

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Национальный исследовательский
Томский государственный университет

**ДВАДЦАТЬ ПЕРВАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
СТУДЕНЧЕСКИХ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ
ИНКУБАТОРОВ**

г. Томск, 13–17 мая 2024 г.

Сборник трудов

УДК 537.86; 621.38.01:53; 681.382.473; 47.14
Д22

Д22 Двадцать первая Всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов. Томск, 13–17 мая 2024 г. : сборник трудов. – Томск : STT, 2024. –134 с.

ISBN 978-5-93629-716-8

Сборник содержит доклады участников Двадцать первой Всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов, проходившей в Томском государственном университете 13–17 мая 2024 года. Цель конференции – обмен результатами фундаментальных и прикладных исследований в области радиофизики, электроники, оптоэлектроники, лазерной техники и лазерных технологий, радиоэлектронных систем и комплексов, включая проектирование и разработку специализированного математического и программного обеспечения, новых приборов и материалов.

Сборник представляет интерес для студентов, аспирантов, молодых ученых, преподавателей в области радиофизики и оптики.

УДК 537.86; 621.38.01:53; 681.382.473; 47.14

Рецензенты:

Коротаев А.Г., канд. физ.-мат. наук, декан РФФ НИ ТГУ;
Торгаев С.Н., доцент, канд. физ.-мат. наук, зав. каф. РФФ НИ ТГУ;
Суханов Д.Я., д-р физ.-мат. наук, профессор РФФ НИ ТГУ;
Шипилов Э.С., д-р физ.-мат. наук, профессор РФФ НИ ТГУ;
Кочеткова Т.Д., доцент, канд. физ.-мат. наук, доцент РФФ НИ ТГУ;
Каширский Д.Е., канд. физ.-мат. наук, доцент РФФ НИ ТГУ.

 **infotecs**

Опубликовано при поддержке компании АО «ИнфоТекС»

ISBN 978-5-93629-716-8



© Авторы, 2024.
© Оформление. STT™, 2024.

РАДИОФИЗИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Прототип многоканальной пассивной РЛС кругового обзора на базе SDR

С.А. Аббас, Р.С. Хаддур, М.А. Щелоков

Научный руководитель: канд. тех. наук И.Ю. Кузьменко

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: samerov92.abbas@gmail.com

Аннотация: Данный доклад содержит материалы о технологии SDR с её применением в области пассивной радиолокации, упрощая и удешевляя разрабатываемое устройство.

Ключевые слова: AD, ADALM-PLUTO, SDR, RF, RFE.

Технология программно-определяемой радиосвязи (SDR – software defined radio) произвела революцию в области измерения характеристик радиосигналов (RF), предложив гибкую, экономичную и достойную альтернативу традиционным системам измерения. SDR – это универсальный подход к построению приемопередающего устройства, которое может быть запрограммировано для выполнения широкого спектра радиотехнических задач.

В этой статье используется технология SDR для упрощения структуры пассивного радара, где использовалось ADALM-PLUTO для приема сигнала, а также в качестве микроконтроллера.

SDR состоит из двух ключевых компонентов: радиointерфейса (RFE – Radio Front End) и цифрового серверного компонента. RFE, содержащий каналы Rx и Tx, управляет усилением, фильтрацией, настройкой и микшированием. Цифровая серверная часть, обычно оснащенная усовершенствованной микросхемой цифровой обработки сигналов (FPGA) для сложных радиочастотных алгоритмов и гибкость, позволяя SDR обслуживать разнообразные задачи при обработке сигнала. SDR превосходит в радиочастотных измерениях благодаря своей универсальности, приспособляемости, возможности модернизации и дешевизне, обеспечивая одновременный анализ спектральной и временной области, простоту обновления протоколов, адаптацию к различным схемам модуляции и снижение затрат за счет интеграции нескольких функций в одном устройстве [1, 2].

ADALM-PLUTO от компании Analog Devices (AD) представляет собой устройство для изучения технологии SDR. Устройство по-

строено на базе чипа AD9363 (рисунок 1), который имеет один канал приема и один канал передачи. Каналы могут работать в полнодуплексном режиме, способны генерировать или измерять радиочастотные аналоговые сигналы в диапазоне от 70 МГц до 6000 МГц при частоте выборки до 61,44 МГц. PlutoSDR является полностью автономным и обладает USB разъемом для подключения к питанию.

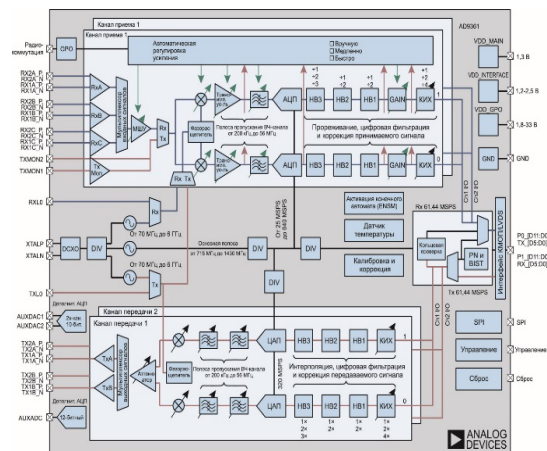


Рис. 1. Схема AD9363

Программируемый РЧ приемопередатчик ADALM-PLUTO может использоваться на устройствах с ОС Windows, Linux и OS X [3].

SDR подключается к ПК через USB-интерфейс, затем передает сигнал через USB-интерфейс на ПК, так что обработка сигнала выполняется на ПК.

Но интерфейс передачи данных существенно ограничивает полосу рабочих частот устройства (пропуск пакетов с данными начинается

при частоте дискретизации более 2 МГц, интерфейс USB).

Чтобы обойти ограничения на возможности использования SDR, Можно запустить пользовательское приложение в операционной системе Linux, работающей в ADALM-PLUTO SDR (без участия ПК), на основе её функции, где PlutoSDR имеет на борту одноядерный процессор ARM Cortex-A9 MPCore, для которого предоставляется дистрибутив Linux. PlutoSDR работает под управлением Linux, пользователи могут писать приложения на C или C++, которые могут быть кросс-скомпилированы на ПК, а затем запущены на PlutoSDR. Устройство включает в себя 4 цифровых пина общего назначения GPO_[0:3], 2 пина ЦАП а также 1 канал АЦП (все элементы представлены на рисунке 2). Указанную выше периферию можно подробнее изучить в приложения [3].



Рис. 2. GPIO PlutoSDR

Для решения задач упреждающего обнаружения объекта, излучающего радиосигналы, применяются различные методы, в том числе пассивная радиолокация. В таком способе обнаружения используется антенная решетка – совокупность нескольких антенн, расположенных в определённом порядке. Построив их диаграммы направленности, можно определить направление откуда пришел сигнал, при условии идентичности характеристик каждой антенны. В исследовательских целях была спроектирована модель из шести широкополосных антенн в программе Компас-3D (рис. 3), которую мы будем применять для создания собственной РЛС.

В традиционном случае пассивный радар состоит из антенной решетки, ВЧ-реле, микроконтроллера, карты сбора данных и компьютера. Микроконтроллер выбирает антенный элемент по команде компьютера, а затем полученный сигнал от антенн передается через карту сбора в компьютер для обработки данных.

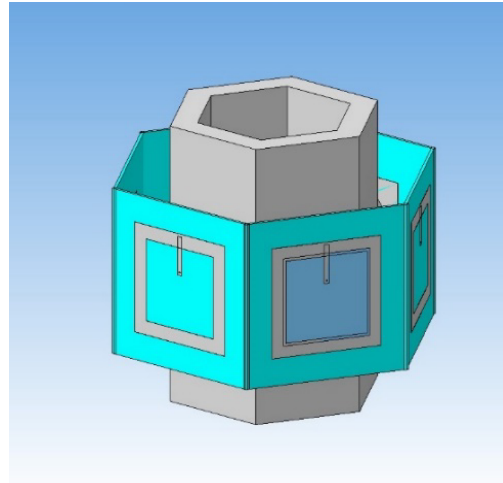


Рис. 3. Модель антенной решетки

Но в зависимости от свойств ADALM PLUTO он может управлять радиореле, собирать сигнал с антенн и выполнять цифровую обработку полученного сигнала, как мы объясним позже. Таким образом, предлагаемая структура РЛС (рис. 4) выглядит следующим образом:

- антенная решетка, состоящая из шести элементов (рабочая частота: 2,4 ГГц (Wi-Fi), 5,6 ГГц (Wi-Fi));
- СВЧ реле на шесть каналов;
- ADALM-PLUTO SDR.

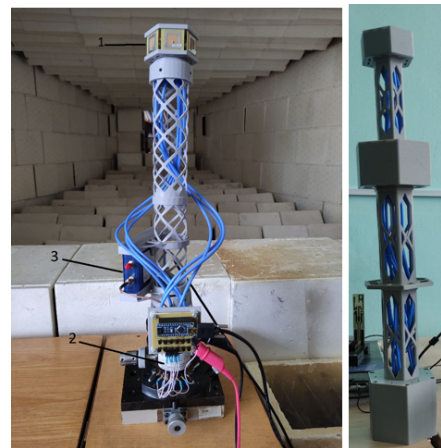


Рис. 4. Пассивная радиолокационная система

Используя предыдущие свойства ADALM PLUTO, была написана программа на C++, работающая в SDR, которая выбирает антенну, посылая управляющий сигнал на радиочастотное реле и затем вычисляя мощность полученного сигнала.

На рисунке 5 показана блок-схема программы на C++, реализованной внутри SDR для вы-

числения мощности принимаемого сигнала и определения направления до источника.

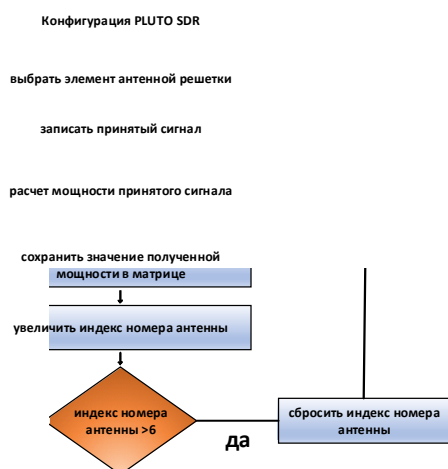


Рис. 5. Схема потока программы на C++

Для проверки предложенного метода мы использовали генератор сигналов с частотой 2,4 ГГц для передачи сигнала, а также вращающуюся на 360 градусов платформу с шагом 1 градус для вращения радара для расчета диаграммы направленности одна из антенн.

На рисунке 6 показана диаграмма излучения одной из использованных антенн основана на измерениях, полученных от ADALM PLUTO SDR с помощью реализованной в нем программы.

SDR технология используется для упрощения структуры пассивной РЛС, позволяет применять ADALM-PLUTO для приема сигнала, а также в качестве микроконтроллера для управления радиочастотным мультиплексором и запуска основной программы.

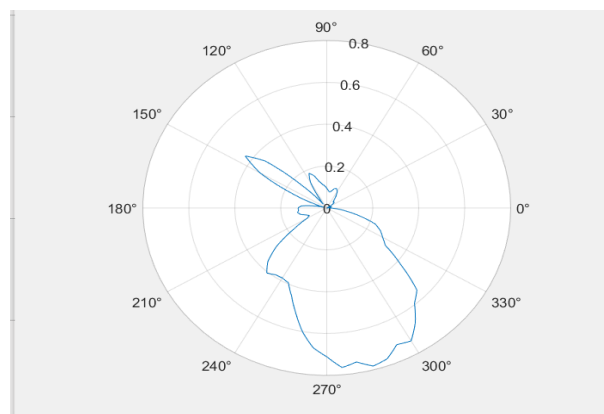


Рис. 6. Диаграмма излучения антенны

В этой статье мы стремимся разработать новый метод использования ADLAM PLUTO не только в качестве устройства для сбора данных, но и для управления другими периферийными устройствами и решения основной задачи обработки сигналов системы.

Список литературы

1. Collins T.F., Getz R., Pu D., Wyglinski A.M. Software-Defined Radio for Engineers. – Norwood : Artech House, 2018. – 352 p.
2. Laufer C. The hobbyist's guide to the RTL-SDR: really cheap software defined radio: a guide to the RTL-SDR and cheap software defined radio. – Scotts Valley : CreateSpace, 2015. – 282 p.
3. ADALM-PLUTO datasheet. – Analog Devices, Inc. – 2 p.

Разработка схемы для фиксации двигательной активности ребенка при диагностике и реабилитации

Т.Л. Болтрукевич

Научный руководитель: А.А. Трубачев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: tlb1@tpu.ru

Аннотация: Представлены результаты разработки принципиальной электрической схемы простейшего электромиографа, как составной части биометрического сенсора для анализа локомоций младенца.

Ключевые слова: электромиография, медицинские изделия, ДЦП, фильтрация биопотенциальных сигналов.

Детский церебральный паралич представляет собой группу стабильных, различных по клиническим проявлениям синдромов, которые возникают в результате аномалии развития головного мозга или его повреждения в перинатальном периоде.

Растёт количество литературы, свидетельствующее о том, что двигательное поведение младенцев предоставляет богатую информацию о развивающейся центральной нервной системе. Атипичные паттерны могут указывать на лежащие в основе нейромоторные патологии, которые отражают или предвещают такие клинические состояния, как детский церебральный паралич. Выявление на самом раннем этапе в младенчестве критически важно для начала клинических вмешательств.

Для анализа локомоций младенца используется схема, включающая в себя акселерометр и гироскоп – для анализа угла поворота конечности и миограф – для фиксации мышечной активности и исключения случайного срабатывания связки акселерометр-гироскоп.

В качестве управляющего микроконтроллера был выбран микроконтроллер STM32F407VG поскольку включает в себя всю необходимую периферию для взаимодействия с датчиками, модуль Floating Point Unit (FPU) для быстрой обработки чисел с плавающей точкой, а также обладает сравнительно высокой производительностью. Для измерения угла поворота была выбрана микросхема MPU6050, в составе которой есть МЭМС-датчики акселерометра и гироскопа.

На данном этапе исследования была разработана принципиальная электрическая схема

электромиографа и системы акселерометров. Был откалиброван выбранный акселерометр.

Простейшая схема электромиографа представляет собой электроды, подключаемые к исследуемому объекту, в данном случае к мышцам рук и ног человека, инструментальный усилитель, систему фильтрации, усиления и регистрирующее устройство. Сигнал, регистрируемый с мышц, обладает частотой полезного сигнала от 0 до 500 Гц. При этом в сигнале присутствует сетевая наводка – 50 Гц, от которой необходимо избавиться, а также помехи, вызванные двигательными артефактами и другими факторами, такими как физиологические шумы тела человека, а также шумы от электродов.

Поскольку сигнал, поступающий с мышц, имеет достаточно малую амплитуду (от десятков микровольт до единиц милливольт), что связано с тем, что миограмма снимается неинвазивным способом и сигнал ослабляется, при прохождении через кожу. Для корректного определения мышечного потенциала при регистрации разности потенциалов используется инструментальный усилитель AD620.

Для фильтрации сигнала используется фильтр нижних частот с частотой среза – 500 Гц и режекторный фильтр с частотой среза – 50 Гц. В качестве фильтра нижних частот было решено использовать фильтр Чебышева второго рода, поскольку у данного типа фильтра наблюдается наиболее резкий спад АЧХ в отличие от других активных фильтров (фильтра Бесселя, Баттерворта), что позволит получить четкую полосу пропускания.

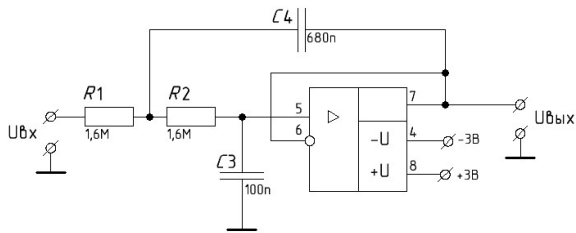


Рис. 1. Схема активного фильтра нижних частот

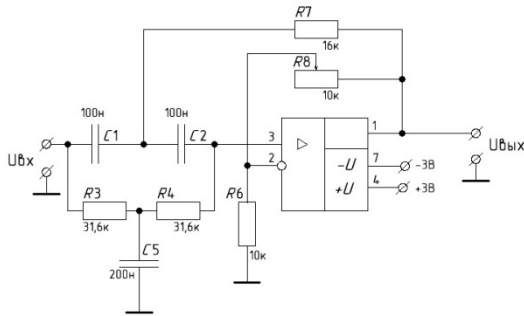


Рис. 2. Схема активного режекторного фильтра

Для проверки работы фильтров в программе Multisim были построены передаточные характеристики, из которых видно, что фильтрация сигнала происходит в соответствии с заданными параметрами.

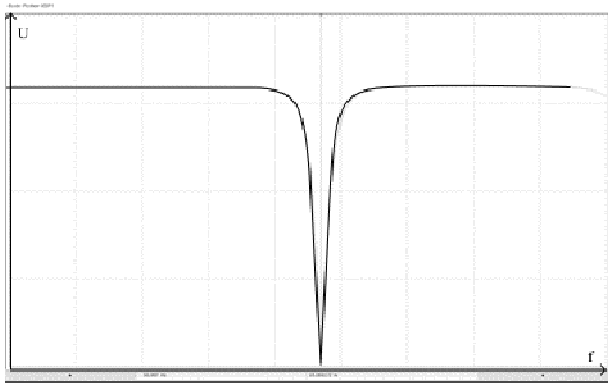


Рис. 3. Передаточная характеристика режекторного фильтра (частота среза – 50 Гц)

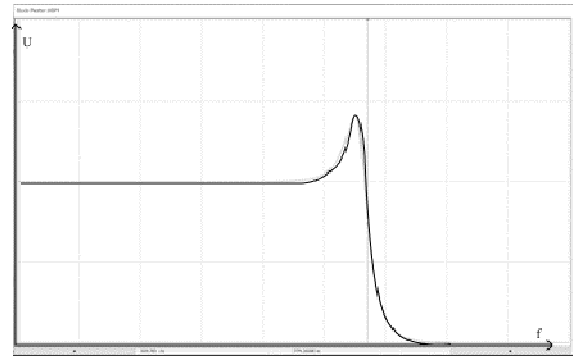


Рис. 4. Передаточная характеристика фильтра нижних частот (частота среза – 500 Гц)

Акселерометр

Для получения корректных данных о положении тела в пространстве необходимо использовать пару датчиков акселерометр-гироскоп. Это связано с тем, что датчик гироскопа при каждом включении прибора определяет нынешнее положение прибора как нулевое и производит отсчет угла некорректно. Акселерометр же позволяет точно определить нулевое положение, но реагирует на влияние внешних сил, что связано с особенностями его работы, а именно определение угла по проекциям силы тяжести на оси x, y, z . На данном этапе была проведена калибровка акселерометра в состоянии покоя при помощи оптического квадранта.

В результате проделанной работы была спроектирована схема электромиографа, собраны схемы активных фильтров: режекторного и ФНЧ, проведена фильтрация сигнала, подтверждающая корректную работу собранных схем, откалиброван датчик акселерометра для проведения дальнейших исследований.

Список литературы

1. Кабанов А. А. Разработка схемы аналоговой фильтрации сигнала электромиографии // Омский научный вестник. – 2018. – №161. – С. 135-138.
2. Novak I., Morgan C., Adde L. et al. Early, Accurate Diagnosis and Early Intervention in Cerebral Palsy Advances in Diagnosis and Treatment // JAMA Pediatrics. – 2017. – Vol. 171, Is. 9. – P. 897-907.
3. Реализация фильтров на операционных усилителях // Основы электроакустики. – URL: http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/op/funop_11_6.htm (дата обращения: 13.03.2024).
4. Активные фильтры // Библиофонд. Электронная библиотека студента. – URL: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=517472#ext> (дата обращения: 13.03.2024).

Разработка фантома для радиотомографии инсультов

В.В. Васин, Е.Н. Мидони

Научные руководители: д-р физ.-мат. наук С.Э. Шипилов; канд. физ.-мат. наук
А.И. Еремеев; А.В. Горст

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: north_vasya@mail.ru

Аннотация: Рассматривается возможность радиоволнового картографирования инсультов с использованием методов радиоволновой томографии на основе сверхширокополосного сигнала. Для проверки такого подхода разработан фантом головного мозга, состоящий из имитации кожи, черепа, серого вещества, инсульта. Проведены эксперименты и построено радиоизображение инсульта

Ключевые слова: радиоволновая томография, имитация тканей мозга, инсульт.

Инсульт – одна из ведущих причин смерти в мире [1]. Первая помощь при инсульте должна быть оказана в течение 4-х часов с момента появления симптомов. Важно быстро отличить инсульт от других болезней, которые способны приводить к развитию аналогичных симптомов. Современные методы диагностики инсульта, такие как магнитно-резонансная томография (МРТ) и компьютерная томография (КТ), требуют времени на подготовку и часто недоступны в экстренных ситуациях. Существует потребность в оперативных методах обнаружения инсультов, которые можно разместить в машине скорой помощи. На решение этой задачи направленно данное исследование.

На кафедре радиофизики НИ ТГУ ведутся исследования по радиоволновой томографии биологических сред [2], результаты которых используются для данной задачи.

Разрабатываемая сверхширокополосная (СШП) радиоволновая установка позволяет провести оперативное сканирование безопасно, что недоступно для МРТ и КТ. Для тестирования такой установки необходимо изготовить фантом с характеристиками, близкими к характеристикам головы человека. Из-за сложности строения головы необходимо учитывать как высокую действительную диэлектрическую проницаемость, так и мнимую диэлектрические проницаемость тканей головы, а также многослойную структуру головы.

В данной работе представлен фантом головы с геморрагическим инсультом. Фантом используется для тестирования установки радиоволнового сканирования головы.

Основными источниками высокой диэлектрической проницаемости является вода и графит. Фантомы, созданные на основе воды, используют муку как связующий элемент. У таких фантомов со временем уменьшается диэлектрическая проницаемость из-за испарения воды [3]. Фантом на основе графита имеет постоянные во времени характеристики [4-5].

Для создания материала замешивался состав из полиуретана, графита и сажи. Графит является источником высокой действительной диэлектрической проницаемости, а сажа – мнимой. Полиуретан используется как связующее вещество. Для повышения текучести полиуретана в состав добавлялся ацетон. Готовый состав помещался в измерительную ячейку для измерения электрофизических характеристик.

Созданы следующие материалы, имитирующие по электрофизическим параметрам ткани головного мозга в диапазоне частот 0,5–3 ГГц: кожа, череп, серое вещество, и геморрагический инсульт. Т. к. геморрагический инсульт возникает из разрыва сосуда в голове, что приводит к кровотечению, то область с геморрагическим инсультом в фантоме считается как область с кровью. Имитацией такой области является шарик диаметром 3 см, заполненный раствором натрия хлорид 0,9%.

Получены материалы, имитирующие ткани мозга. Для измерения таких материалов использовалась специально разработанная измерительная ячейка на кафедре радиофизики. Полученные электрофизические параметры сравнивались с эталонными значениями для тканей головы [6]. Электрофизические параметры по-

лученных материалов представлены на рисунках 1-2.

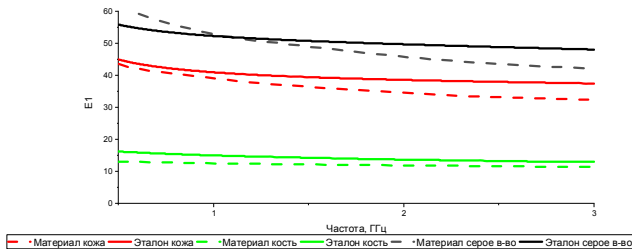


Рис. 1. Действительная часть диэлектрической проницаемости тканей головы и имитирующих их материалов

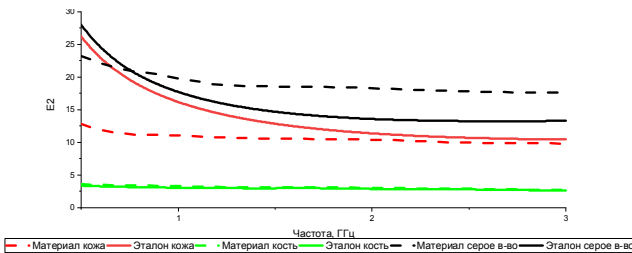


Рис. 2. Мнимая часть диэлектрической проницаемости тканей головы и имитирующих их материалов

На основе представленных материалов создан фантом головы с инсультом.

Установка для сканирования представлена на рисунке 3.

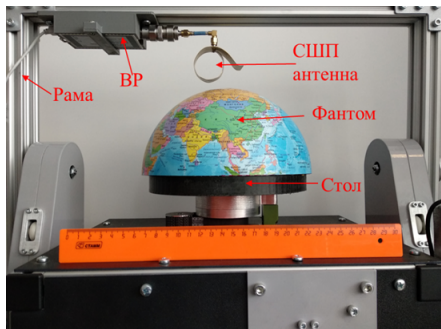


Рис. 3. Полусферический радиоволновой томограф

В дальнейшем будет создан антропоморфный фантом. Антропоморфный фантом будет использоваться при проверке первого образца устройства для оперативного обнаружения инсультов головы с помощью радиоволновой томографии.

Список литературы

1. Feigin V.L., Brainin M., Norrving B. et al. World Stroke Organization (WSO): Global Stroke Fact Sheet 2022 // International Journal of Stroke. – 2022. – Vol. 17, Is. 1. – P. 18-29.
4. Ereemeev A.I., Vasin V.V., Satarov R.N. et al. Application of the migration method for radiotomography of breast cancer // J. Phys. Conf. Ser. – 2021. – Vol. 2140. – 012027.
5. Mobashsher A.T., Abbosh A.M. Three-dimensional human head phantom with realistic electrical properties and anatomy // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters – 2014. – Vol. 13. – P. 1401–1404.
6. Mohammed B., Bialkowski K., Hill S., Stancombe A.E. et al. stable and lifelong head phantoms using polymer composition mimicking materials to test electromagnetic medical imaging systems // IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology. – 2021. – Vol. 5, № 4. – P. 322-328.
7. Pokorny T., Vrba D., Tesarik J. et al. Anatomically and dielectrically realistic 2.5d 5-layer reconfigurable head phantom for testing microwave stroke detection and classification // International Journal of Antennas and Propagation. – 2019. – Vol. 2019. – P. 1–7.
8. Calculation of the dielectric properties of body tissues in the frequency range 10 Hz–100 GHz [Electronic resource]. – URL: <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.php> (дата обращения 10.02.2024).

Автоматизированный шнековый экструдер для производства композиционных филаментов для 3D печати

И.А. Вертопрахов, А.Н. Елясов

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук Г.Е. Кулешов

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: vbrhsx@gmail.com

Аннотация: В данной работе представлены принцип работы, конструкционные особенности и схема автоматического управления шнекового экструдера.

Ключевые слова: экструдер, филамент, конструкция, двигатель, 3D-печать, блок управления.

Сегодня возрастает число радиоэлектронных устройств, работающих в СВЧ и КВЧ диапазонах [1, 2]. Появляется необходимость обеспечения требований электромагнитной совместимости и экологии для снижения влияния повышенного электромагнитного фона [3]. Для этого используются различные радиоматериалы [4]. Их используют при изготовлении корпусов радиоэлектронных приборов, защитных экранов и покрытий, снижающих электромагнитное излучение. В последнее время появляется все больше работ, в которых вышеперечисленные материалы используются для изготовления композиционных филаментов для 3D печати [5]. Для формирования композиционных нитей необходимо специальное оборудование, например, шнековый экструдер.

Целью данной работы является разработка автоматизированного экструдера для применения в сфере производства композиционных филаментов аддитивной технологией.

Ручной экструдер обладает ручной подачей гранул композиционного материала, а также и сам процесс экструдирования происходит вручную. Из-за этого готовый филамент достаточно неоднородный и обладает большой пористостью, что сказывается на конечном качестве напечатанных образцов для исследований.

Учитывая выше сказанные недостатки, при работе с ручным экструдером, была разработана конструкция автоматизированного экструдера, изображенного на рисунке 1, где 1 – блок управления; 2 – электродвигатель с редуктором; 3 – бункер для загрузки композиционного материала; 4 – шнек; 5 – соединительный фланец с термоизоляционной прокладкой; 6 – круговой нагревательный элемент; 7 – головка с фильрой; 8 – экструдат.

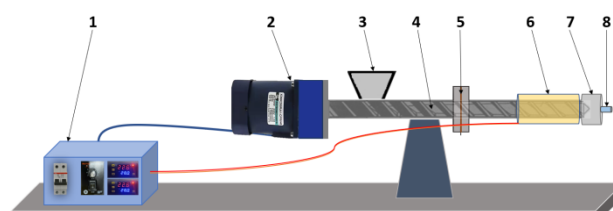


Рис. 1. Схема автоматизированного экструдера

Принцип работы установки, следующий: при помощи блока управления включается питание всей установки, выставляется температура нагревательного элемента и обороты электродвигателя; измельченный композиционный материал помещается в бункер; при помощи шнека он проходит по трубе к головке; за счет нагрева композиционный материал размягчается; через фильру выходит готовый экструдат (филамент).

Блок управления (БУ) является основным регулирующим органом в конструкции автоматизированного экструдера. С его помощью осуществляется контроль и регулировка температуры нагревательного элемента, питание электродвигателя и регулировка его оборотов, защита схемы от перегрузки, а также предусмотрена защита от утечек тока. БУ состоит из следующих компонентов: устройство защитного отключения (УЗО); автомат защиты электродвигателя; регулятор оборотов электродвигателя; температурный регулятор с датчиком (термопара типа К).

Схема устройства блока управления представлена на рисунке 2.

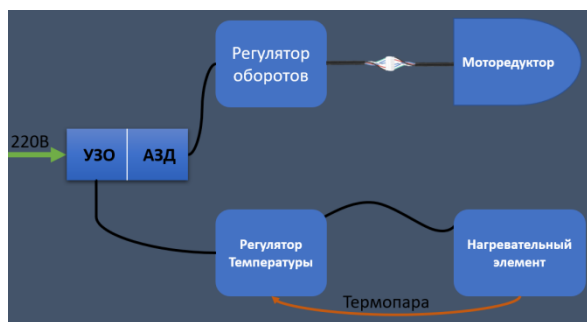


Рис. 2. Схема устройства блока управления

Так как экструдер питается от бытовой электросети с напряжением 220 В, в устройстве блока управления предусмотрена защита от утечки тока при помощи УЗО или устройства дифференциального тока. Контактное коммутационное устройство предназначено для того, чтобы включать, проводить и отключать электрические токи при нормальных условиях эксплуатации и размыкать контакты, когда дифференциальный ток достигает заданного значения при установленных условиях.

Для защиты электродвигателя от выхода из строя, вследствие возникновения чрезмерной нагрузки (например, при попадании в шнековый механизм инородных металлических частей) в схему включен защитный автомат. Автомат защиты двигателя (АЗД) – это устройство, которое автоматически отключает электродвигатель от сети при коротком замыкании и перегрузках.

Таблица 1. Технические характеристики температурного датчика

Характеристика	Величина
Температурный диапазон эксплуатации	-60 °С – 500 °С
Точность измерения температуры	1 °С
Точность настройки температуры	0,1 °С
Частота обновления данных	0,5 с
Питающие напряжение	220 В
Измерительный датчик	Термопара тип К

Для отслеживания текущей температуры (район трубы, в котором размещен кольцевой нагреватель), установки температурного режима в БУ присутствует температурный регулятор с датчиком температуры. Его технические характеристики приведены в таблице 1.

Моторредуктор должен иметь мощность около 200 Вт, а также обладать крутящим моментом не менее 90 кг/см.

В качестве моторредуктора, с учетом вышеперечисленных требований, был выбран готовый вариант (заводское исполнение), мощностью 200 Вт, при этом червячный редуктор выдает момент равный 163 кг/см.

Результатом работы стал сконструированный автоматизированный экструдер, который будет применяться для изготовления различных композиционных филаментов.

Список литературы

1. Wang R., Ren X.-G., Yan Z., Jiang L.-J., Sha Wei, Shan G.-C. Graphene based functional devices: A short review // *Frontiers of Physics*. – 2019. – Vol. 14, Is. 1. – P. 13603.
2. Armstrong C. M., Kowalczyk R., Zubyk A. et al. Compact extremely high frequency MPM power amplifier // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2018. – Vol. 65, Is. 6. – P. 2183–2188.
3. Mathur P., Raman S. Electromagnetic Interference: Measurement and Reduction Techniques // *Journal of Electronic Materials*. 2020. – Vol. 49, Is. 5. – P. 2975-2998.
4. Zahid M., Siddique S., Anum R., Shakir M. F., Nawab Y. and Rehan Z. A. M-type barium hexaferrite-based nanocomposites for shielding application // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 2021. Vol. 34, Is. 4. – P. 1019-1045.
5. Kuleshov G.E., Badin A.V., Gering M.O. Electromagnetic properties of composite materials based on ABS plastic with carbon nanotubes obtained by the additive technology in the SHF and EHF bands // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 731, Is. 1. – P. 012014.

Моделирование эффективности сбора заряда и отношения сигнал/шум сенсоров рентгеновского излучения на основе арсенида галлия, компенсированного хромом

М.С. Голубев

Научный руководитель: А.В. Тяжев

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: golubev21.21@mail.ru

Аннотация: В работе представлены результаты расчета эффективности сбора заряда и отношения сигнал/шум сенсоров на основе арсенида галлия, компенсированного хромом (HR GaAs:Cr). Расчетным путем установлено, что основными видами шумов, снижающих энергетическое разрешение HR GaAs:Cr сенсоров, являются дробовой и генерационно-рекомбинационные шумы. Показано, что с уменьшением площади сенсора вклад этих шумов в общий шум снижается и определяющим становится шум электронного тракта.

Ключевые слова: арсенид галлия, сенсоры рентгеновского излучения, эффективность сбора заряда, отношение сигнал к шуму.

Анализ научно-технической литературы [1-3] показывает, что сенсоры ионизирующего излучения на основе арсенида галлия, компенсированных хромом (HR GaAs:Cr), могут быть использованы для создания мультиспектральных многоэлементных детекторов рентгеновского излучения с энергетическим разрешением на уровне 3-4 кэВ в диапазоне энергий от 10 до 60 кэВ, работающих при комнатной температуре. Подобные детекторы перспективны для использования в составе современных рентгеновских систем промышленного, медицинского и специального назначения.

Многоэлементные HR GaAs:Cr сенсоры рентгеновского излучения изготавливаются по технологии интегральных микросхем с использованием HR GaAs:Cr пластин диаметром 76, 100 мм и толщиной на уровне 500 мкм.

HR GaAs:Cr пластины производятся путем компенсации проводимости пластин арсенида галлия n-типа (n-GaAs), легированных мелкой донорной примесью, атомами хрома (Cr) в процессе высокотемпературного отжига.

Весь технологический цикл изготовления многоэлементных HR GaAs:Cr сенсоров, начиная с контроля электрофизических характеристик пластин n-GaAs, компенсации пластин n-GaAs атомами хрома и заканчивая формированием топологии и контролем эффективности сбора заряда HR GaAs:Cr сенсорами, реализован в Центре «Перспективные технологии в

микроэлектронике» Томского государственного университета.

Важным параметром, определяющим целесообразность использования сенсоров для регистрации и визуализации рентгеновского излучения, являются эффективность сбора заряда величина и отношение сигнала к шуму.

Расчет эффективности сбора заряда ($CCE(x)$) проводился с использованием выражений:

$$CCE(x) = \frac{1}{d} \cdot \left[L_n \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{d-x}{L_n}\right) \right) + L_p \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right) \right) \right] \quad (1)$$

$$L_n = V_n^{drift} \cdot \tau_n = \mu_n \cdot \tau_n \cdot \frac{U}{d} \quad (2)$$

$$L_p = V_p^{drift} \cdot \tau_p = \mu_p \cdot \tau_p \cdot \frac{U}{d}, \quad (3)$$

где L_n , L_p , μ_n , μ_p , τ_n , τ_p – дрейфовые длины, подвижность и время жизни электронов и дырок, соответственно; U , d – напряжение на сенсоре и толщина чувствительного слоя сенсора, соответственно.

Согласно [4], среднеквадратичное отклонение собранного заряда (σ_{Σ}^2) в случае независимости компонент шума имеет вид:

$$\sigma_{\Sigma}^2(x) = \sigma_{st}^2 + \sigma_{el}^2 + \sigma_{col}^2(x) \quad (4)$$

$$\sigma_{st} = \sqrt{F \cdot E_i \cdot E_{\gamma 0}} \quad (5)$$

$$\sigma_{col}(x) = \sqrt{E_\gamma \cdot E_i \cdot CCE(x) \cdot (1 - CCE(x))}, \quad (6)$$

где σ_{st} – флуктуация образования электронно-дырочных пар, F – фактор Фано ($F = 0.12$ для GaAs), σ_{el} – шумы электронного тракта (1 кэВ), $\sigma_{col}(x)$ – флуктуации, обусловленные неполным сбором заряда в зависимости от точки генерации; E_γ – энергия кванта, поглощенного в HR GaAs:Cr сенсоре; E_i – энергия образования электронно-дырочной пары в полупроводниковом сенсоре ($E_i \approx 4.2$ эВ в GaAs); e – заряд электрона.

Расчет отношения сигнал/шум (SNratio), при генерации пакета носителей заряда в области катода сенсора ($x=0$), выполнялся с использованием выражения:

$$SNratio = \frac{e \cdot E_\gamma}{E_i} \cdot \frac{CCE(0)}{\sigma_{sum}^2(0)} \quad (7)$$

Результаты расчета зависимости эффективности сбора заряда и отношения сигнал/шум (SNratio) от напряжения для HR GaAs:Cr сенсоров с площадью 3×3 мм² и $0,1 \times 0,1$ мм² приведены в таблице 1 и таблице 2, соответственно.

Таблица 1. Площадь сенсора 3×3 мм²

Толщина сенсора d , мкм	Максимальное значение SNratio	Максимальное значение эффективности сбора заряда	Напряженность электрического поля, кВ/см
100	9.7	0.91	0.7
250	12.3	0.88	1.2
500	12.9	0.79	1.3
1000	11.8	0.71	1.8

Анализ результатов расчета (таблицы 1, 2), позволяет сделать выводы:

- максимальная величина отношения сигнал/шум для сенсоров с площадью 0.1×0.1 мм² превышает аналогичный параметр для сенсоров с площадью 3×3 мм² и составляет 26 и 13 для сенсоров с площадью 0.1×0.1 мм² и 3×3 мм², соответственно;

- при прочих равных условиях наблюдается уменьшение величины отношения сигнал/шум с ростом толщины сенсора.

Таблица 2. Площадь сенсора 0.1×0.1 мм²

Толщина сенсора d , мкм	Максимальное значение SNratio	Максимальное значение эффективности сбора заряда	Напряженность электрического поля, кВ/см
150	26	0.96	3.9
300	25	0.92	4.3
500	24	0.87	4.5

Исследования выполнены при поддержке:

- 1) гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение № 075–15–2022–1132 от 01.07.2022 г.) в части изготовления HR GaAs:Cr сенсоров;
- 2) в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2022-0018 в части моделирования эффективности сбора заряда и величины отношения сигнал/шум в HR GaAs:Cr детекторах.

Список литературы

1. Silva F. A. Energy Efficient Computing and Electronics: Devices to Systems [Book News] // IEEE Industrial Electronics Magazine. – Vol. 14, No. 1. – P. 100-101.
2. Chsherbakov I., Lozinskaya A. D., Mihaylov T. et al. Electron mobility-lifetime and resistivity mapping of GaAs:Cr wafers // Journal of Instrumentation : electronic journal. – 2017. – Vol. 12, No. 2. – P. C02016 (1-8).
3. Hamann E. Characterization of high resistivity GaAs as sensor material for photon counting semiconductor pixel detectors: PhD Thesis. – 2013. – 232 p.
4. Tyazhev A.V., Novikov V.A., Koretskaya O.B. et al. GaAs radiation imaging detectors for nondestructive testing, medical, and biological applications // Proc. SPIE. – 2005. – Vol. 5922. – 59220Q.

Исследование свойств наночастиц магнетита синтезированного методом химического соосаждения

Р.Д. Капитанов

Научный руководитель: канд. тех. наук Д.В. Вагнер

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: kapitanov5263@gmail.com

Аннотация: синтезированы наночастицы магнетита методом химического соосаждения при различной атмосфере. Исследован фазовый состав, структурные и магнитные свойства материалов для оценки качества проведённого синтеза и определена зависимость данных свойств магнетита от инертной атмосферы.

Ключевые слова: ферриты, химическое соосаждение, намагниченность насыщения, инертная атмосфера.

Наноразмерные частицы магнетита (Fe_3O_4) находят применение в устройствах электротехнике, в биомедицинских приложениях и при изготовлении систем каталитической нейтрализации отработавших газов. Эффективное использование наночастиц Fe_3O_4 требует тщательного контроля их свойств, которые зависят от условий синтеза материала. В работе поставлена цель синтезировать наночастицы Fe_3O_4 методом химического соосаждения при различных атмосферных условиях и исследовать их фазовые, структурные и магнитные свойства.

Синтез наночастиц Fe_3O_4 проводили в атмосфере воздуха (образец №1) и в атмосфере аргона (образец №2) методом химического соосаждения. Условия и этапы синтеза подробно описаны в работе [1]. Для предотвращения агломерации частиц в реакционную смесь добавляли лимонную кислоту. Рентгенофазовый анализ материалов показал, что атмосфера синтеза не повлияла на фазовый состав и размер кристаллитов магнетита. Оба образца не содержали примесей, а средний размер кристаллитов порошков Fe_3O_4 , вычисленный по формуле Шеррера, составил 50 нм.

При помощи импульсного магнитометра [2] исследованы основные магнитные свойства наночастиц Fe_3O_4 (табл. 1).

Таблица 1. Магнитные характеристики исследуемых наночастиц Fe_3O_4

Образец	σ_s , Гс·см ³ /Г	H_c , Э	σ_r , Гс·см ³ /Г
№ 1	54	45	1,9
№ 2	66	25	1,3

Значение удельной намагниченности насыщения (σ_s) для образца № 1 значительно ниже, чем у образца № 2. Это связано с окислением наночастиц магнетита при реализации синтеза в атмосфере воздуха, что приводит к увеличению объема дефектного поверхностного слоя частиц, который проявляет слабые магнитные свойства. Также поверхностный слой оказывает влияние на увеличение значения коэрцитивной силы (H_c) магнетита, синтезированного в отсутствие инертной атмосферы (образец №1).

В результате проведенных исследований показано, что атмосфера синтеза влияет на магнитные свойства наноразмерных частиц ферритов. Для улучшения магнитных свойств необходимо проводить синтез в инертных атмосферах, что позволит избежать окисления наноразмерных структур.

Благодарности

Исследование проводилось на оборудовании ЦКП «Центр радиоизмерений ТГУ». Автор выражает благодарность Мухортовой Ю.Р. (ТПУ) за помощь в проведении синтеза.

Список литературы

1. Mohammed A.D., Azlan A. A., Mahmood S.J., Osama A. N., Pegah M. K., Baharak M. Simple rapid stabilization method through citric acid modification for magnetite nanoparticles // Scientific reports nature research. – 2020. – Vol. 10, Is. 1. – P. 1–8.
2. Wagner D.V., Kareva K.V., Zhuravlev V.A., Dotenko O.A., Minin R.V. Investigation of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$

hexaferrites manufactured by various synthesis methods using a developed pulsed magnetometer //

Inventions. – 2023. – Vol. 26, Is. 8. – P. 1–14.

Разрушение когерентности в системе связанных автогенераторов с хаотической динамикой

В.С. Костерова

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, доцент С.С. Новиков

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: vsk727@yandex.ru

Аннотация: В докладе рассмотрена система связанных автогенераторов, в которой режим динамического хаоса существует за счет разрушения когерентности. Описаны условия для перехода системы в режим динамического хаоса. Показано, что спектр шумовых колебаний занимает полосу порядка несколько октав; при неравномерности 5-7 дБ ширина спектра достигает октавы. Исследования выполнены в формате численного эксперимента для схем с транзисторными автогенераторами.

Ключевые слова: резонансная связь разрушение когерентности, неустойчивость, динамический хаос.

Известно, что хаотическая динамика возникает в динамических системах с не менее 1,5 степенями свободы [1]. При этом обязательным условием является неустойчивость, как статических состояний, так и периодических колебательных движений. Существует большое число электрических схем позволяющих разрушать когерентные колебания [2, 3]. Отличительным признаком таких систем является способ схемной реализации неустойчивости возможных детерминированных (упорядоченных) колебательных движений.

Исследование хаотической динамики систем связанных автогенераторов представляет практический интерес. Такие системы обладают новыми возможностями управления параметрами хаотических колебаний, в частности, такими как статистические характеристики шумового сигнала, полоса частот, выходная мощность, стабильность и т.д. [2, 4]. В настоящем сообщении рассмотрена система двух генераторов связанных посредством резонансной связи в виде последовательного колебательного контура. Такая система имеет три степени свободы. Создание источников генерирующих хаотические колебания с большим числом степеней свободы позволит расширить полосу частот, а так же расширить возможности управления системой.

В докладе рассмотрены условия разрушения когерентности для системы двух связанных автогенераторов с резонансной связью. Для проведения численных исследований была выбрана программа схемотехнического проектирования NI Multisim. С помощью виртуальных приборов исследованы осциллограммы и спектро-

граммы колебаний при переходе от когерентных режимов к режиму развитого хаоса.

На рисунке 1 показана схема системы двух связанных транзисторных автогенераторов, собранных по схеме ёмкостной трёхточки. Цепь связи состоит из последовательных резонансных L, C, r -цепей и общей нагрузки R_H . Генераторы и цепь связи настроены на одну частоту – 550 кГц. Как было сказано ранее, данная система имеет три степени свободы. Особенность системы заключается в наличии трех базовых типов колебаний – мод.

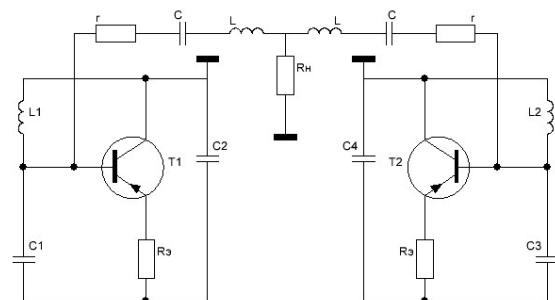


Рис. 1. Система двух взаимосвязанных автогенераторов с резонансной связью

К базовым (собственным) типам колебаний относятся одна синфазная мода и две противофазных с различной частотой. Для разрушения когерентности в системе двух связанных автогенераторов необходимо реализовать неустойчивость всех трёх типов колебаний. Это возможно при выполнении двух условий.

Первое условие связано с потерей устойчивости для синфазной моды и имеет вид критерия [5]:

$$C_{12} = \frac{L}{r^2} > C_{кк}, \quad (1)$$

Параметр C_{12} определяет крутизну мнимой части проводимости y_{12} при резонансной настройке четырехполосника связи на частоту синфазной моды ω_0 , L , r – значения индуктивности и сопротивления омических потерь, $C_{кк}$ – эквивалентная емкость резонансных систем автогенераторов. Согласно приведённому условию, чем больше величина C_{12} , тем быстрее происходит разрушение синфазного режима. Глубиной неравенства (1) можно управлять, регулируя значения одного или же сразу обоих – L и r параметров.

Второе условие позволяет реализовать неустойчивость противофазных типов колебаний. Так как при большой отрицательной связи транзистор работает в перенапряженном режиме, колебательная характеристика увеличивает отрицательный угол наклона. Это приводит к неустойчивости периодических процессов. Управление колебательной характеристикой активного элемента производится с помощью отрицательной обратной связи по току, т.е. с помощью введения резистора в цепь эмиттера. Переход к хаотическому режиму работы сопровождается бифуркациями удвоения периода.

При выполнении, описанных выше условий, существование собственных типов колебаний в системе связанных автогенераторов становится невозможным. В итоге, система находит решение в виде возникновения хаотической динамики. На рисунке 2 показан сектор в режиме динамического хаоса. Как видно, шумовая полоса простирается в пределах 220-2200 кГц.

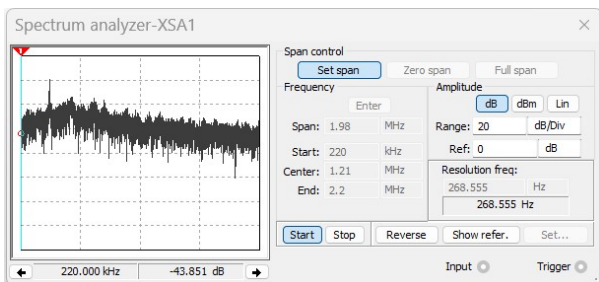


Рис. 2. Спектр колебаний в режиме развитого хаоса

Таким образом, в докладе приведены исследования системы двух связанных автогенераторов. Описаны условия разрушения когерентности и перехода системы в режим динамического хаоса. Проведенное моделирование демонстрирует их эффективность для управления коге-

рентными и некогерентными режимами системы связанных автогенераторов, каждый из которых в автономном режиме генерирует стабильные одночастотные колебания. Выполнение каждого из описанных условий существенным образом влияет на степень разрушения когерентности. Подбор значений индуктивности и сопротивления цепи связи, в соответствии с выражением (1), позволяет разрушить синфазный режим. Скорость (интенсивность) разрушения будет зависеть от заданных L и r величин. Увеличение отрицательной обратной связи с помощью сопротивления в цепи эмиттера, позволит разрушить противофазный режим. Регулировка параметров осуществляется методом подбора из общих соображений в соответствии с допустимыми значениями.

В режиме развитого динамического хаоса система демонстрирует хаотические колебания с достаточно плотным шумовым спектром в широком диапазоне частот превышающим октаву. Система связанных автогенераторов проста в управлении при переключении между периодическими (и близкими к ним) режимами и режимом динамического хаоса. Используя данную модель, можно создать широкополосные источники хаотических колебаний, в том числе состоящие из $N+1$ -числа генераторов.

Список литературы

1. Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е. Регулярные и хаотические автоколебания. Синхронизация и влияние флуктуаций: учебник-монография. – Долгопрудный: Интеллект, 2009. – 312 с.
9. Максимов Н.А., Панас А.И. Энергоэффективный генератор микроволнового хаоса // Успехи современной радиоэлектроники. – 2013. – № 3. – С. 079-083.
10. Semenov A. The additive white Gaussian noise impact on the deterministic chaos oscillator based on a field-effect transistor structure with negative resistance // International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo). – 2016. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/UkrMiCo.2016.7739614.
11. Дмитриев А.С., Панас А.И., Ефремова Е.В., Максимов Н.А. Генерация хаоса / под общ. ред. А.С. Дмитриева. – М. : Техносфера, 2012. – 424 с.
12. Костерова В. С., Новиков С. С. Верификация условий перехода системы связанных автогенераторов в режим динамического хаоса // Техника радиосвязи. – 2022. – Выпуск 4 (55). – С. 108–117.

Моделирование распределения электрофизических параметров по пластине арсенида галлия, компенсированного хромом

К.М. Косухин

Научный руководитель: А.В. Тяжев

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: kostya.kosukhin@bk.ru

Аннотация: В работе представлены результаты расчета и экспериментальных исследований распределения удельного сопротивления и времени жизни носителей заряда в пластинах арсенида галлия, компенсированного хромом (HR GaAs:Cr), полученных путем высокотемпературной диффузии хрома в пластины арсенида галлия электронного типа проводимости (n-GaAs). Продемонстрировано, что неоднородность распределения удельного сопротивления и времени жизни носителей заряда определяется, в частности, неоднородностью распределения донорной примеси в пластинах n-GaAs.

Ключевые слова: арсенид галлия, сенсоры рентгеновского излучения, удельное сопротивление, время жизни носителей заряда.

В ряде публикаций [1–4] показано, что сенсоры ионизирующего излучения на основе арсенида галлия, компенсированных хромом (HR GaAs:Cr), обладают высокой чувствительностью к рентгеновскому излучению в диапазоне энергий рентгеновских квантов от 10 до 60 кэВ и могут быть использованы для создания мультиспектральных многоэлементных детекторов рентгеновского излучения для современных рентгеновских систем промышленного, медицинского и специального назначения.

Многоэлементные HR GaAs:Cr сенсоры рентгеновского излучения изготавливаются по технологии интегральных микросхем с использованием HR GaAs:Cr пластин диаметром 76, 100 мм и толщиной на уровне 500 мкм.

HR GaAs:Cr пластины производятся путем компенсации проводимости пластин арсенида галлия n-типа (n-GaAs), легированных мелкой донорной примесью, атомами хрома (Cr) в процессе высокотемпературного отжига.

Весь технологический цикл изготовления многоэлементных HR GaAs:Cr сенсоров, начиная с контроля электрофизических характеристик пластин n-GaAs, компенсации пластин n-GaAs атомами хрома и заканчивая формированием топологии и контролем эффективности сбора заряда HR GaAs:Cr сенсорами, реализован в Центре «Перспективные технологии в микроэлектронике» Томского государственного университета.

Известно, что в кристаллах n-GaAs, выращенных методом Чохральского, наблюдается

неоднородное распределение легирующей донорной примеси как по диаметру, так и по длине кристалла. Более того, распределение донорной примеси и соответствующее распределение концентрации носителей заряда (электронов) имеют выраженную кристаллографическую ориентацию, в частности для пластин n-GaAs с ориентацией (100): вдоль базового среза W-образный вид, перпендикулярно базовому срезу U-образный вид распределения (рис. 1).

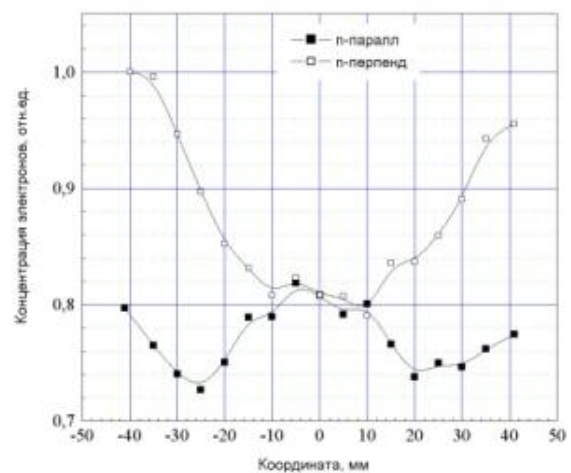


Рис. 1. Распределение легирующей донорной примеси в пластинах n-GaAs

Анализ результатов экспериментальных исследований распределения удельного сопротивления в HR GaAs:Cr пластинах, выполненных ранее с использованием установки бесконтакт-

ного измерения удельного сопротивления COREMA WT, показывает наличие корреляции между распределением донорной примеси в пластинах n-GaAs и удельного сопротивления в соответствующих пластинах HR GaAs:Cr [1].

Для более глубокого понимания зависимости распределения удельного сопротивления в пластинах HR GaAs:Cr от распределения легирующей примеси в соответствующих пластинах n-GaAs, а также для выбора системы примесных уровней, позволяющей оценивать и прогнозировать характеристики HR GaAs:Cr материала и сенсоров на его основе, была разработана модель и выполнены расчеты распределения удельного сопротивления (ρ) и времени жизни неравновесных электронов τ_n и дырок τ_p по площади HR GaAs:Cr пластин.

Результаты расчета и измерения распределения удельного сопротивления в пластине HR GaAs:Cr представлены на рисунке 2.

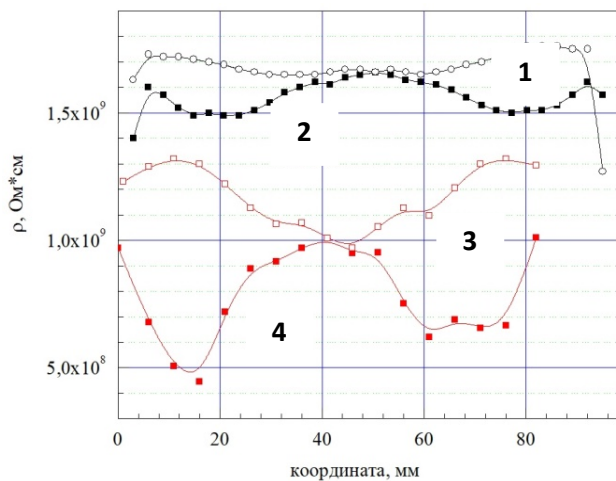


Рис. 2. Расчетные (3, 4) и экспериментальные (1,2) распределения величины удельного сопротивления в пластинах HR GaAs:Cr: 1, 2 – эксперимент, распределение по диаметру перпендикулярно и параллельно базовому срезу, соответственно; 3, 4 – расчет, распределение по диаметру перпендикулярно и параллельно базовому срезу, соответственно

В качестве входных параметров модели использовались экспериментальные данные:

- распределение донорной примеси по площади пластин n-GaAs;
- концентрация атомов хрома в HR GaAs:Cr $1.0 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ [5];
- концентрация EL2 центров (глубокие ловушки электронов) в HR GaAs:Cr в диапазоне $(1-10) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$;

- глубина энергетических уровней термоакцепторов (вакансии мышьяка и галлия) в HR GaAs:Cr материале 0.5 эВ [6].

Концентрация термоакцепторов определялась путем подгонки расчетной величины ρ в центре пластины к соответствующим экспериментальным результатам.

Расчет выполнялся на основе решения уравнения электронейтральности в каждой точке пластины, соответствующей экспериментальным данным по распределению донорной примеси в пластинах n-GaAs. Анализ данных, приведенных на рисунке 2, позволяет утверждать о наличии качественного и количественного соответствия расчетных и экспериментальных данных, что подтверждает правильность предложенной модели и методики расчета.

Дополнительная верификация моделирования проводилась путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных по распределению стационарной фотопроводимости в пластинах HR GaAs:Cr при воздействии инфракрасного (ИК) излучения с длиной волны в диапазоне 900 – 1000 нм.

Известно, что стационарная фотопроводимость ($\Delta\sigma$) линейно зависит от времени жизни неравновесных носителей заряда и определяется выражением:

$$\Delta\sigma = e\beta k(\tau_n\mu_n + \tau_p\mu_p) \frac{Flux}{h\nu}, \quad (1)$$

где β , k , $\tau_n\mu_n$, $\tau_p\mu_p$, Flux – квантовая эффективность ($\beta \approx 1$) для ИК излучения с длиной волны 900-1000 нм, коэффициент поглощения, произведение времени жизни на подвижность для электронов и дырок, интенсивность ИК излучения, соответственно.

Следовательно, при прочих равных условиях, при воздействии ИК излучения с длиной волны в диапазоне 900 – 1000 нм распределение $\Delta\sigma$ по пластине LEC HR GaAs:Cr определяется распределением τ_n , т.к. имеет место неравенство $\tau_n \gg \tau_p$. Расчетные и экспериментальные результаты представлены на рисунках 3, 4.

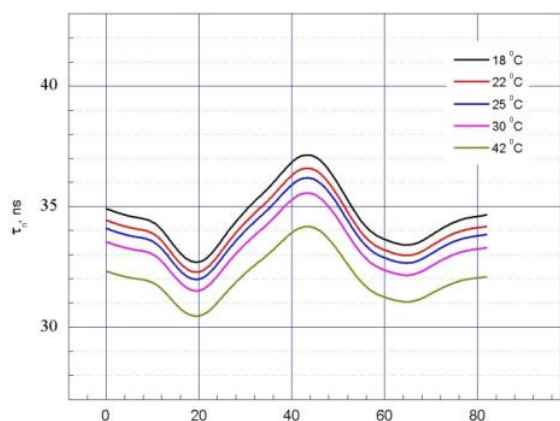


Рис. 3. Расчетные зависимости распределения стационарной фотопроводимости в пластинах HR GaAs:Cr от температуры

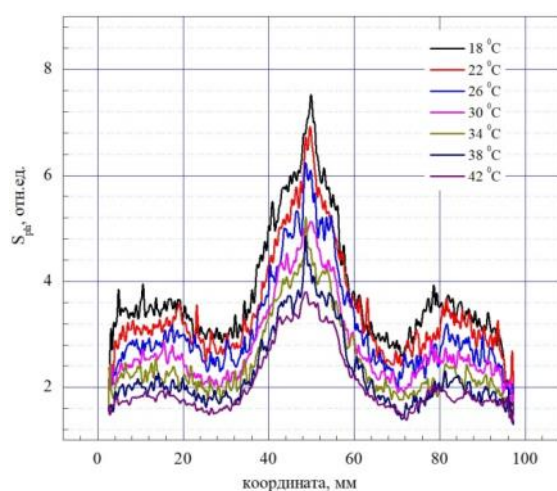


Рис. 4. Экспериментальные зависимости распределения стационарной фотопроводимости в пластинах HR GaAs:Cr от температуры

Анализ данных, представленных на рисунках 1-4, позволяет сделать выводы:

- использование четырехуровневой модели, включающей глубокие и мелкие акцепторы и доноры, позволяет качественно и количественно оценивать и прогнозировать характеристики HR GaAs:Cr материала и сенсоров на его основе;
- наилучшее качественное и количественное совпадение расчетных и экспериментальных величин времени жизни неравновесных носителей заряда, холловской подвижности и удельного сопротивления HR GaAs:Cr материала достигается при использовании концентрации EL2 центров в диапазоне $(1-3) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, концен-

трации Cr равной $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, концентрации термоакцепторов в диапазоне $(1-4) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$;

- время жизни неравновесных электронов и дырок определяется концентрацией ионизированных EL2⁺ центров и ионов Cr⁻, соответственно.

Исследования выполнены при поддержке:

- 1) гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение № 075-15-2022-1132 от 01.07.2022 г.) в части изготовления HR GaAs:Cr пластин и экспериментальных исследований распределения удельного сопротивления и стационарной фотопроводимости в HR GaAs:Cr пластинах;
- 2) в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2022-0018 в части моделирования распределения удельного сопротивления и времени жизни носителей заряда в HR GaAs:Cr пластинах.

Список литературы

1. Silva F.A. Energy Efficient Computing and Electronics: Devices to Systems [Book News] // IEEE Industrial Electronics Magazine Journal. – 2020. – Vol. 14, No. 1. – P. 100-101. – doi: 10.1109/MIE.2020.2966835.
2. Chsherbakov I., Kolesnikova, Lozinskaya A. et al. Electron mobility-lifetime and resistivity mapping of GaAs:Cr wafers // Journal of instrumentation. – 2017. – Vol. 12, No. 2. – doi: 10.1088/1748-0221/12/02/C02016.
3. Hamann E. Characterization of high resistivity GaAs as sensor material for photon counting semiconductor pixel detectors : PhD Thesis. – 2013. – 232 p.
4. Budnitsky D., Novikov V.A., Lozinskaya A.D., et al. Characterization of 4 inch GaAs:Cr wafers // Journal of instrumentation. – 2017. – Vol. 12, No. 1. – DOI:10.1088/1748-0221/12/01/C01063.
5. Омеляновский Э.М., Фистуль В.И. Примеси переходных металлов в полупроводниках. – М. : Металлургия, 1983. – 192 с.
6. Machado W.V., Cipriano E.C., Amato M.A. Experimental evidence of deep acceptor levels in GaAs exposed to near band gap light // Brazilian Journal of Physics. – 1997. – Vol. 27/A, No. 4. – P. 116–120.

Разработка принципиальной электрической схемы портативного трехканального электрокардиографа

Д.С. Ладынская, В.И. Куприянова, А.И. Мауль, А.В. Остряков

Научный руководитель: А.А. Трубачев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: vik33@tpu.ru, dsl22@tpu.ru, aim40@tpu.ru, avo42@tpu.ru

Аннотация: Представлены результаты разработки принципиальной электрической схемы простейшего портативного трехканального электрокардиографа.

Ключевые слова: электрокардиография, медицинское изделие, ЭКГ, фильтрация биопотенциальных сигналов.

По данным Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ) болезни сердечно-сосудистой системы являются лидирующей причиной смертности населения и на данный момент составляют 16% всех случаев смерти в мире [1]. Электрокардиография (ЭКГ) – незаменимый метод диагностики сердечных заболеваний.

Авторами была поставлена следующая цель: создать простейший кардиограф, способный в режиме онлайн передавать кардиограмму пациента по протоколу Wi-Fi на сервер дежурного врача. Такое устройство помогло бы собирать данные о работе сердца в течение суток, эффективно регистрировать нарушения и сообщать о них медицинскому персоналу.

В данной работе описана принципиальная электрическая схема устройства, включающая в себя регистрацию сигнала, фильтрацию, усиление, цепь питания и индикацию заряда, и не затрагивается программная часть устройства.

Работа аппарата ЭКГ заключается в том, что электроды, размещенные на теле пациента, фиксируют вектор и силу электрического заряда, который формирует сердце в процессе работы. Изменения вектора электрического заряда регистрируются в виде графика. Анализ формы этого графика позволяет сделать вывод о возможных нарушениях в работе сердца [2].

Сигнал снимается при помощи ЭКГ электродов, однако он обладает малой амплитудой. Для усиления сигнала с целью дальнейшей работы с ним был выбран инструментальный усилитель AD620, одна из областей применения которого – усиление биопотенциальных сигналов.

Регистрация сигнала в данной работе осуществляется в трех стандартных отведениях.

Одна из основных задач, стоявших при разработке электрокардиографа – убрать помехи, возникающие из-за сетевой наводки и мышечной дрожи, и не потерять при этом полезный сигнал, лежащий в диапазоне от 0,03 до 115 Гц [3]. Для устранения данной проблемы было принято решение собрать систему, состоящую из нескольких активных фильтров: фильтра синфазной помехи, фильтра нижних частот (ФНЧ) и режекторного фильтра

Сетевая помеха относится к классу синфазных сигналов, то есть равных по амплитуде и синфазных по частоте. В работе была реализована схема фильтра синфазной помехи, предложенная в технической документации AD620 при использовании микросхемы в качестве инструментального усилителя для снятия ЭКГ сигнала [4].

Назначение фильтра нижних частот состоит в подавлении частотных компонент сигнала, которые превышают заданную частоту среза. В данной работе был использован Активный фильтр нижних частот Чебышева 2-порядка. Схема ФНЧ приведена на рисунке 1.

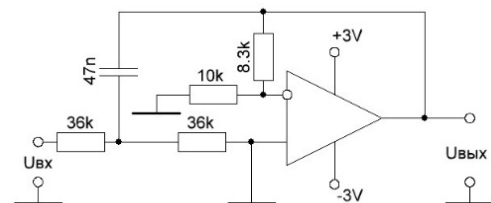


Рис. 1. Схема активного фильтра нижних частот Чебышева 2-порядка

Важную функцию в медицинских приборах и информационных системах выполняет режек-

торный (полосно-заграждающий) фильтр, необходимый для подавления частоты 50 Гц. В данной работе был использован активный режекторный фильтр на основе двойного Т-образного моста. Схема режекторного фильтра приведена на рисунке 2.

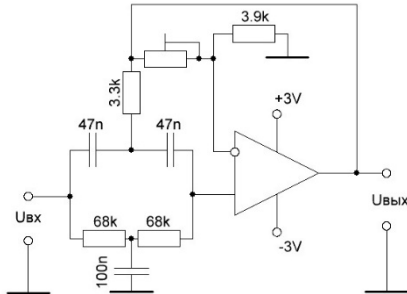


Рис. 2. Схема активного режекторного фильтра на основе двойного Т-образного моста

Подстроечный резистор в цепи отрицательной обратной связи необходим для задания добротности схемы и управления шириной полосы подавления.

В данной работе реализована регистрация ЭКГ в трех стандартных отведениях. Это значит, что оно одновременно формирует три графика, по очереди считывая данные для каждого с высокой частотой дискретизации.

Для решения этой задачи был использован аналоговый мультиплексор CD4016BC, который коммутирует входной сигнал между правой и левой рукой, между правой рукой и левой ногой, между левой рукой и левой ногой, что соответствует I, II и III отведению [5].

В данной работе использован автономный источник питания. Помимо возможности портативного использования устройства у данного типа питания имеются некоторые преимущества по сравнению с питанием от сети. Во-первых, отпадает необходимость гальванической развязки, которая обязательна для медицинских устройств, работающих от сети. Во-вторых, при питании устройства от батареек уменьшается сетевая наводка.

В устройстве осуществлено двухполярное питание от батареек номиналом 3 В.

В работе также была реализована схема индикации заряда батареи, благодаря которой по количеству горящих светодиодов можно отслеживать уровень заряда и предотвращать ошибку в работе прибора при низком заряде батареи.

Во время разработки устройство было собрано сначала на макетной плате, а затем на печатной плате при помощи поверхностного монтажа с целью уменьшения помех при исследовании.

После подбора всех компонентов и проверки работоспособности устройства была выполнена трассировка и осуществлен поверхностный монтаж печатной платы.

Готовое устройство было помещено в корпус, специально разработанный для него и созданный при помощи аддитивных технологий.

На рисунке 3 представлена электрокардиограмма, снятая при помощи разработанного устройства.

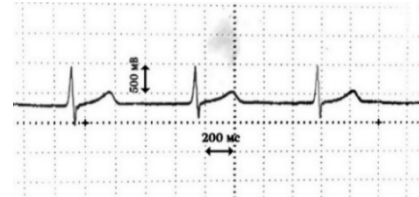


Рис. 3. Электрокардиограмма в первом отведении

В результате проведенной работы был создан простейший портативный трехканальный электрокардиограф, который в дальнейшем может быть улучшен и реализован в качестве медицинского устройства.

Список литературы

1. Всемирная Организация здравоохранения: официальный сайт. – Обновляется в течение суток. – URL: <https://www.who.int/ru/news/item/09-12-2020-who-reveals-leading-causes-of-death-and-disability-worldwide-2000-2019> (дата обращения: 15.03.2024).
2. МедУнивер: официальный сайт. – Обновляется в течение суток. – URL: <https://meduniver.com/Medical/Therapy/118.html> (дата обращения: 13.03.2023).
3. Фролов А.В., Дик С.К., Лихачевский Д.В. и др. Цифровая обработка биомедицинских сигналов и изображений: пособие. – Минск: БГУИР, 2016. – 64 с.
4. Техническая документация к микросхеме AD620. – URL: <https://www.farnell.com/datasheets/2253303.pdf> (дата обращения: 01.10.2023). – 21 с.
5. Многопрофильная клиника “Л мед”: официальный сайт. – Тула. – Обновляется в течение суток. – URL: <https://www.l-med.ru/articles/mnogoprofilnaya-klinika/ekg/> (дата обращения: 13.03.2023).

Разработка и исследование композиционных радиоматериалов на основе оксидных ферритмагнетиков в широком диапазоне частот

К.С. Ланг

Научный руководитель: канд. физ. мат. наук, Г.Е. Кулешов

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: oksanalang1@gmail.com

Аннотация: В данной работе представлены результаты анализа диэлектрических и магнитных характеристик композитных материалов, созданных на основе ферритов и эпоксидной смолы, в диапазоне частот от 0,01 до 18 ГГц. Продемонстрированы результаты моделирования зависимости коэффициента отражения от частоты и толщины слоя композита на "на металле".

Ключевые слова: композиционные радиоматериалы, ферритмагнетики, гексаферриты, радиопоглощающие материалы.

Эволюция современной радиоэлектроники, работающей в диапазоне СВЧ излучения, создала проблему обеспечения электромагнитной совместимости и безопасности. В настоящее время требуется разработка новых радиоматериалов для уменьшения негативных эффектов сверхвысокочастотного излучения. Один из перспективных подходов заключается в использовании новых композиционных материалов, особенно выделяются композиты на основе магнитных материалов с высоким коэффициентом поглощения и низким коэффициентом отражения в широком частотном диапазоне [1].

В качестве активных компонентов в радиопоглощающих устройствах СВЧ диапазона хорошо зарекомендовали себя оксидные ферритмагнетики, являющиеся микроволновыми поглотителями [2]. Они обладают высоким удельным сопротивлением, большой магнитной проницаемостью и намагниченностью насыщения, что обуславливает низкие энергетические потери на вихревые токи на высоких частотах [3].

Исходя из актуальности данной темы перед работой ставится задача исследования электромагнитных характеристик композиционного радиоматериала на основе феррита в диапазоне частот от 0,01–18 ГГц.

Для измерений были изготовлены композитные материалы, состоящие из порошка гексаферрита W-типа с различными размерами частиц (меньше 160 мкм, 160–250 мкм и 250–450 мкм), связующего на основе эпоксидной смолы (ЭДП-20) и отвердителя (ПЭПА). Образцы бы-

ли изготовлены в форме плоских шайб с внешним диаметром 7 мм и внутренним диаметром 3 мм при смешивании 80% ферритового порошка и 20% связующего.

Измерения S-параметров проводились с использованием волноводного метода в коаксиальной измерительной ячейке стандарта 7,0/3,04 мм с помощью векторного анализатора цепей P4M-18 от фирмы "Микран". Принцип работы векторного анализатора заключается в измерении параметров падающей, отраженной и прошедшей через исследуемый объект волны сигнала. Управление осуществляется с помощью персонального компьютера с необходимым программным обеспечением.

Векторный анализатор P4M-18 позволяет измерить коэффициенты отражения, прохождения и фазу в диапазоне частот от 10 МГц до 18 ГГц, а также рассчитать на основе этих данных коэффициент поглощения и комплексные магнитную и диэлектрическую проницаемости образцов.

Для расчета электромагнитных параметров использовался метод Беккера–Джарвиса, описанный в источнике [5], который позволяет установить математические соотношения между S-параметрами и материальными параметрами.

Результат исследования комплексной диэлектрической проницаемости композита с гексаферритом W-типа представлен на рисунке 1.

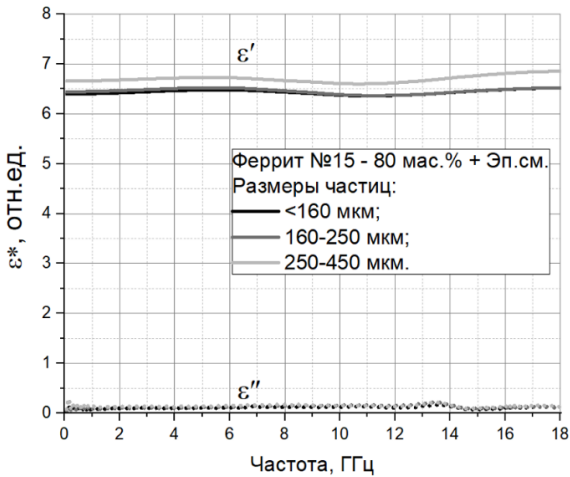


Рис. 1. Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости композита от частоты

Из рисунка 1 видно, что действительная составляющая диэлектрической проницаемости ϵ' лежит в диапазоне около 6,4–6,6 отн. ед., причем ϵ' больше для образца с более крупными частицами, а для образцов с размерами частиц меньше 160 мкм и 160–250 мкм она совпадает. Стоит отметить, что мнимая часть ϵ'' у всех образцов также совпадает.

На рисунке 2 представлен результат исследования комплексной магнитной проницаемости образцов рассматриваемого композита.

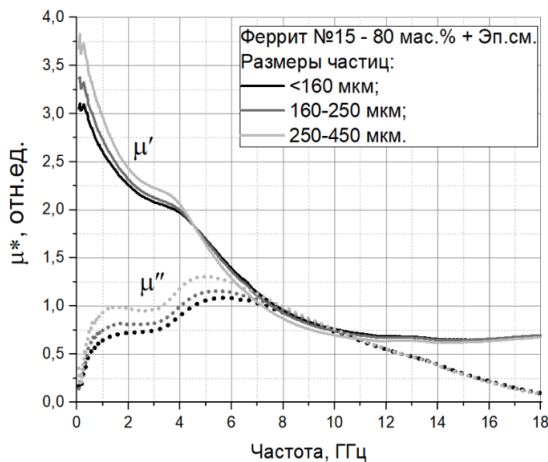


Рис. 2. Зависимость комплексной магнитной проницаемости композита от частоты

Из рисунка 2 видно, что на частотной зависимости мнимой части магнитной проницаемости μ'' заметны два пика. В диапазоне частот до 11 ГГц образец с частицами размером 250–450 мкм имеет большее значение μ'' . В частности, первый пик для данного образца наблюдается при частоте 1 ГГц, где значение μ'' достигает 1 отн. ед. Второй пик находится на частоте 5 ГГц, при этом значение μ'' достигает около 1,25 отн. ед.

Для композитного материала с частицами феррита размером 250–450 мкм было проведено моделирование электромагнитного отклика в программе Mathcad. Зависимость коэффициента отражения от частоты и толщины слоя композита «на металле» представлена на рисунке 3.

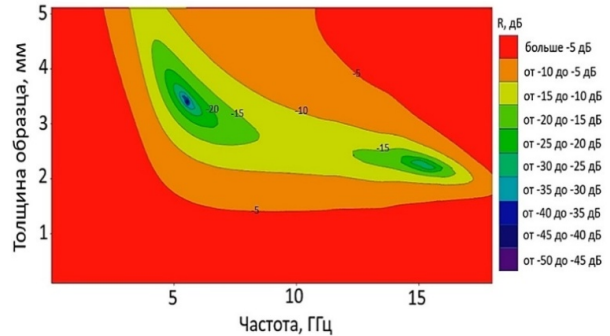


Рис. 3. Моделирование зависимости коэффициента отражения от слоя композита от частоты и толщины образца «на металле»

Из анализа рисунка 3 следует, что рассматриваемый композит хорошо отражает излучение в диапазоне частот от 5 до 7 ГГц при толщине слоя около 2,5 мм, а также в диапазоне от 13 до 16 ГГц при толщине слоя около 2,3–2,4 мм. В этих диапазонах частот коэффициент отражения не превышает –15 дБ

Исследование электромагнитных параметров композита с гексаферритом W-типа показало, что реальная составляющая диэлектрической проницаемости ϵ' принимает значения в диапазоне 6,4–6,6 отн. ед., магнитная проницаемость образцов имеет два выраженных пика, особенно заметных у частиц размером 250–450 мкм. Моделирование электромагнитного отклика от образца подтвердило хорошие поглощающие свойства композита в диапазонах частот 5–7 и 13–16 ГГц, что делает его перспективным для использования в качестве поглощающего покрытия на металле.

Благодарности

Выражаю благодарность В.А. Журавлеву за помощь при измерении S-параметров на векторном анализаторе цепей.

Измерения электромагнитных характеристик проводились на оборудовании Центра коллективного пользования "Центр радиофизических измерений, диагностики и исследования параметров природных и искусственных материалов", директором которого является В.И. Сусляев.

Список литературы

1. Almessiere M. A., Slimani Y., Trukhanov A. V. et al. Review on functional bi-component nanocomposites based on hard/soft ferrites: Structural, magnetic, electrical and microwave absorption properties // Nano-Structures & Nano-Objects. – 2012. – Vol. 26. – P. 2–21.
2. Землянухин Ю.П. Электромагнитные характеристики композиционных радиоматериалов, активно взаимодействующих с электромагнитным излучением миллиметрового диапазона: дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук. – Томск, 2014. – 118 с.
3. Радиоматериалы и радиокомпоненты: учеб. пособие / сост.: Е. В. Нефедцев. – Томский Межвузовский центр дистанционного образования, 2000. – 290 с.
4. Анализаторы цепей векторные / Микран. – [Томск], 2022. – URL: <https://www.micran.ru/productions/IIS/kia/vna/> (дата обращения: 27.12.2023).
5. Chalapat K., Sarvala K., Li J., Sorin G. Wideband Reference-Plane Invariant Method for Measuring Electromagnetic Parameters of Materials // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2009. – Vol. 57, Is. 9. – P. 2257–2267.

Структурные и магнитные свойства никелевой феррошпинели, синтезированной методом золь-гель горения

В.В. Лемешов

Научный руководитель: канд. техн. наук Д.В. Вагнер

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: lemeshov.vlad01@mail.ru

Аннотация: Исследованы фазовый состав и основные магнитные характеристики наноструктурных феррошпинелей NiFe_2O_4 синтезированных методом золь-гель-горения. Проведено сравнение свойств ферритов, полученных при различных температурах отжига. Показано, что дополнительный отжиг при температуре 1073 К приводит к увеличению содержания целевой фазы, существенному увеличению размеров кристаллитов и удельной намагниченности насыщения.

Ключевые слова: феррошпинели, золь-гель горение, наноразмерные частицы, магнитные характеристики.

Никелевые феррошпинели (NiFe_2O_4) находят свое применение в различных областях науки и техники. Наибольшая востребованность данных ферритов наблюдается в электронике, экологии и медицине [1]. Перед работой была поставлена цель, синтезировать методом золь-гель горения NiFe_2O_4 и провести исследование их фазовых, структурных и магнитных свойств.

Ферриты синтезировали методом золь-гель горения. Для удаления органических примесей, полученных в ходе синтеза, порошки прокаливались при температуре 723 К в течение 24 часов (образцы № 1 и № 2). По завершению прокаливания один из образцов подвергся дополнительному отжигу при температуре 1073 К в течение 2 часов (образец № 2).

Фазовый состав и параметры кристаллической структуры материалов исследовались при помощи рентгенофазового анализа. В диапазоне измеряемых углов 2θ от 15° до 55° наблюдались дифракционные пики (111), (220), (311), (222), (400) и (422), соответствующие NiFe_2O_4 . Дополнительный отжиг привел к увеличению размеров кристаллитов с 26 до 120 нм и увеличению содержания целевой фазы.

Таблица 1. Результаты измерения магнитных характеристик исследуемых образцов

Образец	σ_s , Гс·см ³ /г	H_c , Э
№ 1	32	414
№ 2	50	185

Магнитные характеристики, полученные с помощью импульсного магнитометра [2] приведены в таблице 1.

Для образца №2 наблюдались увеличение значений удельной намагниченности насыщения (σ_s) до 50 Гс·см³/г и уменьшение значений коэрцитивной силы (H_c) с 414 до 185 Э за счёт увеличения размеров кристаллитов и уменьшения примесных фаз. Полученные результаты согласуются с литературными данными [3].

Данная технология синтеза позволила получить феррит с высоким содержанием целевой фазы (более 95 об. %). Полученные ферриты со структурой шпинели могут найти применение в устройствах электроники в качестве ферритовых сердечников и системах очистки сточных вод в качестве адсорбента.

Благодарности

Исследование проводилось на оборудовании ЦКП «Центр радиоизмерений ТГУ».

Список литературы

1. Белая Е.А., Грязнова М.С., Колмогорцев А.М. Ионнообменный синтез наноразмерного феррита никеля // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»: Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ. – 2018. – Т. 7. – С. 376–382.
2. Wagner D.V., Kareva K.V., Zhuravlev V.A. et al. Investigation of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ hexaferrites manufac-

tured by various synthesis methods using a developed pulsed magnetometer // Inventions. – 2023. – Vol. 26, Is. 8. – P. 1–14.

3. Смит Я., Вейн Х. Ферриты. – М. : Издательство ИЛ, 1962. – 504 с.

Микрофлюидная спектроскопия воды и водно-солевых растворов (NaCl и $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) в терагерцовом диапазоне частот

Л.О. Лобова, Д.А. Пидотова

Научный руководитель: д-р техн. наук, профессор Г.Е. Дунаевский

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: lobovaludmila123@yandex.ru

Аннотация: Исследуется процесс распространения электромагнитных волн терагерцового диапазона в воде и водных растворах: 0,9% NaCl (хлорид натрия) и 0,1% $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ (мочевина), находящихся в микрофлюидном капилляре. Исследования проведены с помощью тайм-доменного спектрометра в диапазоне частот от 0,1 ТГц до 1 ТГц. В качестве кювет, наполняемых исследуемыми образцами жидкостей, использовались капилляры из кварцевого стекла, внутренний диаметр которых составляет 100 мкм.

Ключевые слова: короткоимпульсная спектроскопия, терагерцовый диапазон частот, микрофлюидная спектроскопия, спектроскопия жидкости.

Дистанционное зондирование жидкостей для определения их химического состава является востребованной современной задачей, а применение терагерцового излучения для этой цели позволяет идентифицировать вещество без его разрушения [1]. В настоящее время проводятся исследования жидкостей в микрофлюидных структурах в диапазоне с 0,5 до 2,5 ТГц. Результаты, показанные в работе [2], демонстрируют осуществимость выполнения спектроскопии высокой чувствительности биомолекул в водных растворах с использованием микрофлюидных устройств. Явным преимуществом радиоволновой спектроскопии в микрофлюидных капиллярах является возможность контроля толщины слоя жидкости. Раствору необходимо определённое количество свободного пространства, это важно для правильного построения и молекул, и кластеров вещества. В то же время контроль толщины жидкости позволяет подобрать оптимальную толщину слоя, при которой возможен спектральный анализ жидкости в том, или ином радиоволновом частотном диапазоне. В работе [3] для изучения параметров жидкости в терагерцовом диапазоне использовали чип с микрофлюидными структурами с заданной высотой канала в пределах 100 мкм. Это обусловлено расстоянием, на которое волны терагерцового диапазона проникают через раствор на этом чипе. Как показано в статье [3], толщины слоя 100 мкм достаточно для свободного размещения химических структур [2,3].

Целью работы является отработка методики диагностики и определение особенностей растворов в терагерцовой области частот.

Исследования проведены с помощью короткоимпульсного спектрометра T-Spec, предназначенного для анализа материалов методом частотной спектроскопии в диапазоне от 0,1 до 10 ТГц [4]. Рассматривался диапазон частот от 0,1 до 1 ТГц с длиной шага перестройки примерно 8,6 ГГц. Проведено сравнение спектров инъекционной воды, водно-солевых растворов 0,9% NaCl (хлорида натрия) и 0,1% $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ (мочевины) в микрофлюидных капиллярах. В работе в качестве кювет использованы капилляры с внутренним диаметром 100 мкм, микрофлюидные капилляры. Рассмотрено влияние состава жидкости на коэффициент прохождения по напряжению и возможность идентификации вещества на основании полученного спектра, в продолжение ранее проведённой работы [5]. Экспериментальное исследование проводилось с помощью оборудования «Центра коллективного пользования радиоизмерений ТГУ».

Полученные в ходе измерений графики спектральных характеристик пустых капилляров, а также заполненных водой для инъекций, раствором хлорида натрия 0,9% и раствором мочевины 0,1%, расположенных вертикально и горизонтально, представлены на рисунках 1, 2, 3, и 4. Схема работы спектрометра – «на проход». Е-вектор поляризация пучка направлен вертикально.

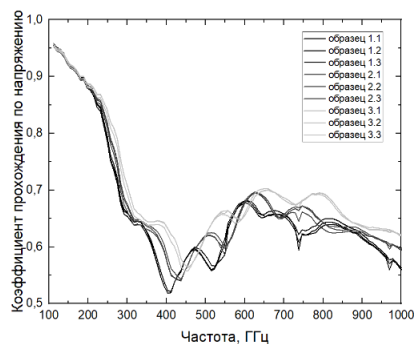


Рис. 1. Графики спектров пустых кювет, расположенных вертикально

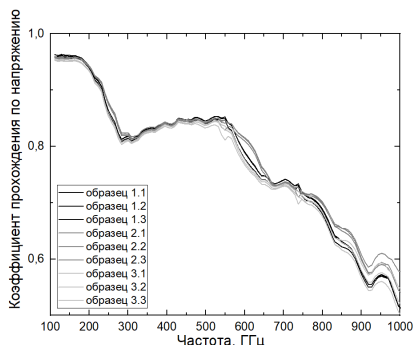


Рис. 2. Графики спектров пустых кювет, расположенных горизонтально

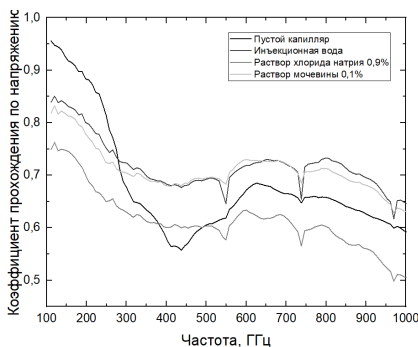


Рис. 3. Графики спектров пустых капилляров, заполненных водой для инъекций, раствором хлорида натрия 0,9% и раствором мочевины 0,1%, расположенных вертикально

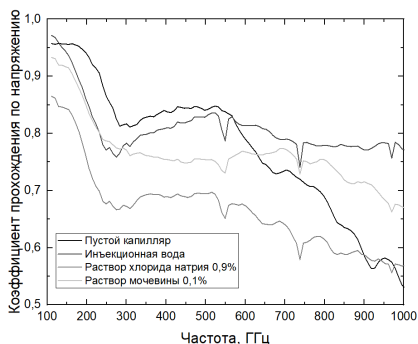


Рис. 4. Графики спектров пустых капилляров, заполненных водой для инъекций, раствором хлорида натрия 0,9% и раствором мочевины 0,1%, расположенных горизонтально

Приведенные результаты (рис. 1 и 2) показывают, что среди капилляров есть некоторые различия в геометрических характеристиках, которые вызывают смещение пиков резонансов. Поэтому следует видоизменить процедуру измерения характеристик образцов и выбраковывать отличающиеся по характеристикам капилляры перед их заполнением. Следует обратить внимание, что вне зависимости от положения капилляра, горизонтального или вертикального, на каждом графике с капиллярами, заполненными водными растворами (рис. 3 и 4), наблюдаются резонансы на частотах 0,549, 0,738 и 0,97 ТГц. При этом, подобные резонансы на графиках пустых капилляров либо значительно сглажены, либо отсутствуют вовсе.

Спектральные характеристики во всём рассматриваемом диапазоне длин волн лежат на разном уровне в зависимости от концентрации солей в растворах, что позволяет идентифицировать данные вещества THz-TDS методом.

Научное исследование выполнено при поддержке Программы развития НИ ТГУ (Приоритет 2030).

Список литературы

1. Киричук В.Ф., Антипова О.Н., Великанова Т.С. и др. Влияние терагерцевых волн на сложные живые биообъекты. – Саратов: Изд-во СГМУ, 2014. – 325 с.
2. George P. A., Hui W., Rana F., Hawkins B.G., Smith A. E., Kirby B. J. Microfluidic devices for terahertz spectroscopy of biomolecules. // Optics express – 2008. – Vol. 16, No. 3. – P. 1577 – 1582.
3. Su B., Zhang C., Fan N., Zhang C. Terahertz microfluidic chips for detection of amino acids in aqueous solutions. // Proc. SPIE. – 2016. – Vol. 10030. – P. 100302B-1 – 100302B-8.
4. Терагерцовый (ТГц) спектрометр реального времени T-SPEC – Москва, 2005-2024. – URL: <https://www.czl.ru/catalog/spectral-system/teravil/real-time-terahertz-spectrometer-t-spec.html> (дата обращения: 20.03.2024).
5. Лобова Л. О. Терагерцовая спектроскопия водных и водных солевых растворов в связанном состоянии // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2021. – № 1-1. – С. 14-17.

Исследование спектров диэлектрической проницаемости магнитных жидкостей конденсаторным методом

Д.А. Мазилев

Научный руководитель: А.А. Павлова

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: dmitrijmazilov20@gmail.com

Аннотация: В работе представлены результаты исследования электромагнитных характеристик ферромагнитных жидкостей различного состава при приложении внешнего магнитного поля.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, ферромагнитные жидкости, конденсаторный метод, магнитная проницаемость, 3D печать.

Магнитные жидкости (МЖ) представляют собой устойчивые многофазные коллоидные системы стабилизированных высокодисперсных частиц магнитного материала (наполнителя) в жидкой среде-носителе.

Магнитные жидкости обладают уникальным сочетанием текучести и способности ощутимо взаимодействовать с магнитным полем. Их свойства определяются совокупностью характеристик, входящих в неё компонентов (твёрдой магнитной фазы, дисперсионной среды и стабилизатора), варьируя которые можно в довольно широких пределах изменять физико-химические параметры МЖ в зависимости от условий их применения [1].

Магнитные жидкости активно используются в разных областях. От сферы их применения зависит их состав и электромагнитные характеристики. Электромагнитные характеристики включают в себя диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость и S-параметры.

Существует несколько способов для определения диэлектрической проницаемости: конденсаторный метод, метод коаксиального пробника, метод линии передачи, метод объёмного резонатора. В данной работе был выбран конденсаторный метод. Преимущества выбранного метода: доступность; возможность измерения на низких частотах; компактность ячейки, которая позволяет помещать ее в систему магнитов; возможность измерения жидких образцов.

Метод с применением конденсатора с параллельными пластинами включает помещение образца между двумя электродами для формирования конденсатора. Измерительная система, использующая метод параллельных пластин,

состоит из анализатора импеданса и устройства подключения, такого как устройство подключения для испытаний диэлектриков.

В работе исследовались образцы трех видов:

- 1) синтетическое масло + нанотрубки (60 % + 1 %);
- 2) синтетическое масло + порошок НР 1010 (61 % + 39 %);
- 3) синтетическое масло + порошок НР 1010+ нанотрубки (60 % + 39 % + 1%).

Жидкостью-носителем стало синтетическое масло марки 10W-40. В качестве магнитной фазы был использован порошок марки НР 1010. В [3] установлено, что в его состав входит Fe_3O_4 , а также содержится аморфный углерод на поверхности частиц магнетита. Для изготовления образцов использовались многостенные углеродные нанотрубки диаметром 9,8 нм, длиной 1–5 мкм. Нанотрубки смешивались с маслом методом ультразвукового диспергирования.

Измерения емкости ячейки проводились на приборе LCR Agilent E4980A.



Рис. 1. Универсальный измеритель LCR Agilent E4980A

Прибор E4980A позволяет выполнить измерения емкости C , сопротивления R и индуктивности L на всех частотах с семиразрядной индикацией на каждом пределе измерения; разрешающая способность при измерении значения $\text{tg}\delta$ составляет 1×10^{-6} .

На рисунках 2 и 3 представлены спектры действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) МЖ. Видно, что с добавлением нанотрубок и порошка магнетита значение действительной части ДП повышается, т.к. их ДП выше, чем у масла.

Также можно наблюдать изменение значений КДП при помещении образцов в магнитное поле (МП). Для всех образцов при приложении магнитного поля наблюдается следующее: при приложении параллельного МП к образцу действительная составляющая ДП уменьшается на 10 %. А при приложении перпендикулярного МП к образцу действительная составляющая ДП уменьшается на 16 %.

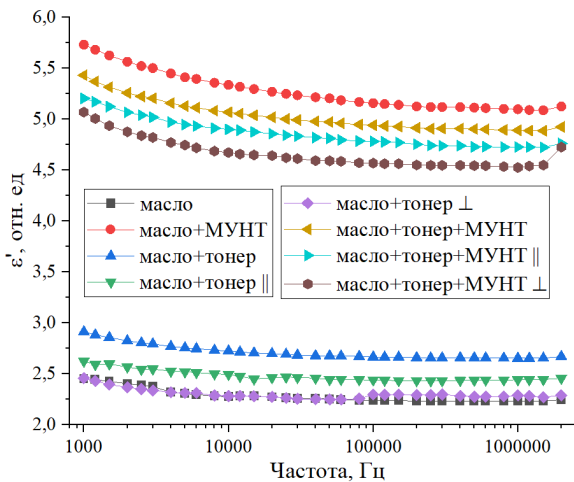


Рис. 2. Результаты исследования действительной части КДП ФМЖ в диапазоне частот от 1 кГц до 2 МГц

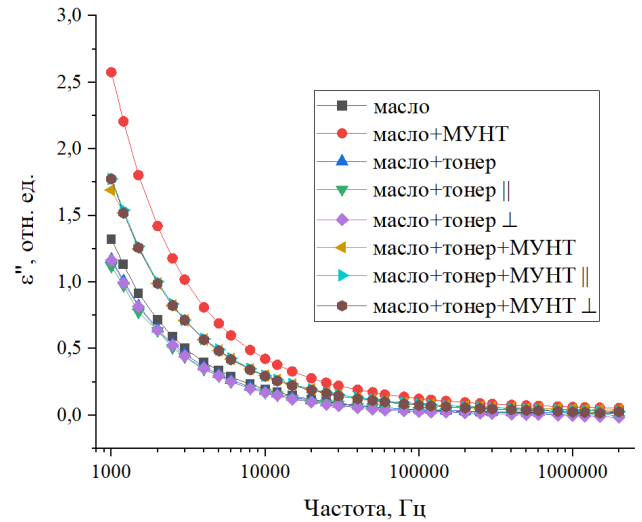


Рис. 3. Результаты исследования мнимой части КДП ФМЖ в диапазоне частот от 1 кГц до 2 МГц

Исследование КДП МЖ показало возможность управления электрическими характеристиками магнитным полем.

Благодарности

Авторы выражают благодарность ЦКП «Центр радиоизмерений ТГУ» за предоставленное оборудование, а также Сусяеву В.И. и Журавлёву В.А. за помощь в обсуждении результатов.

Список литературы

1. Philip J., Laskar J.M. Optical properties and applications of ferrofluids – a review // Journal of Nanofluids. – 2012. – Vol. 1. – P. 3 – 20.
2. Магнитные жидкости: способы получения и области применения. – URL: <http://magneticliquid.narod.ru/authority/008.htm> (дата обращения: 02.10.2023).
3. Доценко О.А., Павлова А.А., Доценко В.С. Влияние внешнего магнитного поля на диэлектрическую проницаемость многофазных ферромагнитных жидкостей // Известия вузов. Физика. – 2017. – Т. 60, № 11. – С. 95 – 99.

Измерение и моделирование вольт-амперных характеристик арсенид-галлиевых сенсоров высокоэнергетических электронов

А.А. Маковский

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук, профессор О.П. Толбанов

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

makoo.2001@mail.ru

Аннотация: В настоящей работе представлены результаты измерений и моделирования вольт-амперных характеристик матричных сенсоров на основе высокоомного арсенида галлия, компенсированного хромом. Установлено, что экспериментальные вольт-амперные характеристики симметричны относительно полярности приложенного напряжения и имеют три участка. Выполнено моделирование вольт-амперные характеристики и сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей. Показано, что учет концентрации термоакцепторов позволяет добиться хорошего совпадения расчетных и экспериментальных вольт-амперных характеристик.

Ключевые слова: арсенид галлия, сенсор, вольт-амперная характеристика, транспорт носителей заряда, дырочная компонента, электронная компонента.

В настоящее время рассматривается новая идея разветвления контактов в сенсорной матрице. Датчики будут покрыты еще одним слоем металлических дорожек, которые будут использоваться для разветвления контактов. Это устранил необходимость в хрупких проводных соединениях между сенсорными площадками и разветвлением, что уменьшает толщину сенсора примерно на 150 мкм и позволяет сделать его более прочным и простым в сборке детектора. Важной задачей при этом является изучение электрических характеристик сенсоров в сенсорной матрице. Цель работы – разработка модели транспорта носителей заряда в исследуемых HR GaAs:Cr сенсорах.



Рис. 1. Сенсор на основе HR GaAs:Cr

В качестве экспериментального образца использовался фрагмент матричного сенсора на основе высокоомного арсенида галлия, компенсированного хромом (рис.1), разработанного для использования в составе электромагнитного калориметра высокоэнергетических электронов. Размер образца 6×9 пикселей, расположен-

ных друг от друга на расстоянии 0,5 мм. Толщина образца 550 мкм. Площадь одного пикселя 4,7×4,7 мм².

Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) выполнялось с использованием источника-измерителя Keithly 2410. Образцы включались в измерительную цепь при помощи прижимных контактов и помещались в металлическую измерительную камеру для снижения влияния оптического излучения и электромагнитных наводок на результаты измерений. Экспериментальные ВАХ представлены на рисунках 2 и 3.

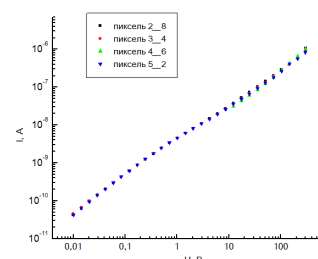


Рис. 2. ВАХ при положительной полярности напряжения

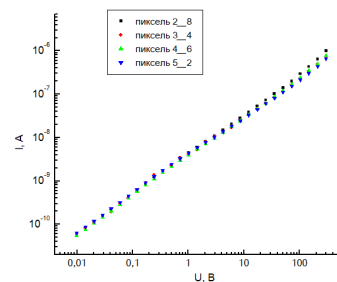


Рис. 3. ВАХ при отрицательной полярности напряжения

Анализ экспериментальных ВАХ позволяет сделать выводы:

- исследуемый образец сенсора характеризуется хорошей однородностью распределения электрофизических характеристик, что обуславливает совпадение ВАХ различных пикселей сенсора;
- ВАХ симметричны относительно полярности приложенного рабочего напряжения;
- наблюдаются три участка с различной функциональной зависимостью силы тока от напряжения на сенсоре: линейный, сублинейный и сверхлинейный.

На рисунке 4 приведены результаты измерения распределения удельного сопротивления по пластине высокоомного арсенида галлия, компенсированного хромом, из которой был изготовлен исследуемый образец сенсора.

Анализ результатов картирования удельного сопротивления показывает:

- в области расположения исследуемого образца, обозначенной пунктирной линией на рис. 4 наблюдается уменьшение величины удельного сопротивления по сравнению с центральной частью пластины;
- причиной снижения удельного сопротивления может быть эффект термоакцептирования при котором происходит увеличение концентрации акцепторов при нагреве пластин во время высокотемпературного отжига.

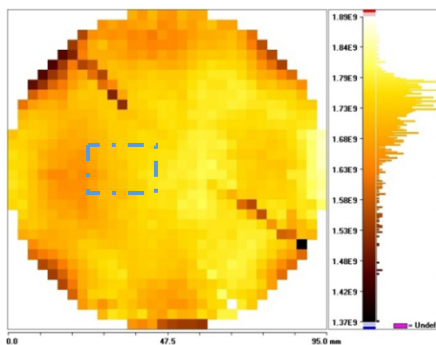


Рис. 4. Экспериментальное распределение удельного сопротивления в пластине высокоомного арсенида галлия, компенсированного хромом

Наличие эффекта термоакцептирования требует учета концентрации термоакцепторов при решении системы уравнений (1-5), описывающих механизмы проводимости и

распределения носителей заряда. Базовой является диффузионно-дрейфовая модель, включающая в себя уравнение Пуассона (1), уравнения непрерывности (2,3) и уравнения для электронного и дырочного токов (4,5):

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \varphi + \vec{P}) = -q(p - n + N_D - N_A) - \rho_{trap}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = q(R - G) + q \frac{\partial n}{\partial t}, \quad (2)$$

$$-\nabla \cdot \vec{J}_p = q(R - G) + q \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\vec{J}_n = -q(\mu_n n \cdot \nabla \psi - D_n \nabla n), \quad (4)$$

$$\vec{J}_p = -q(\mu_p p \cdot \nabla \psi - D_p \nabla p), \quad (5)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость; ψ – электростатический потенциал; q – заряд электрона; p – концентрация дырок; n – концентрация электронов; N_D – концентрация ионизированных атомов доноров; N_A – концентрация ионизированных атомов акцепторов; J_n – плотность электронного тока; J_p – плотность дырочного тока; R – скорость рекомбинации электронов и дырок; G – скорость генерации электронов и дырок; μ_n, μ_p – подвижности электронов и дырок соответственно; D_n, D_p – коэффициенты диффузии электронов и дырок соответственно.

Результаты расчета ВАХ приведены на рисунке 5.

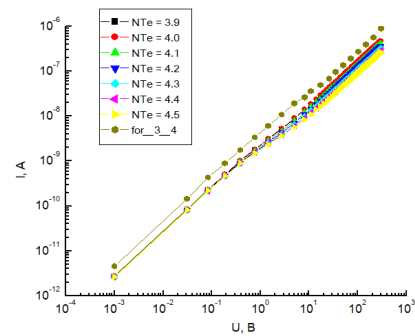


Рис. 5. Расчетные ВАХ с изменением NTe и наложение их на экспериментальную

Видно (рис. 5), что вариация концентрацией легирующей донорной примеси и высотой потенциального барьера на границе «металл-полупроводник» не позволяет добиться хорошего совпадения расчетных и экспериментальных ВАХ. Наилучшее согласование расчетных и экспериментальных ВАХ наблюдается при использовании в качестве подгоночного параметра величины концентрации термоакцепторов на уровне $4,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (рис. 6).

На рисунке 7 представлена расчетная ВАХ структуры и ее дырочная и электронная компоненты.

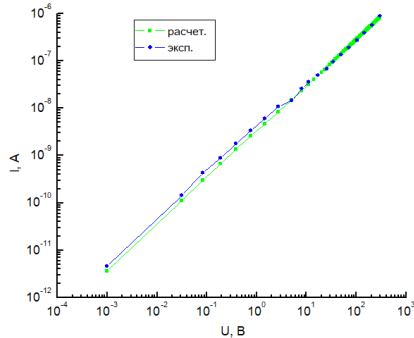


Рис. 6. Экспериментальная и расчетная ВАХ при оптимальной концентрации термоакцепторов ($4,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$)

На рисунках 7-13 представлены результаты расчета распределения концентрации электронов и дырок, а также напряженности электрического поля по толщине сенсора на различных участках ВАХ.

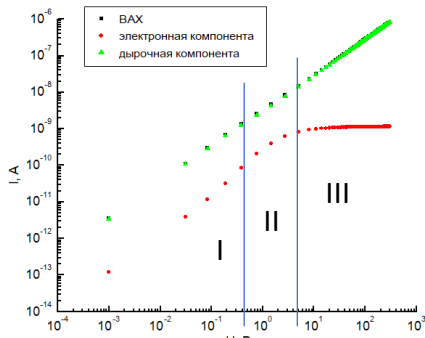


Рис. 7. ВАХ и ее дырочная и электронная компоненты

Анализ результатов расчета позволяет сделать выводы:

- линейный участок ВАХ (участок I) определяется равновесной концентрацией электронов и дырок в материале сенсора;
- распределение напряженности электрического поля по толщине сенсора близко к линейному при напряжениях смещения выше 5 В.

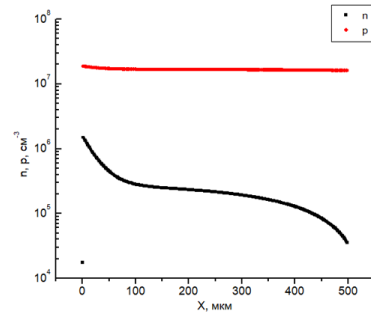


Рис. 8. Распределение концентрации электронов и дырок в объеме сенсора при напряжении 0,5 В (участок I ВАХ)

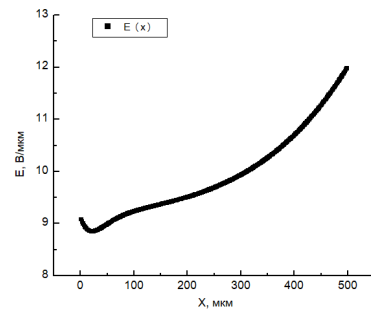


Рис. 9. Распределение напряженности электрического поля в объеме сенсора при напряжении 0,5 В (участок I ВАХ)

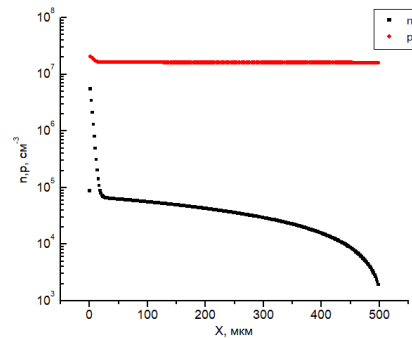


Рис. 10. Распределение концентрации электронов и дырок в объеме сенсора при напряжении 5 В (участок II ВАХ)

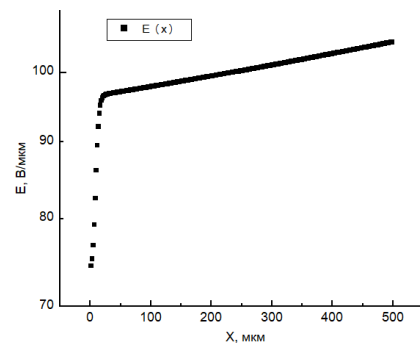


Рис. 11. Распределение напряженности электрического поля в объеме сенсора при напряжении 5 В (участок II ВАХ)

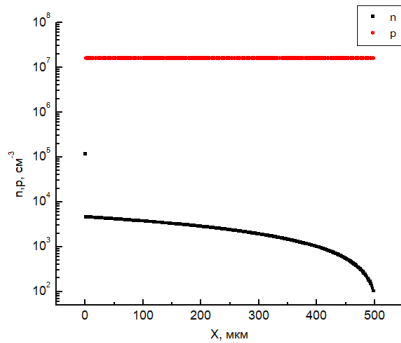


Рис. 12. Распределение концентрации электронов и дырок в объеме сенсора при напряжении 200 В (участок III ВАХ)

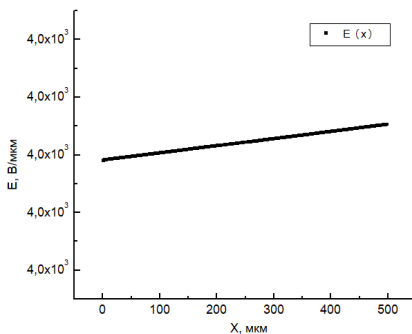


Рис. 13. Распределение напряженности электрического поля в объеме сенсора при напряжении 200 В (участок II ВАХ)

В результате проведенных исследований можно сделать вывод: экспериментальные ВАХ сенсоров на основе арсенида галлия, компенсированного хромом, симметричны относительно полярности приложенного напряжения.

Расчетным путем показано:

- наилучшее согласование расчетных и экспериментальных ВАХ наблюдается при использовании в качестве подгоночного параметра величины концентрации термоакцепторов на уровне $4,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$;
- переход от линейной (участок I) к сублинейной (участок II) функциональной зависимости силы тока от напряжения обусловлен выходом на насыщение электронной компоненты, что является следствием экстракции электронов из объема сенсора и отсутствием притока электро-

нов из обратно смещенного контакта «металл-полупроводник»;

В дальнейшем планируется исследование и моделирование импульсных характеристик сенсоров при воздействии высокоэнергетических электронов.

Исследования выполнены при поддержке:

- 1) гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение № 075–15–2022–1132 от 01.07.2022 г.) в части изготовления HR GaAs:Cr пластин и измерений вольт-амперных характеристик HR GaAs:Cr сенсоров;
- 2) в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2022-0018 в части моделирования вольт-амперных характеристик HR GaAs:Cr сенсоров.

Список литературы

1. Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. – М. : Атомиздат, 1977. – 528 с.
2. Айзенштат Г.И., Лелеков М.А., Новиков В.А. и др. Токотенос в детекторах на основе арсенида галлия, компенсированного хромом // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41, вып. 5. – С. 631–334.
3. Прудаев И.А., Верховлетов М.Г. Нелинейность вольт-амперных характеристик однородных компенсированных детекторных структур из GaAs // Письма в ЖТФ. – 2019. – Т. 45, вып. 11. – С. 37–40.
4. Айзенштат Г.И., Лелеков М.А., Толбанов О.П. Измерение высоты барьера на границе металл-полупроводник арсенид галлия // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41, вып. 11. – С. 1327–1328.
5. Будницкий Д.Л., Новиков В.А., Прудаев И.А. и др. Фотовольтаический эффект в контакте металл-высокоомный GaAs:Cr // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 7. – С. 19–22.
6. Федоров П. И. Галлия арсенид // Химическая энциклопедия. – М. : Советская энциклопедия, 1988. – Т. 1. – С. 481.

Моделирование параметрического изменения профиля на поверхности композита

С.В. Митрофанов, К.В. Карева

Научный руководитель: канд. тех. наук, Д.В. Вагнер

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: m.sergei432@gmail.com

Аннотация: Исследовано влияние добавления углеродной фибры в состав образцов композитов на основе феррита никель-цинковой шпинели, проведено моделирование с привлечением параметрического изменения профиля на поверхности композитов, а именно, изменение его высоты относительно горизонтальной поверхности образцов и периодичности неоднородности.

Ключевые слова: ферриты, композиты, профиль поверхности, СВЧ-диапазон.

В современном мире электронные устройства производят нежелательное электромагнитное (ЭМ) излучение, создавая электромагнитные помехи [1]. Для борьбы с этим явлением активно исследуются радиопоглощающие материалы. Данная работа посвящена изучению композитных материалов на основе порошка феррита Ni-Zn, полученного измельчением кольцевого ферритового сердечника 2000НМ, и углеродной фибры (УФ) в качестве потенциальных поглотителей электромагнитных волн.

Для оценки эффективности поглощения были изготовлены образцы композитов с различными профилями поверхности. Состав композита включал 60 масс. % феррита, 0,08 масс. % углеродной фибры и 39,02 масс. % эпоксидной смолы в качестве связующего вещества.

Электромагнитные свойства образцов были измерены в диапазоне частот от 10 МГц до 18 ГГц с использованием волноводного метода с использованием коаксиальной ячейки и обработаны с помощью модифицированной методики Бейкера-Джарвиса [2, 3].

Оценка влияния добавления УФ может быть дана на основе измеренных спектров коэффициента отражения двух типов композитов на основе никель-цинкового феррита с добавлением и без добавления УФ (рисунок 1) толщиной 2,4 мм. На уровне минус 6 дБ (поглощение не менее 70 % ЭМ волны по мощности) при добавлении УФ возрастает эффективная полоса частот: образец без УФ поглощал на данном уровне от 4,9 до 7,9 ГГц, с добавлением УФ – от 5,3 до 13,6 ГГц со сдвигом минимума на 5,5 дБ в сторону увеличения частоты. На измене-

ние поведения зависимости повлияло внесение диэлектрических потерь в образец.

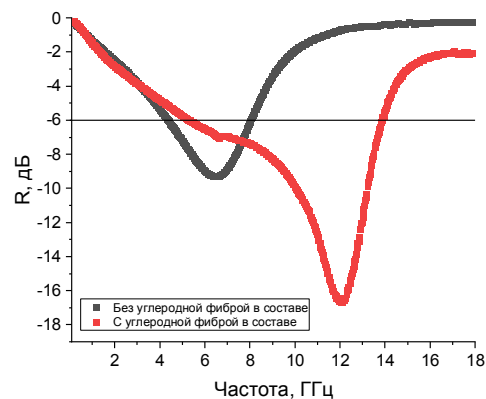


Рис. 1. Спектры коэффициентов отражения образцов композитов

Для моделирования взаимодействия электромагнитных волн с образцами использовалось программное обеспечение CST Studio Suite. Библиотека материалов программы была дополнена спектрами диэлектрической и магнитной проницаемостей, полученными в ходе экспериментальных измерений

Основное внимание в работе уделено влиянию профиля поверхности образца на его электромагнитные параметры. На рисунке 2 представлена модель, используемая для анализа.

Профиль поверхности изменялся по синусоидальному закону:

$$Z(x) = \frac{\sin(ax)}{b}.$$

Для изменения формы поверхности изменялись параметры a , b .

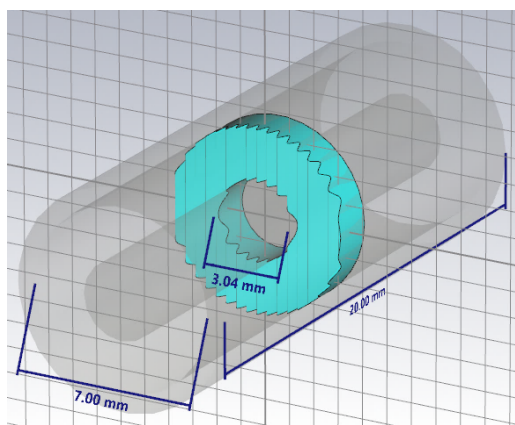


Рис. 2. Модель исследуемого образца

Сравнение коэффициентов поглощения плоского и гофрированного образцов при постоянном параметре $a = 10, 12,5$ и 15 с вариацией параметра b , представлено на рисунках 3 – 5.

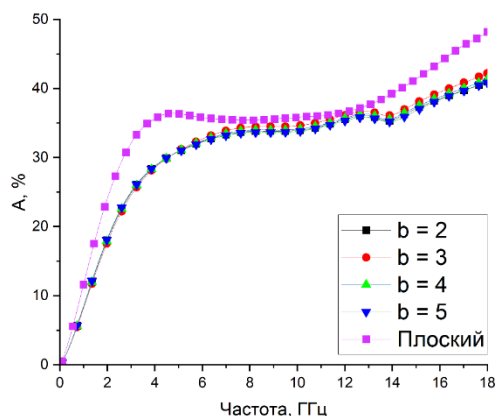


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента поглощения, параметр $a = 10$

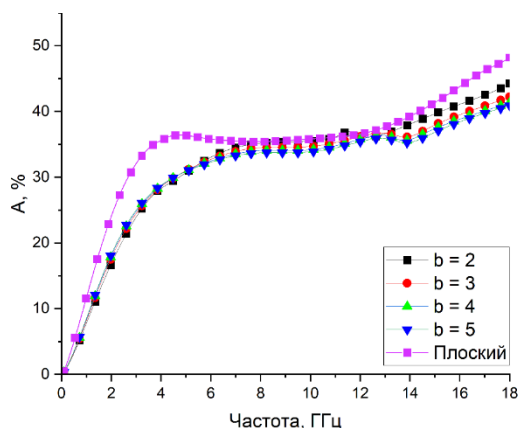


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента поглощения, параметр $a = 12,5$

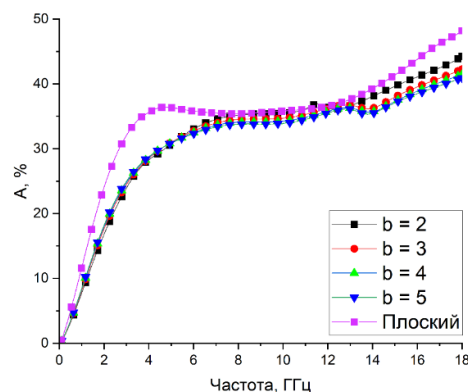


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента поглощения, параметр $a = 15$

Вычисление коэффициента поглощения композита на основе порошка феррита Ni-Zn и углеродной фибры на частотах от 0,01 до 18 ГГц показало, что вариации параметров поверхности до 0,5 мм не влияют на его поглощающую способность.

Это означает, что небольшие неровности на поверхности композита не влияют на его поглощающие свойства, делая его пригодным для использования в качестве согласующего слоя в многослойном материале для снижения отражения электромагнитных волн

Благодарности

Исследование проводилось на оборудовании ЦКП «Центр радиоизмерений ТГУ». Авторы выражают благодарность Журавлеву В.А., Сусляеву В.И. и Дорожкину К.В. (ТГУ) за помощь в проведении измерений.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Список литературы

1. Wagner D. V., Kareva K. V., Zhuravlev V. A., Dot-senko O. A., Minin R. V. Investigation of $BaFe_{12}O_{19}$ hexaferrites manufactured by various synthesis methods using a developed pulsed magnetometer // In-ventions. – 2023. – Vol. 26. – P. 1 – 12.
2. Baker-Jarvis J., Vanzura E., Kissick W. Improved Technique for Determining Complex Permittivity with the Transmission / Reflection Method // Mi-crowave Theory and Technique. – 1990 – Vol. 38, № 8. – P. 1096.
3. Chalapat K., Sarvala K., Li J., Sorin G. Wideband Reference-Plane Invariant Method for Measuring Electromagnetic Parameters of Materials // IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech-niques. – 2009. – Vol. 57, Is. 9. – P. 2257 – 2267.

Устройство для измерения магнитного поля на основе Arduino

Р.Ш. Сайидкулов

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, доцент О.А. Доценко

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: rustamsayidqulov59@gmail.com

Аннотация: В данной работе описано устройство измерения магнитного поля на основе отладочной платы Arduino. Величина магнитного поля измеряется с помощью датчика Холла. Создан виртуальный прибор на основе LabVIEW для соединения датчика Холла с компьютером и автоматической записи измерений.

Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь, магнитное поле, датчик Холла, транзисторно-транзисторная логика, LabVIEW, Arduino.

Экспериментальные приборы играют большую роль в научных исследованиях, потому что без них невозможно провести ни одно научно-практическое исследование. В настоящее время актуальной задачей является создание устройств для научных исследований, которые автоматизируют процесс измерений и позволяют проводить их в более простой и наглядной форме. Интерфейс таких устройств должен быть понятным и простым для использования.

Разработанное экспериментальное устройство предназначено для определения магнитных свойств образцов методом магнитного резонанса.

Магнитный резонанс – это избирательное поглощение энергии электромагнитных волн веществом. Оно обусловлено изменением ориентации магнитных моментов электронов, ионов или атомов. Поглощение происходит из-за расщепления энергетических уровней частиц с магнитным моментом в магнитном поле [1].

На основе явления резонанса при воздействии внешнего поля определяется собственная частота исследуемого образца. Эта характеристика позволяет определить поля и константы анизотропии исследуемых образцов магнитных материалов.

На кафедре радиоэлектроники ТГУ имеется установка для изучения явления ферромагнитного резонанса. Установка включает в себя: генератор СВЧ колебаний, датчик Холла, электромагнит, блок питания и аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В настоящее время появилась задача замены блока АЦП.

Цель работы – разработать виртуальный прибор для измерения магнитного поля.

Программное обеспечение включает в себя: Arduino IDE и LabView. Код датчика Холла был написан с использованием Arduino IDE и загружен в модуль Arduino. В LabView создан виртуальный прибор, позволяющий измерять напряженность магнитного поля и отображать график на экране персонального компьютера.

Среда Arduino IDE предназначена для написания, компиляции и загрузки собственных программ в память микроконтроллера, установленного на плате Arduino-совместимого устройства [2]

Программирование в LabView происходит графически, т.е. отсутствует привычное текстовое описание алгоритма на языке программ высокого уровня [3].

В данной работе для измерения магнитного поля использовался модуль датчика Холла KY-024. Модуль KY-024 – это биполярный, линейный датчик Холла SS49E, подключенный к компаратору LM393 для формирования цифрового TTL выхода [4].

С помощью отладочной платформы Arduino UNO аналоговый сигнал, полученный датчиком, преобразовывается в цифровой сигнал, а результаты измерений отображаются на экране компьютера в виде графика на панели виртуального прибора. Модуль Arduino UNO имеет встроенный 10-битный АЦП, который достаточно эффективен для преобразования аналогового сигнала в цифровой.

На рисунке 1 представлена панель разработанного с помощью программного обеспечения LabVIEW виртуального прибора, а на рисунке 2 – его блок-диаграмма.

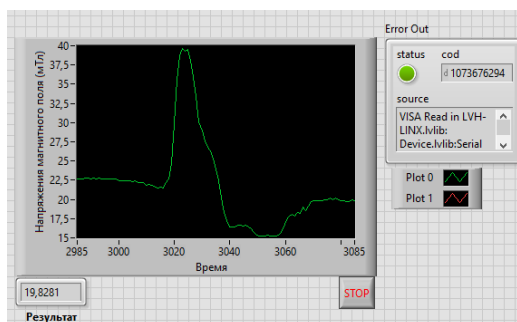


Рис. 1. Зависимость напряженности магнитного поля от времени

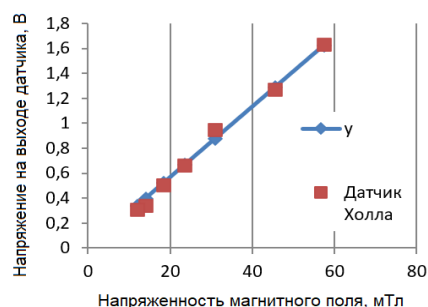


Рис. 2. Калибровочный график

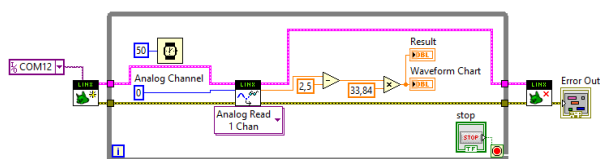


Рис. 2. Блок-диаграмма виртуального прибора

На основной панели виртуального прибора отображается временное изменение магнитного поля и отсчет (результат) в конкретный момент времени.

Калибровка виртуального прибора проводилась в постоянном магнитном поле с помощью миллитесламетра ТПУ-02. Аппроксимирующий полином имеет вид:

$$x = \frac{a+2,574}{0,0283} \quad (1)$$

где a – значение, полученное датчиком Холла.

На рисунке 2 приведен график, построенный на основе проведенных измерений.

По сигналу, передаваемому от генератора, датчик Холла измеряет величину магнитного поля. В АЦП, входящем в Arduino UNO, аналоговый сигнал преобразуется в цифровой и передается на компьютер.

Принятый сигнал автоматически рассчитывается по формуле (1) и отображается на экране компьютера. На рисунке 1 отображен график текущей временной зависимости напряженности магнитного поля, рассчитанный по формуле (1) и отображенный на экране компьютера.

В результате работы был создан виртуальный прибор для проведения измерения магнитного поля. Показано, что разработанный прибор позволяет измерить величину напряженности переменного магнитного поля до 60 мТл.

Благодарности

Я благодарен доценту каф. радиоэлектроники ТГУ Жукову Андрею Александровичу за консультации по программному обеспечению, и доценту каф. радиоэлектроники ТГУ Журавлеву Виктору Алексеевичу за консультации по физике работы установки ФМР.

Список литературы

1. Магнитный резонанс. – URL: <https://bigenc.ru/c/magnitnyi-rezonans-48c2f5> (дата обращения 05.03.2024).
2. Петин В.А. Проекты с использованием контроллера Arduino. – СПб.: БХВ-Петербург, 2017. – 464 с.
3. Загидуллин Р.Ш. LabView в исследованиях и разработках. – М. : Горячая линия. – Телеком, 2005. – 352 с.
4. Модуль линейного датчика Холла KY-024. – URL: <https://duino.ru/datchik-kholla-ky-024> (дата обращения 05.03.2024).

Программно-аппаратный комплекс для сбора агроклиматических данных на основе ESP 32

С.А. Ситников, И.В. Спешилов

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук А.В. Бадьин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: simakina200002@mail.ru

Аннотация: В докладе приведено описание принципа работы программно-аппаратного комплекса для сбора агроклиматических данных, так же приведены результаты сбора агроклиматических данных и их анализ.

Ключевые слова: микроконтроллер, сельское хозяйство, сбор агроклиматических данных.

В современном агробизнесе как никогда важно следить за состоянием почвы, в которой произрастают сорта культурных растений. Агробизнес является одной из ключевых отраслей в мировой экономике и играет важную роль в обеспечении продовольственной безопасности.

Однако, агробизнес сталкивается с множеством проблем, связанных с необходимостью постоянного мониторинга состояния почвы: глубины промерзания, влажности почвы и атмосферного давления воздуха. Для решения этих проблем необходимо внедрять системы сбора, обработки и передачи данных на удаленный сервер. При этом важно учитывать энергоэффективность технических решений для реализации круглогодичной эксплуатации таких систем [4, 5].

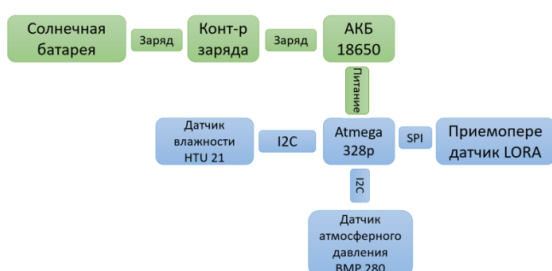


Рис. 1 Структурная схема зонда

Весь программно-аппаратный комплекс состоит из зондов (рис. 1) и базовой станции (рис. 2). Зонды измеряют температуру почвы, атмосферное давление и относительную влажность воздуха. После сбора данных осуществляется их передача по радиоканалу на частоте 868 МГц с типом модуляции LoRa на базовую станцию для дальнейшей их отправки на веб-

интерфейс. Собран зонд на базе микроконтроллера Atmega 328p.

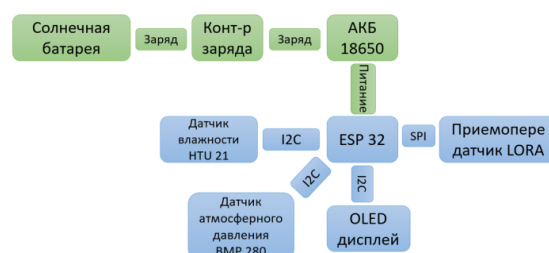


Рис. 2. Структурная схема базовой станции

В свою очередь базовая станция собрана на основе микроконтроллера ESP 32 это связано с тем что, ESP 32 имеет сразу в комплектации Wi-Fi модуль, он нужен обязательно для передачи принятых параметров на сервер. Так же присутствует на плате приёмопередатчик LoRa. Для отслеживания статуса базовой станции предусмотрен OLED дисплей. При включении на него выводится информация о том, что произведено успешное подключение к сети Wi-Fi. После на экране показывается IP адрес, и базовая станция работает в режиме ожидания принятия массива данных от зондов. Так же если базовая станция при каких-то обстоятельствах теряет соединение Wi-Fi сети, то на экране это будет сигнализироваться мигающим в правом верхнем углу крестом.

Когда какой-либо зонд будет выходить на связь с базовой станцией на экран будет выводиться информация о зонде, а именно его номер и время, которое установлено на зонде.

После того как вся информация от зонда передается микроконтроллер формирует JSON строку и отправляет ее на веб-интерфейс, чтобы

конечному пользователю было удобно анализировать собранные зондами данные.

Система электропитания базовой станции идентична зондам, разница заключается только в том, что на зондах стоят солнечные батареи маломощные около 1,5 Вт, а для базовой станции используется солнечная батарея мощностью 20 Вт. Это объясняется тем, что сам микроконтроллер ESP 32 потребляет больше тока чем Atmega 238p, так же более мощная солнечная панель нужна базовой станции чтобы даже в пасмурную погоду аккумуляторные батареи заряжались на полную, для стабильной работы в ночное время суток.

В схеме базовой станции предусмотрено подключение тех же датчиков что и на зондах, на схеме (Рис. 2), к примеру, указаны датчики атмосферного давления BMP 280 и датчик влажности HTU 21. При необходимости можно подключить другие датчики через интерфейс обмена данными I2C и использовать базовую станцию с функциями сбора данных.

На данный момент вся система работает в городе Томск, а именно ботанический сад НИ ТГУ, и в Томском районе на поле, принадлежащее Сибирскому научно-исследовательскому институту сельского хозяйства и торфа [1, 2].

Для анализа возьмем с веб-интерфейса данные с зонда № 17 который был установлен на поле в Томском районе.

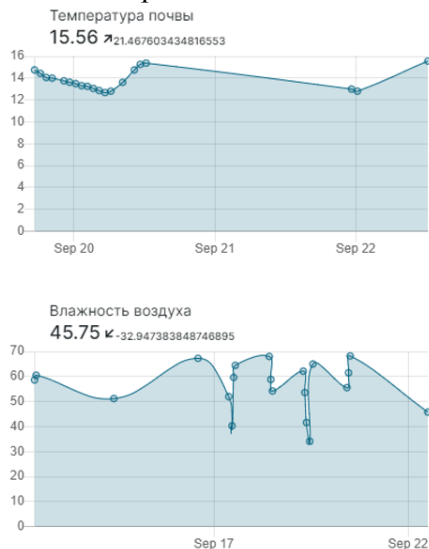


Рис. 3. Рначения температуры почвы и влажности воздуха

Анализируя графики изменения температуры почвы и влажности воздуха (рис. 3), можно

заметить, что после трех часов дня температура почвы начинает уменьшаться. Минимальное значение температуры зафиксированно в десять часов вечера того же дня, температура опустилась до значения двенадцати градусов Цельсия, после чего температура начала подниматься.

Влажность воздуха в момент времени, когда температура почвы минимальна составляет 55 %. На графике (Рис. 3) можно увидеть резкий рост и спад влажности воздуха, вероятнее всего это связано с тем, что параметры были сняты в сентябре, в это время года такие параметры как влажность и температура воздуха могут резко изменяться.

В заключении следует отметить, что использование аппаратно-программного комплекса для сбора агроклиматических данных является эффективным и перспективным решением. Данные решения могут быть использованы не только в сельском хозяйстве, но и в других отраслях, требующих сбора данных о состоянии окружающей среды.

Список литературы

1. Южаков М.С., Берзин А.К., Фильченко Д.И., Бадьин А.В. Программно-аппаратный комплекс по сбору параметров климата для науки // Актуальные проблемы радиофизики АПР-2021: Сборник трудов IX Международной научно-практической конференции. – Томск, 2021. – С. 124–126.
2. Казанин В.А., Минин И.Н., Ситников С.А. Бадьин А.В. Автономная сеть устройств удаленного мониторинга почвенно-климатических параметров в сельском хозяйстве // Электронные средства и системы управления. – 2022. – Т. 2 – С. 235–237.
3. Свистова И.Д., Юрьева Л.В., Пушкарская А.В., Никифорова А.А. Школьный экологический мониторинг по показателям биологической активности // Материалы докладов VI Всероссийской научно-практической конференции, с международным участием. – Махачкала, 2018. – С. 224–227.
4. Иванов А.Л. Инновационные приоритеты в развитии систем земледелия в России // Плодородие. – 2011. – № 4. – С. 1–6.
5. Власенко В.П., Шеуджен З.Р. Анализ ГИС-технологий, применяемых при зонировании земель Краснодарского края для оптимизации использования их в сельскохозяйственном производстве // Плодородие. – 2018. – № 6. – С. 47–50.

Влияние СВЧ-нагрева на изменение внутренней температуры фантомов конечностей человека

П.П. Смыгалина

Научный руководитель: д-р техн. наук, профессор Г.Е. Дунаевский

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: psmygalina@gmail.com

Аннотация: Рассмотрена динамика изменения температуры фантомов конечностей человека различных размеров при их отопреве в воздухе и при наличии теплового СВЧ-воздействия. Проведенные экспериментальные исследования показали принципиальную возможность применения камеры, работающей на частоте ниже критической, в качестве камеры СВЧ-отопрева. Показано увеличение внутренней температуры фантома конечности на значение, достаточное для раскрытия внутренних сосудов, ишемизированных переохлаждением.

Ключевые слова: СВЧ-волны, микроволны, обморожение, температурное распределение, фантомы конечностей.

Холодовая травма (обморожение) является опасным поражением конечностей, которое при неправильном лечении может привести к ампутации (около 90% случаев [1]). Перспективным методом терапии обморожений является СВЧ-отопрев, в ходе которого повышение температуры конечности происходит за счет проникающего теплового воздействия электромагнитного поля [2].

В данной работе рассматривается нагрев фантомов при воздействии СВЧ-поля частоты 460 МГц. В качестве генератора использован аппарат для СВЧ-терапии Ранет ДМВ 20-1, выходная мощность генератора 20 Вт. Конструкция камеры микроволнового отогрева, использованная в эксперименте, построена на основе резонатора, возбуждаемого на частоте ниже критической. Моделирование распределения электромагнитного поля в данной камере используемыми в эксперименте фантомами представлено в работе [3].

Для проведения измерений использовались фантомы конечностей человека: рука ребенка, рука взрослого человека, нога взрослого человека. В качестве оболочки фантомов использовались полые 3D модели из ABS пластика. Наполнитель, имитирующий мышечную ткань, представляет собой гель, обладающий диэлектрическими свойствами мышечной ткани [4].

На рисунках 1 - 3 приведены температурные профили в среднем сечении фантомов по прошествии 90 минут без нагрева, только при теплообмене с воздухом, и после 90 минут СВЧ-нагрева. Изменения внутренней температуры фантомов

производились с помощью погружного термометра [5]. Для охлаждения фантомы помещались в холодильник на сутки, поэтому начальная температура фантомов равна 10 °С и считается одинаковой во всем объеме. Окружающая температура во всех экспериментах равна 24 °С.

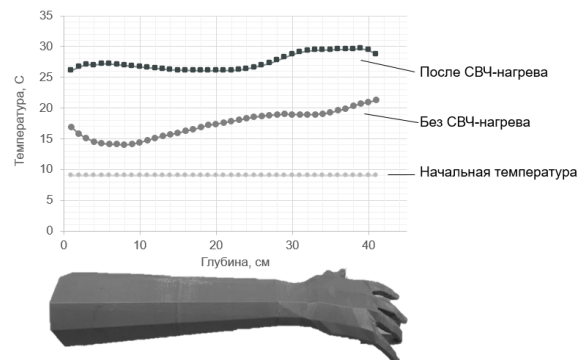


Рис. 1. Внутренняя температура фантома руки ребенка после 90 минут при различном воздействии

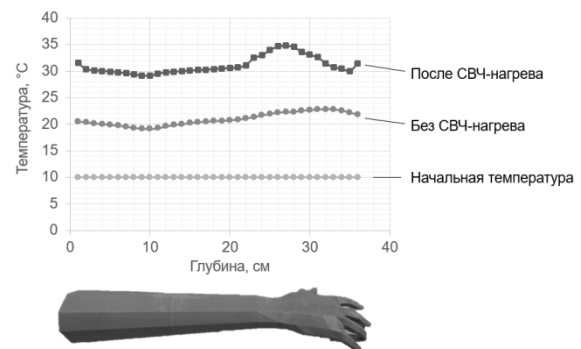


Рис. 2. Внутренняя температура фантома руки взрослого человека после 90 минут при различном воздействии

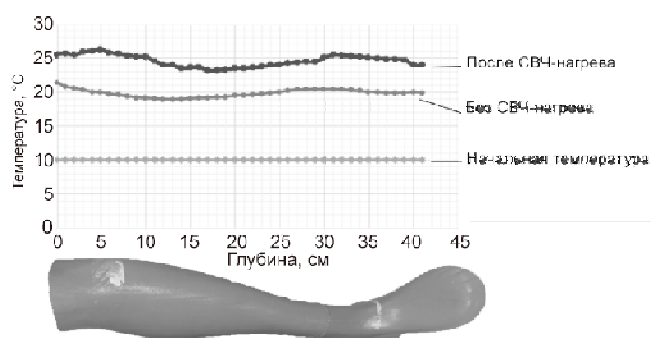


Рис. 3. Внутренняя температура фантома ноги взрослого человека после 90 минут при различном воздействии

Результаты термометрического исследования внутренней температуры фантомов позволяют сделать следующие выводы:

а) Применение СВЧ-нагрева позволяет нагреть фантом конечности на величину от 5 до 10 °С по сравнению с ситуацией, когда фантом находится только при комнатной температуре. Величина данного измерения температуры зависит от размера фантома конечности. Более того применение запредельного волновода позволяет увеличить температуру внутри фантома на значение, достаточное для раскрытия внутренних сосудов, ишемизированных переохладением (более 15 °С).

б) Скорость нагрева фантомов малых размеров (фантом детской руки) в объеме больше, чем для фантомов больших размеров.

в) В зависимости от формы фантома глубинный нагрев может внести перепады в температурное распределение внутри фантома. Наблюдается более сильный нагрев в областях, где конечность сужается.

Список литературы

1. Gavrilin E.V., Dunaevskiy G.E., Antipov V.B. Microwave treatment of cold injuries // Journal of Emergencies, Trauma and Shock. – 2021. – Vol. 14, No. 2. – P. 108–110.
2. Dunaevskiy G.E., Nechaev A.N., Smygalina P.P., Dorofeev I.O. Ch. 2. Microwave Rewarming of Limb Frostbite Injuries (Simulation of Modes) // Microwave Technologies - Recent Advances and New Trends and Applications. – London: IntechOpen Limited, 2023. – doi: 10.5772/intechopen.1002216.
3. Смыгалина П.П. Распределение СВЧ-поля в камере микроволнового отогрева, работающей на частоте ниже критической, при вариации размера конечности // Сборник тезисов, материалы Двадцать седьмой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-27, Екатеринбург). – Ростов-на-Дону : Изд-во АСФ России, 2023. – С. 176 – 177.
4. Hartsgrrove G, Kraszewski A, Surowiec A. Simulated biological materials for electromagnetic radiation absorption studies. Bioelectromagnetics. – 1987. – Vol. 8, No. 1. – P. 29-36. – doi: 10.1002/bem.2250080105.
5. Математическое и физическое моделирование процессов СВЧ-отогрева холодной травмы конечности и формирование плана доклинических испытаний: отчет о НИР / руководитель Г.Е. Дунаевский; Проект № 2.4.8.22.ИГ, выполненный в рамках Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030). Мероприятие 2. – Томск, 2023. – 91 с. – Рег. № НИ-ОКТР 122051200008-6.

Разработка зонда системы сбора агроклиматических параметров с функцией локального резервирования данных

И.В. Снешилов

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук А.В. Бадьин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: aero.ilya@gmail.com

Аннотация: В работе представлен вариант реализации локального резервирования данных внутри зондов системы сбора агроклиматических параметров, используя модуль энергонезависимой памяти в качестве запоминающего устройства.

Ключевые слова: агроклиматические параметры, мониторинг, датчики, энергонезависимая память, микроконтроллер, резервирование данных.

Главным инструментом решения продовольственной проблемы является высокопроизводительное сельское хозяйство, которое достигается за счёт увеличения производительности ограниченного участка земли, а не расширением его площади. Использование систем, осуществляющих своевременный и всесторонний мониторинг текущих почвенно-климатических параметров позволяет строить качественные краткосрочные прогнозы погоды и проводить объективную оценку влияния текущих погодных условий на процесс формирования урожая [1]. Такой системой автономного мониторинга агроклиматических параметров является комплекс «РЭКС-Т» [2], разработка которого ведётся на Радиофизическом факультете Национального исследовательского Томского государственного университета и активно развивается. Система с базовой станцией и зондами в количестве семи штук уже функционирует на поле и покрывает участок поля площадью 3 кв. км. Помимо загрузки данных в сеть Интернет, имеется функция локального хранения данных на внешнем носителе (MicroSD карта) в случае выхода из строя одного из элементов системы передачи. В ходе тестирования системы в зимний период были обнаружены сбои в записи данных на флеш-карту при отрицательных температурах воздуха. Кроме того, применение карт памяти в конструкции зондов привлекает внимание вандалов. В итоге часть информации о параметрах сельскохозяйственного поля была не доступна пользователю.

Целью данной работы является разработка зонда системы сбора агрометеорологических параметров «РЭКС-Т» с функцией локального

резервирования данных с использованием микросхемы энергонезависимой памяти.

Зонд представляет собой цилиндрический пластиковый корпус, на боковой поверхности которого установлена солнечная панель, необходимая для зарядки Li-ion аккумуляторов типоразмера 18650, что обеспечивает необходимую автономность зонда. Для контроля процесса заряда аккумулятора используется модуль заряда аккумуляторов. Внутри корпуса установлена печатная плата, на которой располагаются все составные части зона: микроконтроллер ATMEGA328P, приёмопередатчик LoRa E-19 868M20S, модуль датчика атмосферного давления BMP280, модуль датчика влажности воздуха HTU21, датчик температуры DS18B20, часы реального времени DS3231.

В качестве запоминающего устройства применён модуль энергонезависимой памяти EEPROM AT24C256, технические характеристики которого приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики модуля энергонезависимой памяти EEPROM AT24C256 [3]

Характеристика	Величина
Тип памяти	EEPROM
Объём памяти, Кб	32
Интерфейс	I2C
Максимальная тактовая частота, МГц	1
Время записи, мс	5
Количество циклов записи	1000000
Напряжение питания, В	1,8...5,5
Рабочая температура, °C	-40...+85

Исходя из общего объёма памяти микросхемы и, зная объём массива данных, который необходимо записать, произведены расчеты и оценка количества дней (1), которых потребуется для того, чтобы занять всю память модуля EEPROM, учитывая, что пакеты данных отправляются один раз в час.

$$\frac{V_{eprom}}{V_{data}} \times \frac{1}{24} = \frac{32768}{30} \times \frac{1}{24} \approx 45 \quad (1)$$

где V_{eprom} – объём памяти микросхемы в байтах, V_{data} – вес одного пакета данных в байтах

Таким образом, в режиме локального резервирования данных зонд может проработать около 45 дней.

Обмен данными между микроконтроллером и микросхемой памяти осуществляется с помощью шины I2C [4]. Число ведомых устройств, которые обмениваются данными с ведущим по шине I2C, может достигать 127, так как каждый из них имеет уникальный 7-битный адрес.

Значения с датчиков формируют массив данных, который отправляется на базовую станцию. Этот массив данных резервируется в памяти модуля EEPROM во избежание утери пакета данных при передаче.

При выполнении операции записи микроконтроллер генерирует тактовый сигнал по линии SCL. Сначала, по линии SDA подается стартовый импульс, сигнализирующий о начале передачи данных и отправляется 8-битный адрес микросхемы памяти. Затем, передается два байта, указывающие на номер ячейки (от 0 до 32768), в которую необходимо записать данные. Далее, происходит запись одного байта данных в указанную ячейку памяти. Запись байта завершается [2].

Использование микросхемы памяти EEPROM AT24C256 в корпусе DIP позволяет беспрепятственно её вынимать для дальнейшего считывания сохраненных данных. Чтение данных из микросхем памяти типа EEPROM реализуется с использованием разработанного внешнего устройства, представленного на рисунке 1.

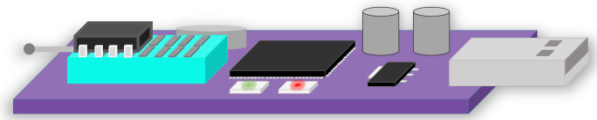


Рис. 1. Модель устройства для чтения памяти EEPROM

На печатной плате устройства установлены микроконтроллер, запрограммированный на чтение содержимого всех ячеек микросхемы памяти EEPROM и их экспорт в текстовый файл в память компьютера; быстрозажимная панель, в которую устанавливается микросхема памяти; разъем USB Type-A для подключения к ПК; светодиоды, которые сигнализируют о процессе передачи и об окончании процесса передачи данных.

Результатом работы стал зонд системы сбора агроклиматических параметров «РЭКС-Т» с функцией локального резервирования данных. Технические характеристики микросхемы памяти EEPROM AT24C256 допускают использование ее при низких температурах, а объём встроенной памяти позволяет локально резервировать необходимое количество массивов данных.

Список литературы

1. Минин И. Н., Бадьин А. В., Ситников С. А. и др. Мониторинг почвенно-климатических параметров в сельском хозяйстве с использованием автономной системы // Актуальные проблемы радиофизики АПР-2023 : Сборник трудов X Международной научно-практической конференции, Томск, 26–29 сентября 2023 года. – Томск : Изд-во ТГУ, 2023. – С. 321–323.
2. Казанин В.А., Минин И.Н., Ситников С.А. Бадьин А.В. Автономная сеть устройств удаленного мониторинга почвенно-климатических параметров в сельском хозяйстве // Электронные средства и системы управления. – 2022. – Т. 2 – С. 235–237.
3. 2-wire Serial EEPROMs AT24C128/ AT24C256. Atmel Corporation. – 2007. – URL: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/226397/ATMEL/AT24C256/151/1/AT24C256.html>.
4. Семенов, Б.Ю. Шина I2C в радиотехнических конструкциях. – М. : СОЛОН-Пресс, 2007. – С. 5–35.

Влияние продольной деформации на электромагнитный отклик анизотропной структуры в терагерцовой области частот

Д.А. Фролова, Д.А. Пидотова

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук А.В. Бадьин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: frolova_d.a@mail.ru

Аннотация: В работе приведена разработка и результаты исследования анизотропной структуры для измерения продольной деформации (механического напряжения). Получены частотные зависимости коэффициента прохождения от продольного удлинения структуры и ориентации вектора напряженности электрического поля. Проведена оценка изменения электромагнитного отклика структуры при продольной деформации.

Ключевые слова: анизотропия, структура, 3D печать, терагерцовое излучение, деформация.

Важным аспектом развития терагерцовой техники является создание материалов, которые бы могли проявлять активное взаимодействие с волнами данного диапазона [1]. При этом 3D-печать позволяет создавать сложные геометрические формы и объединять выбранные функциональные компоненты, обеспечивая новый подход к изготовлению многофункциональных устройств [2]. С помощью 3D-моделирования и печати можно создавать различные поляризационные структуры, используя различные проводящие материалы, которые будут обладать необходимыми резонансными свойствами [3]. Эластомеры являются широко используемым классом материалов, обладающих высокой упругостью и вязкостью, что позволяет подвергаться обратимым деформациям и работать в различных условиях, включая бытовые и экстремальные [5]. В связи с этим целью данной работы является разработка гибкой анизотропной структуры на основе эластомеров методом 3D - печати и исследование их электрофизических свойств в терагерцовой области частот.

В данной работе была разработана и исследована конструкция структуры для измерения продольной деформации (механического напряжения). Изготавливаемая методом 3D печати конструкция представляет собой подложку 20 на 30 мм толщиной 400 мкм из териопластичного полиуретана (TPU) с нанесенной на ней периодической одномерной решеткой (толщина полос $d = 1$ мм, ширина зазора l составляла 500 мкм, 400 мкм и 300 мкм) из композиционного материала (филамента) TPU с 50 масс. % $BaFe_{12}O_{19}$ толщиной 600 мкм (рис. 1).

Длина полос дифракционной решетки составляла 20 мм.

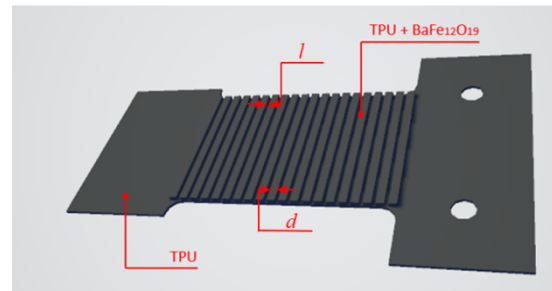


Рис. 1. Модель микроволновой структуры продольной деформации

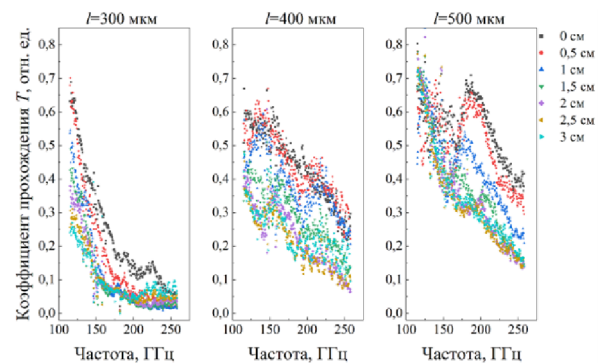


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента прохождения от продольной деформации анизотропной структуры при параллельной поляризации

Частотная зависимость коэффициента прохождения (рис. 2, 3) при различном значении продольной деформации показывает, что методика нанесения аддитивной технологией по-

слоистой наплавления ферритосодержащей одномерной дифракционной решетки на поверхности термопластичного полиуретана пригодна для создания микроволновых структур деформации (механического напряжения).

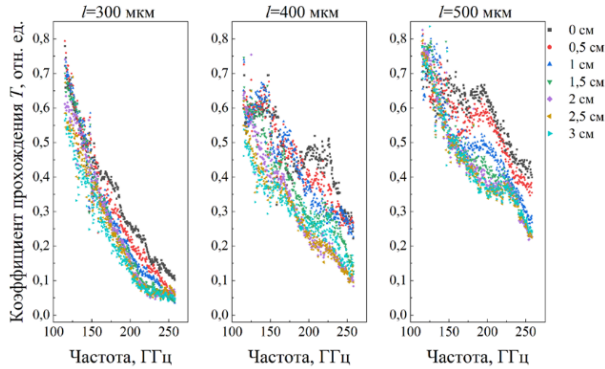


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента прохождения от продольной деформации анизотропной структуры при ортогональной поляризации

В результате исследований получены измеренные коэффициенты прохождения электромагнитного излучения в квазиоптическом тракте в зависимости от продольного растяжения с использованием разработанной конструкции модуля квазиоптического спектрометра СТД-21, предназначенного для продольного растяжения образцов материалов. Измерения проводились в квазиоптическом тракте спектрометра в диапазоне частот 115-258 ГГц при продольной деформации структуры от 5 до 30 мм.

Получены частотные зависимости коэффициента прохождения от продольного удлинения структуры и ориентации вектора напряженности электрического поля (рис. 2, 3).

Проведена оценка чувствительности структуры на продольную деформацию согласно выражению (1).

$$\eta = \frac{\Delta P_{out}}{\Delta P_{in} \times \Delta L}, \quad (1)$$

где ΔP_{out} – мощность прошедшего излучения, ΔP_{in} – мощность падающего излучения; ΔL – продольное удлинение.

Результаты расчета чувствительности приведены в таблицах 1, 2.

Результаты показывают наибольшую чувствительность структуры продольного удлинения при $d=500$ мкм $\eta = 12,7 \times 10^{-3}$ отн. ед./мм.

Таблица 1. Оценка чувствительности при горизонтальном положении полос (вектор напряженности электрического поля сонаправлен с направлением полос дифракционной решетки)

Периодичность, мкм	Чувствительность η , отн. ед. / мм		
	$f=150$ ГГц	$f=185$ ГГц	$f=240$ ГГц
300	$17,1 \times 10^{-3}$	$7,7 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-3}$
400	$11,1 \times 10^{-3}$	$10,1 \times 10^{-3}$	$7,7 \times 10^{-3}$
500	$9,9 \times 10^{-3}$	$21,1 \times 10^{-3}$	$16,1 \times 10^{-3}$

Таблица 2. Оценка чувствительности при вертикальном положении полос

Периодичность, мкм	Чувствительность η , отн. ед. / мм		
	$f=150$ ГГц	$f=185$ ГГц	$f=240$ ГГц
300	$5,3 \times 10^{-3}$	$8,1 \times 10^{-3}$	$4,1 \times 10^{-3}$
400	$4,7 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-3}$	$8,5 \times 10^{-3}$
500	$9,7 \times 10^{-3}$	$12,7 \times 10^{-3}$	$7,3 \times 10^{-3}$

Частотная зависимость коэффициента прохождения показывает, что такая структура пригодна для регистрации деформации (механического напряжения). Наибольшая чувствительность структуры достигает $\eta = 12,7 \times 10^{-3}$ отн. ед./мм. при $d_z = 500$ мкм.

Научное исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 23-29-00895.

Список литературы

1. Бадьин А.В., Дорожкин К.В., Кулешов Г.Е. Диэлектрические свойства композитов на основе полимерных матриц и высокодисперсного углерода в Суб-ТГц диапазоне // Новые материалы и перспективные технологии: Шестой междисциплинарный научный форум с международным участием. – М., 2020. – Т. 2. – С. 39-42.
2. Xu Y. et al. The boom in 3D-printed sensor technology // Sensors. – 2017. – Vol. 17, No. 5. – P. 1166.
3. Badin A. V. et al. Electromagnetic response of 3D printed resonant periodic structures in the EHF range // 2019 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – IEEE, 2019. – P. 143-148.
13. Битарова Д.Т., Коцюева Э.Г. Эластомеры // Научные труды студентов Горского Государственного аграрного университета "Студенческая наука-агропромышленному комплексу". – 2016. – С. 98-100.

Измерение фазы с использованием двухканальной радиосистемы SDR

Р.С. Хаддур, С.А. Аббас, М.А. Щелоков

Научный руководитель: канд. тех. наук И.Ю. Кузьменко

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: raghdakhadour 93@gmail.com

Аннотация: Многоканальное программно-определяемое радио (SDR) представляет собой эффективный инструмент в качестве недорогого приемопередатчика. В традиционных системах антенные решетки часто требуют сложной аппаратной структуры, однако SDR с несколькими синхронизированными каналами предлагает более простое и доступное решение. В данном исследовании используется синхронная двухканальная программируемая радиосистема (p201) для измерения пространственного фазового распределения. Также в статье приводятся оценка точности измерения пространственного фазового распределения с помощью линейного сканера. В материалах статьи представлены практические результаты работы.

Ключевые слова: программно-определяемое радио, разность фаз, длина волны, точность.

В области систем обработки сигналов и связи точное измерение разности фаз играет решающую роль. Будь то в радиолокации, беспроводной связи или радиоастрономии, понимание различий в фазе между сигналами является важным для точной интерпретации данных и калибровки системы. Традиционные методы измерения фазы часто включают сложные аппаратные настройки и специализированное оборудование, что делает их громоздкими и дорогостоящими. Однако появление технологии SDR усовершенствовало эту область, предлагая гибкую, недорогостоящую и доступную альтернативу для измерения разности фаз. Одним из ключевых преимуществ использования SDR для измерения разности фаз является его адаптивность. Платформы SDR могут использоваться как передатчики и приемники для различных частот, что позволяет без проблем применять их в различных задачах. Будь то работа с радиочастотными сигналами, звуковыми частотами или даже оптическими сигналами, SDR может быть настроен для эффективной обработки желаемых входных сигналов. Такое разнообразие функций делает SDR подходящим устройством как в радиолюбительских целях, так и в научно-исследовательских.

Определение разности фаз между двумя зашумленными комплексными сигналами с общей частотой имеет такие применения: оценка размера частиц, оценка скорости в лазерной анемометрии [2], измерение импеданса [3] и калибровка электрической мощности [4]. Общая форма комплексного сигнала:

$$X(t) = A \cdot \exp(j(\omega t + \varphi)) \quad (1)$$

Где $A > 0$ и $\varphi \in [0, 2\pi]$ – обозначают амплитуду и начальную фазу сигнала соответственно, а $\omega = 2\pi f$ – угловую частоту, f – частоту сигнала.

Если сигналы заданы явно как $X_1(t) = A_1 \cdot \exp(j(\omega t + \varphi_1))$ и $X_2(t) = A_2 \cdot \exp(j(\omega t + \varphi_2))$, то разность фаз можно рассчитать путем вычитания фазы первого сигнала из фазы второго сигнала [5]:

$$X = X_1 \cdot X_2^* \quad (2)$$

Система, используемая для измерения разности фаз и их точности, представлена на рисунке 1. Для выполнения этой задачи было использовано SDR (p201) с радиоинтерфейсом AD9361 и процессором Xilinx Zynq 7020, а также генератор 25-12000 МГц в качестве передатчика и линейного скан-

нера 0–1000 мм для изменения расстояния между приемными антеннами.

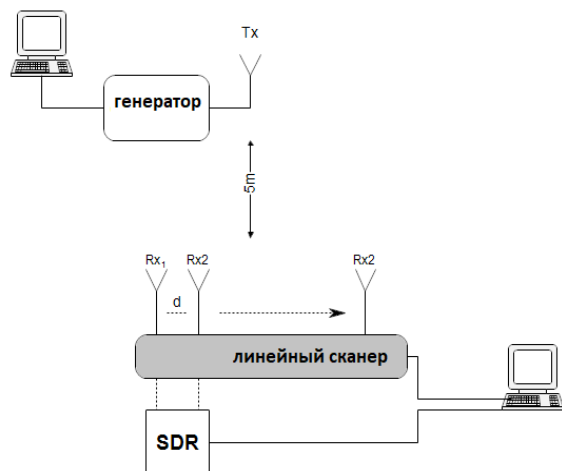


Рис. 1. Система измерения разности фаз и их точности: Tx – передающая антенна, Rx_1 – опорная приемная антенна, Rx_2 – вторичная приемная антенна

Сначала сигнал генератора с частотой 5,7 ГГц без помех передается на расстоянии нескольких метров (5 м) от обеих антенн. После этого механически изменяется расстояние между двумя приемными антеннами.

Для измерения разности фаз одну из приемных антенн (опорную) фиксировали, а другую антенну (вторичную) каждый раз перемещали на расстояние 1 см, вплоть до расстояния 5λ (26 см) вперед и назад:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{5.7 \times 10^9} = 5.2 \text{ см} \quad (3)$$

Данные для каждого канала записывались на всех точках остановки.

На следующем рисунке показана разность фаз между опорными и вторичным сигналами при изменении расстояния между антеннами. Значения разности фаз находятся в диапазоне $(-\pi, \pi)$ как при движении вперед, так и при движении в обратном направлении.

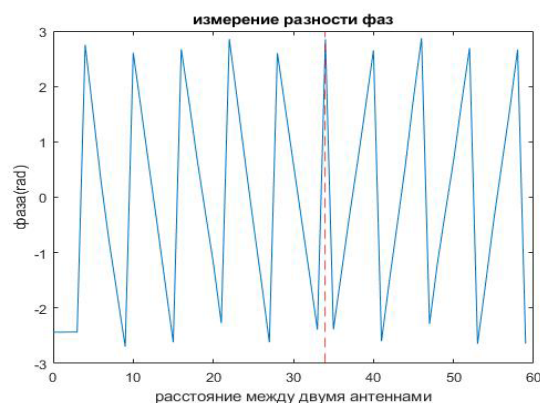


Рис. 2. Разность фаз между ссылочным и вторичным сигналами при изменении расстояния между ними (1 см)

Скачки 2π (фаза, полученная в результате измерений), показанные на рисунке 2, должны быть переведены в непрерывную форму и, следовательно, сделать фазу пригодной для любого анализа или дальнейшей обработки. Этот процесс называется разворачиванием фазы, который избавляет от скачков 2π . Развернутую фазу затем можно использовать для определения расстояния с помощью устройства SDR, как показано на рисунке 3.

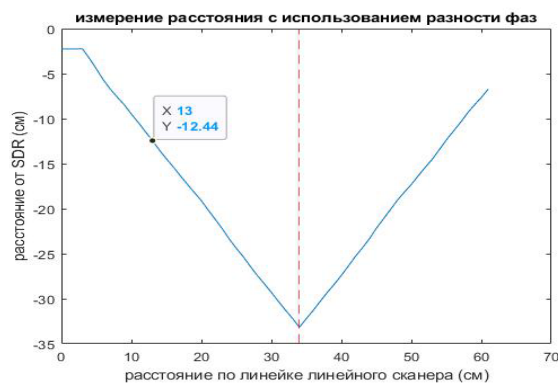


Рис. 3. Измерение расстояния

Точность измерения разности фаз позволяет получить наиболее близкие к реальным значения сдвига фаз между двумя сигналами. Степень достоверности измерения разности фаз имеет важное значение, поскольку она напрямую влияет на производительность и надежность систем, использующих информацию о фазе. В качестве важного результата можно отметить, что SDR можно использовать для точной оценки разности фаз между сигналами, даже если отклонения минимальны. Взаимосвязь между длиной волны, разностью фаз и раз-

ностью расстояния можно описать формулой:

$$\text{phase difference(rad)} = \frac{2\pi \times \text{path difference(m)}}{\lambda(m)} \quad (4)$$

Для измерения точности фазы одна из приемных антенн (опорная) была зафиксирована, а другая антенна (вторичная) каждый раз перемещалась на расстояние 0,1 мм, вплоть до расстояния 2 см. В результате был построен график разности фаз на различной дистанции (рисунке 4).

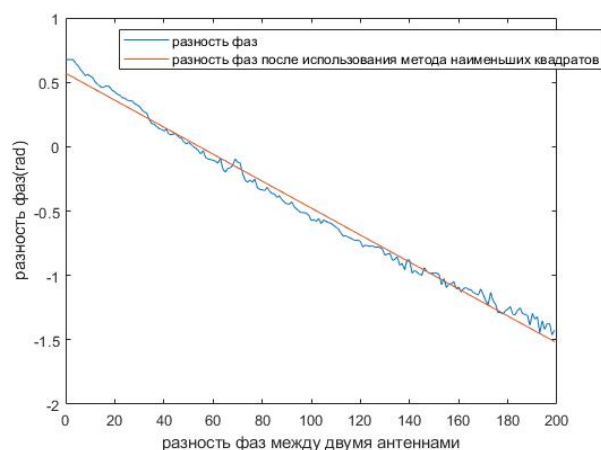


Рис. 4. Разность фаз между опорными и вторичным сигналами при изменении расстояния между ними (0,1 мм)

Разность фаз, которую можно измерить теоретически, составила 0,0119 радиан, или 0,189 % одного полного цикла. В то время как результат, полученный из обработанных данных, после выполнения метода наименьших квадратов (этот метод предполагает нахождение линии (в случае линейной регрессии), которая лучше всего соответствует заданным точкам данных, путем минимизации суммы квадратов разностей между наблюдаемыми и прогнозируемыми значениями в этом направлении) показал, что практическая разность фаз с использованием SDR составляет 0,0106 радиан, или 0,168 % от одного полного цикла, что лучше при сравнении с теоретическим значением. Тогда как значение средней ошибки между значениями разности фаз до и после применения метода наименьших квадратов

равно 0,0034, что является слишком маленькой величиной.

Это исследование продемонстрировало, что SDR является эффективным инструментом в качестве недорогого приемопередатчика, обеспечивающего упрощенную альтернативу традиционным антенным решеткам с интенсивным использованием аппаратного обеспечения. Экспериментальная установка, описанная в этой работе, с использованием SDR (p201) с линейным сканером, позволила точно измерить разность фаз между двухканальными SDR. Практическая разность фаз, полученная с использованием SDR, показывает высокий уровень точности даже по сравнению с теоретическими значениями, где теоретическое значение разности фаз составляло 0,0119 радиан, или 0,189% одного полного цикла. В то время как практическая ценность после использования метода наименьших квадратов 0,0105 радиан, или 0,167 % от одного полного цикла, со средней ошибкой, равной 0,0034.

Список литературы

1. Vd Merwe J.R., Malan J., Maasdorp F.D.V., Du Plessis W.P. Multi-channel software defined radio experimental evaluation and analysis // Proc. SIGE XVI Symposium of Operational Applications in Areas of Defence. – 2014. – P. 102–107.
2. Handel P., Host-Madsen A. Estimation of velocity and size of particles from two channel laser anemometry measurements // Measurement. – 1997. – Vol. 21, No. 3. – P. 113–123.
3. Ramos P.M., da Silva M.F., Serra A.C. Low frequency impedance measurement using sine-fitting // Measurement. – 2004. – Vol. 35. – P. 89–96.
4. Vucijak N.M., Saranovac L.V. A simple algorithm for the estimation of phase difference between two sinusoidal voltages // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2010. – Vol. 59, No. 12. – P. 3152–3158.
5. So H.Ch., Zhou Zh. Two accurate phase-difference estimators for dual-channel sine-wave model // Journal on Advances in Signal Processing. – 2013. – P. 122.

Терагерцовая визуализация многослойных полимерных материалов в аддитивном производстве

Р.Е. Холодов, Д.С. Кателина, А.А. Комарова

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук А.В. Бадьин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: kringener.roman@mail.ru

Аннотация: В работе представлены результаты визуализации текста, напечатанного электропроводящим полимерным материалом, между оптически непрозрачными диэлектрическими пластинами методом послойного наплавления. Визуализация проводилась в квазиоптическом тракте, на частоте 972 ГГц путем двухмерного механического перемещения исследуемого образца относительно падающего излучения. На полученном изображении можно четко определяется часть надписи «ТНеМе».

Ключевые слова: ТГц визуализация, аддитивное производство, полимерные материалы.

Терагерцовое (ТГц) излучение – это электромагнитное излучение, частота которого лежит в диапазоне 0,1–10 ТГц [1]. ТГц визуализация – это технология с высоким пространственным разрешением, использующая неионизирующие электромагнитное излучение.

ТГц-волны могут распространяться через легковоспламеняющиеся жидкости, не вызывая горения, поэтому, они пригодны для целей обеспечения безопасности [2] и обнаружения газов. Более того, многие материалы демонстрируют свои «спектральные отпечатки» в этом диапазоне. ТГц-излучение очень чувствительно к полярным молекулам, таким как вода [3], но оставаясь прозрачным для неполярных молекул, таких как пластмассы, керамика, бумага, ткани, жиры и т.д. Эти отчетливые ТГц отклики являются основой, как для характеристики материалов, так и для спектроскопической визуализации [4].

Применение терагерцовой визуализации сосредоточено на обнаружении клеток [5], скрытых объектов, обеспечении безопасности и качества пищевых продуктов [6], а также мониторинге уровня воды в листьях растений.

Для визуализации контрастных дефектов диэлектриков непрозрачных в видимом и инфракрасном диапазонах, терагерцовое излучение имеет высокий потенциал [7]. По сравнению с классически используемыми микроволновыми системами, терагерцовое излучение позволяет достичь значительно более высокого разрешения.

Дефекты при аддитивном производстве могут привести к выходу из строя детали или

целого устройства, если не обнаружить и не исправить их заранее.

Для эксперимента была собрана установка (рис. 1).

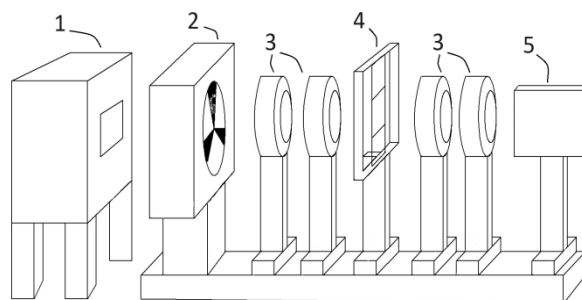


Рис. 1. Схема установки: 1 – генератор, 2 – обтюратор, 3 – линзы, 4 – позиционер, 5 – детектор

Генератор (лампа обратной волны) создает непрерывное терагерцовое излучение, которое модулируется обтюратором. Фокусировка электромагнитного излучения в квазиоптической линии осуществлялась тефлоновыми линзами. Исследуемый образец, закрепленный в двумерном позиционере [8]. В качестве детектора применялся акустооптический преобразователь (ячейка Голея). В каждой точке плоскости объекта регистрировалось значение интенсивности прошедшего ТГц излучения.

В ходе работы был изготовлен объект, смоделированный и напечатанный на 3D-принтере (рис 2.)

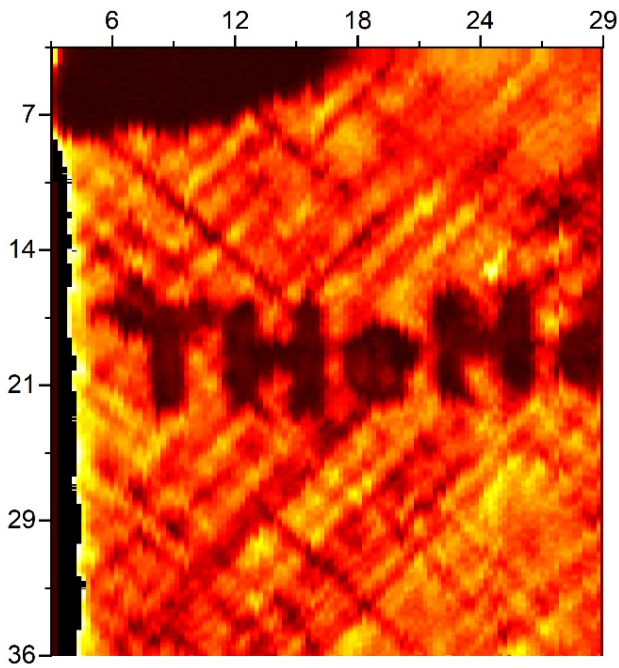


Рис. 3. Финальный результат



Рис. 2. 3D-модель исследуемого объекта

Образец квадратной формы размером 45x45 мм состоял из шести слоев:

- первые два слоя толщиной 400 мкм из акрилонитрилбутадиенстирола (АБС);
- вторые два слоя из электропроводящего АБС (фирма «Mellow», Китай)
- третья пара слоёв толщиной 400 мкм из АБС.

Общая толщина образца составила 1062 мкм.

Изготовление образца производилось на 3D-принтере Pruso i3 методом послойного наплавления с использованием сопла с диаметром 400 мкм. Температура стола в процессе 3D-печати составляла 110 °С, сопла – 230 °С. Скорость подачи филамента составляла 40 мм/мин.

Образец был сканирован попиксельно, и мы получили матрицу размерностью 116 на 510 пикселей. После программной обработки полу-

чено изображение запечатанного в образце текста (рис. 3).

На изображении удалось увидеть четкие очертания букв надписи «ТНеМе», нанесенной электропроводящим материалом между слоев диэлектрика. На изображении можно идентифицировать структуру подложки диэлектрика, нанесенного крест-накрест под прямым углом. Мелкие буквы не так хорошо детализированы, потому что просвет в букве «е» по диаметру меньше длины волны. В левом верхнем углу находится область полного поглощения, которая представляет собой пластичную массу, используемую для закрепления объекта.

Таким образом, наше исследование показывает перспективу применения ТГц излучения в дефектоскопии изделий, получаемых методом 3D печати послойным наплавлением. Это позволит снизить долю брака продукции выпускаемой аддитивными производствами.

Научное исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 23-29-00895.

Список литературы

1. Anitha V., Beohar A., Nella A. THz imaging technology trends and wide variety of applications: a detailed survey // *Plasmonics*. – 2023. – Vol. 18, No. 2. – P. 441–483.
2. Hocine M., Hamid Z., Mohamed L. Concealed objects detection and recognition in active transmission sub-terahertz imaging scanner for automatic security screening // *Optical Engineering*. – 2024. – Vol. 63, No. 3. – P. 033102–033102.
3. Shchepetilnikov A. V. et al. Quantitative analysis of water content and distribution in plants using terahertz imaging // *Optical Engineering*. – 2020. – Vol. 59, No. 6. – P. 061617–061617.
4. Jiang Y., Ge H., Zhang Y. Quantitative analysis of wheat maltose by combined terahertz spectroscopy and imaging based on Boosting ensemble learning // *Food chemistry*. – 2020. – Vol. 307. – P. 125533.
5. Nikitkina A.I. et al. Terahertz radiation and the skin: a review // *Journal of Biomedical Optics*. – 2021. – Vol. 26, No. 4. – P. 043005–043005.
6. Rawson A. et al. Recent advances in terahertz time-domain spectroscopy and imaging techniques for automation in agriculture and food sector // *Food Analytical Methods*. – 2022. – Vol. 15, No. 2. – P. 498–526.
7. Mansourzadeh S. et al. High-power lensless THz imaging of hidden objects // *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9. – P. 6268–6276.
8. Badin A. V. et al. Quasi-optical 2D system for non-contact non-destructive testing of defects in natural and artificial crystals // *Proc. SPIE*. – 2017. – Vol. 10466. – P. 462–466.

Автоматизированная система управления высокотемпературного нагревателя

Д.В. Чернышев, А.А. Яценко

Научный руководитель: Кушнарев Б.О.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: XchernyshevX@mail.ru

Аннотация: В данной работе представлены конструкционные особенности, схема управления и принцип работы автоматизированной системы управления высокотемпературного нагревателя.

Ключевые слова: контроль нагрева, система управления блоком питания, автоматизация.

Для исследования характеристик полупроводниковых материалов зачастую используются высокотемпературные нагревательные камеры с возможностью изменения газовой среды, для изучения свойств помещенных материалов [1,2,3,4].

Существует множество различных вариантов автоматизированных систем управления нагревателем, осуществляющих плавный нагрев и удержание температуры в различных режимах [5]. Однако данные решения довольно дорогие.

Целью данной работы является разработка автоматизированной системы управления нагревом путем изменения управляющих параметров не программируемого импульсного блока питания постоянного тока (БППТ).

В ходе разработки был получен следующий вид интеграции блока управления в конструкцию стенда-нагревателя представленного на рисунке 1, где 1 – БППТ; 2 – управляющий вывод блока управления (БУ); 3 – силовые провода БППТ; 4 – БУ; 5 – контакты термопары; 6 – нагревательная камера; 7 – трубки охлаждения; 8 – система водяного охлаждения (СВО).

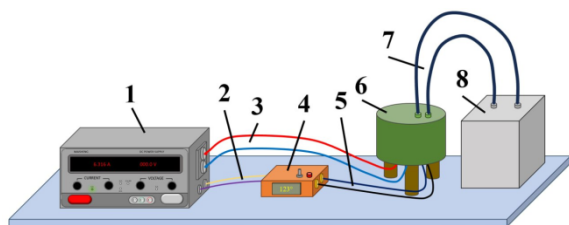


Рис. 1. Нагревательная установка

Принцип работы установки, следующий: для начала работы с устройством необходимо включить блок управления и выставить необхо-

димую температуру нагрева, а также включить систему охлаждения и продувки камеры. В дальнейшем БУ начнет плавно изменять управляющее напряжение, приходящее на блок питания постоянного тока, пока не достигнет нужной температуры. При достижении установленной температуры, она будет автоматически поддерживаться в заданном значении. После установления необходимой температуры можно производить все необходимые измерения. Подобные системы используются для термического анализа, например, при изучении магнитных и оптических свойств материалов, дифференциально-термического анализа, анализа выделяемых газов и визуально-политермического анализа.

БУ обрабатывает входящие показания температуры и на их основе управляет БППТ. Температура нагревательной камеры может изменяться в диапазоне от 0 до 1100 градусов Цельсия, поэтому для измерения температуры используется термопара S – типа (платинородий-платиновая термопара). Исходя из диапазона измеряемых температур, значение напряжения на контактах термопары изменяется от 0 мВ до 10,757 мВ. Диапазон работы АЦП, на используемой аппаратной платформе Arduino Uno на базе микроконтроллера ATmega328, составляет от 0 до 5 В и при разрядности 10 бит шаг между выдаваемыми значениями будет 4,8 мВ, поэтому для считывания температуры сигнал с термопары необходимо предварительно усилить. Для этого используется схема неинвертирующего усилителя на базе ОУ LM358.

Обратной связью для системы автоматической регулировки служит снимаемое с контактов термопары усиленное напряжение позволяющее определить текущую температуру

внутри нагревательной камеры. Однако усилитель лишь усиливает сигнал, не искажая его формы, что не исключает возможность скачков напряжения на контактах термопары, что в дальнейшем может привести к неправильному определению температуры, поэтому первое, что нужно сделать с полученным сигналом, это усреднить его по времени, нивелируя ошибки термопары. Для преобразования полученного напряжения с термопары в температуру, воспользуемся функцией, построенной на основе значений ТЭДС, взятых из градуировочной таблицы для используемого типа термопары. График зависимости ТЭДС от температуры и сопутствующая функция, по которой вычисляется температура, представлены на рисунке 2.

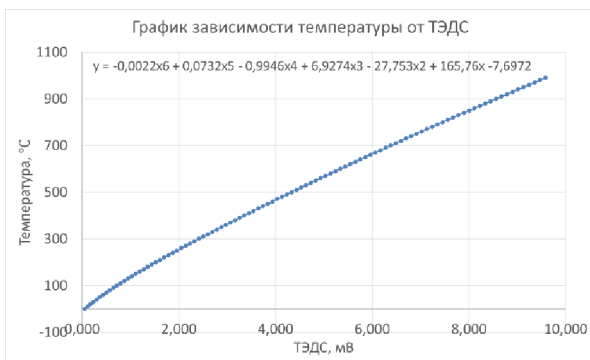


Рис. 2. График зависимости температуры от ТЭДС и аппроксимирующая его функция

На основе разности полученных значений текущей и установочной температур производится плавный нагрев согласно заданному алгоритму. В основе работы алгоритма лежит параболическая функция, обеспечивающая изменение скорости роста значения управляющего напряжения, приходящего на БППТ, в зависи-

мости от удаленности текущей температуры от целевой. Данный алгоритм позволяет компенсировать температурную инерцию нагревателя и предотвращает “раскачивание” управляющего напряжения при достижении установленной температуры.

Результатом работы является готовая система автоматизированного управления высокотемпературным нагревателем в измерительной установке для изучения свойств полупроводниковых материалов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-79-10043-П.

Список литературы

1. Moos R., Muller R., Plog C. et al. Selective ammonia exhaust gas sensor for automotive applications // Sensors and Actuators B: Chemical – 2002. – Vol. 83, Is. 1–3. – P. 181–189.
2. Fleischer M., Meixer H. Selectivity in high-temperature operated semiconductor gas-sensors // Sensors and Actuators B: Chemical. – 1998. – Vol. 52, Is. 1–2. – P. 179–187.
3. Oszwaldowski M., Berus T. High temperature Hall sensors // Sensors and Actuators A: Physical. – 2007. – Vol. 136, Is. 1. – P. 234–237.
4. Majdi S., Gabrysc M., Suntornwipat N. et al. High-temperature deep-level transient spectroscopy system for defect studies in wide-bandgap semiconductors // Review of Scientific Instruments – 2019. – Vol. 90. – 063903.
5. Микроустановки зондового контроля NEXTRON. – URL: <https://www.czl.ru/catalog/special/micro-probe-station/> (дата обращения: 20.03.2024).

ОПТИКА, ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА

Банк данных и анализ оптических характеристик ледяных частиц для интерпретации данных лазерного зондирования перистых облаков

А.Е. Бабинович^{1,2}, Е. Бакуте¹

Научный руководитель: д-р физ.-мат. наук, профессор А.В. Коношонкин^{1,2}

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет

² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

E-mail: anastasiababinovich@gmail.com

Аннотация: Работа направлена на создание оптической модели перистых облаков для последующего использования специалистами корпораций «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» и Роскосмос в задаче повышения количества благоприятных дней для калибровки положения спутников на орбите.

Ключевые слова: рассеяние света, приближение физической оптики, атмосферные ледяные кристаллы, перистые облака, лазерное зондирование.

ГЛОНАСС – российская спутниковая система навигации предоставляет трансляцию сигналов, доступных в любой точке Земли, применяется для наземного, водного и авиационного транспорта, поиска и спасения, персональной навигации и многих других направлений. Однако для её точной работы требуется регулярная калибровка и мониторинг: нужно точно знать местоположение спутников. Для этого используется лазерный луч и атомные часы, установленные на Земле и на самом спутнике, которые позволяют определить расстояние до системы с точностью до нескольких сантиметров.

Но данный зарекомендованный и отлаженный процесс может применяться только при абсолютно ясном небе, что наблюдается достаточно редко: облака почти всегда присутствуют на небе, при чем самых разных типов: от жидко-капельных до кристаллических. По своей физической природе, свет, проходя через различные среды, меняет свою скорость. При прохождении же через облако свет замедляется, а поскольку наша задача состоит в точной калибровке, эта задержка создает достаточно большую проблему.

Для того чтобы понять свойства света в облаке нужно провести соответствующие расчеты для каждой частицы внутри него. Перистых (кристаллические) облака, располагающиеся преимущественно в умеренных широтах и в полярных регионах Земли, на высотах 6-12 км, являются существенным фактором неопреде-

ленности в исследовании климата планеты [4]. Размеры ледяных частиц, из которых состоят кристаллические облака, варьируются от 10 до 1000 мкм [9], а геометрическая форма в своей основе имеет вид гексагональной призмы. В отличие от сферических частиц жидко-капельных облаков, изучать процесс рассеяния света на кристаллических частицах достаточно сложно в силу разнообразия форм и фактора пространственной ориентации [3]. Агрегаты кристаллических частиц, которые составляют существенную фракцию частиц в кристаллических облаках, по-прежнему остаются малоизученными из-за того, что принципиально отличаются от единичных частиц [1]. Частицы, из которых они состоят, могут отличаться по количеству, размеру, форме, степени разреженности и взаимному расположению.

По мере решения данной задачи были созданы различные подходы к ней, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Например, методами конечных разностей во временной области или дискретных диполей [5] можно получить точное решение задачи рассеяния света, однако сложность их вычисления разительно возрастает с увеличением размера частицы, и эффективность вычислений можно поддерживать лишь для частиц размером до 10 мкм. При этом реальный размер частиц в облаках в основном колеблется в диапазоне 30–300 мкм. С другой стороны поставленную задачу можно было бы решать в приближении хорошо известного приближения геометрической

оптики, однако для задач лазерного зондирования атмосферы основной интерес представляет обратное рассеяние света, в котором приближение геометрической оптики содержит сингулярность из-за эффекта уголкового отражения. Для преодоления указанных недостатков в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН разработано приближение физической оптики, основанное на алгоритме трассировки оптических пучков [7].

Благодаря разработанному приближению физической оптики могут быть получены решения для кристаллических частиц. Приближение физической оптики основано на алгоритме трассировки пучков, который похож на алгоритм трассировки лучей, но работает с плоскопараллельными оптическими пучками. В этом алгоритме частица, рассеивающая свет, состоит из граней, состоящих из вершин с трехмерными координатами. Алгоритм разбивает свет, падающий на грани, на пучки. Эти пучки распространяются в частице и могут быть многократно разделены на преломленные и отраженные пучки, прежде чем они покинут частицу и рассеются. Данный метод рассчитывает рассеянное поле в ближней зоне в рамках приближения геометрической оптики, а при переходе к дальней зоне учитываются дифракция и интерференция. Однако расчет дифракции для каждого рассеянного пучка – очень затратная операция, особенно для случая произвольно ориентированных частиц в облаке. Больше всего время расчета в приближении физической оптики возрастает с увеличением количества граней в частице.

На данный момент с целью повышения количества благоприятных для калибровки спутника дней по всему миру строятся чрезвычайно дорогостоящие центры. Благодаря же использованию уже полученных предварительных данных для среднестатистического кристалла, возможно увеличить количество благоприятных дней на 20-30%, что представляет собой как экономическую выгоду, так и повышение независимости и безопасности страны и данных, которые могут быть получены посредством использования системы. Наша работа направлена на расчет характерных для перистых облаков кристаллов для последующего использования специалистами корпораций НПК СПИ и Роскосмос.

Кроме того, актуальность данной работы также выражена и тем, что перистые облака оказывают влияние на радиационный баланс нашей планеты и, соответственно, играют важ-

ную роль в формировании климата. Изучение их оптических свойств требует решения задачи рассеяния света на ледяных несферических частицах. Немаловажно и то, что в связи с перспективами развития Российской орбитальной станции (РОС), начало формирования которой намечено на период 2028 года, возникает необходимость в проработке инструментов базового модуля станции – Научно-энергетического модуля (НЭМ), концепция которого предполагает установку на нем поляризационного лидара, который позволит непрерывно получать информацию о состоянии атмосферы Земли

Своевременное создание оптической модели перистых облаков позволит вовремя сформулировать необходимые предложения по техническим характеристикам космического лидара и внести соответствующие изменения в конструкцию лидара для его максимально эффективного использования.

Однако для разработки оптической модели необходимо построение базы данных матриц обратного рассеяния света, созданной как с учетом технических характеристик конкретного космического лидара (угла поля зрения, используемых длин волн, каналов поляризации и т.д.), так и с учетом многообразия микрофизических характеристик перистых облаков – размеров и форм кристаллов, их пространственной ориентации и концентрации, показателя преломления и т.д. [2]. Важно понимать, что практический интерес представляют не сами матрицы рассеяния света в зависимости от пространственной ориентации частицы и ее физических параметров, а их усредненные значения, соответствующие характеристикам конкретного облака. В перистых облаках усреднение происходит как по пространственной ориентации частиц, так и по распределению частиц по размерам.

На основе матрицы обратного рассеяния света удобно вычислить коэффициент обратного рассеяния β , деполяризационное отношение δ , спектральное отношение χ и лидарное отношение S , которые непосредственно измеряются при лазерном зондировании по формуле (1).

$$\beta = cM_{11}; \delta = \frac{M_{11} - M_{22}}{M_{11} + M_{22}}; \chi = \frac{M_{11}(\lambda_1)}{M_{11}(\lambda_2)}; S = \frac{c\sigma_{ext}}{\beta} \approx \frac{2s}{M_{11}}, \quad (1)$$

где c – константа, характеризующая концентрацию частиц в облаке, σ_{ext} – сечение экстинкции, которое для крупных хаотически ориентированных частиц с достаточно хорошей точностью может быть принято как удвоенная средняя площадь проекции частицы s .

Основная сложность в построении оптической модели перистых облаков заключается в недостаточном количестве экспериментальных данных, описывающих параметры ледяных кристаллов перистых облаков. В частности для вычисления матрицы M_2 необходимо иметь надежную информацию о распределении частиц в облаке по глубине полости. К счастью С.Г. Schmitt и А.Д. Heuymfield в 2007 году провели такое исследование. Согласно этому исследованию существует зависимость глубины полости от размера кристалла.

Важно отметить, что в реальном облаке наблюдается смесь кристаллов различной формы. Поэтому решение строилось как для хаотически ориентированных ледяных гексагональных столбиков, так и для частиц неправильной формы.

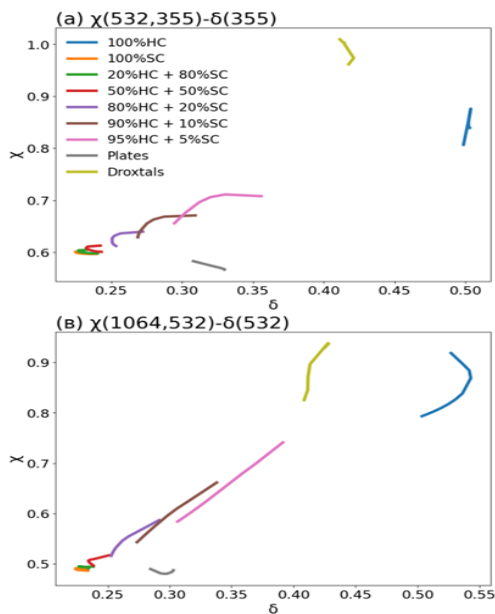


Рис. 1. Диаграммы зависимости лидарных параметров для смеси идеальных столбиков (SC) и полых столбиков (HC) в различных пропорциях: (а) – зависимость $\chi(532,355)$ от $\delta(355)$; (в) – зависимость $\chi(1064,532)$ от $\delta(532)$

В качестве примера, на основе банка данных, были построены измеряемые лидаром оптические характеристики для типичных длин волн (0,355; 0,532; 1,064 мкм), а именно: спектральное χ , деполаризационное δ и лидарное S отношения. Оптические характеристики перистого облака, усреднённые по размерам, как функции эффективного радиуса частиц в облаке для различных пропорций смеси идеальных (SC) и полых (HC) столбиков представлены на рисунках 1 и 2.

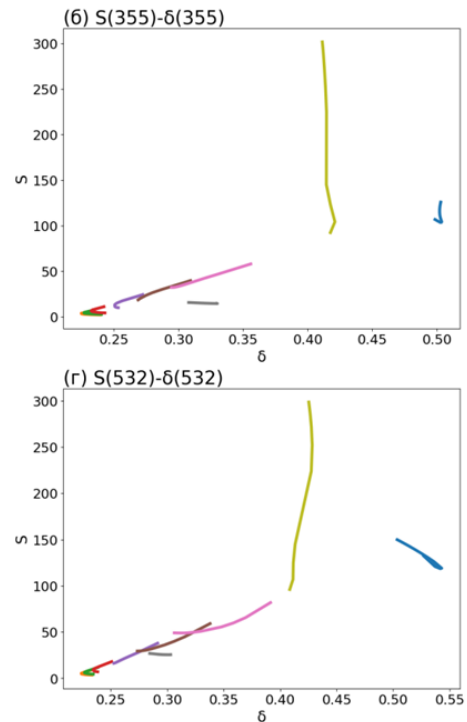


Рис. 2. Диаграммы зависимости лидарных параметров для смеси идеальных столбиков (SC) и полых столбиков (HC) в различных пропорциях: (б) – зависимость $S(355)$ от $\delta(532)$; (г) – зависимость $S(532)$ от $\delta(532)$

Подтверждено, что добавление даже 5% идеальных столбиков к полым приводит к резкому уменьшению лидарного отношения, что хорошо согласуется с данными экспериментальных наблюдений, подтверждая гипотезу, о том, что полые столбики в перистых облаках в чистом виде не встречаются.

Результаты исследования также показывают, что коэффициент обратного рассеяния для смеси также сильно отличается от характеристик обратного рассеяния идеальных и полых столбиков. Добавление идеальных столбиков к полым приводит к быстрому смещению характеристик смеси в сторону идеальных столбиков с ростом их доли. Количество рассеянной энергии в направлении рассеяния назад также резко увеличивается с ростом эффективного радиуса частиц в облаке. При этом деполаризационное и лидарное отношение слабо меняются с ростом эффективного радиуса частиц, очередной раз, показывая, что использование лидаров на длинах волн 0,355, 0,532 и 1,064 мкм мало перспективно для восстановления размера частиц в облаке. Тем не менее, все характеристики оказались чувствительными к пропорции частиц в облаке.

Анализ спектрального отношения для облака показал, что спектральное отношения для облака только идеальных частиц равно 0,5 для пары 1,064/0,532 и 0,6 для пары 0,532/0,355, а для облака полых столбиков лежит в окрестности 0,8–0,9 для обеих пар. Для облака, состоящего из смеси, спектральное отношение монотонно переходит между этими значениями.

Анализ, показал, что если доля полых столбиков более 50%, то удастся восстановить долю полых столбиков в облаке, особенно по диаграмме спектральное-деполяризационное отношение, где зависимость практически линейная. При этом диаграммы, полученные для смеси полых и идеальных столбиков не перекрываются с диаграммами идеальных гексагональных пластинок и дроксталлов, что имеет важное значение для практического применения полученной нами оптической модели при интерпретации реальных лидарных данных.

Таким образом, в ходе исследования было выявлено, что выбранный подход позволяет отличать частицы гексагональной формы от частиц произвольной формы и дроксталлов, а также восстанавливать форму частиц при следующих условиях: необходимо иметь лидар с парой длин волн, возможность построения спектрального отношения для этой пары длин волн, а также возможность измерять лидарное и деполяризационное отношение на любой из предложенных длин волн.

В результате исследования была создана надежная оптическая модель хаотически ориентированных кристаллов, которая позволит улучшить существующие алгоритмы калибровки положения спутников ГЛОНАСС на орбите сотrudниками НПК СПИ и Роскосмос.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ No. 23-77-01084,
<https://rscf.ru/project/23-77-01084>.*

Список литературы

1. Liou K.N. Influence of Cirrus Clouds on Weather and Climate Processes - a Global Perspective // Mon. Weather Rev, 1986 – Vol. 114 – P. 1167–1199.
2. Okamoto, H., Sato, K., Borovoi, A., Ishimoto, H., Masuda, K., Konoshonkin, A., Kustova, N. Interpretation of lidar ratio and depolarization ratio of ice clouds using spaceborne high-spectral-resolution polarization lidar // Optics Express. – 2019 – Vol. 27. – P. 36587-36600.
3. Кан Н.В., Тимофеев Д.Н., Коношонкин А.В., Бабинович А.Е. Сравнение характеристик рассеяния света на хаотически и квазигоризонтально ориентированных атмосферных ледяных кристаллах // Юбилейная XXX конференция Аэрозоли Сибири. – Томск, 2023. – С. 7.
4. Шишко В.А., Бабинович А.Е., Тимофеев Д.Н., Коношонкин А.В., Кустова Н.В. Характеристики обратного рассеяния света для типичных моделей атмосферных агрегатов в рамках приближения физической и геометрической оптик // Материалы 21-й международной конференции Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. – Москва, 2023. – С. 61.
5. Zubko E., Shmirko K., Pavlov A., Sun W.B., Schuster G.L., Hu Y.X., Stamnes S., Omar A., Baize R.R., McCormick M.P., Loughman R., Arnold J.A., and Videen G. Active remote sensing of atmospheric dust using relationships between their depolarization ratios and reflectivity // Opt. Lett. – 2021– Vol. 46. – P. 2352–2355.
6. Ткачев И. В., Тимофеев Д. Н., Кустова Н. В., Коношонкин А. В. Банк данных матриц обратного рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах размерами 10–100 мкм для интерпретации данных лазерного зондирования // Оптика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 34, № 03. – С. 199–206. – DOI: 10.15372/AOO20210306.
7. Коношонкин А. В., Кустова Н. В., Шишко В. А., Тимофеев Д. Н., Ткачев И. В., Бакуте Е., Бабинович А. Е. Характеристики обратного рассеяния света на полых ледяных гексагональных столбиках для построения оптической модели перистых облаков // Оптика атмосферы и океана. – 2023. – Т. 36, № 12. – С. 1013–1019.

Азотсодержащие центры окраски алмаза в спектрах электролюминесценции

Л.А. Васильева, З.И. Бородулин

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук Е.И. Липатов

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: wassil_93@mail.ru

Аннотация: В данной статье рассматриваются NV-центр и N_2V -центр в качестве перспективных источников одиночных фотонов.

Ключевые слова: центры окраски, NV-центр, N_2V -центр, спектр электролюминесценции, источник одиночных фотонов.

Для практической реализации квантовых линий связи необходимы источники одиночных фотонов, которые могут быть построены на центрах окраски в алмазе [1]. Центры окраски представляют собой примесно-дефектные дефекты, которые влияют на цвет, пропускание, электрические свойства алмаза. Азот является основной примесью в алмазе и может встраиваться в виде одиночного замещающего азота и азотных комплексов: NV, N_2V , N_2 , N_3V , N_4V , N_4V_2 [2]. В данной работе были рассмотрены NV и N_2V центры и их влияние на электролюминесценцию.

При рассмотрении двух образцов с разными центрами окраски были измерены спектры поглощения и электролюминесценции (рис. 1, 2).

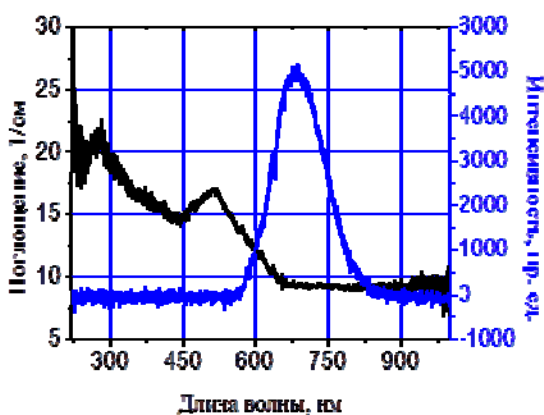


Рис. 1. Спектры поглощения и электролюминесценции образца C122

На рисунке 1 представлены спектры люминесценции и спектр поглощения образца C122. Спектр данного образца коррелирует со спектром NV центра, измеренного при фотолюминесценции. БФЛ на длине волны 636 нм, а из-

лучение происходит на 680 нм. На рисунке 2 представлен спектр образца C130.

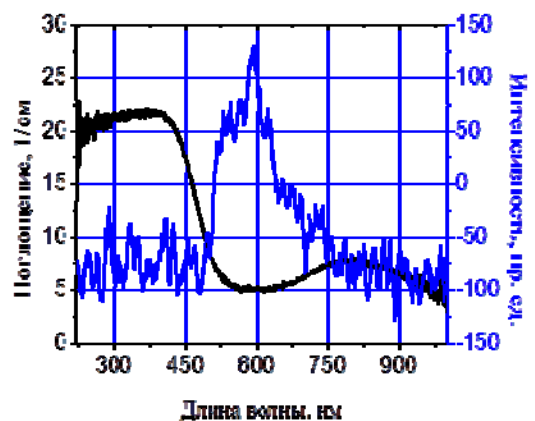


Рис. 2. Спектры поглощения и электролюминесценции образца C130

БФЛ образца находится примерно на длине волны 503 нм и спектр излучения, характерный для N_2V -центров в обоих зарядовых состояниях. Ширина спектра электролюминесценции для образца C122 составляет более 200 нм, а для образца C130 порядка 200 нм. Сравнив два образца, с разными центрами окраски, можно сделать вывод, что при изготовлении однофотонных источников преимущество имеют образцы, в которых наблюдается электролюминесценция на N_2V -центрах.

Исследование было выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2020-0048.

Список литературы

1. Большедворский С. В. Исследование центров окраски в наноалмазах и их агрегатах : дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2022. – 104 с.
2. Хмельницкий Р. А., Талипов Н. Х., Чучуева Г. В. Синтетический алмаз для электроники и оптики. – М. : Издательство ИКАР, 2017. – 228 с.

Картины дифракции структур 1x2 и 2x1 при эпитаксии Si на Si(100)

О.И. Ворсин, И.Ю. Дюков, А.В. Гнеушев, О.И. Кукенов

Научный руководитель: д-р физ.-мат. наук А.П. Коханенко

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: janekroll2018@gmail.com

Аннотация: В работе представлено исследование особенностей характера осциллирующей интенсивности картин дифракции быстрых отраженных электронов в направлении [110] при эпитаксиальном росте Si на Si(100), а также интенсивности рефлексов от сверхструктур 1x2 и 2x1 в направлении [100] при разных температурах синтеза (200–800 °C).

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, сверхструктуры, дифракция быстрых отраженных электронов, Si(100), террасы.

Нанoeлектроника и нанoфотоника выдвигают жесткие требования к качеству наноструктур и гетерограницам формирующихся эпитаксиальных слоев, поэтому необходимо полное понимание процессов эпитаксиального роста. На рост наноструктур большое влияние оказывает температура, которая определяет протекание кинетических процессов при эпитаксиальном синтезе [1]. В связи с этим целью работы является определение механизмов роста Si на подложке Si(100) при различных температурах. Исследования бимодального характера осциллирующей и сравнение результатов с интенсивностью рефлексов от сверхструктуры 2x1 и 1x2 позволили определить механизмы формирования террас Si на поверхности Si(100).

Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) позволяет создавать высококачественные эпитаксиальные слои с заданными свойствами и параметрами в условиях сверхвысокого вакуума ($<1 \cdot 10^{-10}$ торр). Экспериментальная установка МЛЭ «Катунь-100» позволяет использовать методы постоянного контроля ростовых параметров [2]. К одному из них относится метод дифракции быстрых отраженных электронов (ДБОЭ), позволяющий получать информацию о состоянии поверхности и принимать своевременные решения о корректировке всех ростовых параметров, влияющих на процессы синтеза [3].

Перед экспериментом пластины Si (100) проходили стандартную предэпитаксиальную химическую подготовку с последующим отжигом при температуре 1000°C и напылением буферного слоя. В работе использовалась крем-

ниевая пластина Si(100) с углом разориентации менее 0,1°. Эпитаксиальный рост Si на Si(100) происходил при температурах от 200 °C до 800 °C со скоростью напыления 0,1 МС/сек.

Изменения картин дифракции в процессе эксперимента фиксировались на видеокамеру для последующего детального анализа. В результате компьютерной обработки картин дифракции получена зависимость интенсивности центрального рефлекса от времени. Такая зависимость представлена на рисунке 1 в качестве примера для температуры 450 °C.

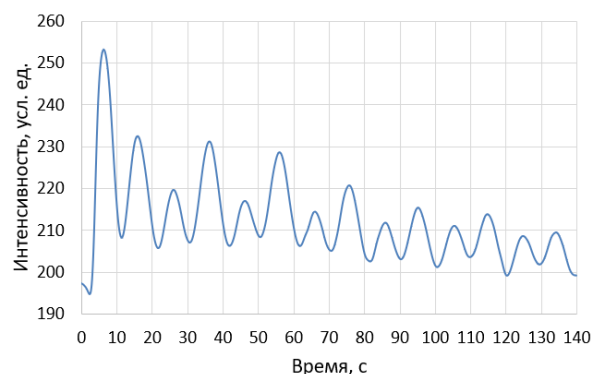


Рис. 1. Зависимость интенсивности центрального рефлекса от времени в направлении [110]

Поверхность Si(100) представляет собой чередующиеся террасы, поверхность которых имеет сверхструктуру 2x1 и 1x2 [4, 5]. Терраса T_A имеет димерные ряды, которые образуют сверхструктуру 1x2. Они расположены параллельно ступени (краю террасы). Димерные ряды террасы В располагаются перпендикулярно

ступени, образуя сверхструктуры 2×1 . В направлении $[110]$ рассеяние быстрых электронов от террасы А больше чем от террасы В [5]. Поэтому максимумы на 15, 36, 56 и т. д. секундах соответствуют формированию террас В, а на 25, 45, 65 и т. д. секундах – террасе А. Зависимость отношения величины времени зарастания террасы В (T_B) ко времени формирования террасы А (T_A) от температуры приведена на рис. 2 и выделена голубыми точками.

В направлении падения пучка электронов $[100]$ на поверхность Si(100) получена зависимость интенсивности рефлексов от сверхструктур 1×2 и 2×1 . Интенсивность в данном направлении соответствует площади соответствующих террас. На рисунке 2 указанная зависимость выделена серыми точками. Для простоты восприятия графиков добавлена зелёная кривая, обобщающая отношение ширин террас двух типов.

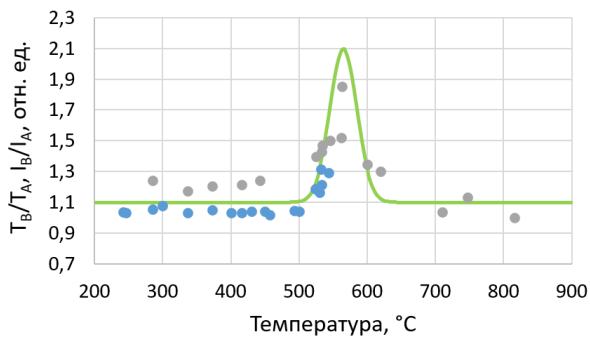


Рис. 2. Зависимость от температуры отношения периодов формирования террас В к А и отношения интенсивности рефлексов террасы В к А

В диапазоне температур от 200 до 500 °C кривые находятся на своих постоянных значениях и символизируют постоянство отношения ширин террас В к А. Механизм роста происходит за счёт образования двумерных островков. От 500 до 550 °C наблюдается увеличение отношения T_B к T_A . Данный факт говорит о сближении ступеней: для зарастания террасы типа В требуется больше времени, чем на А. В то же время тоже растёт I_B/I_A , что дополнительно подтверждает сближение ступеней. Помимо двумерно-островкового роста начинает быть существенным рост по сдвигу ступеней, а после точки 550 °C, он начинает преобладать. В диапазоне 550–600 °C с ростом температуры

террасы постепенно сравниваются по ширине. Осцилляций интенсивности в диапазоне 550 – 800 °C не наблюдается. Двумерно-островковый режим роста становится несущественным, так как атомы на поверхности имеют большую длину диффузии и в своём большинстве достигают краёв ступеней.

Таким образом, в результате анализа картин дифракции при эпитаксиальном росте по характеру осцилляций интенсивности в направлении падения дифракционного пучка $[110]$ на поверхность Si $[100]$ и по величине отношения интенсивности рефлексов 1×2 и 2×1 в направлении $[100]$ определено изменение морфологии поверхности в зависимости от температуры (200–800 °C). Экспериментально подтверждена зависимость механизмов формирования эпитаксиальных структур от температуры. Обнаружено, что в диапазоне 500–550 °C происходит сближение ступеней разных типов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №23-62-10021.

Список литературы

1. Jianjun Z., Moritz B., Martyna G., Oliver G. S. Evolution of epitaxial semiconductor nanodots and nanowires from supersaturated wetting layer // Chem. Soc. Rev. – 2015. – Vol. 44. – P. 26–39.
2. Blinov V.V., Mashanov V.I., Nikiforov A.I. et al. Plant for molecular beam epitaxy «Katun-100» // Spacecrafts & Technologies. – 2018. – Vol. 2, no. 3. – P. 170–174.
3. Dirko V.V., Lozovoy K.A., Kokhanenko A.P., Voitsekhevskii A.V. High-resolution RHEED analysis of dynamics of low-temperature superstructure transitions in Ge/Si(001) epitaxial system // Nanotechnology. – 2022. – Vol. 33, no. 11. – P. 115603-1–115603-8.
4. Эрвье Ю.Ю. Образование двойных ступеней на поверхности кремния (100): роль проницаемости А-ступеней // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2020. – Т. 63, no. 6. – С. 3–7.
5. Kukenov O.I., Sokolov A.S., Dirko V.V. et al. Analysis of the temperature dependence of homoepitaxial growth of Si on Si by reflection high-energy electron diffraction // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2023. – Vol. 16, is. 3.1. – P. 112–116.

Выбор ширины спектральной линии лазерного излучения для формирования натриевой лазерной опорной звезды

С.А. Ермаков¹

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук Л.А. Больбасова^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

E-mail: ermakov_s98@mail.ru, sla@iao.ru

Аннотация: Представлены результаты численного моделирования яркости натриевой лазерной опорной звезды для астрономических обсерваторий средних широт Российской Федерации в соответствии с современными представлениями о физике взаимодействия лазерного излучения с мезосферными атомами натрия.

Ключевые слова: адаптивная оптика, лазерная опорная звезда, атмосферная турбулентность, ширина спектральной линии лазерного излучения, численное моделирование.

Натриевые лазерные опорные звезды (ЛОЗ) используются в качестве опорных источников адаптивных оптических систем (АО), и становятся неотъемлемой частью современных крупных наземных телескопов оптического диапазона. С их помощью можно получить информацию о турбулентных флуктуациях в канале распространения излучения от астрономического объекта. Натриевые лазерные опорные звезды создаются посредством резонансной флуоресценции атомов натрия в мезосфере. Атомы натрия возбуждаются лазерным излучением, настроенным на линию натрия D_2 ($\lambda \sim 0,5892$ мкм).

Эффективность работы АО с ЛОЗ во многом зависит от параметров мезосферного слоя натрия, пропускания атмосферы, величины геомагнитного поля и параметров лазерной системы (мощность излучения, поляризация, ширина спектральной линии лазерного излучения). Атмосферные параметры перечисленные выше зависят от географического положения обсерваторий и имеют сезонные изменения (например, слой натрия имеет широтную и сезонную зависимость) [1-3].

Первостепенным является обеспечить достаточный уровень сигнала (обратный поток фотонов) от ЛОЗ для работы датчика волнового фронта АО системы. При этом определить оптимальные требования к лазерному источнику для формирования ЛОЗ на этапе создания. Высокие уровни освещенности в натриевом слое могут привести к эффекту насыщения, что в

свою очередь ограничит обратный поток фотонов от натриевой ЛОЗ [2].

В настоящей работе рассматриваются требования к ширине спектральной линии лазерного излучателя для создания натриевой ЛОЗ. Для этого было проведено численное моделирование обратного потока фотонов при различной величине ширины спектральной линии лазерного излучения. Был проведен литературный обзор по существующим лазерным источникам, работающих на длине волны 589 нм, исходя из которого определен диапазон ширин спектральных линий, используемых для численного моделирования [4-5].

Целью данной работы являлась оценка изменения числа фотонов от натриевой ЛОЗ в зависимости от ширины спектральной линии лазерного излучения, формирующего ЛОЗ.

В качестве среды моделирования использовалась модель LGSBloch. Данная модель наиболее полно математически описывает взаимодействия лазерного излучения с мезосферными атомами натрия, с учетом ряда параметров [6]. При этом модель LGSBloch, использовалась для моделирования натриевых ЛОЗ различных обсерваторий, разными научными группами, показав согласие с экспериментами. Поэтому была и выбрана в качестве основы для расчета обратного потока фотонов от натриевой ЛОЗ.

В таблице 1 приведены входные параметры, используемые для моделирования, соответствующие астрономическим обсерваториям РФ [1].

Таблица 1. Параметры моделирования

Параметр	Обозначение	Значение
Параметры лазера		
Мощность лазерного излучения	P	5-50 Вт
Интенсивность излучения лазера в мезосфере	I	5-10 Вт/м ²
Длина волны D ₂	λ	589,159 нм
Поляризация	X	0-1
Ширина спектральной линии лазера	FWHMbw	0 – 1000 МГц
Атомные, атмосферные и мезосферные параметры		
Геомагнитное поле в мезосфере	B	0,48G
Склонение		7,40°
Наклонение		62,34°
Пропускание атмосферы	T _a	0,8
Температура мезосферы	T _{NA}	180-200K
Высота натриевого слоя в мезосфере	H _{NA}	91-92 км
Концентрация натрия в мезосфере	C _{NA}	1.9-4,7×10 ¹³ атом м ⁻²
Параметры стартового телескопа		
Зенитный угол	ζ	0-60°
Высота стартового телескопа	H _{tele}	2100 м
Апертура стартового телескопа	D	20 см
Радиус луча стартового телескопа	ω	14 см
Коэффициент качества луча, M ²	M ²	1,2

Для вычисления ожидаемого обратного потока фотонов на приемнике Φ (в единицах фотон/с/м²) на расстоянии L от слоя флуоресцирующих атомов натрия (L – разность высоты слоя и высоты расположения телескопа), рассчитывался поток при нескольких уровнях освещенности, затем выполнялось интегрирование по освещенной площади в мезосфере, ортогональной лучу при концентрации натрия (в единицах атомов/м²), с учетом пропускания атмосферы.

На рисунке 1 представлены результаты численного моделирования величины потока фотонов, детектируемой приемником при формировании натриевой ЛОЗ различной мощностью излучения для атмосферных условий средних широт РФ при работе в зенит в зависимости от ширины спектральной линии лазерного излучения, в диапазоне от 0 до 1000 МГц.

Результаты свидетельствуют, что выбор ширины спектральной линии лазерного излучения, должен осуществляться с учетом мощности лазерного излучения, которое используется для формирования ЛОЗ.

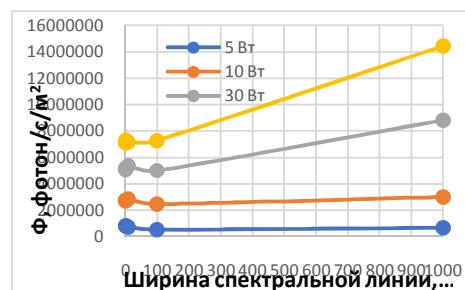


Рис. 1. Обратный поток фотонов Φ от натриевой ЛОЗ в зависимости от ширины спектральной линии лазерного излучения

Яркость ЛОЗ увеличивается с увеличением мощности лазерного излучения. Максимальное значение обратного потока достигается при ширине лазерного излучения 1000 МГц, то есть при использовании широкополосных лазерных источников.

Полученные результаты представляют интерес для оптимизации параметров лазерного излучателя для создания натриевых ЛОЗ для АО систем телескопов обсерваторий РФ.

Список литературы

3. Большасова Л.А., Ермаков С.А., Лукин В.П. Моделирование яркости натриевой ЛОЗ, формируемого поляризованным излучением для астрономических обсерваторий Северного Кавказа. // Оптика Атмосфера и Океана. – 2023. – Т. 36, № 09. – С. 773–779.
4. Otarola A., Hickson P., Gagné R. et al. On-Sky Tests of a High-Power Pulsed Laser for Sodium Laser Guide Star Adaptive Optics // Journal of Astronomical Instrumentation. – 2016. - Vol. 5, Is. 2. – P. 1650001.
5. Holzlohner R., Rochester S.M., Bonaccini Calia D., et al. Optimization of cw sodium laser guide star efficiency // A&A. – 2010. – Vol. 510. – P. A20.
6. Huo X., Qi Y., Zhanga Y. et al. Research development of 589 nm laser for sodium laser guide stars // Optics and Lasers in Engineering. – 2020. – Vol. 134. – P. 106207.
7. Cai Y., Bai Z., Qi Y. et al. Recent progress in yellow laser: Principles, status and perspectives // Optics and Laser Technology. – 2022. – Vol. 152. – P. 108113.
8. Rochester Scientific. AtomicDensityMatrix and LGSBloch packages. URL: <https://www.rochesterscientific.com/ADM>.

Оптическая и спектральная время-разрешенная диагностика плазмы наносекундного разряда в атмосферном воздухе в условиях высокого перенапряжения

Б. Зайцев¹

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук Д.А. Сорокин^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

²Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

E-mail: bogdanzaitsev683@gmail.com

Аннотация: Исследованы динамика наносекундного разряда в воздухе при атмосферном давлении и спектры излучения формируемой плазмы с высоким ($\ll 1$ нс) временным разрешением. Обнаружено, что пробой происходит в результате развития встречных стримеров, а после разряда наблюдается второй пик излучения.

Ключевые слова: наносекундный разряд, пробой, стример, искра, плазма, излучение, спектр.

Наносекундный газовый разряд – это кратковременный ($\sim 10^{-8} - 10^{-9}$ с) электрический разряд в газе, в процессе которого образуется неравновесная низкотемпературная плазма (ННП). Такой разряд может быть реализован в частности в воздухе при атмосферном давлении. Атмосферная ННП – уникальный инструмент воздействия на объекты живой и неживой природы [1]. Цели такого рода воздействия самые разнообразные: от модификации свойств поверхности материалов до лечения раковых заболеваний [2]. Широкий спектр применения обусловлен разнообразием химически активных форм атомов и молекул [3] (O, N, OH, NO, O₃ и т. д.), образующихся в процессах ионизации, возбуждения, диссоциации, рекомбинации, а также действия ультрафиолетового излучения. [4]. Уникальные возможности применения ННП способствуют высокой активности исследований данного типа газового разряда. Путь от лабораторной установки до полноценной технологии не прост и связан с поиском решений для ряда проблем. К таковым, например, относятся генерация ННП в воздухе и определение её свойств в динамике. В этой связи в рамках исследования планируется изучить развитие стримеров, а также оптические и спектральные характеристики плазмы время-разрешенными методами при одновременном измерении параметров энерговода.

Эксперимент проводился на экспериментальной установке, состоящей из газоразрядной

камеры, высоковольтного наносекундного генератора, генераторов запускающих импульсов, осциллографа, а также сверхскоростной четырехканальной ICCD камеры и стрик камеры со спектрометром. В разрядной камере размещались электроды из швейных игл. Камера заполнялась атмосферным воздухом. Процесс развития разряда исследовался при помощи сверхскоростной четырехканальной ICCD камеры. Эта камера хорошо подходит для съёмки экстремально быстрых событий (субнаносекундный масштаб времен), к которым относится процесс формирования разряда. Стрик камера, оснащённая спектрометром, использовалась для время-разрешённой регистрации спектра излучения. Осциллографом записывались импульсы напряжения и тока.

В начале был исследован процесс формирования разряда. Были получены временно-разрешённые изображения свечения плазмы разряда в межэлектродном зазоре шириной 4 мм. Напряжение падающих импульсов было 20 кВ. При возникновении электрического поля в промежутке, от высоковольтного анода начинает развиваться стример. На заземлённом катоде стример формируется с запозданием, когда стример с анода успевает пройти 2/3 расстояния до катода.

Стримерная стадия протекает очень быстро (< 1 нс). После столкновения стримеров

возникает диффузный разряд (кадр 1 на рисунке 1). После столкновения образовавшихся из стримеров искровых лидеров в промежутке формируется искра, перемыкающая промежутки. Форма искрового канала может меняться, а в зависимости от интенсивности возникающего плазменного облака границы размываются. Развитие процесса сильно зависит от условий проведения эксперимента. Так, повышая температуру, будет уменьшаться плотность воздуха, из-за чего искра может вообще не сформироваться. Если нагревать воздух в герметичной камере, то будет расти и давление. Концентрация меняться не будет. В таких условиях разряд будет склонен к контракции (образованию искры). В условиях эксперимента давление внутри камеры составляло порядка атмосферного.

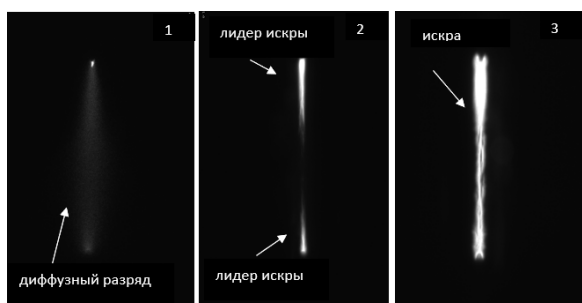


Рис. 1. Формирование разряда: 1 – 3 нс, 2 – 20 нс, 3 – 58 нс

На рисунке 2 представлены осциллограммы напряжения, тока и интенсивности излучения плазмы разряда. Напряжение измерялось в коаксиальном кабеле ёмкостным делителем напряжения вблизи газоразрядной камеры, а также сразу же за разрядным промежутком. На основании этих измерений определялся ток разряда.

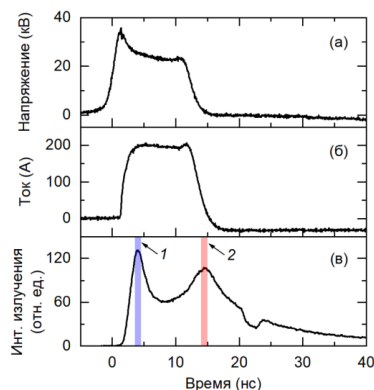


Рис. 2. Осциллограммы напряжения, тока и интенсивности излучения: 1 – первый максимум, 2 – второй максимум

Как видно из графика напряжения, длительность импульса $\tau \approx 13$ нс. Момент времени, соответствующий резкому спаду напряжения и резкому возрастанию тока до 200 А, указывает на пробой промежутка. Анализируя временной ход интенсивности излучения плазмы (рисунок 2в), вызывает интерес второй максимум, возникающий в самом конце импульса. Предположительно, данное свечение обусловлено процессами рекомбинации (рекомбинационный континуум). Спектральное распределение энергии излучения плазмы разряда в диапазоне длин волн $200 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1280 \text{ нм}$ представлено на рисунке 3.

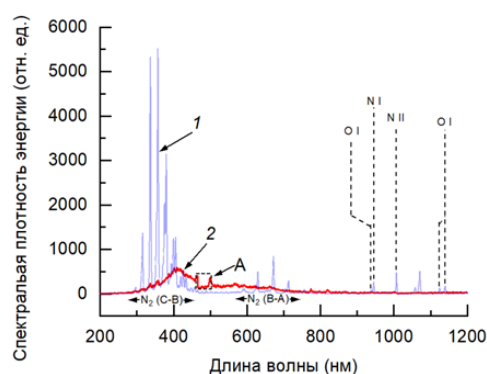


Рис. 3. Спектры излучения в различные моменты времени, соответствующие максимумам 1 и 2 на рисунке 2

Во время первого максимума доминирует излучение полос второй положительной системы молекулярного азота, а во время второго – излучение рекомбинационного континуума

В рамках проведённого исследования было установлено, что при наносекундном разряде в условиях высокого перенапряжения переход от диффузного горения в искру приводит к возникновению излучения рекомбинационного континуума.

Благодарности

Автор благодарит с.н.с. ИСЭ СО РАН, к.ф.-м.н. Д.В. Белоplotова за помощь при написании статьи.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИСЭ СО РАН, проект № FWRM-2021-0014.

Список литературы

1. Adamovich I., Agarwal S., Ahedo E. et al. The 2022 Plasma Roadmap: low temperature plasma science and technology // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2022. – Vol. 55. – 373001.
2. Duarte S., Panariello B.H.D. Comprehensive biomedical applications of low temperature plasmas // *Archives of Biochemistry and Biophysics.* – 2020. – Vol. 693. – 108560.
3. Janda M., Hensel K., Machala Z. Kinetic plasma chemistry model of pulsed transient spark discharge in air coupled with nanosecond time-resolved imaging and spectroscopy // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2018. – Vol. 51. – 334002.
4. Бакшт Е.Х., Тарасенко В.Ф., Шутько Ю.В., Ерофеев М.В. Точечный источник УФ-излучения с частотой 1 кГц и короткой длительностью импульса // *Известия высших учебных заведений. Физика.* – 2011. – Т. 54, № 11. – С. 91-94.

Приуроченность событий на временных рядах численности планктона, зарегистрированных цифровой голографической камерой *in situ*

Д.В. Куркова

Научный руководитель: канд. техн. наук, доцент И.Г. Половцев

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: kdv_01@inbox.ru

Аннотация: В работе приведены результаты анализа временных рядов численности планктона, зарегистрированных с помощью цифровой голографической камеры. Рассмотрена реакция планктона на антропогенное воздействие и сделаны выводы относительно возможности использования спектрального анализа в целях маркирования временных рядов и выработки тревожного сигнала о возможном факте загрязнения и неблагополучии среды обитания.

Ключевые слова: планктон, цифровая голография, цифровая голографическая камера, биотестирование качества воды, ритмические процессы.

Причины загрязнения акваторий могут быть разные: влияние индустриализации, загрязнение воздуха, нефтепродукты, естественные источники загрязнения и т.д. [1]. Влияя в комплексе, эти источники, радикальным образом меняют водную экосистему, что проявляется в свойствах биоиндикаторных организмов. В качестве таких организмов могут быть использованы сообщества зоопланктона, естественным образом присутствующие в акватории [2]. Для измерения показателей зоопланктона в среде обитания используются погружные оптико-электронные приборы.

В частности, погружная цифровая голографическая камера (ДНС). В сравнении с другими существующими методами исследования зоопланктона [3,4], гидробиологический зонд, оснащенный ДНС и установленный на донной станции на постоянное дежурство, позволяет получать информацию о количестве частиц, их форме и размере в исследуемом объеме в режиме реального времени [5]. Эти данные отображаются в виде временных рядов экосистемных функций, простейшей из которых является концентрация зоопланктона.

В настоящей работе рассмотрены естественные синхронизации изменчивости планктона, обнаруженные во временных рядах его концентраций, зарегистрированных в биоиндикационном эксперименте с применением ДНС.

Принципиальная схема регистрации планктона по методу голографии Габора приведена на рисунке 1.

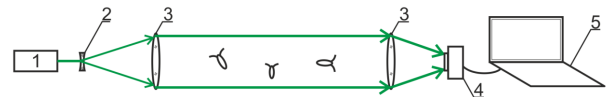


Рис. 1. Схема цифровой голографической камеры: 1 – лазерный диод, 2 – расширитель пучка, 3 – объектив, 4 – CMOS-камера, 5 – компьютер.

ДНС, реализующая эту схему, была установлена в составе гидробиологического зонда в Баренцевом море (Зеленецкая губа, в период с 6.08.2022 – 24.09.2022 с координатами: N 69°7'7.9" E 36°4'10") на фиксированной высоте 4 м от уровня дна. Каждый час станция регистрировала 20 голограмм рабочего объема морской воды с планктоном с промежутком между кадрами 1 сек. По ВОЛС цифровые голограммы передавались на береговую вычислительную станцию, где выполнялась обработка потока голограмм, определение концентрации планктона в рабочем объеме и формирование временного ряда наблюдений. Временной ряд за все время регистрации приведен на рисунке 2.

Эллипсом на рисунке отмечен период внешнего контролируемого антропогенного воздействия. Вертикальными линиями выделены сутки, когда в связи с техническим обслуживанием или непогодой регистрация временно приостанавливалась.

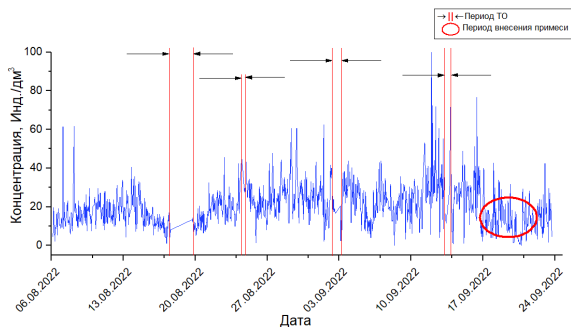


Рис. 2. Временной ряд концентрации зоопланктона

Помимо ДНС, в состав зонда входили датчики, позволяющие регистрировать такие факторы среды, как давление, температуру, проводимость. Поток этих гидрофизических данных представлен на рисунке 3 в виде соответствующих временных рядов.

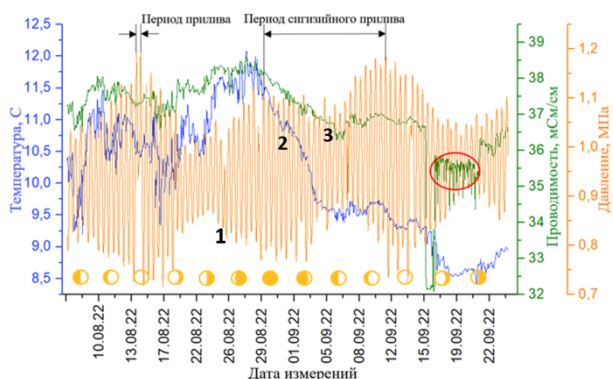


Рис. 3. Временные ряды измерений факторов среды на стоянке: 1 – давление, 2 – температура, 3 – проводимость

Эллипсом на рисунке отмечен период, когда для оценки реакции планктона на антропогенное воздействие вводилась индикаторная примесь NaCl. Солевой раствор является безвредным загрязнителем, если воздействие не очень длительно (5-10 дней).

В настоящей работе рассматривается суточная изменчивость планктонных концентраций, выявленная в результате анализа рядов представленных на рисунках 2 и 3. Примеры суточной изменчивости приведены на рисунках 4 и 5. Под сутками понимается интервал времени стоянки, при котором к суткам текущей длительности добавляются 12 часов до, и 12 часов после текущих суток. Часовые отсчеты формировались из данных, усреднённых по 20 голограммам и по пяти суткам. На рисунке 4 приведено изменение усредненной концентрации

планктона в течение суток 7.08.2022 г. – 11.08.2022 г.

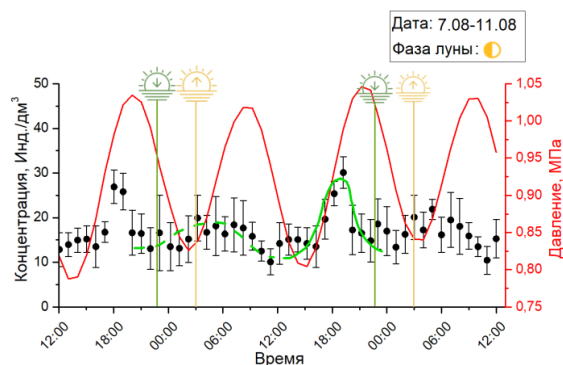


Рис. 4. Усредненный временной ряд за 7.08.2022 г. – 11.08.2022 г.: точки – средние значения, $\bar{\square}$ – стандартное отклонение, штриховая линия (00:00-12:00) – утреннее кормление, сплошная (12:00-00:00) – вечернее

Из графика можно видеть, что суточная изменчивость в концентрациях планктона проявляется в виде двугорбой кривой, демонстрируя явные максимумы дважды за сутки: в момент восхода Солнца и за несколько часов до захода. Для фототропного поведения планктона восход Солнца — это сигнал к тому, что можно выходить на кормление. Похожая реакция наблюдается и за остальные рассмотренные дни без воздействия. Удивительно, что несмотря на изменение времени восхода и захода Солнца, стабильно сохраняется положение первого максимума относительно времени восхода и длительность (12 часов) между первым и вторым максимумом кормления. В связи с этой стабильностью, мы говорим о синхронизации суточной изменчивости планктона с ритмом задаваемым Солнцем. Однако, если рассмотреть рисунок 5, где приведены сутки в период антропогенного воздействия, амплитуда проявлений существенно уменьшается (в 2 раза) и имеют место десинхронозы циркадного ритма при первом проявлении (на 5 часов) и во втором проявлении (на 8 часов).

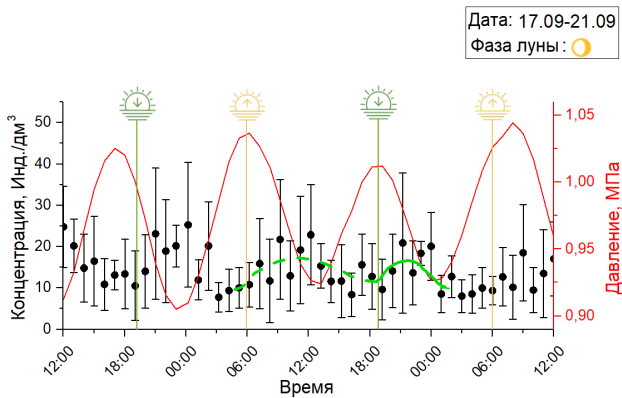


Рис. 5. Усредненный временной ряд за 17.09.2022 г. – 21.09.2022 г.: точки – средние значения, $\bar{\square}$ – стандартное отклонение, штриховая линия (03:00-18:00) – утреннее кормление, сплошная (18:00-03:00) – вечернее.

Заметим, что синхронизаций суточной изменчивости с приливами–отливами (тидальный ритм) обнаружено не было. Только можно отметить увеличение в 1,5 раза среднего количества планктона во время сизигия (высокого прилива).

Рассмотрение временного ряда планктонных концентраций в контексте суток позволяет сделать следующие выводы относительно суточной временной изменчивости:

1. Временная изменчивость задается ритмом восходов Солнца и имеет период 24 часа – циркадный ритм.

2. Характер суточной изменчивости описывается с помощью двугорбой кривой, временные привязки которой отражают двухразовый цикл дневного питания (ночью нет) ровно через 12 часов даже в условиях полярного дня.

3. Антропогенное вмешательство в биоценоз, изменяющее условия жизни приводит к существенному изменению циркадной ритмики.

Обнаруженное синхронизирующее воздействие является обоснованием целесообразности применения методов спектрального анализа формы линий для выделения маркеров аномального уширения.

Список литературы

1. Damania R., Desbureaux S., Rodella A. S. et al. Quality Unknown: the Invisible Water Crisis // World Publications. – 2019. – P. 142.
2. Безматерных Д.М. Зообентос как индикатор экологического состояния водных экосистем Западной Сибири / Гос. публич. науч.-техн. б-ка Сиб. отд-ния Рос. акад. наук, Ин-т вод. и экол. проблем. – Новосибирск, 2007. – 87 с. – (Сер. Экология. Вып. 85).
3. Шурганова Г.В. Жихарев В.С. Кудрин И.А. и др. Отбор и обработка зоопланктона при гидро-экологических исследованиях : учебно-методическое пособие – Нижний Новгород : Нижегородский государственный университет, 2021. – 33 с.
4. Srichandan S., Baliarsingh S. K., Lotliker A. A., et al. Unravelling tidal effect on zooplankton community structure in a tropical estuary // Environ Monit Assess. – 2021. – Vol. 6. – P. 1-21.
5. Dyomin V.; Semiletov I.; Chernykh D., et al. Study of Marine Particles Using Submersible Digital Holographic Camera during the Arctic Expedition // Appl. Sci. – 2022. – Vol. 12. – 11266.

Оценка длительности существования конденсационных следов самолета по данным поляризационного лидара и спутникового спектрорадиометра MODIS

О.Ю. Локтюшин

Научный руководитель: д-р физ.-мат. наук, профессор И.В. Самохвалов

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: olegloktyushin@gmail.com

Аннотация: В работе описываются результаты совместной обработки данных зенитного поляризационного лидара Томского государственного университета и спутникового спектрорадиометра MODIS.

Ключевые слова: Облака верхнего яруса, конденсационные следы самолетов, поляризационный лидар, спектрорадиометр MODIS.

В настоящее время численные модели прогноза погоды и климата не учитывают ряд атмосферных процессов и явлений. К одному из наиболее значимых недоучитываемых явлений относят облака верхнего яруса (ОВЯ), которые оказывают существенное влияние на радиационный баланс Земли [1]. С одной стороны они отражают поток солнечного излучения, а с другой – способствуют усилению парникового эффекта, возвращая обратно исходящее от поверхности Земли инфракрасное излучение. Кроме того, в последние десятилетия значительно выросло число антропогенно образованных ОВЯ, что вызвано большим числом ежедневных авиаперелетов. Самолетные следы способствуют образованию ОВЯ. Эти облака, как и сами самолетные следы, преимущественно состоят из ледяных частиц несферической формы; таким частицам свойственна преимущественная пространственная ориентация. Конденсационные следы самолетов, как и ОВЯ естественного происхождения, воздействуют на пропускание атмосферой излучения, однако имеют иную микроструктуру [2]. Они отличаются от перистых облаков формой и большой концентрацией кристаллов льда [3]. По мере увеличения интенсивности коммерческого воздушного движения конденсационные следы становятся более распространенным явлением в небе промышленно развитых стран. Из-за своей небольшой площади одиночные конденсационные следы, идентифицируемые по их обычному линейному виду, неспособны оказать значительное влияние на климат. Вместе с тем, часто такие образования расширяются, покрыва-

вая большую площадь. Кроме того, над районами с интенсивным авиационным трафиком одновременно может отмечаться множество конденсационных следов. Совокупное влияние всех самолётных следов на потоки лучистой энергии в атмосфере над данными районами может значительно изменять радиационный баланс, а на десятилетних масштабах времени – региональный климат и климат планеты в целом. Однако, в современных моделях атмосферы, используемых при прогностических расчетах погоды и климата, оно никак не учитывается [4].

В зависимости от атмосферных условий, следы могут быть коротко- или долгоживущими. Вторые из них (Всемирная метеорологическая организация определяет их как *Cirrus Homogenitus*) сохраняются видными в течение по крайней мере 10 минут и являются единственным типом ледяных облаков антропогенного происхождения [5]. В зависимости от того, сохраняют ли они свою линейную форму, их называют устойчивыми конденсационными следами и перистыми облаками, формируемыми конденсационными следами, соответственно, или, вместе, облака самолетного происхождения [6]. Время жизни ОВЯ, формируемых конденсационными следами самолетов, обычно не превосходит 10 часов, т.к. со временем уменьшается количество кристаллов льда вследствие возгонки (испарения) льда. Такие процессы ограничивают время жизни облака, даже несмотря на благоприятные окружающие условия для их сохранения. Известны работы, по данным которых ОВЯ, образовавшиеся из самолетных

следов, подобны естественным облакам своей концентрацией и размерами кристаллов льда через 5–7 часов после их появления [3].

ОВЯ естественного и искусственного происхождения исследуются методом поляризационного зондирования, согласно которому в атмосферу посылаются пучки лазерного излучения с каждым из четырех состояний поляризации, определяющих вектор-параметр Стокса [7]. Затем регистрируются все четыре компонента вектора Стокса обратно рассеянного излучения для каждой поляризации зондирующего. Влияние рассеивающей среды на состояние поляризации излучения при взаимодействии с ней определяется ее микроструктурой или, другими словами, параметрами распределений частиц среды по размерам, форме и пространственной ориентации. Этот метод реализован в поляризационном лидаре Томского государственного университета [8], эксперименты на котором выполняются систематически с 2009 г.

Для анализа данных лидарных экспериментов как результатов зондирования именно следов самолетов, а не естественных ОВЯ, они сопоставляются с траекторией полета самолета, а также направлением и скоростью ветра на его высоте. В качестве источника метеоданных используется реанализ ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) [9].

Для получения информации о спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) излучения, отраженного облаками в космос, используются данные спутникового спектрометра MODIS, установленного на спутниках Terra (на орбите с 1999 г.) и Aqua (на орбите с 2002 г.) [10]. Данные MODIS для координат Томска могут быть получены 1–2 раза в дневное время и столько же раз в ночное. Для сопоставления с результатами лидарных экспериментов использовались наборы данных уровня обработки 1В (MOD021KM/MYD021KM), содержащие информацию о зарегистрированном радиометром излучении с пространственным разрешением 1×1 км. Для оценки воздействия ОВЯ на потоки лучистой энергии в атмосфере (коротко- и длинноволновой) анализировались данные 8 спектральных каналов видимого диапазона и одного ИК, соответствующего полосе поглощения водяного пара.

С целью оценки воздействия продолжительности существования конденсационного следа на его способность отражать потоки лучистой энергии необходимо провести объединенный анализ данных по СПЭЯ с учетом времени су-

ществования самолетных следов. Для этого использовался массив лидарных данных с сентября 2019 г. по сентябрь 2023 г. включительно (более 630 серий измерений; более 170 часов). За это время записано более 170 тысяч траекторий самолетов. 60% из них включали координатные точки, азимут от которых на точку стояния лидара ТГУ соответствовал направлению ветра на высоте полета. Другими словами, указанная доля соответствует случаям дрейфа самолетных следов к месту расположения лидара. Были выделены три группы следов в зависимости от их длительности существования: от 0,1 до 1, от 1 до 1,5 и от 1,5 до 2 часов. В результате анализа было обнаружено, что у следов, существующих более 1,5 часов, коэффициент отражения в среднем уменьшается на 40%. Это явление обусловлено тем, что в процессе развития следа самолета кристаллы льда в нем увеличиваются в размере, что снижает их способность ориентироваться параллельно поверхности Земли.

Список литературы

1. Minnis P., Ayers J.K., Nordeen M.L. et al. Contrail frequency over the United States from surface observations // *J. Climate*. – 2003. – V. 16., Iss. 3. – P. 3447–3462.
2. Gayet J.F., Febvre G., Brogniez G. et al. Microphysical and optical properties of cirrus and contrails: Cloud field study on 13 October 1989 // *J. Atmos. Sci.* – 1996. – Vol. 53. – P. 126–138.
3. Bock L., Burkhardt U. The temporal evolution of a long-lived contrail cirrus cluster: Simulations with a global climate model // *J. Geophys. Res.: Atmosphere*. – 2016. – Vol. 121, Iss. 7. – P. 3548–3565.
4. Дмитриева-Аппаго Л.Р., Трубина М.А., Толстых М.А. Роль фазового состава облаков в формировании потоков коротковолновой и длинноволновой радиации // *Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. – 2017. – № 363. – С. 19–34.
5. Kärcher B. Formation and radiative forcing of contrail cirrus // *Nature Com.* – 2018. – No. 9. – 1824.
6. Gierens K., Vazquez-Navarro M. Statistical analysis of contrail lifetimes from a satellite perspective // *Meteor. Zeitschrift*. – 2018. – Vol. 27, No. 3. – P. 183–193.
7. Кауль Б.В. Оптико-локационный метод поляризационных исследований анизотропных аэрозольных сред: дис. ... докт. физ.-мат. наук. – Томск, 2004. – 219 с.
8. Самохвалов И.В., Кауль Б.В., Насонов С.В. и др. Матрица обратного рассеяния света зеркально отражающих слоев облаков верхнего яруса, образованных кристаллическими частицами, преимущественно ориентированными в горизон-

- тальной плоскости // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25, № 5.– С. 403–411.
9. ClimateDataStore [Электронный ресурс]. – URL: <https://cds.climate.copernicus.eu> (дата обращения: 20.03.2024 г.).
10. MODIS [Электронный ресурс]. – URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about> (дата обращения: 20.03.2024 г.).

Расчет характеристик синего светодиода GaN с одной квантовой ямой

Г.А. Шабанов, В.Д. Катренко

Научный руководитель: д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник
А.П. Коханенко

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: altx65@gmail.com

Аннотация: В докладе представлены результаты теоретических расчетов характеристик синего светодиода GaN с одной квантовой ямой при изменении концентрации легирования и толщины эпитаксиального слоя AlGaIn. Полученные результаты демонстрируют возможность применения программы Silvaco TCAD ATLAS при разработке конструкций оптоэлектронных приборов.

Ключевые слова: светодиод, квантовая яма, легирование, люминесценция, скорость излучательной рекомбинации, оже-рекомбинация.

Светодиоды представляют собой полупроводниковую структуру с электронно-дырочным переходом, создающим оптическое излучение при пропускании через него электрического тока в прямом направлении [1].

В отличие от красного и зеленого светодиода, синий светодиод был получен намного позже. Это было связано со сложностью и дороговизной процесса. Получение синего светодиода дало возможность создать излучение белого цвета, а следовательно, и всего видимого спектра. Это привело к активному использованию светодиодов в освещении и в светоиспускающих устройствах.

Создание новых гетероструктур светодиодов GaN технологически сложно и дорого, поэтому важно предварительное моделирование подобных структур. В работе использовалась программа Silvaco TCAD ATLAS [2]. В функционал данной программы входит: моделирование полупроводниковых процессов и устройств, расчет характеристик и визуализация данных в виде графиков [3].

В данной работе рассмотрена структура синего светодиода GaN с одной квантовой ямой. Структура светодиода показана на рисунках 1 и 2.

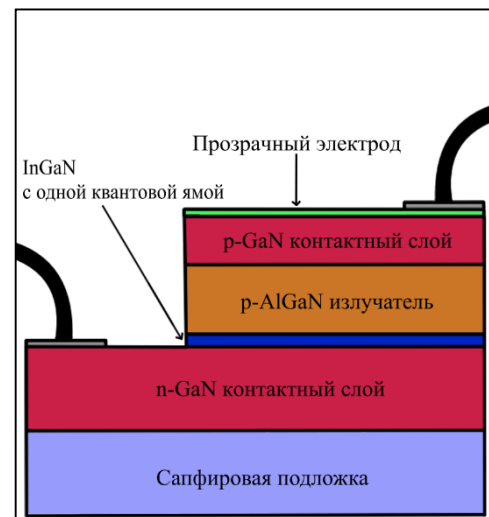
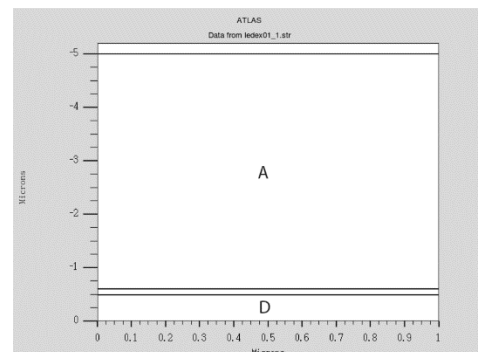


Рис. 1. Структура синего светодиода GaN с одной квантовой ямой



А и D – слой GaN

Рис. 2. Структура синего светодиода GaN с одной квантовой ямой в программе Silvaco TCAD ATLAS

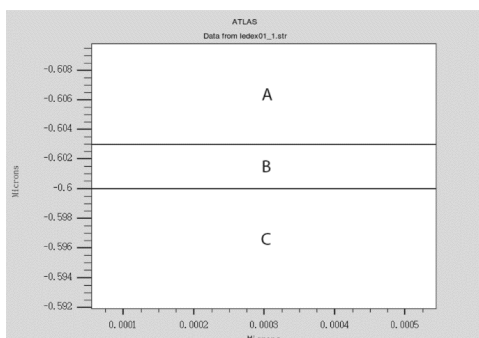


Рис. 3. Структура синего светодиода GaN с одной квантовой ямой в программе Silvaco TCAD ATLAS с увеличенным масштабом: А – слой GaN; В – слой InGaN; С – слой AlGaN

Рассматриваемая модель светодиода состоит из четырех слоев:

Первый слой GaN толщиной 4,4 микрон.

Второй слой InGaN толщиной 0,003 микрон, в котором находится одна квантовая яма.

Третий слой AlGaN (толщина - 0,1; 0,2; 0,3 микрона).

Четвертый слой GaN толщиной 0,5 микрон.

Расположение электродов показано на рисунке 1.

При проведении расчетов выбирались следующие концентрации носителей заряда: первый слой GaN с концентрацией электронов 10^{18} см^{-3} ;

третий слой AlGaN концентрация дырок – 10^{19} см^{-3} , $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и 10^{20} см^{-3} ;

четвертый слой GaN концентрация дырок 10^{19} см^{-3} .

Для каждого из слоев были выбраны свои значения параметров: время жизни дырок и электронов – 10^{-9} с ; скорость излучательной рекомбинации – $1,1 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$; коэффициент оже-рекомбинации для дырок и электронов – $10^{-46} \text{ м}^6/\text{с}$.

Кроме этого, учитываются следующие параметры: подвижность электронов – $0,01 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и подвижность дырок – $0,001 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; коэффициент концентрации электронов перед пробоем – 10^{-4} .

На рисунках 4 и 5 представлены рассчитанные зависимости плотности тока светодиода от напряжения для трех выбранных значений концентрации легирования слоя AlGaN.

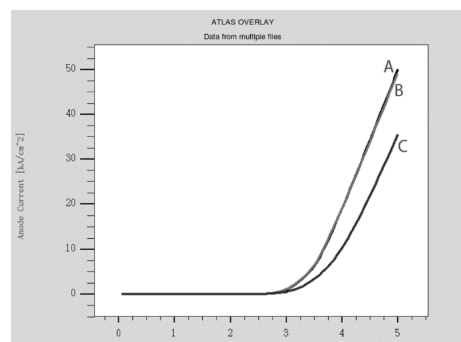


Рис. 4. Зависимости плотности тока светодиода от напряжения для трех случаев легирования слоя AlGaN: А – концентрация дырок 10^{20} см^{-3} ; В – концентрация дырок $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; С – концентрация дырок 10^{19} см^{-3}

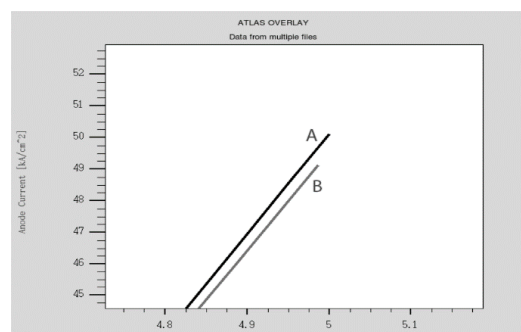


Рис. 5. Зависимости плотности тока светодиода от напряжения для двух случаев легирования слоя AlGaN в увеличенном масштабе: А – концентрация дырок 10^{20} см^{-3} ; В – концентрация дырок $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

Из рисунков видно, что при увеличении концентрации дырок в слое AlGaN увеличивается плотность тока при одинаковом напряжении. При дальнейшем увеличении концентрации носителей заряда этого слоя расчеты показали, что плотность тока будет увеличиваться незначительно.

На рисунке 6 представлены зависимости мощности люминесценции светодиода от плотности тока на аноде для трех разных концентраций легирования слоя AlGaN.

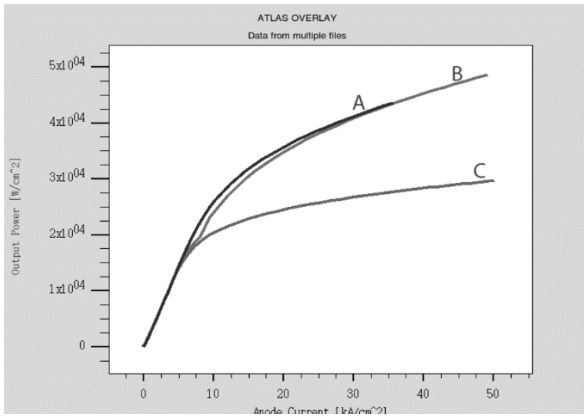


Рис. 6. Зависимости мощности люминесценции светодиода от плотности тока на аноде для трех концентраций легирования слоя AlGaIn: А – концентрация дырок 10^{19} см^{-3} ; В – концентрация дырок $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; С – концентрация дырок 10^{20} см^{-3}

Из рисунка 6 видно, что при увеличении концентрации легирования слоя AlGaIn в 5 раз от начального, увеличивается выходная мощность люминесценции для того же значения плотности тока. Однако, при увеличении концентрации дырок в 10 раз от начального, выходная мощность люминесценции значительно уменьшается при том же значении плотности тока.

На рисунке 7 представлены рассчитанные зависимости плотности тока светодиода от напряжения для четырех значений толщины слоя AlGaIn с концентрацией дырок $5 \cdot 10^{-19} \text{ см}^{-3}$.

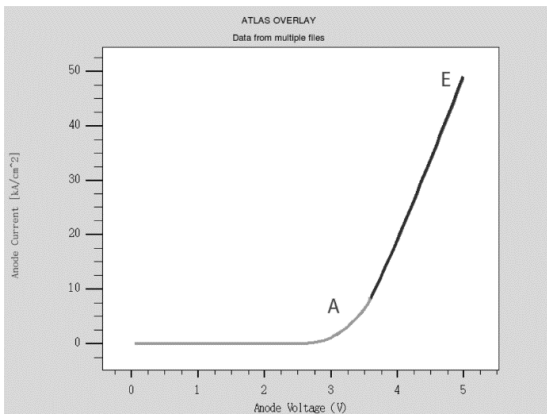


Рис. 7. Зависимости плотности тока светодиода от напряжения для четырех значений толщины слоя AlGaIn: А – AlGaIn толщиной 0,05 микрон; Е – близкие друг к другу графики AlGaIn толщинами 0,1; 0,2; 0,3 микрон

Для того, чтобы увидеть графики для AlGaIn с толщинами 0,1; 0,2; 0,3 микрон был увеличен масштаб на рисунке 8.

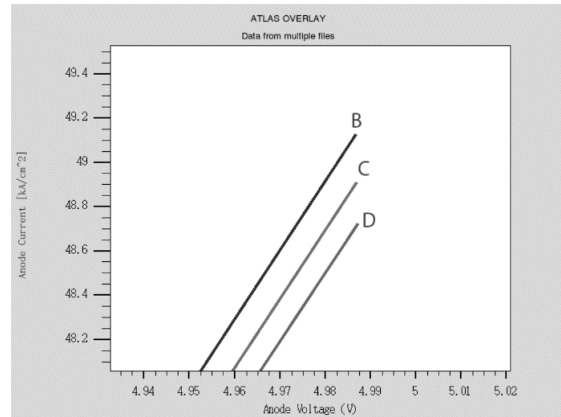


Рис. 8. Зависимости плотности тока светодиода от напряжения для трех значений толщины слоя AlGaIn в увеличенном масштабе: В – толщина 0,1 микрон; С – толщина 0,2 микрон; D – толщина 0,3

Из рисунка 8 видно, что при увеличении толщины слоя AlGaIn уменьшается плотность тока.

Кроме того, для тех же толщин слоя AlGaIn и для концентрации легирования $5 \cdot 10^{-19}$ были посчитаны три зависимости выходной мощности люминесценции от плотности тока (рис. 9).

Для того, чтобы увидеть графики AlGaIn с толщинами 0,1; 0,2; 0,3 микрон был увеличен масштаб на рисунке 9.

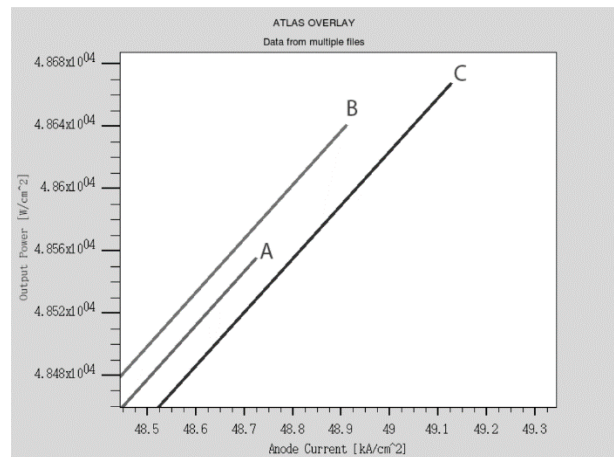


Рис. 9. Зависимости выходящей мощности люминесценции от плотности тока при различных толщинах слоя AlGaIn в увеличенном масштабе: А – толщина 0,3 микрон; В – толщина 0,2 микрон; С – толщина 0,1 микрон

Из рисунка 9 видно, что уменьшение толщины слоя AlGaIn значительно уменьшает выходящую мощность люминесценции.

Таким образом видно, что изменение концентрации дырок в эпитаксиальном слое AlGaIn приводит к значительным изменениям характеристик светодиода, как в лучшую, так и в худшую сторону. В свою очередь изменение толщины слоя приводит лишь к изменениям в одну сторону. Проведенные в работе расчеты с помощью программы Silvaco TCAD ATLAS показали возможность использования данной программы для оптимизации параметров структу-

ры светодиода GaN с точки зрения концентрации электронов, дырок и толщины слоев AlGaIn.

Список литературы

1. Берг А., Дин. П. Светодиоды / пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – М.: Мир, 1979. – 677 с.
2. Silvaco. – 1984–2024. – URL: <https://silvaco.com/tcad>.
3. Atlas User's Manual. – Santa Clara: Silvaco inc., 2006 – 878 p.

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ**

Разработка информационных программ для работы с комплектом приборов NI ELVIS III

А.С. Духанов, А.А. Фоминых

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, доцент А.А. Жуков

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: sanya.dukhanov@mail.ru

Аннотация: Представлено описание информационных программ в системе LabVIEW для работы с комплектом приборов NI ELVIS III. Разработанные программы размещены в системе Moodle и используются для самостоятельной работы студентов при подготовке к лабораторным практикумам по техническим дисциплинам.

Ключевые слова: NI ELVIS III, LabVIEW, Moodle, самостоятельная работа студентов.

В настоящее время комплекты измерительных приборов NI ELVIS широко используются для проведения лабораторных практикумов по радиотехническим дисциплинам, т.к. позволяют организовать работу с множеством измерительных приборов: мультиметром, источником регулируемого напряжения, генератором, осциллографом, анализаторами вольтамперных характеристик и другими устройствами.

Существуют несколько моделей таких комплектов, но только последняя из них – NI ELVIS III допускает работу с измерительными приборами как через USB-интерфейс, так и по сети Internet [1]. Поэтому такие комплекты широко используются для организации удаленного доступа к измерительным приборам [2,3].

Несмотря на разработку электронного курса по работе с NI ELVIS III [7,8] у студентов факультета часто возникают затруднения по работе с этим оборудованием.

Поэтому для повышения эффективности самостоятельной работы студентов при изучении этого комплекта приборов перед авторами была поставлена задача разработать набор информационных программ для изучения как самого комплекта NI ELVIS III, так и особенностей работы с приборами, входящими в его состав.

В качестве инструментальной среды для разработки таких программ была использована система графического программирования LabVIEW [9].

Авторами созданы три информационных программы для изучения комплекта NI ELVIS III и три программы по работе с конкретными приборами этого комплекта.

К программам для изучения комплекта NI ELVIS III относятся:

– программа-справочник «Руководство по работе с NI ELVIS III» в которой рассматриваются составные части рабочей станции и макетной платы комплекта NI ELVIS III. Программа включает набор закладок, на которых представлены графические и текстовые материалы по составным частям рабочей станции и макетной платы, пользовательской периферии, сигнальным линиям, кнопкам и индикаторам макетной платы, разъемам и линиям для работы с измерительными приборами;

– программа «Способы подключения NI ELVIS III» в которой рассматриваются способы подключения к измерительному оборудованию NI ELVIS III. Программа включает набор закладок, на которых представлены графические и текстовые материалы, иллюстрирующие способы подключения к комплекту приборов NI ELVIS III и особенности их реализации;

– программа «Описание MeasurementsLive» в которой пользователи знакомятся с программной средой measurementslive для работы с цифровым мультиметром, регулируемым источником напряжения, функциональным генератором, осциллографом, анализаторами Боде и ВАХ, логическими анализатором и генератором и другими приборами.

Переключение между закладками в первых двух программах происходит при выборе конкретного пункта пользовательского меню, а в третьей программе при нажатии кнопок, соответствующих выбранному приборам.

Лицевая панель программы «Способы подключения NI ELVIS III» приведена на рис. 1.

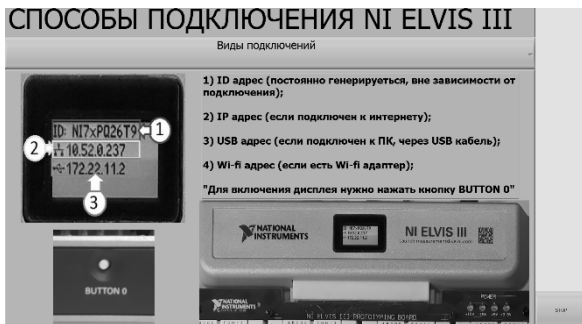


Рис. 1. Лицевая панель программы «Способы подключения NI ELVIS III»

К программам для изучения особенностей работы с конкретными приборами комплекта NI ELVIS III относятся:

- программа «Руководство по работе с осциллографом (Scope) и генератором (Fgen)», которая содержит набор закладок, на которых представлены графические и текстовые материалы по генерации и отображению на экране осциллографа различных видов сигналов;
- программа «Руководство по работе с мультиметром и источником регулируемого напряжения», которая предназначена для ознакомления студентов с измерением напряжения, тока, сопротивления и других характеристик элементов цепей;
- программа «Руководство по работе с анализатором вольтамперных характеристик», которая позволяет студентам познакомиться с измерением ВАХ двух- и трёх-полюсников.

Блок диаграммы всех программ схожи по своей структуре и включают: цикл while для непрерывной работы программы, структуры событий (Events), реагирующей на выбор конкретного пункта пользовательского меню или на нажатие определенной кнопки, структуры выбора (Case) и структуры управления вкладками (Tab Control).

Для удобства использования все созданные программы реализованы в виде exe-файлов и размещены в системе Moodle НИ ТГУ и используются для организации самостоятельной работы студентов. Студентам необходимо поработать с созданными программами, а затем ответить на вопросы тестов, проверяющих степень усвоения рассмотренного материала. Работа студентов оценивается, а оценка учитыва-

ется в курсах «Радиоэлектроника» и «Схемотехника аналоговых электронных устройств».

Список литературы

1. About the NI ELVIS III [Электронный ресурс] // Официальный сайт National Instrument ni.com. – URL.: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-elvis-iii-feature/page/about-ni-elvis-iii.html> (дата доступа: 24.03.2024).
2. Mayzel A., Medvedev A., Temkina V. et al. On the experience of using NI ELVIS III in remote laboratory practice during pandemic lockdown // International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies. Springer Proceedings in Physics. – 2022. – Vol. 268. – P. 77 – 83.
3. Парфенова Е.С., Новиков Ю.Н., Устинов А.Б. О внедрении в лабораторный практикум онлайн-исследований средствами DAQ-платформы NI ELVIS III // Неделя науки ИФНиТ. Сборник материалов Всероссийской конференции. – СПб: Изд-во: Политех-Пресс, 2020. – С. 68 – 71.
4. Жуков А.А., Булахов Н.Г. Опыт проведения лабораторных практикумов по радиотехническим дисциплинам в дистанционном формате // Методические, технологические и организационные аспекты электронного обучения : сборник статей по результатам научно-методической конференции. – Томск : Томский государственный университет, 2021. – С. 31–36.
5. Жуков А.А., Булахов Н.Г. Удаленный доступ к измерительному оборудованию в лабораторном практикуме по курсу "Введение в специальность" // Актуальные проблемы радиофизики АПР-2021 : сборник трудов IX Международной научно-практической конференции. – Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2021. – С. 301–303.
6. Доценко О.А., Жуков А.А., Булахов Н.Г. Опыт использования комплекта измерительных приборов NI ELVIS III в лабораторном практикуме по курсу "Радиоэлектроника" в режиме удаленного доступа // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2023 : сборник трудов VI международного научно-технического форума. – Рязань : Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, 2023. – Т. 9. – С. 53–57.
7. Туктаров А.М., Гергет К.А. Информационное и методическое обеспечение курса «Удаленный доступ к измерительному оборудованию комплекта NI ELVIS III» // Восемнадцатая всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов. – Томск : STI, 2021. – С. 256–260.
8. Фоминых А.А. Программно-аппаратный комплекс LABVIEW-NI ELVIS III для сбора данных и управления внешними устройствами // Двадцатая Всероссийская конференция студенческих

научно-исследовательских инкубаторов : сборник докладов конференции. – Томск : STT, 2023. – С. 146–148.

9. Жуков А.А. Система программирования LabVIEW. Основы работы : учебно-методическое пособие. – Томск : STT, 2020. – 150 с.

Применение модели расширенного автомата для проверки знания студентом алгоритма раскраски графа

Е.В. Корытников

Научный руководитель: канд. тех. наук, доцент С.А. Прокопенко

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: ekorytnikov@list.ru

Аннотация: Данная работа посвящена формальному описанию логики взаимодействия студента с обучающей системой при изучении алгоритма раскраски графа.

Ключевые слова: граф, раскраска графа, расширенный автомат.

Информационные технологии широко применяются в различных областях, в том числе и для обучения. В данной работе разрабатывается обучающая система, позволяющая студенту отработать навыки раскраски графа [1, 2], поскольку многие технические задачи сводятся именно к данной задаче.

Проведен обзор ресурсов по сходной тематике [3 – 7]. Во все рассмотренных ресурсах отсутствует проверка понимания студентом алгоритма раскраски графа и действия студента не комментируются.

В разрабатываемой обучающей системе помимо правильного выполнения действий на каждом шаге, студент должен правильно выбирать следующий шаг. Студенту дается возможность совершить не более трех ошибок. Любое действие студента проверяется обучающей системой и комментируется. Чтобы иметь для этого возможность, необходимо формально описать взаимодействие студента и обучающей системы. В качестве формальной модели используется расширенный автомат [8], который изображен на рисунке 1.

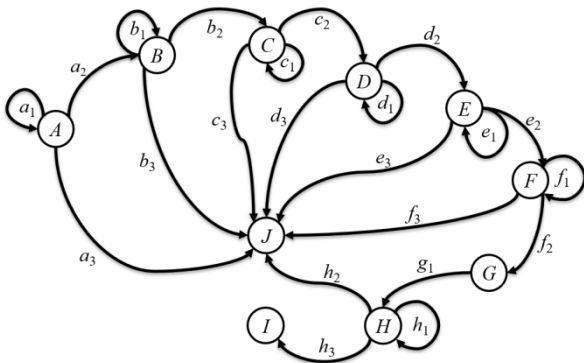


Рис. 1. Расширенный автомат, описывающий взаимодействие студента с обучающей системой

Расширенный автомат содержит 10 состояний и 22 перехода. Состояния A, C, E, G соответствуют выбору шагов алгоритма 1, 2, 3, 4 (в указанном порядке), состояния B, D, F, H соответствуют проверке действий, выполняемых на текущем шаге алгоритма, а переходы имеют следующий вид:

a_1 : выбран шаг алгоритма (i) , $i \neq 1$ и $fault < 3$ / $fault ++$, «Ошибка»;

a_2 : выбран шаг алгоритма (i) , $i = 1$ / ok ;

a_3 : выбран шаг алгоритма (i) , $fault = 3$ / «Повторите теорию»;

b_1 : ответ не совпадает, $fault < 3$ / $fault ++$, «Ошибка»;

b_2 : ответ совпадает / ok ;

b_3 : ответ не совпадает, $fault > 3$ / $fault ++$, «Повторите теорию»;

c_1 : выбран шаг алгоритма (i) , $i \neq 2$ и $fault < 3$ / $fault ++$, «Ошибка»;

c_2 : выбран шаг алгоритма (i) , $i = 2$ / ok ;

c_3 : выбран шаг алгоритма (i) , $fault = 3$ / «Повторите теорию»;

d_1 : ответ не совпадает, $fault < 3$ / $fault ++$, «Ошибка»;

d_2 : ответ совпадает / ok ;

d_3 : ответ не совпадает, $fault > 3$ / $fault ++$, «Повторите теорию»;

e_1 : выбран шаг алгоритма (i) , $i \neq 3$ и $fault < 3$ / $fault ++$, «Ошибка»;

e_2 : выбран шаг алгоритма (i) , $i = 3$ / ok ;

e_3 : выбран шаг алгоритма (i) , $fault = 3$ / «Повторите теорию»;

f_1 : ответ не совпадает, $fault < 3$ / $fault ++$, «Ошибка»;

f_2 : ответ совпадает / ok ;

f_3 : ответ не совпадает, $fault > 3$ / $fault ++$, «Ошибка»;

g_1 : выбран шаг алгоритма (i), $i = 3 / ok$;

h_1 : ответ не совпадает, $fault < 3 / fault ++$, «Ошибка»;

h_2 : ответ не совпадает, $fault > 3 / fault ++$, «Ошибка»;

h_3 : ответ совпадает / ok .

В начале работы студенту на экране компьютера выдается граф и список шагов алгоритма. Это соответствует начальному состоянию A расширенного автомата. Если студент правильно выбирает шаг алгоритма, то автомат из состояния A переходит в состояние B (переход a_2). Если студент неправильно выбирает шаг алгоритма, то автомат остается в том же состоянии A (переход a_1). Но как только у студента сгорают все попытки ($fault = 3$), то автомат из состояния A переходит в состояние J (переход a_3), которое говорит о том, что студент не справился с заданием.

В состояниях C и E поведение автомата определяется аналогичным образом.

Когда автомат находится в состоянии B , то студент выполняет задание по выделению максимальных соцветных подмножеств. Если студент выполнил задание верно, то далее автомат из состояния B перейдет в состояние C (переход b_2). Но при неправильном выполнении задания, с учетом уже потраченных попыток ($fault = 3$) в предыдущих состояниях, автомат остается в состоянии B (переход b_1). Как только попытки закончатся, выполняется переход из состояния B в состояние J (переход b_3).

Состояние D автомата соответствует тому, что студенту нужно будет выполнить задание по построению булевой матрицы и нахождению ее покрытия. Если задание выполнено правильно, то в автомате определен переход из состояния D в состояние E (переход d_2). Если задание было выполнено неверно, то автомат остается в состоянии D (переход d_1), но как только закончатся попытки ($fault = 3$) автомат из состояния D перейдет в состояние J (переход d_3).

Состояние F автомата соответствует выполнению студентом задания по удалению повторяющихся элементов. При правильном ответе автомат из состояния F перейдет в состояние G (переход f_2), при неправильном ответе – останется в этом же состоянии F (переход f_1), а в случае, если закончились попытки ($fault = 3$), из состояния F перейдет в состояние J (переход f_3).

Состояние G представляет собой беспроегрешный вариант, ведь из всех шагов остался последний шаг. Вне зависимости от ответа студента автомат может перейти только в состояние H (переход g_1).

Состояние H автомата соответствует ситуации, когда студенту нужно будет выполнить последнее задание: выбрать цвета и раскрасить вершины графа. Если задание выполнено верно, то автомат перейдет в состояние I (переход h_3). Если задание выполнено неверно, то останется в том же состоянии H (переход h_1). Если закончились попытки ($fault = 3$), то автомат из состояния H переходит в состояние J (переход h_2).

Таким образом, автомат попадает в состояние I , если студент справился с заданием, то есть правильно раскрасил граф, а в состояние J , если студент не справился с заданием.

В дальнейшем планируется реализовать веб-приложение, основываясь на описанном расширенном автомате, и внедрить данное приложение в курс «Дискретная математика ч. 2» в системе дистанционного образования MOODLE.

Список литературы

1. Кристофидес Н. Теория графов: алгоритмический подход. – М. : Мир, 1978. – 432 с.
2. Дискретная математика : учебно-методическое пособие. Ч. 2 / сост. С. А. Прокопенко. – Томск, 2006. – 29 с.
3. Graph Online [Электронный ресурс]. – URL: <https://graphonline.ru> (дата обращения 20.03.24).
4. Program for you [Электронный ресурс]. – URL: <https://programforyou.ru/calculators/postroenie-tablitsiistinnosti-sknf-sdnf> (дата обращения: 20.03.24).
5. Ликбез по дискретной математике [Электронный ресурс]. – URL: <https://stepik.org/course/91/promo?search=3221768027> (дата обращения: 20.03.24).
6. Основы дискретной математики [Электронный ресурс]. – URL: <https://stepik.org/lesson/12293/step/1?unit=4008> (Дата обращения: 20.03.24).
7. Основы теории графов [Электронный ресурс]. – URL: <https://stepik.org/lesson/383818/step/1?unit=371032> (дата обращения: 20.03.24).
8. Petrenko A., Boroday S., Groz R. Confirming Configurations in EFSM Testing // IEEE Trans. Software Eng. 2004. – Vol. 30. – P. 29-42.

Программно-аппаратный комплекс LabView-NI ELVIS II+ для работы с цифровыми и аналоговыми устройствами ввода-вывода

Н.А. Косарев

Научный руководитель: канд. физ.- мат. наук, доцент А.А. Жуков

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: navkosarev@gmail.com

Аннотация: Представлено описание программно-аппаратного комплекса LabVIEW-NI ELVISII+ для работы с цифровыми и аналоговыми устройствами ввода-вывода. Разработаны разделы электронного курса в системе Moodle по программированию линий цифрового и аналогового ввода-вывода NI ELVIS II+ в LabVIEW. Эти разделы включают примеры программ, а также методические и кон-трольные материалы по рассматриваемой теме.

Ключевые слова: NI ELVIS II+, LabVIEW, Moodle, ввод-вывод аналоговых и цифровых данных.

Комплект приборов NI ELVIS II+ представляет собой набор измерительных приборов, ориентированных на применение в учебном процессе [1]. Это оборудование широко используется в процессе обучения на радиофизическом факультете в различных курсах: "Радиоэлектроника" [2], "Измерительные приборы и устройства в радиотехнике" [3], "Схемотехника аналоговых электронных устройств" [4], а также для организации самостоятельной работы студентов [5].

Использование системы LabVIEW [6] для программирования комплекта приборов NI ELVIS II+ позволяет расширить возможности измерительной аппаратуры и создать дополнительные измерительные устройства [7].

В этом случае появляется возможность расширить навыки студентов области создания устройств сбора и обработки данных и сократить время на создание программно-аппаратных комплексов, ориентированных на решение таких задач.

Была поставлена задача создания набора виртуальных приборов (ВП) в системе LabVIEW для работы с цифровыми и аналоговыми устройствами ввода-вывода комплекта приборов NI ELVIS II+.

Набор ВП реализуется в среде графического программирования LabVIEW.

NI ELVIS II+ представляет программно-аппаратный комплекс, предназначенный для проведения лабораторных работ по общетехническим и специальным дисциплинам. Он вклю-

чает настольную рабочую станцию, монтажную панель, плату сбора данных, а также набор измерительных приборов и устройств. Объединение аппаратных средств и программного обеспечения, созданного в среде LabVIEW делает NI ELVIS II+ мощной и гибкой контрольно-измерительной платформой.

В ходе работы был создан набор виртуальных приборов для работы с различными датчиками, как аналоговыми, так и цифровыми.

В качестве примера рассмотрим работу с устройством аналогового ввода-вывода NI ELVIS II+ в LabVIEW.

На рисунке 1 приведены лицевая панель (1) и блок-диаграмма (2) виртуального прибора для ввода аналоговых данных. На лицевой панели размещены график зависимости температуры от времени, график изменения температуры в реальном времени и кнопка "стоп". Блок-диаграмма включает следующие блоки: узел «DAQAssistant» для соединения физического аналогового входа NI ELVIS II+ с самим виртуальным прибором, узел «WaveformChart» для вывода значений, поступающих с датчика в режиме реального времени, временную задержку, узел «XY Graph» для создания графика зависимости температуры от времени на протяжении всего диапазона измерений. В качестве источника аналогового сигнала использован модуль DFR0023, который построен на температурном датчике LM35 [5]. Модуль размещен на макетной плате NI ELVIS II+, сигнальный вывод модуля подключен к аналоговому входу «AI0»

этого комплекта. Как видно из графика, приведенного на рисунке 1, при нагревании или остывании датчика меняется напряжение на его выходе, поэтому появляется возможность построения графика температурной зависимости.

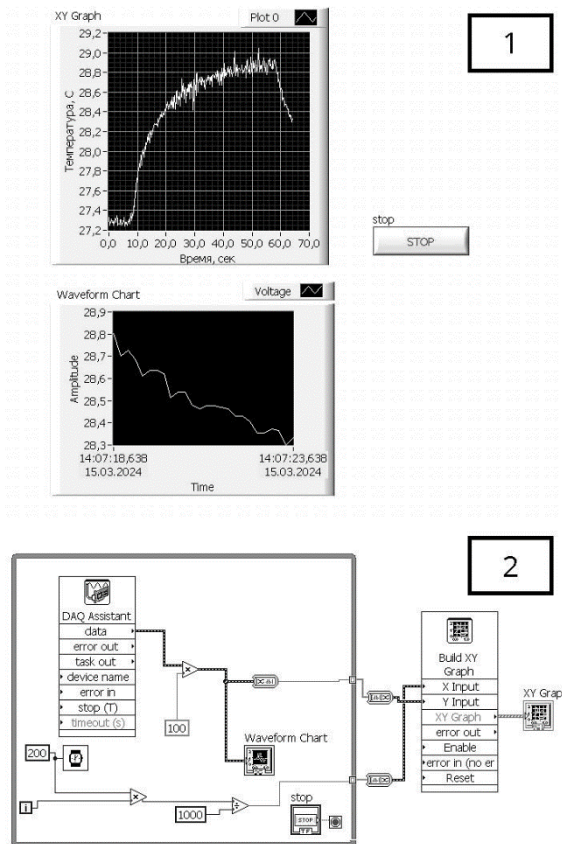


Рис. 1. Передняя панель (1) и блок-диаграмма (2) ВП для ввода данных

Кроме вышеописанного ВП также разработаны программы для работы с другими устройствами ввода-вывода аналоговых и цифровых данных.

В системе Moodle в рамках курса «Виртуальные приборы LabVIEW» разработаны разделы по программированию датчиков в среде LabVIEW с использованием NI ELVIS II+:

- программирование NI ELVIS II+ в LabVIEW. Цифровой ввод-вывод данных;
- программирование NI ELVIS II+ в LabVIEW. Аналоговый ввод-вывод данных.

В данных разделах размещена методическая информация по работе с конкретными датчиками и библиотека ВП, а также предусмотрены набор вариантов заданий для студентов и контрольные задания для проверки выполненных работ.

В результате работы создан набор ВП для работы с устройствами ввода-вывода аналоговых и цифровых данных. Разработаны разделы электронного курса в системе Moodle по работе с аппаратурой NI ELVIS II+ и LabVIEW. Этот курс планируется использовать в процессе обучения специалистов второго курса радиофизического факультета ТГУ при изучении дисциплины «Виртуальные приборы LabVIEW».

Список литературы

1. Комплекс Elvis II [Электронный ресурс]. – URL: https://edu.ikit.sfu-kras.ru/lab_p/pages/elvis.html (дата обращения 11.03.2024).
2. Zhukov A.A., Dotsenko O.A., Kochetkova T.D., Novikov S.S., Pavlova A.A. The computer laboratory workshops "The bases of electronics" // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings. – 2015. – P. 7147045.
3. Жабин О.С., Василенко Р.А., Маленко Г.И. и др. Использование информационных технологий в лабораторном практикуме по курсу "Измерительные приборы и устройства в радиотехнике" // Новые информационные технологии в исследовании сложных структур : материалы Тринадцатой Международной конференции. – Томск : ТГУ, 2020. – С. 39–40.
4. Жуков А.А., Дейкова Г.М., Ващенко Д.А. и др. Опыт использования комплекта виртуальных измерительных приборов NI ELVIS II+ в лабораторном практикуме по курсу "Схемотехника аналоговых электронных устройств" // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 8/3. – С. 231–232.
5. Доценко О. А., Жуков А.А. Опыт использования электронного курса "Основы работы с приборами комплекта NI ELVIS II+" для организации самостоятельной работы студентов // Методические, технологические и организационные аспекты электронного обучения : сборник статей по результатам научно-методической конференции. – Томск : ТГУ, 2022. – С. 8–13.
6. Жуков А.А. Система программирования LabVIEW. Основы работы : учебно-методич. пособие. – Томск : STT, 2020. – 150 с.
7. Седов Н.С. Программно-аппаратный комплекс LABVIEW-NI ELVIS II+ для измерения вольтамперных характеристик МОП-транзисторов // Двадцатая Всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов : сборник докладов конференции. – Томск : STT, 2023. – С. 143–145.
8. SKU:DFR0023. [Электронный ресурс]. – URL: https://wiki.dfrobot.com/DFRobot_LM35_Linear_Temperature_Sensor_SKU_DFR0023_ (дата обращения 14.03.2024).

Автоматизированный поиск полуволнового напряжения на фазомодуляторе интерферометра системы квантового распределения ключей

З.Г. Кузубаев

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, доцент М.Л. Громов

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: daplunc@mail.ru

Аннотация: В работе рассматривается задача определения оптимального напряжения для фазомодулятора, используемого в одном из плеч интерферометра системы квантового распределения ключей. Основной целью является достижение точного фазового сдвига, необходимого для корректной работы протокола BB84. Решение задачи осуществляется путём аппроксимации зависимости изменения фазы от приложенного напряжения.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей, фазомодулятор, аппроксимация, автоматизация, интерферометр.

В данной работе рассматривается метод определения оптимального напряжения для фазомодулятора, используемого в одном из плеч интерферометра системы квантового распределения ключей. Фазомодулятор играет ключевую роль в создании необходимых фазовых сдвигов для защиты передачи данных с использованием протокола BB84 [1], который предполагает использование квантового распределения ключей [2] для обеспечения безопасности передаваемой информации. Основная цель работы заключается в разработке программного обеспечения для автоматизации процесса настройки фазомодулятора, что позволит упростить подготовку и повысить точность настроек оборудования.

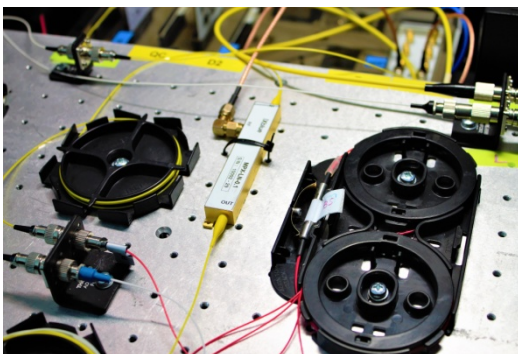


Рис. 1. Фотография интерферометра с фазомодулятором

На рисунке 1 демонстрируется интерферометр с интегрированным фазомодулятором, настройка которого в настоящее время выпол-

няется вручную. Автоматизация этого процесса представляется перспективной для упрощения подготовки и повышения точности работы системы квантового распределения ключей.

Работа описывает подходы и методы, используемые для точного определения напряжений, необходимых для достижения оптимального фазового сдвига, обеспечивающего корректную работу установки, включая методы аппроксимации и анализа данных, а также разработку соответствующего программного обеспечения.

Разработка метода определения напряжения для фазомодулятора включает подбор параметров, обеспечивающих точный фазовый сдвиг на половину длины волны. Процесс калибровки основан на теоретической модели [3], предполагающей зависимость фазового сдвига от приложенного напряжения, что допускает использование аппроксимационных методов для точного определения необходимых значений.

Для реализации метода используется комбинация аналитических расчетов и экспериментальных данных. Первоначально, с помощью программного обеспечения, разработанного на основе библиотеки ALGLIB [4], производится аппроксимация функции, описывающей изменение фазы в зависимости от напряжения. Данный процесс включает создание модели, которая представляет собой полином третьей степени, выбранный из-за его способности точно описывать поведение фазового сдвига. В ходе экспериментов сначала генерируются тестовые данные без шума, затем к ним

добавляются искусственные шумы для имитации реальных условий эксплуатации оборудования. Анализ данных проводится с использованием математических и статистических методов для выявления оптимальных параметров напряжения. Результаты анализа визуализируются через библиотеку Matplotlib [5]

Используя разработанную программу, применялась для анализа экспериментальных и сгенерированных данных. В процессе работы было обработано более четырехсот файлов с данными, каждый из которых прошёл через программу для определения оптимальных условий фазового сдвига. Отклонение измеренных значений от теоретически предсказанных составило не более 1,13%, что свидетельствует о высокой точности метода. Помимо этого, относительная погрешность, рассчитанная на основе всех измерений, составила всего 0,016%, что подтверждает надёжность и эффективность использованного подхода к аппроксимации.

Для наглядности результатов, программа использует визуализацию, демонстрируя аппроксимированные данные и точки максимума на графиках. Подтверждая правильность теоретических расчетов иллюстрируя успех метода в выявлении оптимальных параметров для настройки фазомодулятора.

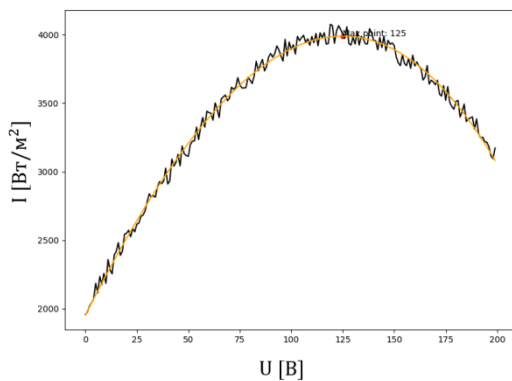


Рис. 2. График аппроксимированных данных с искомой точкой

Рисунок 2 иллюстрирует график аппроксимированных данных с отмеченной точкой максимума, которая является искомым значением напряжения. Эта точка ключевая для настройки фазомодулятора в реальных условиях эксплуатации, гарантируя точность и стабиль-

ность работы системы квантового распределения ключей.

В рамках данной работы была разработана программа, определяющая искомое значение напряжения для фазомодулятора, используемого в интерферометре системы квантового распределения ключей. Метод, применённый в программе, базируется на использовании полиномиальной аппроксимации для точного определения зависимости фазового сдвига от приложенного напряжения. Этот подход доказал свою эффективность, обеспечивая высокую точность и надёжность в определении необходимых параметров. Результаты работы программы на экспериментальных и сгенерированных данных хорошо согласуются с теоретическими расчётами. Программа продемонстрировала свою способность адаптироваться к различным условиям и предоставить надёжные данные для настройки фазомодулятора. Эффективность и точность разработанного подхода подтверждается результатами практических испытаний, включая анализ большого объема данных.

Список литературы

1. BB84 [Электронный ресурс] // Википедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/BB84> (дата обращения: 11.01.2023).
2. Методическое пособие по квантовым коммуникациям. Квантовое распределение ключей [Электронный ресурс]. (дата обращения: 26.12.2022).
3. Кузубаев З.Г. Автоматизированный поиск оптимального напряжения на фазомодуляторе интерферометра системы квантового распределения ключей // Двадцатая всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов : сборник докладов конференции. – Томск : STT, 2023. – С. 113–114.
4. ALGLIB. (2021) [Электронный ресурс] // ALGLIB: cross-platform numerical analysis and data processing library. – URL: <https://www.alglib.net> (дата доступа: 17.03.2023).
5. Matplotlib. (2022). Кроссплатформенная библиотека для визуализации [Электронный ресурс]. – URL: <https://matplotlib.org> (дата обращения: 29.02.2024).

Нейросетевой алгоритм распознавания и классификации черноморского зоопланктона

М.М. Курков

Научный руководитель: д-р тех. наук, профессор В.Т. Калайда

Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: kurkov190801@mail.ru

Аннотация: В данной работе исследуется применение цифровой голографической камеры (ДНС) для регистрации численности и видового распределения зоопланктона. В отличие от традиционных методов, ДНС обеспечивает детализированный анализ формы, размера и концентрации планктона *in situ*. Решение проблемы обработки больших объемов данных достигнуто за счет использования нейросетевых алгоритмов, обеспечивающих автоматизацию процессов детекции и классификации. Результаты показывают значительное влияние морфологии зоопланктона на качество работы нейросети в рамках несбалансированного датасета, при схожей точности полнота, входящая в F1, сильно рознится.

Ключевые слова: цифровая голография, цифровая голографическая камера, 2D - картирование при воспроизведении цифровых голограмм, цифровая фокусировка, нейросетевой алгоритм, классификация и распознавание зоопланктона.

Основными параметрами, регистрируемыми в биоиндикационном эксперименте, является численность и видовое распределение планктона в водоёме. Принято считать, что зоопланктон является точнейшим биоиндикатором качества воды и составной частью экологического мониторинга водной среды [1]. В настоящей работе для этой цели используется лабораторное исполнение цифровой голографической камеры (ДНС) [2]. В отличие от классических методов [3,4], ДНС технология позволяет получить детальные характеристики формы, размера и концентрации планктона в исследуемом объёме *in situ*. Однако при численном восстановлении изображений из голограммы получается большое количество плоскостей, из которых необходимо выбрать те, в которых объект находился при регистрации и даже при использовании алгоритма построения 2D образа объема, ввиду регистрации в реальном времени требуется ручная обработка большого числа изображений с целью подсчёта и классификации зоопланктона.

В настоящее время для решения задач детекции и классификации широко применяются нейросетевые алгоритмы. Они позволяют автоматизировать процессы распознавания с достаточной точностью до ~97% [5].

В рамках программы «большие вызовы» был выполнен проект задачами которого были:

Формирование обучающей и тестовой выборки восстановленных голограмм зоопланктона, собранного сетным методом в акватории Черного моря.

Обучение нейросети и оценка качества работы нейросетевого алгоритма в задачах распознавания и классификации зоопланктона Черного моря

Для отлова зоопланктона использовался метод вертикального лова от дна до поверхности нескольких точках акватории сетью Джеди с ячейкой 37 мкм. После отлова проводилась ручная обработка, очистка и отбор проб зоопланктона. Для регистрации зоопланктона отобранные особи помещали в подготовленную кювету и помещали в поле зрения лабораторной цифровой голографической камеры, представленной на рисунке 1, после чего производилась регистрация особей.

Из восстановленных цифровых голограмм формировался обучающий и тестовый набор изображений. В результате ручного отбора проб с учетом найденных организмов было решено остановиться на следующих 6 таксонах для классификации: *Chaetognatha*, *Copepoda*, *Noctiluca*, *Cirripedia*, *Larvae*, *Penilia*.

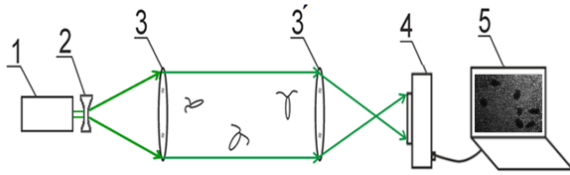


Рис. 1. Схема записи цифровой голограмм: 1 – полупроводниковый лазер; 2 – рассеивающая линза; 3,3' – коллимирующей и фокусирующей объективы, между которыми располагается кювета; 4 – матрица цифровой камеры; 5 – компьютер

Для решения задач распознавания и классификации зоопланктона использовалась сверточная нейронная сеть YOLOv8, которая является одной из самых современных и эффективных моделей для задач объектного детектирования, а конкретно была выбрана архитектура YOLOv8x как наиболее точная в семействе, она содержит 86,7 млн параметров. Архитектура YOLOv8 состоит из 3 основных блоков [6]:

1. Спина – используется для извлечения признаков из входного изображения. YOLOv8 использует улучшенный вариант сети CSPDarknet, оптимизированной для повышения производительности и уменьшения вычислительной сложности. Включает в себя несколько блоков свёртки, нормализации и активации.

2. Шея – часть архитектуры предназначена для обработки признаков и их объединения для улучшения качества предсказаний. Включает блоки свёртки и объединения признаков, что способствует повышению точности детекции.

3. Голова – отвечает за окончательные предсказания ограничивающих рамок, классов и вероятностей для каждого объекта на изображении. Включает в себя несколько блоков свёртки и полносвязных слоёв, адаптированных для выходных предсказаний. Схематическое представление приведено на рисунке 2.

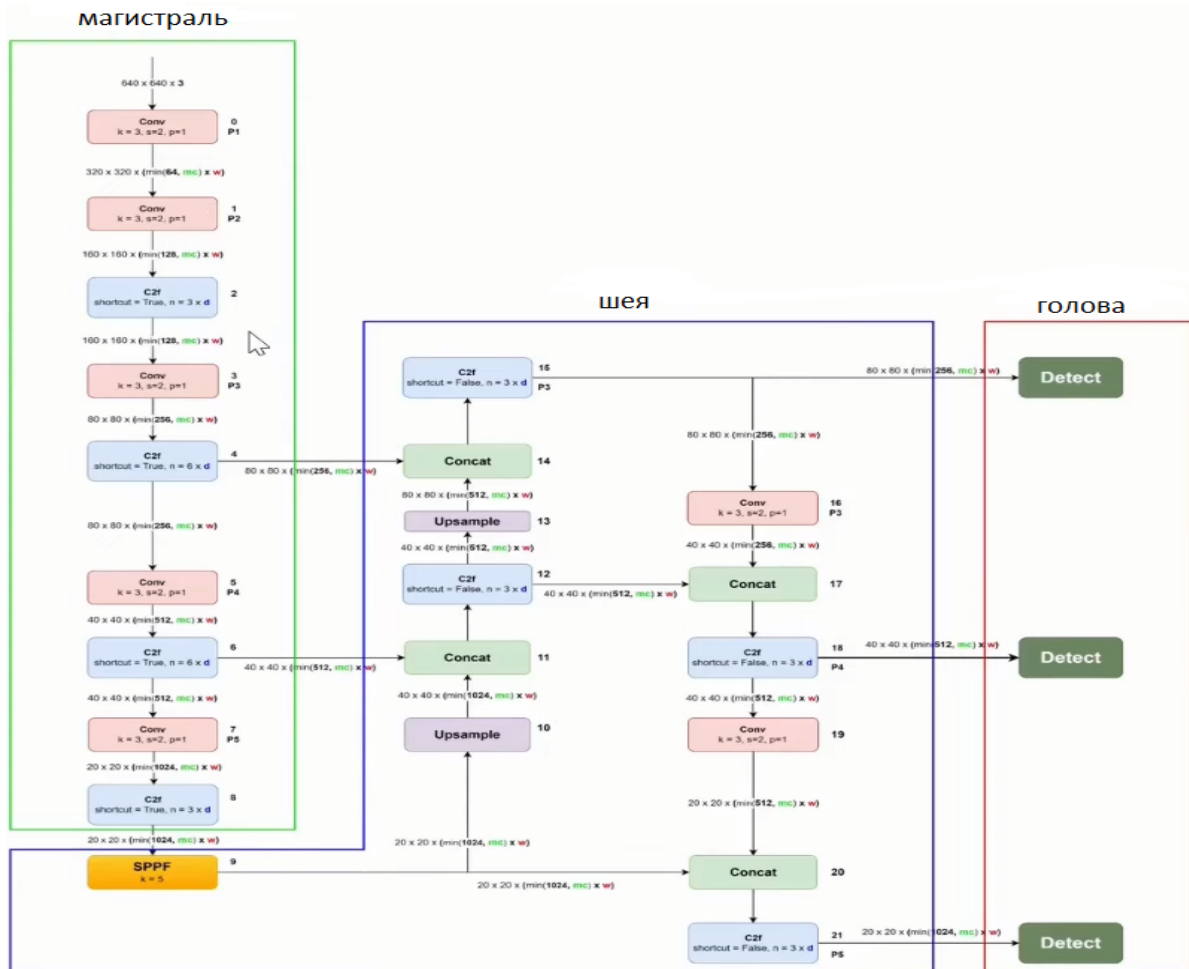


Рис. 2. Архитектура модели YOLOv8

Каждый отдельный блок на рисунке 2 представляет определённую последовательность

свёрток подвыборки и других операций с изображением.

Результаты

Для обучения алгоритма был сформирован датасет из 1440 размеченных изображений, полученных при восстановлении с цифровых голограмм, тестовый набор составил 7%. Искусственно набор данных был увеличен до 2570 изображений, а валидационная выборка составила 210 изображений. Обучение проводилось со стандартными настройками параметров.

Для программной реализации был выбран язык C# и библиотека winforms, позволяющая создавать оконные приложения windows, для работы с обученной моделью использовалась библиотека YOLOv8.Net.

В ходе работы было разработано оконное приложение, которое позволяет удобно работать с обученной моделью нейросети и производить распознавание и подсчет различных классов зоопланктона как на одиночных изображениях, так и на сериях. Интерфейс программы представлен на изображении 3.

Для оценки качества тестирования на валидационной выборке использовалась метрика точности и F1 [7]. Результат работы оконного приложения для распознавания Черноморского зоопланктона на восстановленных изображениях показан на рисунке 4.

После тестирования обученной нейронной сети на валидационной выборке была получена оценка значения F1 от уверенности, рисунок 5.

Из графика видно, что средняя оценка F1 при уверенности 30-40% составляет ~65%, что является низким результатом, однако также видно, что F1 отдельных классов составляет 80-90%, такой разброс обусловлен морфологическим строением организмов, в частности *Chaetognatha*, F1 которой до 90% - это морская стрелка, которая имеет сравнительно крупные размеры и сильно вытянутое строение тела, она представлена на рисунке 2 слева, а *Noctiluca* F1 которой только 40% - это ночесветка тело которой очень мало полупрозрачно и имеет круглую форму. Однако если смотреть на точность, рисунок 6, то она достигает 80-95% при уверенности 60-80%.

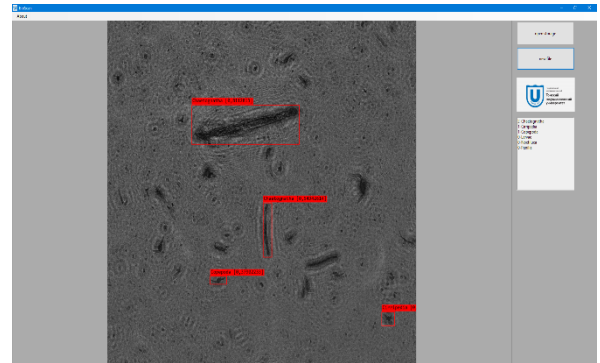


Рис. 3. Интерфейс разработанной программы

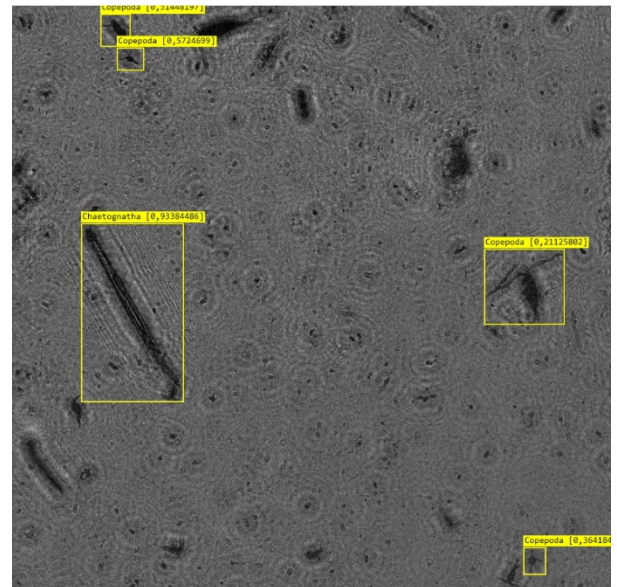


Рис. 4. Пример работы нейронной сети

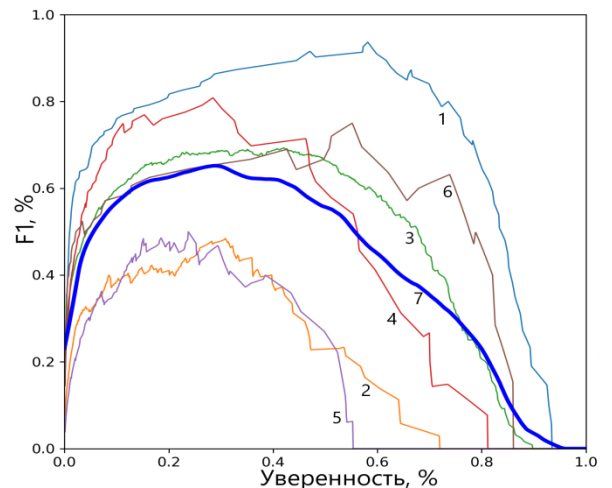


Рис. 5. График зависимости F1 от уверенности: 1 – *Chaetognatha*, 2 – *Cirripedia*, 3 – *Copepoda*, 4 – *Larvae*, 5 – *Penilia*, 6 – *Noctiluca*, 7 – среднее

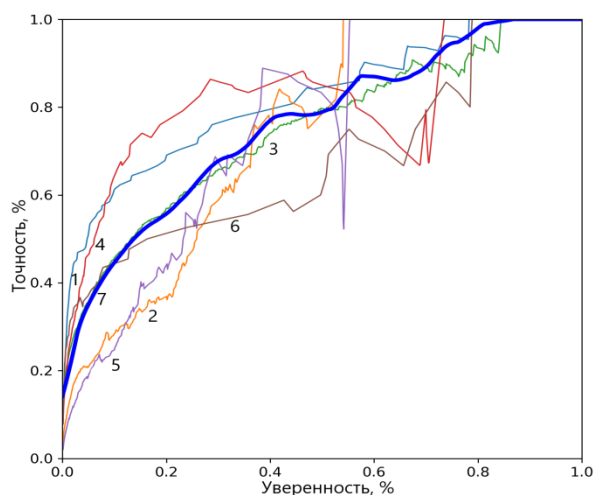


Рис. 6. График зависимости точности от уверенности

В ходе работы был составлен обучающий датасет зоопланктона из Черного моря, зарегистрированного с помощью цифровой голографической камеры. Нейросеть протестирована на валидационной. Показано, что точность распознавания достигает 80-95% при уверенности 60-80%, несмотря на некоторую разницу в оценке F1 для различных таксонов, обусловленную их морфологическими особенностями. Для улучшения показателей требуется балансировка датасета и его увеличение.

Благодарности

Отдельная благодарность школьникам, принимавшим участие в выполнении проекта: Демиду, Анастасии, Альберту, Александре и Матвею, а также членам команды Александре Юрьевне и Дарье Валерьевне.

Исследование выполнено при поддержке образовательного центра “Сириус” и лаборатории “радиофизических и оптических методов исследования окружающей среды”.

Список литературы

1. Арефьева И.В. Планктон как биоиндикатор экологического состояния водоемов // Научные труды НГТУ. – 2017. – Т. 2. – С. 63.
2. Dyomin V.V., Davydova A. Y., Polovtsev I. G. Underwater holographic sensor for plankton Sstudies in situ including accompanying measurements // Italian National Conference on Sensors. – 2021. – Vol. 21, is. 14. – 4863.
3. Чуйко Г.М., Томилина И.И., Холмогорова Н.В. Методы биодиагностики в водной экотоксикологии // Токсикологический вестник. – 2022. – Т. 30, №5. – С. 315–322.
4. Thompson C.R.S., Bron J.E., Bui S. Illuminating the planktonic stages of salmon lice: A unique fluorescence signal for rapid identification of a rare copepod in zooplankton assemblages // Journal of Fish Diseases. – 2021. – Vol. 44. – P. 863-879.
5. Guo, B., Nyman, L., Nayak, A. R. et al. Automated plankton classification from holographic imagery with deep convolutional neural networks // Limnology and Oceanography: Methods. – 2020. – Vol. 19. – P. 21-36.
6. Brief summary of YOLOv8 model structure: Github 2023. [Electronic resource]. – URL: <https://github.com/open-mmlab/mmyolo/blob/dev/configs/yolov8/README.md> (дата обращения 02.06.2024).
7. Saito T., Rehmsmeier M. The Precision-Recall Plot Is More Informative than the ROC Plot When Evaluating Binary Classifiers on Imbalanced Datasets // PLoS ONE. – 2015. –Vol. 10, is. 3. – e0118432.

Разработка программного обеспечения для портативного электрокардиографа

А.И. Мауль, В.И. Куприянова, Д.С. Ладынская, А.В. Остряков

Научный руководитель: А. Трубачев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: aim40@tpu.ru, vik33@tpu.ru, dsl22@tpu.ru, avo42@tpu.ru

Аннотация: В статье описывается разработка программного обеспечения для портативного носимого электрокардиографа с возможностью передачи данных по протоколу WI-FI.

Ключевые слова: телемедицина, носимый трёхканальный электрокардиограф, IndexedDB, MQTT-протокол, сигнал ЭКГ, веб-страница, хранение медицинских данных, протокол WI-FI.

В последнее время в связи с развитием телемедицины стало актуально создание устройств и различных технологий для обмена медицинской информацией. Внутри одной больницы в условиях большого количества пациентов с заболеваниями разной степени тяжести работа персонала может быть затруднена необходимостью наблюдения за каждым из них одновременно. В настоящее время к каждому больному в тяжелом состоянии приставлена медсестра для мониторинга показаний приборов. В связи с этим для использования в медицинских учреждениях предлагается программное обеспечение (ПО) для устройства непрерывного мониторинга состояния сердечной мышцы нескольких пациентов одновременно и удалённо, осуществляющего регистрацию сигнала ЭКГ в трёх отведениях и имеющего возможность передачи данных по WI-FI. Также данное ПО может быть использовано в носимых электрокардиографах для регулярного контроля работы сердечной мышцы людей, находящихся в зоне риска развития заболеваний сердечно-сосудистой системы.

ПО включает в себя: веб-приложение для удобного представления данных; программу для передачи данных с микроконтроллера, считывающего и оцифровывающего значения потенциала ЭКГ; серверный компьютер с базой данных IndexedDB, хранящей персональные данные пациентов, а также зарегистрированные электрокардиограммы.

Для удобного представления данных было разработано веб-приложение для визуализации сигнала портативного электрокардиографа, web-интерфейс которого представлен на рисунке 1. Оно позволяет осуществить регистрацию врача (рис. 2), производящего наблюдение, до-

бавление персональных данных пациента, запись ЭКГ в трёх отведениях, регистрацию ЭКГ в режиме реального времени, расчёт частоты сердечных сокращений, сохранение суточных или частичных записей ЭКГ сигнала в базу данных. Вся обработка сигнала, включая построение графиков и расчёт частоты сердечных сокращений, производится на языке JavaScript.

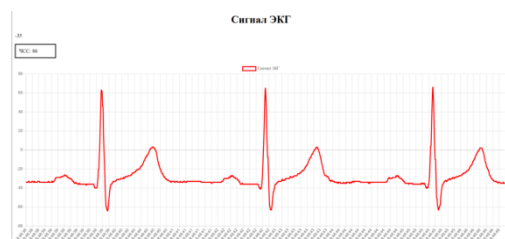


Рис. 1. Визуализация сигнала ЭКГ

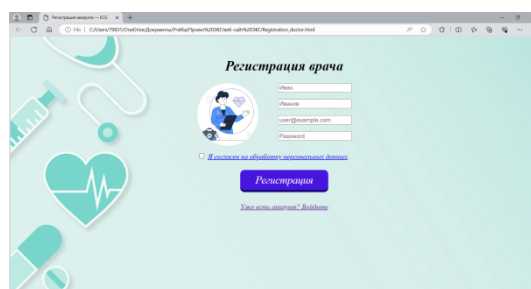


Рис. 2. Страница регистрации врача

Для реализации беспроводной передачи данных по Wi-Fi был выбран микроконтроллер ESP8266. Хотя этот микроконтроллер уступает по мощности другим из этой серии, например, ESP32, его возможностей более чем достаточно для оцифровки сигнала и передачи его по WI-FI на серверный компьютер. Протокол WI-FI необходим для наблюдения за состоянием мо-

бильных пациентов удалённо, что возможно поскольку он не требует физической связи с серверным компьютером. Значения потенциала, попадающие на аналоговый вход ESP8266, с частотой дискретизации 500 Гц через брокер shiftr.io поступают в базу данных IndexedDB серверного компьютера и параллельно также через брокер на веб-страницу, отображающую сигнал в режиме реального времени.

Для того чтобы потенциально доступ к данным был не только у одного компьютера, а у всех компьютеров медицинских работников, используется общение не напрямую по WI-FI, а через брокер, работа которого подчинена MQTT-протоколу. MQTT протокол имеет значительные преимущества перед другими протоколами для применения в этом устройстве: реализация MQTT на устройстве IoT требует малого количества кода, и микроконтроллер тратит немного энергии. Задача брокера – отфильтровать все входящие сообщения от издателей и отправить их соответствующим подписчикам. Внутри брокера распределение сообщений производится по темам, устройство может быть подписано на несколько тем, и одновременно быть издателем нескольких тем. Также брокер отвечает за авторизацию и аутентификацию клиентов MQTT. В данном ПО брокером является серверная система MQTT shiftr.io (платформа IoT для взаимосвязанных проектов), которая координирует сообщения между клиентскими устройствами.

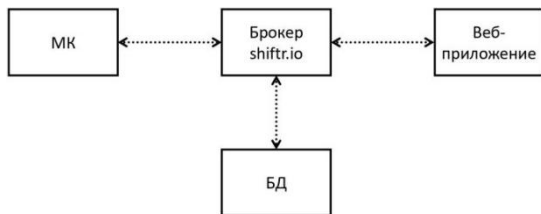


Рис. 2. Схема связи по протоколу MQTT

В предлагаемой системе обмена данными на серверном компьютере в режиме реального времени работает отдельное веб-приложение, принимающее сообщения от брокера о запросе данных, начале и конце записи, и непосредственно с данными, которые необходимо занести в базу. На компьютере медицинского работника, в свою очередь, веб-приложение публикует сообщения с запросом данных, с просьбой начать запись сигнала, поступающего с микроконтроллера, в серверное хранилище, или прини-

мает запрошенный пакет со значениями сигнала ЭКГ от брокера.

В данном программном обеспечении используется встроенная в браузер база данных IndexedDB, доступ к которой возможен только из этого браузера. Значительным преимуществом для безопасной передачи медицинских данных является реализация общения с базой данных при помощи транзакций, обеспечивающих надёжность.

Применительно к данному ПО база данных имеет следующую архитектуру, представленную на рисунке 3. Было реализовано три хранилища, в каждом из которых доступ к данным осуществляется при помощи ключей. Каждая запись пациента хранит, в том числе, информацию о датах, когда был зарегистрирован сигнал ЭКГ и о ключах, соответствующих записям ЭКГ в хранилище ECG. Часть данных хранится в зашифрованном виде, поскольку является персональными данными.

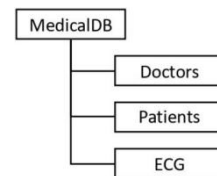


Рис.3. Архитектура базы данных

В ходе разработки было реализовано программное обеспечение для хранения данных пациентов, наблюдения и регистрации ЭКГ в режиме реального времени. Алгоритм определяет частоту сердечных сокращений, и имеет потенциал для дальнейшего математического анализа сигнала. Данное программное обеспечение может быть использовано в портативных электрокардиографах для регулярного контроля работы сердечной мышцы.

Список литературы

1. Ивель В.П., Герасимова Ю.В., Петров П.А., Молдахметов С.С. Основные этапы разработки беспроводной системы Холтеровского мониторинга // Вестник СКУ им. М. Козыбаева. – 2020. – № 2(47). – С. 254-261.
2. Майхуб С.Г. Модель сбора данных в сетях IoT на основе протокола обмена сообщениями MQTT // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 991-995.
3. Антошкин В.А., Щербакова В.И. Использование JavaScript интерфейса прикладного программирования для управления NoSQL базой данных

- "IndexedDB" // Информатика и прикладная математика. – 2021. – № 27. – С. 26-32.
4. Гончаров А.Ю. Web-дизайн: HTML, JavaScript и CSS : карманный справочник. – М. : КУДИЦ-Пресс, 2009. – 320 с.
5. Худяков С.В., Самохвалова С.Г. Использование микроконтроллера ESP8266 01. Программирование с помощью Arduino IDE // Постулат. – 2016. – № 12(14). – С. 9.

Проверка программного обеспечения с учётом требований к информационной безопасности

В.В. Ни

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, доцент В.А. Мещеряков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: nivladislav350@mail.ru

Аннотация: В работе рассматриваются способы верификации программного обеспечения по критериям информационной безопасности. Рассмотрены методики проверки, указанные в законодательстве Российской Федерации и способы тестирования.

Ключевые слова: Автоматизированное рабочее место, программное обеспечение, тестирование, методика.

Современное информационное общество не может обойтись без автоматизированных рабочих мест, где компьютеры и специализированное программное обеспечение играют ключевую роль в деятельности бизнеса, науки, здравоохранения, образования и других областей. Эти рабочие места включают разнообразные устройства и программы, управляющие сложными процессами, такими как медицинская аппаратура, системы управления производством, банковские терминалы и прочее. С увеличением сложности таких систем становится критически важным обеспечение их надежной работы. В наше время многие ИТ-компании работают независимо от других организаций, что требует поиска новых продуктов или разработки собственных решений. Для защиты бизнес-процессов компании необходимо проводить верификацию нового программного обеспечения.[1]

Одной из ключевых задач проверки программного обеспечения для автоматизированных рабочих мест является обеспечение его корректного функционирования в соответствии с заранее определенными критериями, требованиями и стандартами безопасности. Необходимо не только проводить тестирование отдельных частей и модулей программы, но также проверять их взаимодействие для обеспечения стабильности и безопасности работы всей системы. Проверка должна быть выполнена согласно методике тестирования обновлений

безопасности программного и аппаратного обеспечения, утвержденной Федеральной службой по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК) России 28 октября 2022 года.[2]

Согласно методике, утвержденной ФСТЭК, необходимо провести следующие тесты:

- 1) сверка идентичности обновлений безопасности (Т001);
- 2) проверка подлинности обновлений безопасности (Т002);
- 3) антивирусный контроль обновлений безопасности (Т003);
- 4) поиск опасных конструкций в обновлениях безопасности (Т004);
- 5) мониторинг активности обновлений безопасности в среде функционирования (Т005);
- 6) ручной анализ обновлений безопасности (Т006).

Дополнительно могут проводиться тесты, утвержденные во внутренних документах компании.

При выполнении этих процедур исследователь самостоятельно выбирает методику проверки, учитывая доступность обновлений безопасности через различные источники, их открытый доступ, а также свои технические навыки и наличие необходимого оборудования для анализа. По завершении тестирования исследователь подробно описывает результаты каждого проведенного теста. В случае выявления подозрительных признаков в процессе проверки, необходимо провести более детальный

анализ с использованием методов ручного изучения обновлений безопасности. Далее ответственный оператор информационной системы принимает решение о применении обновлений на основе результатов проведенных исследователем тестов согласно установленной процедуре.[3]

Существуют разные методы тестирования программного обеспечения:

1) Ручное тестирование: это процесс выявления ошибок в программе путем ручного исследования ключевых и критических для безопасности компонентов со стороны опытного специалиста по обеспечению качества. Цель состоит в проверке соответствия установленным требованиям.

2) Автоматизированное тестирование: в этом методе используются специальные средства для автоматического выполнения наборов тестовых сценариев с автоматическим анализом результатов. Набор инструментов должен охватывать все аспекты тестирования, включая функциональность, безопасность и производительность программного обеспечения.

Преимущества автоматизированного тестирования включают повышение эффективности проверки, сокращение времени, затрачиваемого на проведение тестов, а также увеличение точности и надежности результатов. Необходимо отметить, что несмотря на плюсы автоматизированного подхода, он не может полностью заменить ручное тестирование, поскольку важна человеческая экспертиза при анализе результатов и принятии решений на основе этих данных. Этот недостаток можно значительно смягчить, разработав систему верификации, включающую базовые алгоритмы проверки уязвимостей ПО и специфические требования компании. Система алгоритмов проверки уязвимостей должна соответствовать основным принципам: быть ортогональной и полной, а также удовлетворять специфическим требованиям компании, чтобы обеспечить конкурентное преимущество разрабатываемой автоматизированной системы.

Соблюдение принципов ортогональности алгоритмов позволяет упорядочить требования ФСТЭК, разбив их на отдельные, независимые компоненты, избавиться от избыточного кода базового алгоритма, который может усложнять работу процесса анализа уязвимостей, а также

оптимизировать программы тестирования. Требование полноты алгоритмов тестирования порой превышает рамки методик, утвержденных ФСТЭК. Современные информационные системы сталкиваются с уязвимостями, вызванными использованием новейших технологий, таких как искусственный интеллект и квантовые технологии. Эти изменения необходимо отслеживать и вовремя включать соответствующие алгоритмы в базис. Разработка алгоритмов тестирования, удовлетворяющих специфическим требованиям компании, может быть сложной, но их создание должно быть основано на общем подходе к анализу и проверке информационной безопасности.

Автоматизированные системы должны содержать компоненты для принятия решений, документирования процесса проверки, обработки исключительных ситуаций, связанных с программным и аппаратным обеспечением, а также иметь удобный пользовательский интерфейс.

Поэтому разработка автоматизированных систем для тестирования и проверки программного обеспечения остается важной для создания автоматизированных рабочих мест и играет ключевую роль в обеспечении качества и надежности функционирования систем, повышении эффективности бизнес-процессов, обеспечении безопасности информации и снижении риска возможных сбоев.

В данном контексте быстрое развитие технологий и методов проверки является необходимым для приспособления к постоянно меняющимся требованиям и вызовам современного информационного общества.[4]

Процессы контроля информационной безопасности организации можно рассматривать как две основные части. Первая часть включает в себя проверку на наличие несанкционированных утечек информации, а вторая - проверку несанкционированного внедрения программного обеспечения или файловых компонентов. В обоих случаях необходимо создать строго ортогональную систему тестирования. Это означает построение набора тестов, где нет повторяющихся элементов. Наличие повторяющихся элементов может привести к неоднозначным результатам тестирования, усложняет процесс тестирования, заполняя результаты лишней ин-

формацией, и требует дополнительной проверки для обеспечения безопасности.

Для создания подобных тестов можно использовать критерии, построенные на предположениях о возможных ошибках. Однако подобный метод может содержать множество субъективных моментов, поскольку он опирается на оценку рисков системы, квалификацию разработчиков и опыт тестировщиков. Существующие методы разработки тестов часто основаны на субъективной оценке, что является основной причиной принятия неверных решений.

Исходя из базового примера, где процессы контроля информационной безопасности на предприятии можно разделить на две основные части, давайте исследовать методы формализованного подхода к созданию ортогональной системы тестирования. Для этого необходимо более детально разобрать понятия несанкционированной утечки информации и несанкционированного внедрения программных продуктов в информационную систему предприятия.

Допустим, что утечка информации происходит из-за незаконного копирования файла. Процесс копирования осуществляется стандартным кодом, имитирующим действия конечного автомата. Подтверждение корректности кода представлено в логической таблице переходов и считается безупречным.

Для построения ортогональных алгоритмов тестирования необходимо выявить все возможные способы передачи информации и проверить каждый канал на наличие возможности копирования. Это приведет к формированию базового набора тестов. Следующим этапом будет проверка полноты этого набора путем анализа линейной зависимости каждого нового теста от базовых.

Теперь рассмотрим несанкционированное внедрение программных продуктов в информационное пространство предприятия. Предпо-

ложим, что внедрение информации происходит через процедуру записи. Запись файлов или их частей в системе осуществляется с использованием стандартного кода, имитирующего действия конечного автомата. Проверка корректности этого кода осуществляется через логическую таблицу переходов и считается верной.

Для создания ортогональных алгоритмов тестирования необходимо выявить все возможные способы записи информации и проверить каждый канал на возможность записи. В результате формируется базовый набор тестов. Для проверки его полноты используется аналогичный метод анализа линейной зависимости любого нового теста от базовых. Этот подход можно применить ко всем уязвимым элементам. Такой метод создает систему канонических, ортогональных тестов, без перекрывающихся элементов, что позволяет избежать неопределенностей в оценке результатов тестирования, уменьшить лишнюю информацию в тестах и упростить проверку безопасности.

Список литературы

1. Гончаров В.Н., Ерохин А.М., Колосова О.Ю. и др. Информационное общество: проблемы становления и закономерности развития: монография. – Новосибирск : Изд-во ЦРНС, 2014. – 184 с.
2. Методика тестирования обновлений безопасности программных, программно-аппаратных средств // ФСТЭК России [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-28-oktyabrya-2022-g>.
3. Марков А.С., Цирлов В.Л., Барабанов А.В. Методы оценки несоответствия средств защиты информации / под ред. А.С. Маркова. – М. : Радио и связь, 2012. – 192 с.
4. Амиров А.Ж., Когай Г.Д., Томилов А.Н. и др. Проблемы верификации и тестирования программного обеспечения информационно управляющих систем // Вестник науки и образования. – 2017. – № 26. – С. 13–16.

Разработка набора функций базовых гейтов для эмулятора квантового компьютера

М.А. Олейник

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, доцент С.Н. Торгаев

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: marinamoro149@gmail.com

Аннотация: В данной научной статье описаны результаты разработки и программной реализации однокубитных операций для обработки изображений на симуляторе квантового компьютера. В работе используются квантовые операции, такие как гейт Адамара, гейт поворота X (оператор NOT), гейт поворота Y и гейт поворота Z. Разработан программный код на основе использования фреймворка PyTorch на языке Python.

Ключевые слова: кубит, гейт, код, оператор, эмулятор, квантовый компьютер, квантовые вычисления.

Квантовые вычисления представляют собой важное направление развития современных технологий, основанное на использовании принципов квантовой механики для решения сложных вычислительных задач. В настоящее время квантовые компьютеры и симуляторы находятся в центре внимания научного и технического сообщества, так как обладают потенциалом превзойти классические вычислительные системы в решении широкого спектра задач [1].

Однако, разработка и эксперименты с реальными квантовыми устройствами являются сложными и затратными процессами, а их доступность ограничена. Поэтому для изучения и тестирования квантовых алгоритмов на практике широко используются эмуляторы [2, 5, 6]. Эти программные средства позволяют моделировать поведение квантовых систем на классических компьютерах, предоставляя исследователям доступ к квантовым вычислениям без необходимости использования реальных квантовых устройств. Однако существующие эмуляторы являются зарубежными и доступ в них с IP адресов РФ невозможен. Существующий российский эмулятор также не имеет общего доступа.

Таким образом, актуальной становится задача создания собственного эмулятора квантовых вычислений, который был бы доступен для исследователей из России и других стран. Это позволило бы расширить круг пользователей и стимулировало бы развитие квантовых технологий в стране. Эмулятор, который будет иметь общий доступ, должен иметь две части: web и

сервер. На сегодняшний день разработан прототип web-интерфейса, а также серверная часть на базе библиотеки Qiskit [3]. Однако, реализация программы расчёта на базе данных библиотеки не позволяет ускорить процесс вычисления, в частности за счёт инструментов распараллеливания.

Целью данной работы является создание библиотеки для построения простейших квантовых алгоритмов, направленных на работу в эмуляторе квантового компьютера. Исследование ориентировано на разработку инструментов, способных эффективно вычислять значения кубитов с использованием принципов квантовых вычислений.

Для обеспечения эффективной работы серверов и выполнения распараллеливания вычислений важно выбрать подходящий инструмент. В нашем случае, для реализации функций квантовых операций был выбран фреймворк PyTorch.

В рамках данной работы рассматриваются четыре однокубитных гейта: гейт Адамара, гейт поворота X (оператор NOT), гейт поворота Y и гейт поворота Z. Каждая из этих операций описывается матрицей, которая преобразует состояние кубита [4].

Гейт Адамара используется для создания суперпозиции.

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \#(1)$$

Действия оператора Адамара на кубит для α и β :

$$H|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \alpha + \beta \\ \alpha - \beta \end{pmatrix} = \frac{\alpha + \beta}{\sqrt{2}} |0\rangle + \frac{\alpha - \beta}{\sqrt{2}} |1\rangle$$

Гейт X – это оператор инверсии.

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \#(2)$$

Действия оператора NOT на кубит:

$$X|\psi\rangle = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta \\ \alpha \end{pmatrix} = \beta|0\rangle + \alpha|1\rangle$$

Гейт Y является комплексной операцией.

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \#(3)$$

Действия гейта Y на кубит:

$$Y|\psi\rangle = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -i\beta \\ i\alpha \end{pmatrix} = -i\beta|0\rangle + i\alpha|1\rangle$$

Гейт Z соответствует повороту вектора вокруг оси Z на угол π на сфере Блоха.

$$Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \#(4)$$

Действия гейта Z на кубит:

$$Z|\psi\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha \\ -\beta \end{pmatrix} = \alpha|0\rangle - \beta|1\rangle$$

Для реализации квантовых операций в рамках данного исследования были использованы массивы из одного и двух нулевых кубитов. Массив для одного кубита состоит из двух элементов, в то время как массив для двух кубитов содержит четыре значения. Первые два значения массива описывают нулевой кубит [1,0], а следующие два значения единичный кубит [0,1].

Для проведения операции Адамара, была создана соответствующая функция.

```
import torch
qubit = torch.tensor([[1.+0.j], [0.+0.j]])
def hadamard_gate(qubit):
    hadamard_matrix = torch.tensor([[1.+0.j, 1.+0.j], [1.+0.j, -1.+0.j]]) *(1/ torch.sqrt(torch.tensor(2.)))
    new_qubit = torch.matmul(hadamard_matrix, qubit)
    return new_qubit
new_qubit = hadamard_gate(qubit)
print(new_qubit)
```

Эта функция принимает в качестве аргумента информацию о кубите, для которого требуется выполнить расчет. Затем функция берет значение этого массива, перемножает его на матрицу Адамара и возвращает полученные два значения. Эти два значения затем записываются в массив на место этого кубита. Гейт Адамара задаётся матрицей согласно формуле (1).

Для применения функции поворота X к массиву из двух кубитов, в данном исследовании передавался индекс кубита (2).

```
import torch
def x_gate(qubits, index):
    if index < len(qubits):
        x_gate_matrix = torch.tensor([[0.+0.j, 1.+0.j], [1.+0.j, 0.+0.j]])
        qubit = qubits[index]
        new_qubit = torch.matmul(x_gate_matrix, qubit)
        qubits[index] = new_qubit
        return qubits
    else:
        print("Ошибка: Индекс кубита выходит за пределы длины массива.")
qubits = [torch.tensor([[0.9505+0.0495j], [0.2169-0.2169j]]), torch.tensor([[0.+0.j], [1.+0.j]])]
index = 0
new_qubits = x_gate(qubits, index)
for qubit in new_qubits:
    print(qubit.squeeze())
```

Функция x_gate принимает на вход массив кубитов и индекс кубита, к которому будет применен гейт X. Внутри функции создается матрица квантовой операции, а затем производится умножение этой матрицы на выбранный кубит. Результат применения гейта X заменяет соответствующий кубит в исходном массиве. После применения гейта X к выбранному кубиту происходит вывод результата. Каждый кубит выводится в виде комплексного числа.

Для реализации операции поворота Y к единичному кубиту, создается комплексное значение, представленное в виде двухэлементного комплексного вектора (3).

```
import torch
def y_gate(qubit):
    y_gate_matrix = torch.tensor([[0, -1j], [1j, 0]])
    dtype=torch.complex128
    new_qubit = torch.matmul(y_gate_matrix, qubit)
    return new_qubit
qubit = torch.tensor([[1.+0.j], [0.+0.j]])
dtype=torch.complex128
new_qubit = y_gate(qubit)
print(new_qubit)
```

Далее производится умножение матрицы гейта Y на кубит, после чего возвращается новое значение кубита после применения гейта Y. Применение операции гейта Z к заданному нулевому кубиту (4).

```
import torch
qubit = torch.tensor([[0.9505+0.0495j], [0.2169-0.2169j]])
z_gate_matrix = torch.tensor([[1.+0.j, 0.+0.j], [0.+0.j, -1.+0.j]])
new_qubit = torch.matmul(z_gate_matrix, qubit)
print("Исходный кубит:", qubit.squeeze())
print("Кубит после применения Z-gate:", new_qubit.squeeze())
```

В коде создается квантовый кубит с заданными комплексными значениями. Далее, формируется матрица гейта Z в комплексном виде. Выполняется операция умножения матрицы гейта Z на заданный квантовый кубит. Это приводит к изменению состояния кубита в соответ-

ствии с матрицей гейта Z . Выводится исходный квантовый кубит и квантовый кубит после применения гейта Z . Это позволяет наглядно оценить изменения состояния кубита после применения соответствующей операции.

В ходе исследования были разработаны функции квантовых операций с использованием инструментов квантовых вычислений. Представленные результаты основаны на использовании четырех простых однокубитных операций: Адамара, гейта поворота X (оператор NOT), гейта поворота Y и гейта поворота Z . Результат работы функций предоставлены на рисунке 1.

```
tensor([[0.7071+0.j],
        [0.7071+0.j]])
```

а

```
tensor([0.2169-0.2169j, 0.9505+0.0495j])
tensor([0.+0.j, 1.+0.j])
```

б

```
tensor([[0.+0.j],
        [0.+1.j]], dtype=torch.complex128)
```

в

```
Исходный кубит: tensor([0.9505+0.0495j, 0.2169-0.2169j])
Кубит после применения Z-gate: tensor([ 0.9505+0.0495j, -0.2169+0.21
```

г

Рис. 1. Результаты влияния квантовых гейтов на кубит: а – результат применения гейта Адамара; б – результат применения гейта X ; в – результат применения гейта Y ; г – результат применения гейта Z

Таким образом, в данной работе были реализованы четыре квантовых алгоритма однокубитных операций. Практические результаты демонстрируют функциональность предложенных квантовых гейтов. Эти операции были про-

граммно реализованы с использованием инструментов квантовых вычислений на фреймворке PyTorch. Полученные результаты подтверждают возможность успешной реализации квантовых операций. Возможность эффективного использования квантовых гейтов, представляет перспективы для создания более мощных и эффективных алгоритмов обработки информации.

Список литературы

1. Yan F., Venegas-Andraca S.E. Quantum Image Processing // Springer Nature Singapore Pte Ltd. – 2020. – P. 29 – 32.
2. Qiskit [Электронный ресурс]. – URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/azure/quantum/quickstart-microsoft-qiskit-portal?pivots=platform-ionq> (дата обращения: 16.01.2024). – Режим доступа: для зарегистр. пользователей.
3. Эмулятор квантового компьютера ТГУ [Электронный ресурс]. – URL: <https://qsim.tsu.ru/circuit> (дата обращения: 16.01.2024). – Режим доступа: свободный.
4. Торгаев С.Н., Шульга И.Д., Юрченко Е.А., Громов М.Л. Основы квантовых вычислений: учебное пособие. – Томск: STT, 2020. – 25 с.
5. Квантовые облака VK Cloud [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/companies/vk/articles/754518/>
6. IBM // Электронный ресурс. – URL: <https://quantum.ibm.com/composer/files/new?initial=N4IgdghgtgpiBcICqYAuBLVAbGATABAMboBOhArpiADQgCOEAzIAiAPIAKAogHICKAQQDKAWXwAmAHQAGANwAdMOjCEs5XDHzz6MLOgBGARknLC2hWEV0SMAOb46AbQAsAXQuEb9wi-eKaIBqMnugADhgA9mCsIAC%2BQA> (дата обращения: 10.01.2024). – Режим доступа: для зарегистр. пользователей.

Программно-аппаратный комплекс LabVIEW-NI ELVIS II+ для измерения вольтамперных характеристик полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом

Н.С. Седов

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, доцент, А.А. Жуков

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: nikita.sedov2016@gmail.com

Аннотация: Представлено описание программно-аппаратного комплекса LabVIEW-NI ELVIS II+ для измерения передаточных и выходных вольтамперных характеристик полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом. Комплекс предназначен для проведения измерений в рамках лабораторных работ по курсу "Схемотехника аналоговых электронных устройств".

Ключевые слова: NI ELVIS II+, LabVIEW, BAX полевого транзистора, Moodle.

В настоящее время использование полевых транзисторов стало обыденностью в производстве большинства электронных устройств. Так, например, ввиду их хорошей помехоустойчивости без них не обойтись в схемах высокоточного измерительного оборудования. Также их используют во всех цифровых системах, ввиду высокой скорости переключения между открытым и закрытым состоянием.

На Радиофизическом факультете Томского государственного университета в рамках учебного процесса уделяется значительное время на изучение полевых транзисторов, однако в лабораторных работах на данный момент детальное рассмотрение их характеристик сводится к моделированию в пакетах Multisim и Micro-Cap. Если характеристики реальных биполярных транзисторов студенты могут получить с помощью лабораторно-технических платформ компании National Instruments, то для полевых транзисторов такой возможности нет.

В связи с этим была поставлена задача на базе имеющихся комплектов NI ELVIS II+ [1] и системы программирования LabVIEW [2] разработать программно-аппаратный комплекс, способный измерять выходные и передаточные вольтамперные характеристики (BAX) полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом. Измерение BAX МОП-транзисторов ранее реализовано автором и представлено в работе [3].

Студенты, используя графический язык программирования «G» в среде LabVIEW и, объединяющий технические инструменты, комплект NI ELVIS II+, могут освоить разработку программ сбора и обработки данных, не прибегая к

написанию кода с помощью текстовых языков программирования.

Автором в системе LabVIEW был разработан программно-аппаратный комплекс для получения выходных и передаточных характеристик полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом.

Измерительная схема, собираемая на платформе NI ELVIS II+, представлена на рисунке 1. Реле необходимо для переключения питания при смене типа транзистора с п-канального на р-канальный и наоборот. Напряжение, падающее на резисторе, используется для вычисления силы тока, протекающего через транзистор.

Для платформы NI ELVIS II+ имеются следующие ограничения на величины токов и напряжений используемых выводов:

- SUPPLY+: не более 12 В, 500 мА;
- AO 0: не более 10 В, 25 мА;
- AI 0,1,2: не более 10 В.

Для проведения измерения необходимо использовать резистор R1 сопротивлением не меньше 24 Ом, чтобы избежать работу источника питания (VPS+ и VPS-) в области предельного тока 500 мА. В платформе предусмотрена защита от превышения такой величины тока, заключающаяся в отключении питания используемого источника при достижении 500 мА, однако такая нештатная остановка может привести к ошибкам в работе разработанного комплекса, потому в программе предусмотрено собственное окончание текущего цикла измерения на величине 450 мА для обеспечения стабильной работы измерительной системы.

Программы, разрабатываемые в среде LabVIEW, представляют собой виртуальные приборы (ВП) и отображаются в двух окнах: лицевой панели и блок-диаграмме.

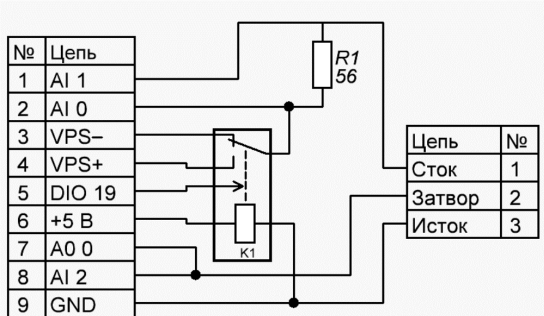


Рис. 1. Измерительная схема, применяемая в программно-аппаратном комплексе

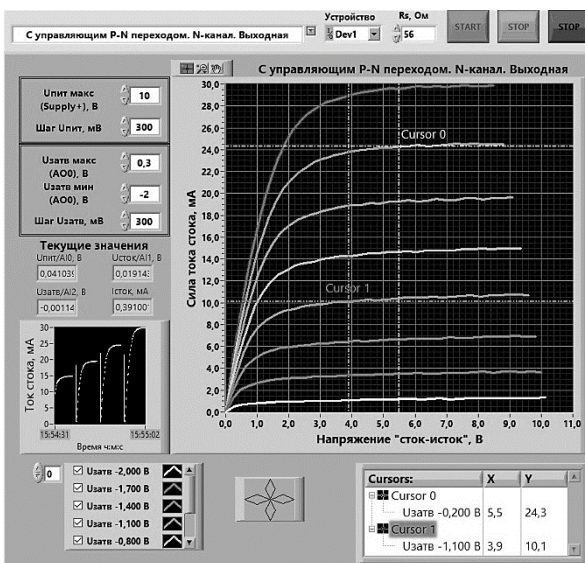


Рис. 2. Лицевая панель виртуального прибора при измерении выходной ВАХ n-канального полевого транзистора J113 с управляющим p-n-переходом

Блок-диаграммы, разработанные автором, содержат циклы, экспресс-приборы, а также набор функциональных узлов, отвечающих за последовательный ход измерений.

Лицевая панель ВП для измерения выходных ВАХ представлена на рисунке 2. Перед началом измерения выбирается тип транзистора и его характеристики, задаются пределы пода-

ваемых напряжений, выбирается идентификационное имя платформы NI ELVIS II+, подключенной к персональному компьютеру. После запуска программы в нижней левой области лицевой панели можно наблюдать за построением характеристики и за текущими значениями напряжений и силы тока.

По окончании измерений пользователь может с помощью курсоров получить координаты конкретных точек на ВАХ.

Автором в системе дистанционного обучения Moodle был создан раздел с описанием лабораторной работы, включающей сборку измерительной схемы на платформе NI ELVIS II+ и проведение измерений с помощью описанного выше ВП. Для того, чтобы студенты не могли внести изменения в разработанный ВП, им предлагается использовать сформированные exe-файлы виртуального прибора, дающие доступ только к его лицевой панели.

Автором разработан программно-аппаратный комплекс на базе среды программирования LabVIEW и платформы NI ELVIS II+, предназначенный для измерения передаточных и выходных вольтамперных характеристик полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом. В электронном курсе размещены информационные и контрольные материалы с описанием используемого программно-аппаратного комплекса, лабораторной работы и вариантов заданий для студентов.

Список литературы

1. NI ELVIS II. Учебный курс. [Электронный ресурс]. – URL: <https://training-labview.ru/templates/standard/opencore/coreEIVIS/mobile/index.html> (дата обращения 11.03.2024).
2. Жуков А.А. Система программирования LabVIEW. Основы работы : учебно-методическое пособие. – Томск : STT, 2020. – 150 с.
3. Седов Н.С. Программно-аппаратный комплекс LABVIEW-NI ELVIS II+ для измерения вольтамперных характеристик МОП-транзисторов // Двадцатая Всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов : сборник докладов конференции. – Томск : STT, 2023. – С. 143-145.

Проектирование оптимальной структуры беспроводной внутренней сенсорной сети

А.А. Сиротинин

Научный руководитель: канд. тех. наук, доцент С.В. Исаев

Обособленное подразделение «Федерального исследовательского центра «Красноярского научного центра СО РАН» Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск

E-mail: slitch@icm.krasn.ru

Аннотация: В работе предложен подход для проектирования оптимальной структуры внутренней сенсорной сети для технологии интернета вещей. Используется гибридная структура сети на основе стандартов Wi-Fi и ZigBee для увеличения энергоэффективности. Уникальность предложенного подхода заключается в том, что сенсорная сеть проектируется на трехмерной модели здания с учётом затухания сигнала в препятствиях. Для оптимального размещения узлов связи и сенсоров применяется комбинация радиоволновой модели Мотли–Кинана и генетического алгоритма для оптимизации.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, уровень мощности сигнала, интернет вещей, задача оптимизации, генетические алгоритмы.

В настоящее время существует проблема проектирования беспроводной сенсорной сети (БСС) оптимальной структуры [1]. БСС – распределенная система различных сенсорных и исполнительных электронных устройств, которая собирает информацию о параметрах окружающей среды и передает её на сервер посредством беспроводного соединения. Поскольку многие параметры, получаемые от датчиков, имеют критическое значение, требуется обеспечить стабильную и надежную работу сети. В устройствах интернета вещей для обмена данными внутри помещений наиболее распространены стандарты Wi-Fi, Bluetooth, Z-Wave, Thread, ZigBee и предоставляемые операторами сотовых сетей NB-IoT [2]. В настоящей работе стандарт Wi-Fi используется для соединения между собой точек доступа (хабов), стандарт ZigBee для соединения между собой датчиков, чтобы повысить энергоэффективность сети.

Для решения задачи оптимального расположения точек доступа необходимо комбинировать радиоволновое моделирование с подходящими оптимизационными методами. В большинстве исследований в качестве радиоволновой модели используется модель простых логарифмических потерь на расстоянии (LDPL), которая не учитывает затуханий в стенах и перекрытиях этажей в отличие от моделей распространения лучей или мультистенных моделей. При этом мультистенные модели имеют более высокую вычислительную эффектив-

ность и требуют небольшое количество параметров. Среди мультистенных моделей дополненная модель Мотли-Кинана показывает более точные результаты, чем мультистенная модель COST 231 [4]. В работе проектирование сети выполняется на трехмерной модели здания, поэтому в качестве радиоволновой модели выбрана дополненная модель Мотли-Кинана.

В качестве оптимизационного метода применяется классический генетический алгоритм, который относится к стохастическим методам [5]. Данный класс методов находит глобальный оптимум с некоторой вероятностью, в отличие от детерминированных методов [6], но позволяет выполнять расчёты для большого количества входных данных с меньшими вычислительными затратами.

Целью настоящей работы является проектирование структуры оптимальной беспроводной сети расположения хабов на трехмерной модели здания.

Построение БСС рассматривается на трехмерной модели здания научного института. Задача оптимизации заключается в оптимальной расстановке хабов с учётом максимально возможного уровня мощности сигнала и минимально возможных затрат на хабы и коммуникации.

$$f_1 = \sum_{i=1}^{N_p} RSS_i \rightarrow \max, f_2 = \sum_{i=1}^{N_p} (C_i + H_i) x_i \rightarrow \min, \quad (1)$$
$$x_i \in \{0, 1\}, \forall i \in [1; N_p].$$

Здесь RSS_i – мощность сигнала (RSS – Received Signal Strength) (дБм), N_p – количество клеток, на которое разбивается исследуемое здание, C_i – стоимость коммуникаций, H_i – стоимость хаба.

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{хаб установлен в } i\text{-й клетке,} \\ 0, & \text{нет.} \end{cases} \quad (2)$$

Для реализации генетического алгоритма четыре этажа здания были разбиты на клетки. Каждая клетка – это куб размером $3000 \times 3000 \times 3000$ мм. Всего получилось 484 клетки. Для расчета уровней мощности сигнала были определены 24 контрольные точки для всего здания. От каждой контрольной точки до предлагаемого места установки хаба учитывается количество и тип препятствий, что даёт возможность оптимально расставить необходимое количество хабов. В качестве хромосомы выбран вектор x_i , который описывает расстановку хабов во всём здании (2). Каждый ген в хромосоме принимает значения 0 или 1 в зависимости от того установлен хаб в рассматриваемой клетке или нет. Поставленная задача оптимизации представляет собой многокритериальную задачу с двумя целевыми функциями (1). Для учета обоих критериев применялся метод взвешенной функции, в котором определяется новая функция в виде суммы целевых функций с соответствующими весами:

$$F(x) = \sum_{i=1}^K \omega_i f_i(x), \quad \omega_i \in [0;1], \quad \sum_{i=1}^K \omega_i = 1, \quad (3)$$

где $f_i(x)$ – целевые функции, ω_i – соответствующие веса, K – количество целевых функций.

Для согласования оптимумов в целевой функции f_2 стоимость хабов и коммуникаций была взята отрицательной:

$$\bar{f}_2 = \sum_{i=1}^{N_p} (\bar{C}_i + \bar{H}_i) x_i \rightarrow \max, \quad \bar{C}_i = -C_i, \quad \bar{H}_i = -H_i.$$

Таким образом, задача многокритериальной оптимизации (1) имеет вид:

$$\omega_1 f_1 + \omega_2 \bar{f}_2 \rightarrow \max,$$

где веса ω_1, ω_2 выбираются в зависимости от приоритетизации целевых функций.

Генетический алгоритм представляет собой имитацию эволюционного процесса и включает следующие этапы: отбор, скрещивание и мутацию [7]. В нашем случае в качестве отбора выбран турнирный отбор, метод к-скрещивания и

мутация в виде инвертирования бита. В дальнейшем задача оптимизации может быть расширена с учетом расстановки сенсоров, подключенных по стандарту ZigBee. В последующих работах будут представлены решения соответствующих задач оптимизации.

Предложенный подход к созданию оптимальной беспроводной сенсорной сети, основанный на трехмерной модели здания, является перспективным исследованием в области развития интернета вещей. Использование дополненной модели Мотли-Кинана позволяет учитывать затухания как в стенах, так и в перекрытиях этажей и спроектировать БСС на трехмерной модели здания. Решение задачи оптимизации с помощью генетического алгоритма даёт возможность найти оптимальное решение за приемлемое время. В целом, данное исследование открывает новые перспективы для развития беспроводных сетей в области интернета вещей, позволяя эффективнее использовать ресурсы для создания современных автоматизированных рабочих пространств.

Список литературы

1. Srinidhi N.N., Kumar S.M.D., Venugopal K.R. Network optimizations in the Internet of Things: A review // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2019. – Vol. 22, no. 1. – P. 1-21.
2. Jia M., Komeily A., Wang Y., Srinivasan R.S. Adopting Internet of Things for the development of smart buildings: A review of enabling technologies and applications // Automation in Construction. – 2019. – Vol. 101. – P. 111-126.
3. El-Maghrabi H.M. A Standard Ray Tracing Technique for Predicting Signal Strength of Wireless Sensor Network in Smart Building // Progress In Electromagnetics Research Letters. – 2022. – Vol. 105. – P. 79-84.
4. Andrade C.B., Hoefel R.P.F. IEEE 802.11 WLANs: A comparison on indoor coverage models // CCECE. – 2010. – P. 1-6.
5. Singh A., Sharma S., Singh, J. Nature-inspired algorithms for wireless sensor networks: A comprehensive survey // Computer Science Review. – 2021. – Vol. 39. – P. 100342.
6. Тайк А.М., Лупин С.А., Варапов Ю.Ф. Применение алгоритма перебора для оптимизации топологии беспроводных сетей // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Vol. 4, no. 9. – P. 80-86.
7. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. – Canada : Addison-Wesley Longman Publishing, 1989. – 412 p.

Определение параметров сигналов цифровой модуляции

К.К. Слесарчик

Научный руководитель: М.К. Золотенкова

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),
г. Москва

E-mail: kirill5k@yandex.ru

Аннотация: Рассмотрен гибридный подход к идентификации параметров QAM, FSK, PSK, и GMSK модуляции на основе методов анализа статистических характеристик, Вейвлет-преобразований, что обеспечивает высокую вероятность правильной идентификации параметров модуляции при малых размерах выборок (200-600 отсчетов) анализируемого сигнала и низких соотношениях сигнал/шум (5 Дб).

Ключевые слова: идентификация вида модуляции, QAM, FSK, PSK, GMSK, Вейвлет-преобразование, гибридный (комбинированный) подход.

Процесс идентификации параметров сигнала применяется в различных сферах связи, включая управление ресурсом связи и радиоэлектронную борьбу.

Ретроспективный анализ источников [1-10] позволил выявить основное направление исследований – повышение степени априорной неопределенности исходных данных о наличии, виде и параметрах сигнала.

Перечень применяемых методов идентификации параметров модуляции достаточно обширен:

1. Метод максимального правдоподобия является одним из популярных подходов к решению задачи определения модуляционной структуры сигнала. Метод максимального правдоподобия наиболее эффективен, но при условии полной априорной информации по параметрам канала связи [2].

2. Параметрические алгоритмы за счет снижения точности требуют гораздо меньших вычислительных затрат и лучше подходят для реализации на практике. Выбор того или иного метода принятия решения при работе с параметрическими алгоритмами определяется диапазоном изменения значений соотношения сигнал/шум [3].

3. Метод «Слепой» обработки сигнала эффективен при применении методов пространственного разнесения сигналов, но с условием наличия априорных знаний о параметрах канала [1].

4. Метод распознавания по "сигнальному созвездию" чувствителен к соотношению С/Ш

(<5 Дб) и качеству реализации принимающего устройства [4].

5. Интеллектуальные методы (искусственной нейронной сети (ИНС), деревья решений и т.д.) обеспечивают высокую эффективность при низких значениях С/Ш (<5 Дб) при условии выполнении требований к стационарности анализируемой выборки в условиях воздействия шума. При работе в диапазоне значений сигнал/шум от 3 дБ и выше метод дерева решений показывает результаты ничем не уступающие ИНС, при этом требует меньшего количества вычислительных ресурсов. Однако, если соотношение С/Ш оказывается ниже 3 дБ, ИНС позволяет получить значительный выигрыш в точности определения модуляции, за счет увеличения вычислительной сложности [5].

6. Метод распределения фаз обеспечивает большую точность по сравнению с вероятностными методами, но точность зависит в значительной степени от качества используемого классификатора [6].

7. Метод расстояний прост в смысле формирования классификатора видов модуляции, но эффективен только при значениях соотношения С/Ш больше 10 Дб [3].

8. Метод кумулянтов (моментов высокого порядка) позволяет определять параметры модуляции сигнала без необходимости проведения спектрального анализа сигнала, точность полученного результата зависит от качества выбранного классификатора [7].

9. Метод на основе Вейвлет-преобразований позволяют решить задачу при

низких вычислительных затратах, но результат чувствителен к соотношению С/Ш и количество определяемых типов модуляций сильно ограничено [8].

10. Комбинированные методы устойчивы при снижении значения С/Ш до 3 Дб, при этом обработка сигналов возможна в режиме, близком к реальному времени [9-10].

Все перечисленные методы пригодны для решения задачи многоклассового и многопризнакового распознавания.

Фактически, определить наиболее эффективный из них возможно, только на основе результатов экспериментальной проверки с одинаковым набором входных данных. Для этого требуется формирование статистически достаточной обучающей выборки, куда должны войти эталонные сигналы для каждого распознаваемого класса, а также необходимо опреде-

лить информативный набор признаков, позволяющий эффективно разделять объекты на классы.

В рамках исследования проведен анализ публикаций [9-12] по результатам имитационного моделирования процесса идентификации вида модуляции с применением методов: кумулянтов, Вейвлет-преобразований, «расстояний», распознавания по "сигнальному созвездию", распределения фаз, параметрического и максимального правдоподобия. В дополнении проведено имитационное моделирование процесса идентификации параметров модуляции с применением методов гистограмм и критерия χ^2 по разработанному гибриднему алгоритму идентификации параметров цифровой модуляции (рис. 1–4).

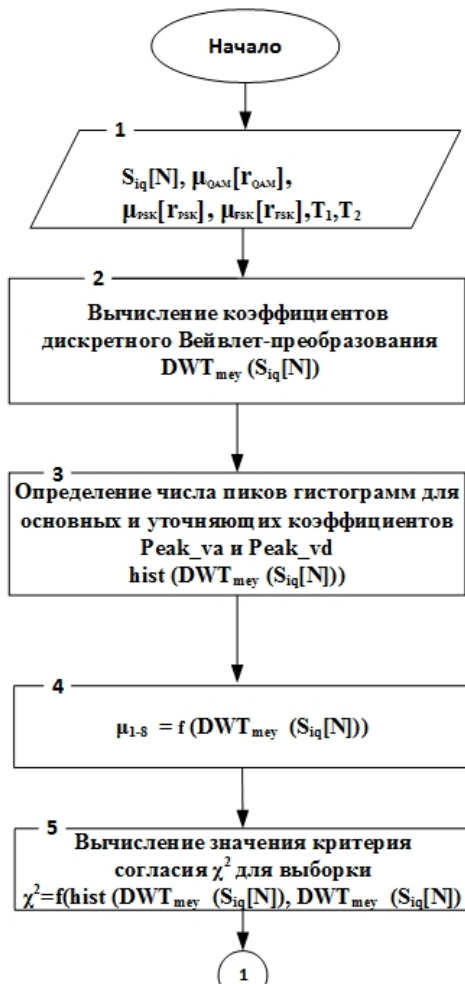


Рис. 1. Гибридный алгоритм определения вида модуляции

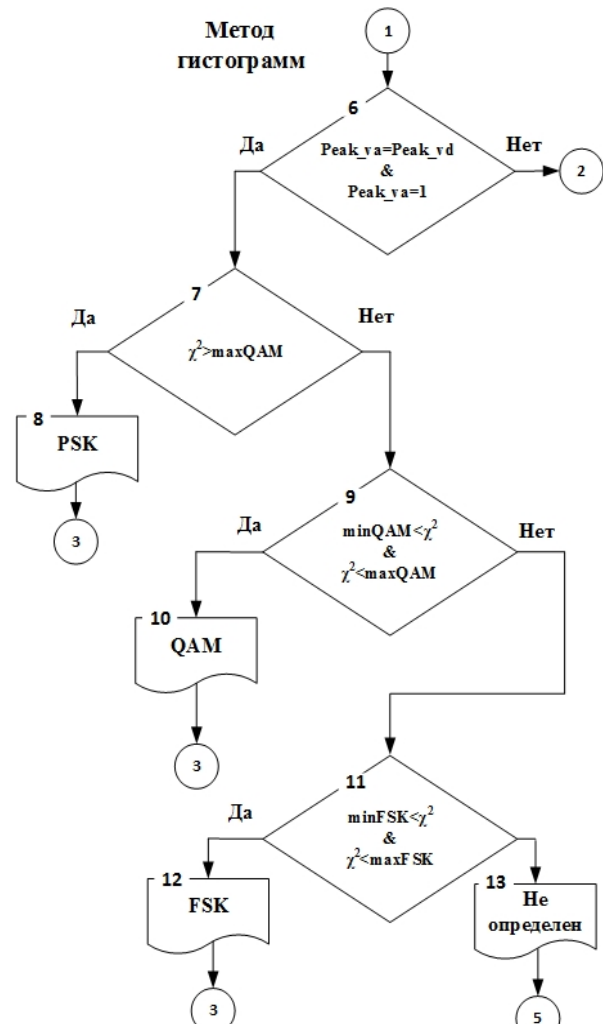


Рис. 2. Гибридный алгоритм определения вида модуляции

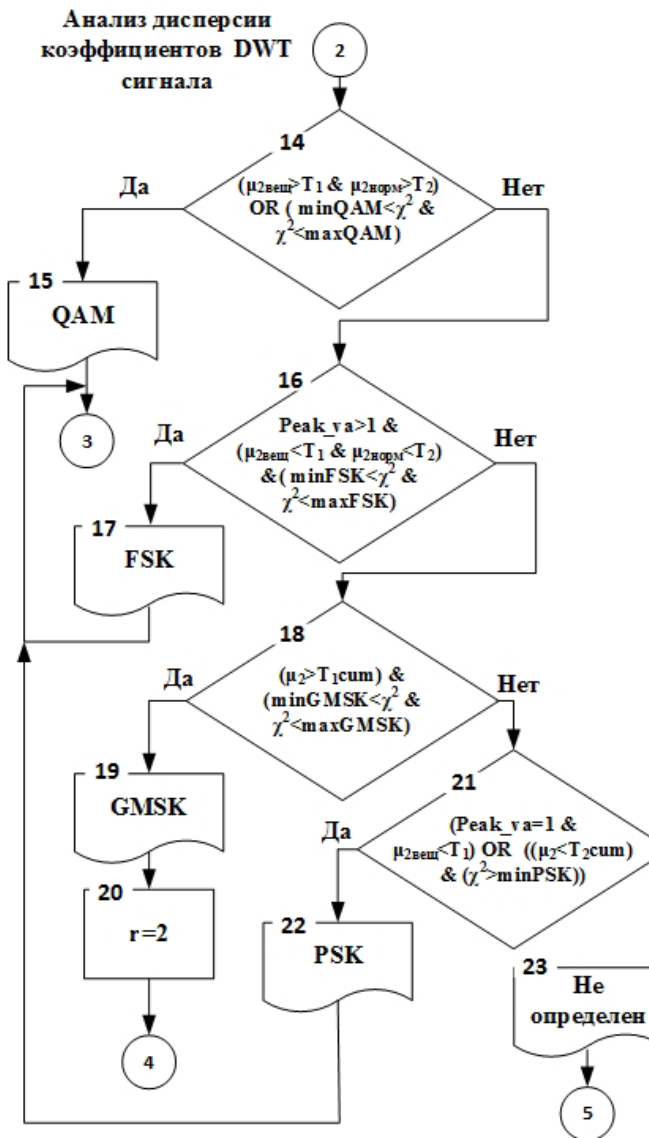


Рис. 3. Гибридный алгоритм определения вида модуляции

В качестве исходных данных используются:

- $S_{iq}[N]$ – выборка анализируемого сигнала в N отсчетов;
- $\mu_{QAM}[r_{QAM}]$, $\mu_{PSK}[r_{PSK}]$, $\mu_{FSK}[r_{FSK}]$ – массив рассчитанных моментов i и $(i + 1)$ порядка для эталонных сигналов QAM, PSK и FSK до 2^r позиционности;
- T_1, T_2 – пороговые значения для выбора вида модуляции.

На шаге 2 производится расчет коэффициентов дискретных Вейвлет-преобразований по выборке анализируемого сигнала $S_{iq}[N]$, используется оконная функция «Мэя».

Шаг 3. Построение гистограммы и определение количества ее пиков.

Шаг 4. Расчет значений моментов первого и второго порядков $\mu_1 - \mu_8$ по результатам рас-

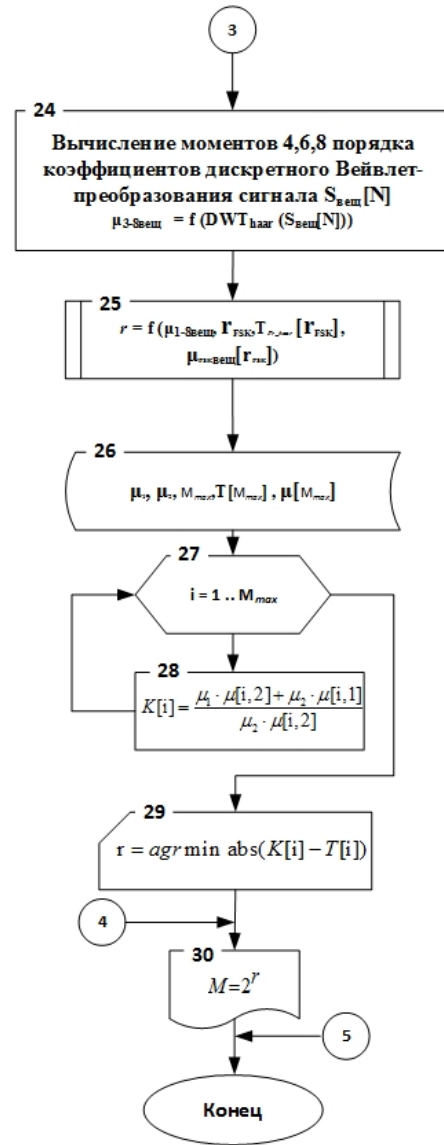


Рис. 4. Гибридный алгоритм определения вида модуляции

чета коэффициентов дискретных Вейвлет-преобразований на шаге 2.

Шаг 5. Вычисление значения критерия согласия χ^2 для выборки коэффициентов дискретных Вейвлет-преобразований.

Шаги с 6 по 13. Решение по виду модуляции с использованием метода гистограмм и пороговых значений критерия согласия χ^2 .

Шаги с 14 по 23. Решение по виду модуляции с учетом анализа дисперсии коэффициентов дискретных Вейвлет-преобразований вещественного сигнала.

Шаги 24–30 определение значения позиционности сигнала с применением критерия минимума абсолютной разности эталонного $T[i]$ и рассчитанного $K[i]$ значения порогов, с учетом моментов первого и второго порядка, для

выдвигаемой гипотезы о позиционности анализируемого сигнала, где $i = 1 \dots M_{max}$ и $M_{max} = r$. Значения $K[i]$ рассчитывается по формуле (1):

$$K[i] = \frac{\mu_1 \cdot \mu[i,2] + \mu_2 \cdot \mu[i,1]}{\mu_2 \cdot \mu[i,2]} \quad (1)$$

Экспериментальная проверка алгоритма проводилась в среде «MATLAB» при следующих условиях, что соотношение сигнал/шум в канале связи h_s^2 устанавливалось исходя из значения энергии сигнала, приходящейся на один бит сообщения, пересчитанное для комплексной координаты канального символа по формуле (2):

$$h_s^2 = 10 \log_{10} h_b^2 + 10 \log_{10} k, \quad (2)$$

где h_b^2 – соотношение энергии сигнала, приходящейся на бит сообщения, и спектральной плотности шума в канале связи.
 k – количество бит, приходящихся на один канальный символ.

Результаты экспериментальной проверки представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Преимущество идентификации вида цифровой модуляции при использовании гибридного подхода

h_b^2 , Дб	15		
Метод идентификации	Гибридный	Гистограмм	Критерий χ^2
QAM-16	1	0,96	1
PSK-4	0,96	0,92	1
FSK-4	0,99	0,98	0,88
GMSK	1	1	0
h_b^2 , Дб	5		
QAM-16	0,43	0,96	0,42
PSK-4	0,95	0,88	0,84
FSK-4	0,339	0,736	0,864
GMSK	0,52	1	0

Для повышения точности определения вида модуляции перспективным направлением является совместное применение нескольких ранее разработанных методов [9-10]. Примером

совместного использования нескольких методов определения вида модуляции является комбинация Вейвлет-преобразования (Метод гистограмм) и оценки параметров сигнала по методу расстояний (критерий χ^2). Данный метод позволяет классифицировать модуляцию радиосигнала при соотношении сигнал/шум не менее 5 дБ.

Результаты имитационного моделирования показали, что значение максимальной вероятности правильной идентификации вида модуляции в 0,95 при применении гибридного подхода можно достигнуть при соотношении сигнал/шум 5 дБ на выборке в 200-600 модуляционных символов для сигналов QAM, FSK, GMSK и PSK.

Анализ результатов и условий моделирования показал, что для наиболее перспективным является гибридный подход, нивелирующий недостатки при использовании отдельных методов. А в целом комбинированные методы, позволяют повысить точность идентификации и снизить вычислительные затраты.

Список литературы

1. Горячкин О.В. Методы слепой обработки сигналов и их приложения в системах радиотехники и связи. – М.: Радио и связь, 2003. – 230 с.
2. Толстоедов Н.А., Семкин П.В., Кузовников А.В., Сомов В.Г. Оценка параметров и демодуляция радиосигналов в условиях априорной неопределенности // Радиотехника. – 2013. – № 6. – С. 96-100.
3. Волвенко С.В., Завьялов С.В., Павлов В.А. Особенности реализации классификатора сигналов с аналоговой модуляцией с помощью нейронных сетей // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. – 2018. – Т. 8, № 4. – С. 196-200.
4. Адженов С.С., Строгов А.А., Терешнок М.В., Чиров Д.С., Иванкович М.В. Алгоритм распознавания вида цифровой модуляции сигнала по форме фазового созвездия с использованием самоорганизующихся карт Кохонена // Технологии информационного сообщества. – 2011. – Т.5, № 11. – С. 4-6.
5. Адженов С.С., Терешнок М.В., Чиров Д.С. Распознавание видов цифровой модуляции радиосигналов с использованием нейронных сетей // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2015. – № 1. – С. 23-28.
6. Дубов М.А., Набилков В.Д., Приоров А.Л., Пелуев С.С. Анализ алгоритмов автоматического определения типов модуляции радиосигналов // Сб. труд. конф. «Цифровая обработка сигналов

- и её применение – DSPA-2019». – 2019. – Кн. 2(2). – С. 223-228.
7. Li S., Song C., Shen F.C.L. Automatic Modulation Classification of MPSK signals Using High Order Cumulants // ICSP. – 2006. – P. 1-4.
 8. Русанов В.Э. Автоматическое распознавание цифровых радиосигналов по коэффициентам вейвлет-базиса // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – Т. 10, № 10. – С. 33-37.
 9. Hong L., Ho K.C. Identification of digital modulation types using the wavelet transform // Proceedings of the IEEE Conference on Military Communications. – 1999. – Vol. 1. – P. 427-431.
 10. Prakasam P., Madheswaran M. M-ary shift modulation Scheme identification algorithm using wavelet transform and higher order statistical moment. Journal of Applied sciences. – 2008. – Vol. 8, is. 1. – P. 112-119.
 11. Еременко А.И., Шведов С.Н., Кокорев А.В., Слесарчик К.Ф. Повышение достоверности идентификации параметров модуляции сигналов GMSK и PSK // Радиотехника, электроника и связь : тезисы докладов VII Международной научно-технической конференции (Омск, 4–6 октября 2023 года). – Омск: ОНИИП, 2023. – С. 140-142.
 12. Еременко А.И., Шведов С.Н., Кокорев А.В., Слесарчик К.Ф. Алгоритм идентификации вида сигнала цифровой модуляции // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XII МНТИНМК; сб. науч.ст. в 4 т. / под. ред. С.И. Макаренко; сост. В.С. Елагин, Е.А. Аникевич. – СПб. : СПбГУТ, 2023. – Т. 3. – 915 с.

Разработка прототипа аппаратно-программного комплекса для управления манипулятором

Р.А. Сотников, А.Н. Смирнов М.В. Шевчук, О.К. Якименко

Научный руководитель: А.А. Трубачев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: ras31@tpu.ru, ans86@tpu.ru, mvs89@tpu.ru, oky2@tpu.ru

Аннотация: В статье описывается разработка прототипа аппаратно-программного комплекса для управления манипулятором с использованием видеокамеры и лазерного дальномера.

Ключевые слова: манипулятор, видеокамера, шаговый двигатель, сервопривод, Python, OpenCV, Arduino, интерфейс.

В настоящее время в медицине были сделаны значительные шаги в роботизации. Продолжается поиск высокотехнологичных подходов к лечению всех заболеваний, позволяющих повысить эффективность лечения. Для проведения многих операций или исследований уже используется большое количество манипуляторов, так как роботизированные комплексы позволяют врачам добиться чрезвычайной точности в процессе сложного оперативного вмешательства и находят применение в нейрохирургии, хирургии уха, урологии, малоинвазивной хирургии и других областях медицины, где требуются высокочастотные оперативные вмешательства [1]. Для эффективного управления медицинскими манипуляторами необходимо понимание принципа работы этого устройства, по этой причине нужен прототип аппаратно-программного комплекса для обучения.

Информационно-измерительные системы на базе оптико-электронных преобразователей в настоящее время широко используются в электротехнике для получения информации о состоянии окружающей среды. Непрерывное совершенствование аппаратной части для формирования видеоданных и аппаратно-программных комплексов для обработки видеосигналов дало техническую возможность использования видеокамеры для решения задач, направленных на поиск релевантной информации за малый промежуток времени. Одной из таких задач является поиск и фиксирование определённого цветового пятна на движущемся информационном фронте видеокамеры, который характеризует максимальное расстояние, на котором линия может быть найдена на видеоизображении.

В данной работе описан алгоритм работы прототипа манипулятора, движущегося по линиям определенного цвета с использованием видеокамеры и лазерного дальномера, а также приложение для персонального компьютера (ПК), с помощью которого происходит управление манипулятором. Краткий алгоритм работы представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Алгоритм работы прототипа манипулятора

Для управления движением прототипа манипулятора была выбрана платформа Arduino Uno [2], в основе которой лежит 8-разрядный микроконтроллер ATmega328. Преимуществом этого модуля является возможность подключения большого количества датчиков и модулей расширения, а также простая и удобная среда программирования.

Система управления прототипом манипулятора состоит из приложения, работающего на ПК, микроконтроллера ATmega328, управляемого с ПК, шагового двигателя Nema 17, драйвера A4988, четырёх сервоприводов SG90 и MG90s и дальномера, подключенных к Arduino Uno [3], видеокамеры HBVCAM 3M1917, подключенной к ПК. Внешний вид прототипа манипулятора представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Внешний вид прототипа манипулятора

Для разработки программы управления манипулятором и приложения для персонального компьютера была задействована среда разработки Visual Studio Code. В этой среде на языке программирования Python с использованием таких библиотек, как OpenCV (в частности, обработка изображений и численные алгоритмы общего назначения) [4], Matplotlib (построение графиков) и NumPy (математические расчёты), были получены данные с видеокамеры. С помощью функции `inRange()` был разработан алгоритм для определения заданного цвета.

От персонального компьютера на микроконтроллер поступает пакет данных для запуска и движения модели манипулятора. Далее микроконтроллер обрабатывает эту информацию и передает управляющий сигнал на драйвер и сервоприводы. Драйвер, в свою очередь, передает сигнал на шаговый двигатель. Прототип манипулятора принимает положение для сканирования поверхности. После чего ПК получает

и обрабатывает данные с видеокамеры, фильтруя определённый цвет. Далее ПК через COM-порт посылает на микроконтроллер информацию о начальном положении и команды для движения модели манипулятора по заданному цвету. Проследовав до конца цветовой линии или вернувшись в начальное положение, манипулятор заканчивает движение, микроконтроллер ожидает следующую команду. Например, для поиска линии другого цвета или для ручного управления. На рисунке 3 продемонстрирована работа цветных фильтров и выделение определенного цвета на изображении.

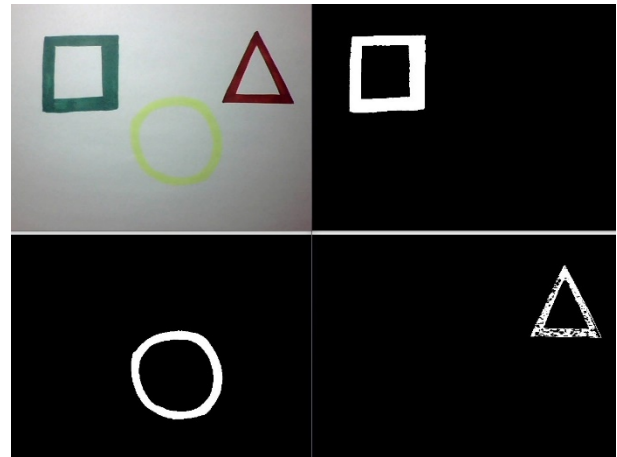


Рис. 3. Результаты работы фильтров для поиска цвета на изображении

Для более комфортного управления был разработан графический интерфейс с помощью Tkinter [5] на языке программирования Python, который позволяет визуализировать пройденный маршрут и получить изображение с камеры. А также в интерфейсе располагаются основные кнопки: начало и завершение работы, выбор цветового фильтра, интерфейс для ручного управления манипулятором. Также в ПО предусмотрено использование различных исполнительных устройств на манипуляторе и управление ими.

В результате проведенной работы была разработана система управления прототипом манипулятора, позволяющая различать цвета и совершать движение по определённому цвету. Описана структура системы управления и подобраны информационно-измерительные системы для сбора данных, разработан принцип работы прототипа манипулятора. Система управления и модель манипулятора просты в изготовлении, имеют достаточно низкие финансовые затраты и могут использоваться для

обучения работы с роботизированными комплексами.

Список литературы

1. Якушенкова А.П., Тимашков Д.А., Войцеховская З.Э., Шпикалов А.М., Громов К.С. Применение роботизированных манипуляторов в медицине. обзор патентной документации // Кремлевская медицина. Клинический вестник. – 2023. – № 1. – С. 89-92.
2. Arduino.ru [Электронный ресурс]: Arduino Uno: официальный сайт. – URL: <https://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardUno> (дата обращения: 18.02.2024).
3. Псарев Д.В. Разработка протокола передачи данных для управления манипулятором на Arduino // Перспективные материалы науки, технологий и производства : сборник научных статей Международной научно-практической конференции. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 267-270.
4. OpenCV [Электронный ресурс] : официальный сайт. – URL: https://docs.opencv.org/4.x/d9/df8/tutorial_root.html (дата обращения: 13.02.2024). – Обновляется в течение суток
5. Руководство по Tkinter [Электронный ресурс] // Metanit.com. – URL: <https://metanit.com/python/tkinter> (дата обращения: 11.03.2024).

Применимость веб-компонентов для математических вычислений при реализации системы контроля знаний студентов в рамках курса «Аналитическая геометрия»

В.И. Тишкова

Научный руководитель: канд. техн. наук, доцент С.А. Прокопенко

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: valeriatshk@gmail.com

Аннотация: Данная работа посвящена обзору веб-компонентов для математических вычислений и их применению при автоматизированной проверке контроля знаний студентов.

Ключевые слова: веб-компонент, веб-приложение, контроль знаний.

В процессе обучения студентов необходимо обеспечить контроль усвоения учебного материала. Преподаватели стремятся не только оценить, насколько успешно студенты освоили учебный материал, но и выявить возможные проблемы и трудности, с которыми студенты могут столкнуться. Поэтому после завершения каждого раздела учебного курса обычно проводятся контрольные точки, включающие различные задания. Проверка большого количества контрольных работ занимает у преподавателя много времени: преподаватель проверяет работы, выставляет оценки и уведомляет студентов о результатах. Если студент не удовлетворен оценкой, он может потребовать объяснений и запросить возможность пересдачи. Таким образом, как студенты, так и преподаватели тратят дополнительное время на этот процесс. Поэтому разработка приложения с автоматизированной проверкой контрольных работ и предоставлением студентам объяснений о допущенных ошибках является актуальной задачей. Кроме того, такое приложение позволит минимизировать возможность списывания, потому что каждому студенту будет выдаваться индивидуальное задание.

Мы создаем веб-приложение с автоматизированной проверкой контрольных работ для курса «Аналитическая геометрия», так как он изучается студентами первого курса радиофизического факультета и является фундаментальным для изучения более сложных дисциплин, включая линейную алгебру, векторный и тензорный анализ, основы оптики и другие.

Чтобы лучше понять текущие подходы к автоматизированной проверке знаний в различных обучающих ресурсах [1-7], был проведен их анализ. Результаты показали, что, как прави-

ло, проверка осуществляется посредством тестирования студентов. Более сложные системы с пошаговым отслеживанием действий студента ориентированы на лабораторные работы по физическим дисциплинам и программирование.

Проверка решения каждой заданной студенту задачи предполагает поэтапный анализ каждого действия студента. Для этого необходимо обеспечить студента возможностью записи решения задачи, которое, по сути, является набором математических выражений. Соответственно необходимо найти инструменты, позволяющие студенту записывать математические выражения в веб-приложение.

Существует несколько возможностей записи аналитических выражений [8-12]. MathML обеспечивает точное представление математических выражений, но требует знания специального синтаксиса, что может быть неудобно для студентов и повышает вероятность ошибок. LaTeX удобен для записи математических выражений, но требует создания специализированного редактора для использования в веб-приложении. WIRIS и MathCast предоставляют удобный интерфейс для ввода математических выражений, но WIRIS платный, а интерфейс MathCast показался нам устаревшим по сравнению с другими решениями. CortexJS обладает современным дизайном, интуитивно понятным интерфейсом и бесплатным открытым исходным кодом. Именно CortexJS был выбран для записи математических выражений в разрабатываемом приложении.

CortexJS состоит из двух компонентов: Mathlive и compute engine. Mathlive позволяет писать формулы в двух вариантах: в математическом, привычном для людей виде и с помощью LaTeX (в него встроена реализация алгоритмов TeX).

Mathlive предоставляется с виртуальной клавиатурой, ее можно настроить в соответствии со своими потребностями. Помимо виртуальной клавиатуры в Mathlive уже настроены горячие клавиши, например, если нажать на знак «/», то сформируется дробь с числителем и знаменателем.

Compute engine CortexJS – это библиотека JavaScript для вычислений математических выражений. Compute Engine разработан для людей из области образования, науки и техники, которым требуется разрабатывать приложения для выполнения технических вычислений, работающих в браузере или на сервере с использованием JavaScript, например, Node.js.

CortexJS можно подключить к своему проекту несколькими способами. Самый простой вариант – это использование CDN (Content Delivery Networks) [13] (посредством написания одной строки кода). Далее можно начинать работу с самим веб-компонентом с помощью тегов, описанных в руководстве. Конечно, если у разработчика нет опыта в создании сайтов и веб-приложений, будет не просто разобраться в работе данного веб-компонента. На рисунке 1 представлен простой пример работы CortexJS, в котором требуется сократить дробь. При верном решении ответ подсвечивается в зеленый цвет и в консоль выводится «Correct!».



Рис. 1. Пример работы CortexJS

Таким образом, выбранный инструмент CortexJS записи аналитических выражений оказался, во-первых, удобным для интеграции в разрабатываемое веб-приложение автоматизированной проверки контрольных работ, а, во-

вторых, его дружелюбный интерфейс является интуитивно понятным для пользователей.

В дальнейшем предполагается разнообразить типовые примеры для контрольных работ, автоматизировать проверку решения этих примеров и интегрировать их в разрабатываемое веб-приложение.

Список литературы

1. Plario [Электронный ресурс]. – URL: <https://plario.ru> (дата обращения 20.01.2024).
2. Линейная алгебра и аналитическая геометрия [Электронный ресурс]. – URL: https://mooc.lektorium.tv/courses/course-v1:MKGTU+LA_AG+2022_03/info (дата обращения 20.01.2024).
3. Линейная алгебра и аналитическая геометрия для инженеров и исследователей [Электронный ресурс]. – URL: <https://openedu.ru/course/misis/LAG> (дата обращения 20.01.2024).
4. ZipGrade [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.zipgrade.com> (дата обращения 20.01.2024).
5. Uchi.ru [Электронный ресурс]. – URL: <https://distant.uchi.ru/check-knowledge> (дата обращения 20.01.2024).
6. Горохова-Алексеева А.В. Автоматическая проверка заданий с нечетким алгоритмом // Новые информационные технологии в автоматизированных системах : материалы девятнадцатого научно-практического семинара. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2016. – С. 225-228.
7. Симуни М.Л., Соловьев А.Л., Шайтан В.И. Автоматизированная проверка задач в курсе «Функциональное программирование» // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2016. – Т. 12, № 3-1. – С. 90-96.
8. MathML [Электронный ресурс]. – URL: <https://developer.mozilla.org/ru/docs/Web/MathML> (дата обращения 20.01.2024).
9. LaTeX [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.latex-project.org> (дата обращения 20.01.2024).
10. WIRIS [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.wiris.com/en/mathtype> (дата обращения 20.01.2024).
11. MathCast [Электронный ресурс]. – URL: <https://mathcast.sourceforge.net/home.html> (дата обращения 20.01.2024).
12. CortexJS [Электронный ресурс]. – URL: <https://cortexjs.io> (дата обращения 19.03.2024).
13. Радчук Д.Г., Никульчев Е.В. Проект компьютерной сети на основе технологии content Delivery Network // Cloud of science. – 2014. – Vol. 1, No. 4. – P. 635-664.

Программно-аппаратный комплекс LabVIEW-NI ELVIS II+ для управления источником тока

М.А. Черкашин

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, доцент А.А. Жуков

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: cherkashin.tolya.85.sos@gmail.com

Аннотация: Разработан программно-аппаратный комплекс LabVIEW-NI ELVIS II+, управляющий источником тока. Создана лабораторная работа, а также методические и контрольные материалы, позволяющие студентам изучить принципы работы и характеристики источника тока, а также приобрести практические навыки в его использовании.

Ключевые слова: LabVIEW, NI ELVIS II+, Moodle, источник тока, лабораторная работа.

Регулируемые напряжением источники тока обеспечивают точное и стабильное значение тока, независимо от нагрузки. Они используются в измерительных приборах для определения сопротивления и управления электродвигателями и соленоидами.

Чтобы расширить возможности таких источников, автором был разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий управлять источником тока с помощью компьютера и разработана лабораторная работа, включающая схемотехническое моделирование и экспериментальное исследование характеристик таких источников тока.

Для изучения источника тока на операционном усилителе и МОП-транзисторе была использована типовая схема [1].

Для экспериментального исследования свойств источника использовались цифровой мультиметр DMM и источник напряжения VPS из комплекта NI ELVIS II+ [2]. Этот комплект является популярным учебным инструментом, который позволяет студентам разрабатывать и исследовать электронные схемы в лабораторных условиях. Платформа NI ELVIS II+ включает набор измерительных приборов и устройств и программное обеспечение LabVIEW [3], позволяя студентам без навыков программирования разрабатывать программы для сбора и анализа данных.

В НИ ТГУ этот комплекс используется в лабораторных практикумах по различным дисциплинам [4, 5], а также для самостоятельной работы студентов [6,7].

Разработанный автором источник тока реализован на операционном усилителе LM358P и

n-канальном МОП-транзисторе IRF540N. Было проведено моделирование этого источника в программе Multisim (рис. 1). Результаты моделирования демонстрируют неизменность силы тока при изменении сопротивления нагрузки (от 10 Ом до 50 Ом), что соответствует определению источника тока.

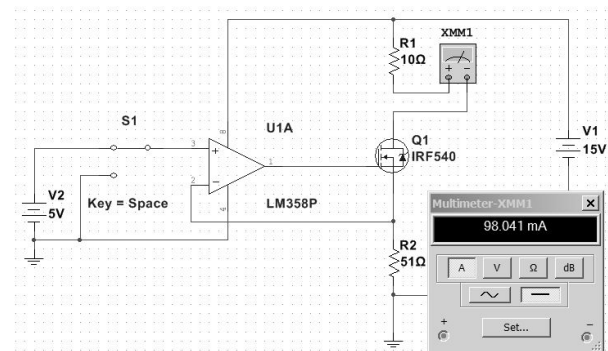


Рис. 1. Моделирование источника тока в программе Multisim

Создана программа в системе LabVIEW с использованием измерительных устройств комплекта NI ELVIS II+ для управления выходным током источника на основе программного изменения входного напряжения.

На рисунке 2 представлена лицевая панель виртуального прибора (ВП), управляющего источником тока, а на рисунке 3 блок-диаграмма этого прибора. Созданный ВП позволяет задавать управляющее напряжение в диапазоне от 0 до 12 В с помощью регулируемого источника напряжения (VPS) из комплекта приборов NI ELVIS II+. С помощью мультиметра (DMM) ВП измеряет силу тока на нагрузке и выводит полученное значение на лицевую панель в инди-

каторе «Измеренная сила тока на нагрузке». ВП также позволяет рассчитать теоретическую силу тока на нагрузке, данное значение отображается на лицевой панели в индикаторе «Вычисленная сила тока на нагрузке». При работе с ВП пользователь может наблюдать измеряемую и вычисляемую силы тока на нагрузке, что в свою очередь позволяет вычислить погрешность измеренной величины тока по отношению к расчётной, данное значение выводится на лицевой панели в индикаторе «Погрешность».

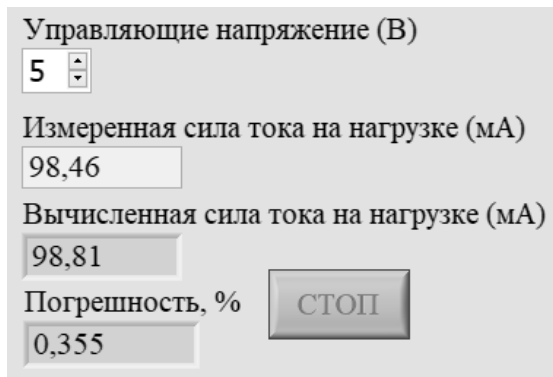


Рис. 2. Лицевая панель виртуального прибора, управляющего источником тока

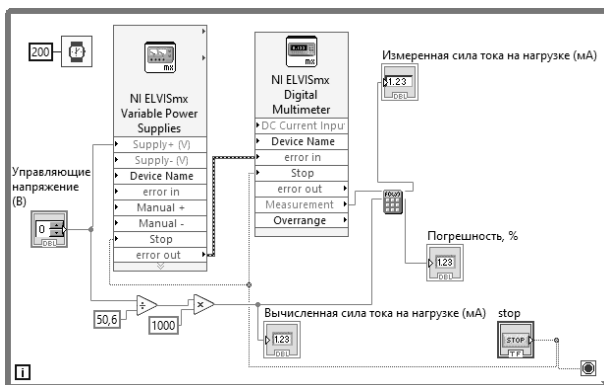


Рис. 3. Блок-диаграмма виртуального прибора, управляющего источником тока

В натурном эксперименте удалось программно реализовать управление источником тока, значение тока в нагрузке совпало с результатом расчётов и моделирования.

Автором разработано методическое указание по сборке макета источника тока с использованием операционного усилителя и МОП-транзистора. Создана лабораторная работа «Источник тока на базе операционного усилителя и МОП-транзистора» для курса «Схемотехника аналоговых электронных устройств».

Методические указания, задания, контрольные и информационные материалы размещены на образовательной платформе Moodle. Это позволяет студентам дистанционно изучать материал и выполнять лабораторные задания, а преподавателям - эффективно организовать учебный процесс и оценивать знания учащихся.

Реализовано программное управление данным источником тока, который в свою очередь выступит основой для реализации проекта по управлению индуктивной нагрузкой, что позволит создать управляемое электромагнитное поле и провести исследования в области магнитных свойств материалов.

Список литературы

1. Волович Г.И. Мощные источники регулируемого тока на операционных усилителях // Современная электроника. – 2010. – № 5. – С. 36–39.
2. NI ELVIS II – Руководство пользователя [Электронный ресурс]. – URL: <https://nitec.nstu.ru/upload/lib/NI%20ELVIS%20II%20User%20Manual.pdf> (дата доступа 11.03.2024).
3. Жуков А.А. Система программирования LabVIEW. Основы работы : учебно-методическое пособие. – Томск : STT, 2020. – 150 с.
4. Zhukov A.A., Dotsenko O.A., Kochetkova T.D., Novikov S.S., Pavlova A.A. The computer laboratory workshops "The bases of electronics" // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2015. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147045.
5. Жуков А.А., Коровин Е.Ю., Агамасов В.В. и др. Использование информационных технологий в лабораторном практикуме по курсу "Измерительные приборы и устройства в радиотехнике" // Актуальные проблемы радиофизики (АПР 2019): VIII Международная научно-практическая конференция. – Томск : Изд-во ТГУ, 2019. – С. 452–455.
6. Черкашин М.А., Духанов А.С. Электронный учебный курс по основам работы с программно-аппаратной платформой NI Elvis II+ // Восемнадцатая всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов : сборник. – Томск : STT, 2021. – С. 261–265.
7. Доценко О. А., Жуков А.А. Опыт использования электронного курса "Основы работы с приборами комплекта NI ELVIS II+" для организации самостоятельной работы студентов // Методические, технологические и организационные аспекты электронного обучения: сборник статей по результатам научно-методической конференции. – Томск : Изд-во ТГУ. – 2022. – С. 8–13.

Применение наземной системы мониторинга климата для обеспечения достоверности данных дистанционного зондирования

М.С. Южаков, В.А. Казанин

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук А.В. Бадьин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: miha.yuzhakov@gmail.com

Аннотация: В статье рассматривается применение наземной системы мониторинга климата для обеспечения достоверности данных дистанционного зондирования. Авторы анализируют преимущества и ограничения использования наземных систем мониторинга климата, а также их роль в повышении точности и надёжности данных дистанционного зондирования Земли. Особое внимание уделяется методам калибровки данных, полученных с помощью дистанционного зондирования, и их корреляции с наземными измерениями. Результаты исследования могут быть полезны для улучшения систем мониторинга климата и повышения качества данных, используемых в научных исследованиях и практических приложениях.

Ключевые слова: интернет вещей, дистанционное зондирование, мониторинг климата.

В условиях современного мира, когда климатические изменения становятся всё более очевидными и угрожающими, вопрос мониторинга и анализа климатических показателей приобретает особую актуальность. Одним из наиболее эффективных инструментов для сбора данных о климате является дистанционное зондирование — метод получения информации об объекте или явлении с помощью регистрации их собственного или отражённого излучения. Однако данные дистанционного зондирования (ДДЗ) могут быть подвержены влиянию различных факторов, что ставит под сомнение их достоверность. [1]

Для обеспечения достоверности данных дистанционного зондирования необходимо использовать дополнительные источники информации, одним из которых является наземная система мониторинга климата. Наземная система мониторинга позволяет собирать данные о климатических показателях непосредственно с поверхности Земли, что обеспечивает более точный и надёжный анализ [2].

Целью данной статьи является рассмотрение возможности использования наземной системы мониторинга климата для обеспечения достоверности данных дистанционного зондирования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Рассмотреть основные принципы и методы дистанционного зондирования;

- Изучить особенности наземной системы мониторинга климата;

- Проанализировать возможности интеграции наземной системы мониторинга климата с методами дистанционного зондирования;

- Оценить эффективность применения наземной системы мониторинга климата для обеспечения достоверности данных дистанционного зондирования. [3]

Современные системы дистанционного зондирования позволяют получать данные с высоким пространственным разрешением (до нескольких метров) и высокой частотой обновления (до нескольких раз в день). Это позволяет получать актуальную информацию о состоянии объектов и явлений в режиме реального времени.

Развитие технологий дистанционного зондирования привело к появлению новых методов и сенсоров, таких как гиперспектральная съёмка, лидарная съёмка и радиолокационная съёмка. Эти методы позволяют получать более подробную и точную информацию о параметрах объектов и явлений. [4]

Для решения задач по мониторингу климата с использованием технологии дистанционного зондирования необходимо подобрать спутники, удовлетворяющие следующим требованиям:

- данные периодически обновляются и находятся в открытом доступе;

- наличии аппаратуры, работающей в дальнем инфракрасном диапазоне. [5]

Landsat-8 – это искусственный спутник Земли, предназначенный для дистанционного зондирования нашей планеты. Он был запущен в 2013 году и является частью программы Landsat, которая занимается сбором данных о поверхности Земли уже более сорока лет [6].

Landsat-8 оснащён мощным оптико-электронным сенсором, который позволяет получать изображения поверхности Земли с высоким пространственным разрешением. Спутник может делать снимки в видимом, ближнем инфракрасном и тепловом инфракрасном диапазонах, что позволяет получать информацию о различных параметрах объектов и явлений. [7]

Данные, полученные со спутника Landsat-8, используются в различных областях, таких как сельское хозяйство, экология, картография, метеорология и многих других. Они позволяют получать информацию о таких параметрах, как тип растительности, влажность почвы, уровень загрязнения, температура поверхности и т. д. [8]

На борту спутника установлены два прибора:

Operational Land Imager (OLI) – многоспектральный сканер, который позволяет получать изображения в видимом, ближнем инфракрасном и тепловом инфракрасном диапазонах.

Thermal Infrared Sensor (TIRS) – инфракрасный радиометр, который измеряет температуру земной поверхности и атмосферы.

Технические характеристики OLI:

- 9 спектральных каналов (433 – 1390 нм);
- пространственное разрешение: 15–30 м;
- ширина полосы обзора: 185 км.

Технические характеристики TIRS:

- 2 спектральных канала (10,3 – 12,5 мкм);
- пространственное разрешение: 100 м;
- ширина полосы обзора: 185 км.

Таким образом аппаратура Landsat-8 позволяет измерять температуру земной поверхности и атмосферы, используя 10-ый и 11-ый канал TIRS. [9]

Однако показания температуры почвы и атмосферы, полученные методами дистанционного зондирования, требуют калибровки и верификации. Для этого подходит показания наземной системы мониторинга.

В качестве наземной системы мониторинга температуры почвы использовалась система, разработанная студентами Томского государст-

венного университета, состоящая из агрозондов и использующая для работы стандарты Интернета вещей [10]. Технические характеристики системы наземного мониторинга позволяют калибровать данные спутников с необходимой точностью. Показания системы наземного мониторинга сравнивались с профессиональными научными метеостанциями. Структура измерительного устройства приведена на рисунке 1.

Применяемое в данной работе устройство для мониторинга собирает следующие параметры: температуру воздуха, температуру почвы на разных глубинах, атмосферное давление и относительную влажность воздуха.

Из открытых источников данных были получены снимки исследуемого участка в дальнем инфракрасном диапазоне в различные времена года (рис. 1, 2).

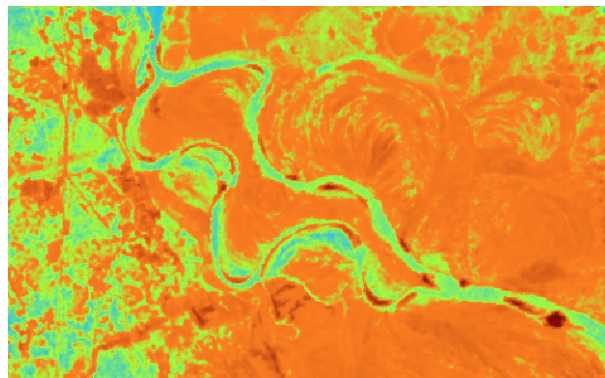


Рис. 1 Снимок исследуемого участка в ближнем инфракрасном диапазоне (канал № 10) 30 июля 2022 года

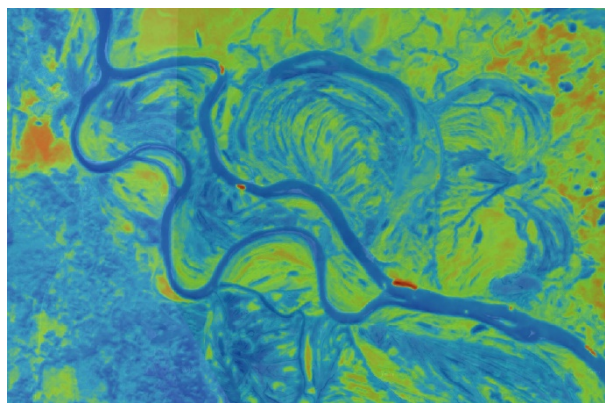


Рис. 2 Снимок исследуемого участка в ближнем инфракрасном диапазоне (канал № 10) 19 декабря 2022 года

За основу исследования были взяты результаты работы системы наземного мониторинга на научной станции в д. Кайбасово Томской области. Далее с помощью специального программного обеспечения для работы с снимками спутников дистанционного зондирования QGIS. Была рассчитана температура в местах установки узлов системы наземного мониторинга и проведена калибровка. На рисунке 3 приведены графики температуры почвы и воздуха, полученные агрозондом и методом расчета по данным ДДЗ.

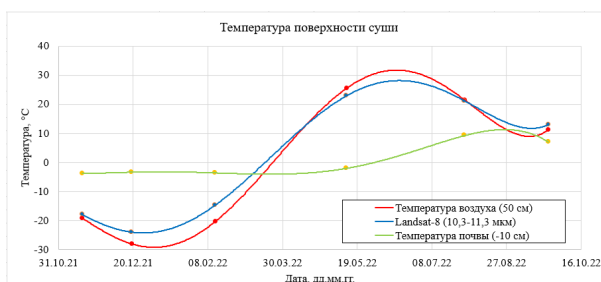


Рис. 3. Температура воздуха и почвы в период с ноября 2021 года по октябрь 2022 года

Следующим шагом была проведена калибровка ДДЗ с помощью наземных датчиков квадратичной функцией. В таблице 1 приведены данные о температуре воздуха аппаратуры Landsat-8, наземной системы мониторинга и откалиброванные данные ДДЗ.

Таблица 1. Данные ДДЗ и системы наземного мониторинга

Дата	Lansat-8 t , °C	t воздуха, °C	Landsat-8 (калибр.) t , °C
16.11.2021	-19,25	-18,01	-15,39
19.12.2021	-28,06	-24,03	-24,49
13.02.2022	-20,36	-14,71	-16,51
12.05.2022	25,52	22,93	23,63
30.07.2022	21,44	21,11	20,57
24.09.2022	11,20	12,96	12,45

На рисунке 4 приведен график сравнения действительной температуры воздуха и откалиброванной с помощью квадратичной функции.

Их графика видно, что путем калибровки получилось приблизиться к действительным показаниям температуры воздуха.

В ходе работы выяснилось, что данные наземного мониторинга и дистанционного зондирования земной поверхности (ДДЗ) взаимосвязаны и могут быть использованы для прогнозирования наземных измерений. Однако данные



Рис. 4. Температура поверхности суши Landsat-8

дистанционного зондирования требуют проверки и корректировки. [11]

Для обеспечения бесперебойной работы в течение года необходимо улучшить и расширить систему наземного мониторинга. Также следует оптимизировать и автоматизировать процесс получения и обработки данных дистанционного зондирования и расширить методы их анализа.

Кроме того, следует провести статистический анализ данных дистанционного зондирования и информации с наземных датчиков.

Список литературы

1. Искусственные спутники Земли [Электронный ресурс] – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Искусственный_спутник_Земли (дата обращения: 06.09.2024).
2. Дистанционное зондирование Земли [Электронный ресурс] – URL: <https://www.roskosmos.ru/24707> (дата обращения: 06.09.2024).
3. Aschbacher J., Milagro-Perez M. The European Earth monitoring (GMES) program: Status and perspectives // Remote Sensing of Environment – 2012. – Vol. 120. – P. 3-8.
4. Putman W., Suarez M. Cloud-system resolving simulations with the NASA Goddard Earth Observing System global atmospheric model (GEOS-5) // Geophysical Research Letters. – 2011. – Vol. 16 – P. 38.
5. Li K., Wan G., Cheng G. Object detection in optical remote sensing images: A survey and a new benchmark // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2020 – Vol. 159 – P. 296-307.
6. Сутырина Е.Н. Дистанционное зондирование Земли: учебное пособие. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2013. – 165 с.
7. Wulder M. A., Hermosilla T., White J. C. Augmenting Landsat time series with Harmonized Landsat Sentinel-2 data products: Assessment of spectral correspondence // Science of Remote Sensing. – 2021 – Vol. 4. – 100031.

8. Radočaj D., Obhodas J., Jurisic M. Global open data remote sensing satellite missions for land monitoring and conservation: A review // Land. – 2020. – Vol. 9. – 402.
9. Wang Y., Lu Z., Sheng Y. Remote sensing applications in monitoring of protected areas // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12. – 1370.
10. Yuzhakov M.S., Filchenko D.I., Berzin A.K. Hardware and Software Complex for Monitoring Soil and Climatic Parameters // Proceedings of the 2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2021. – P. 483-488.
11. Copernicus Open Access Hub [Электронный ресурс] – URL: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (дата обращения: 18.08.2023).

Беспилотный авиационный комплекс на основе бортовых систем с элементами искусственного интеллекта для использования в сфере сельского хозяйства

Г.Р. Янгалин, А.В. Первалов, К.А. Хромей

Научный руководитель: К В. Дорожкин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: g.r.yangalin@stud.tsu.ru

Аннотация: В докладе представлены результаты разработки беспилотного авиационного комплекса, включающего в себя мониторинговый беспилотный летательный аппарат типа гексакоптер с ИИ-камерой и наземный комплекс управления

Ключевые слова: БПЛА, беспилотный авиационный комплекс, ИИ-камера, свёрточные нейронные сети, сельское хозяйство, системы технического зрения, БРЭО, интеллектуальные системы управления

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко используются в различных сферах жизнедеятельности человека, позволяют автоматизировать и упростить производственные процессы, логистические поставки, обеспечить безопасность инфраструктурных объектов. Одним из приоритетных направлений применения БПЛА является их использование в сельскохозяйственной отрасли для решения задач оценки качества посевов, опрыскивания полей, проведения аэрофотосъёмки.

В данной работе рассматривается разработка и создание беспилотного авиационного комплекса (БАК), который включает в себя мониторинговый беспилотный летательный аппарат конструкции типа гексакоптер (рис. 1), разработанный в САПР КОМПАС-3D v21 (Учебная версия) и наземный комплекс управления (рис. 2).



Рис. 1. Компьютерная модель мониторингового БПЛА



Рис. 2. Наземный комплекс управления мониторингового БПЛА

Основным бортовым радиоэлектронным оборудованием выступает отладочная плата STM32 Nucleo на базе микроконтроллера F411RE и микрокомпьютер Рerка Pi 3. Для полета мониторингового БПЛА используются бесколлекторные двигатели ReadyToSky модели RS 2212-920 kv, карбоновые винты модели 1045, аккумулятор 3S RC LiPo 5200 мАч, конструкционная рама, состоящая из алюминиевых профилей и основания из органического стекла.

Для увеличения дальности полета гексакоптера в состав БАК включен следящий наземный комплекс управления, состоящий из антенны Yagi-Uda, рассчитанной на частоту 433 МГц, с усилением 11 дБи, линейной поляризацией, которая имеет 5 элементов и симметричный вибратор, включающая радиомодуль Lora EBYTE E22-400T3 0D и следящий механизм с шаговыми двигателями Nema 23.

В качестве полезной нагрузки будет использована ИИ-камера Intel RealSense D435 (рис. 3).



Рис. 3. ИИ-камера Intel RealSense D435 в составе БПЛА

Данная камера позволит осуществлять картографирование сельскохозяйственных угодий с последующим созданием трехмерной карты местности. ИИ-камера Intel RealSense D435 (Рис. 4) является стереоскопической с технологией определения глубины, состоит из правого и левого сканера, RGB-модуля, ИК-приемника. Выходное разрешение камеры глубины составляет до 1280×720 px, частота кадров составляет до 90 FPS. Её основное предназначение заключается в распознавании образов с помощью сверточной нейронной сети, входные данные, которой проходят через каждый слой сети и подвергаются сериям линейных и нелинейных преобразований.

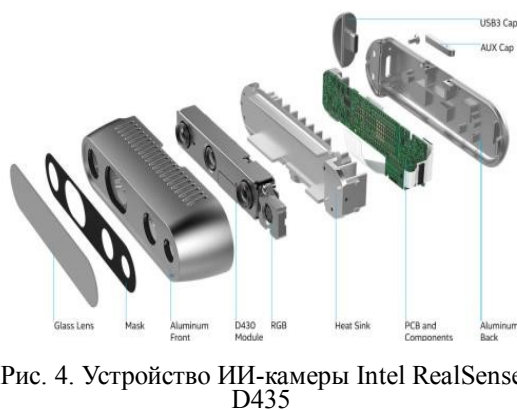


Рис. 4. Устройство ИИ-камеры Intel RealSense D435

Помимо камеры в состав БНАК входит комплекс датчиковой аппаратуры, который включает в себя датчик температуры и влажности, инфракрасный датчик, датчик тока, IMU-модуль, барометр, цифровой компас-магнитометр, датчик вибрации, радиомодуль Loga EBYTE E22-400T30D для передачи телеметрии, радиомодуль FPV Aviation RC832 для передачи видеоданных, модуль GNSS GT-U12 для определения положения в пространстве, пульт управления с дополнительным радиомодулем FlySky FS-I6 для управления дроном.

Принципиальным отличием от имеющихся разработок в сфере БПЛА будет являться использование отечественной компонентной базы по части управления ИИ-камерой, при помощи которой будет осуществлено получение снимков местности с последующей обработкой данных.

Предполагается, что разработанный комплекс может быть использован для оценки состояния сельскохозяйственных культур в процессе созревания, выявления сорняков и создания карты их расположения с целью реализации шагов по увеличению урожайности.

Благодарности

Научное исследование выполнено при поддержке Радиофизического факультета, кафедры радиоэлектроники, Национального исследовательского Томского государственного университета.

Список литературы

1. Биард Р.У., Маклэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / под ред. Г.В. Анцева. – М. : Техносфера, 2015. – 312 с.
2. Михайлов В.А., Пилипенко О.Г. Распознавание основных объектов инфраструктуры городской местности при помощи БПЛА и нейросети U-Net // Четвертый Всероссийский научно-практический семинар "Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта" (БТС-ИИ-2017). – Казань : Центр инновационных технологий, 2017. – С. 25–35.
3. Ivanov L.I., Obukhova N.A., Baranov P.S. Review of modern UAV Detection algorithms using methods of computer vision // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIcon Rus). – IEEE, 2020. – P. 322-325.
4. Горбатенко С.В. Беспилотные летательные аппараты. Основы механики управляемого полета. – М. : Вузовская книга, 2023. – 140 с.
5. Соколов О.А., Травкин К.И., Ренц М.П. Беспилотные летательные аппараты и их электроника // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2023. – Т. 8, № 3(29). – С. 4-8.
6. Афонин П., Голубев И., Колотков Н. и др. Беспилотные летательные аппараты. – М. : Машиностроение, 1967. – 440 с.
7. Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. – М. : Машиностроение, 1962. – 548 с.

**RECENT DEVELOPMENTS IN RADIOPHYSICS, OPTICS,
PHOTONICS, OPTOINFORMATICS AND INFORMATION
TECHNOLOGIES**

RHEED patterns from 2x1 and 1x2 superstructures during epitaxy of Si on Si(100)

I.Y. Dyukov, A.A. Burnashov

Supervisor: Doctor of Sciences in Phys. and Math., A.P. Kokhanenko

National research Tomsk State University, Tomsk

E-mail: dyukov.ilya.yu@mail.ru

Annotation: This paper analyzes the growth of Si on Si (100) substrate in a wide temperature range by reflection high-energy electron diffraction method (RHEED) and studies its mechanisms.

Keywords: Molecular-beam epitaxy, superstructures, reflection high-energy electron diffraction, silicon, terraces.

Nanoelectronics and nanophotonics impose strict requirements on the quality of nanostructures and heteroboundaries of the emerging epitaxial layers, so a full understanding of epitaxial growth processes is necessary. In addition to the fact that the synthesis of a nanostructure depends on the growth temperature, which determines the course of kinetic processes during epitaxial deposition [1]. In this regard, the purpose of the work is to determine the growth processes Si on the substrate Si(100) at different temperatures. The novelty of the study lies in determining the influence of temperature on the mechanisms of formation of the atomic steps at growth Si on Si (100).

The most advanced epitaxial method is the molecular-beam epitaxy (MBE) method, which allows to create epitaxial layers of high-quality structures with predetermined properties and parameters in ultra-high vacuum conditions. The experiments were carried out on the «Katun-100» MBE installation using the RHEED method for *in situ* surface analysis [2, 3].

Before experimentation, the Si (100) substrates underwent a standard pre-epitaxy preparation. The work used a silicon substrates Si(100) with a scaling angle of less than 0.1°. Because of this, the silicon surface is presented as alternating terraces with different types of 2x1 and 1x2 dimers on the surface [4, 5]. The epitaxial growth of Si on Si(100) occurred at temperatures from 200 C° to 800 C° at a growth rate of 0.1 ML/s.

As a result, the influence of temperature on the mechanisms of formation of terraces of the two

types in the process of synthesis Si on Si(100) was investigated. The dependence of the formation mechanisms of epitaxial structures on temperature in the range of 200–800 °C was experimentally confirmed.

The study was carried out with the financial support of RSF as part of a scientific project № 23-62-10021

References

1. Jianjun Z., Moritz B., Martyna G., Oliver G.S. Evolution of epitaxial semiconductor nanodots and nanowires from supersaturated wetting layer // Chem. Soc. Rev. – 2015. – Vol. 44. – P. 26–39.
2. Blinov V.V., Mashanov V.I., Nikiforov A.I., Pridachin D.N. et al. Plant for molecular beam epitaxy «Katun-100» // Spacecrafts & Technologies. – 2018. – Vol. 2, No. 3. – P. 170–174.
3. Dirko V.V., Lozovoy K.A., Kokhanenko A.P. et al. High-resolution RHEED analysis of dynamics of low-temperature superstructure transitions in Ge/Si(001) epitaxial system // Nanotechnology. – 2022. – Vol. 33, No. 11. – P. 115603-1–115603-8.
4. Hervieu Yu.Yu. Formation of Double Steps on Si(100): Effect of Permeability of the A-Steps // Russian Physics Journal – 2020. – Vol. 63, No. 6. – P. 3-7.
5. Kukenov O.I., Sokolov A.S., Dirko V.V. et al. Analysis of the temperature dependence of homoepitaxial growth of Si on Si by reflection high-energy electron diffraction // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2023. – Vol. 16, Is. 3.1. – P. 112–116.

Transport of nonequilibrium charge carriers in sensors based on chromium-compensated gallium arsenide under the influence of high-intensity synchrotron radiation

M.S. Trofimov

Scientific supervisor: Doctor of Sciences in Phys. and Math., O.P. Tolbanov

National Research Tomsk State University, Tomsk

E-mail: mihant1999@yandex.ru

Abstract: An important stage in the development and design of semiconductor detectors is carrying out scientific research to study the mechanisms of current flow in semiconductor sensors when exposed to ionizing radiation of various natures. In this work, we studied the transport of charge carriers in microstrip sensors based on chromium-compensated gallium arsenide when exposed to synchrotron radiation in the X-ray range. The computer-aided semiconductor design system COMSOL was used as a research tool.

Keywords: Semiconductor detector, chromium-compensated gallium arsenide, photocurrent, synchrotron radiation.

Currently, synchrotron radiation sources are gradually replacing X-ray tubes from scientific research instruments and occupy a leading position in the development of modern science and technology. To register synchrotron radiation, ionizing radiation detectors based on semiconductor materials are widely used, which have significantly better spectrometric characteristics compared to gas and scintillation counters. Today, chromium-compensated gallium arsenide (HR-GaAs:Cr, where HR is high resistivity) has proven itself well as a detector material. The technology developed by scientists from Tomsk to compensate GaAs n-type conductivity with chromium in the process of high-temperature diffusion makes it possible to obtain radiation-resistant HR-GaAs:Cr (HR – high resistivity) structures with a resistivity of the order of 10^9 Ohm·cm and an active region thickness of up to 1 mm [1–3]. Research over the past 20 years has shown that detectors based on HR-GaAs:Cr are highly efficient and promising for high-energy physics experiments.

At the moment, there is no data in the literature on the mechanisms of current flow in HR-GaAs:Cr sensors when exposed to synchrotron radiation in the X-ray range, which served as an incentive to study this issue. In this work, we simulated the transport of nonequilibrium charge carriers in a single-element HR-GaAs:Cr sensor under the influence of a single high-intensity X-ray pulse with a photon energy of 20 keV.

The first stage of modeling was the design of a geometric model of the HR-GaAs:Cr sensor, specifying dopant distribution profiles and a discrete

computational mesh. The calculations took into account deep acceptor centers of chromium c, deep donor E12 centers and a shallow donor impurity of tellurium with concentrations of 10^{17} cm⁻³, 10^{15} cm⁻³ and 10^{16} cm⁻³, respectively. The distribution of impurities was specified by a uniform profile. Metal contacts at the interface with gallium arsenide formed Schottky barriers with a value of 0.9 eV. The thickness of the model was 500 μm.

The next stage of modeling was the construction of a physical model of the HR-GaAs:Cr sensor and the design of an elementary electrical circuit for recording the photocurrent. To calculate the electric field strength and the concentration of nonequilibrium charge carriers, a system of equations was constructed, consisting of the Poisson and continuity equations. The electron and hole current densities were specified using a diffusion-drift model. The process of ionization of impurities was specified according to Fermi-Dirac statistics. To take into account the recombination of charge carriers through deep impurities, the Shockley-Reed-Hall model was used, used by the authors of the article [4]

The designed electrical circuit consisted of a 1000 V DC power supply connected in series, an HR-GaAs:Cr sensor and a 50 ohm load resistance. The intensity and duration of pulsed X-ray radiation corresponded to the characteristics of synchrotron radiation sources and amounted to 6000 W/cm² and 100 ps respectively.

Fig. 1 shows the calculated photocurrent pulse obtained as a result of irradiating the HR-GaAs:Cr sensor with an X-ray pulse with a photon energy of

20 keV from the cathode side (the voltage was applied to the anode). Analyzing the dynamics of photocurrent formation, two characteristic effects can be noted. In the interval (0 – 15) ns, three characteristic peaks with decreasing duration and amplitude are observed. The pulse duration is about 50 ns, which is almost 10 times higher than the pulse duration in sensors based on this material at a given bias voltage.

To explain these effects, profiles of the distribution of the concentration of generated electrons over the thickness of the active region of the sensor and the field strength were constructed at different times. The results of the study showed that at a given radiation intensity, an electron-hole plasma is formed in the sensor volume, which decays due to the diffusion of charge carriers in opposite directions.

Within 15 seconds, electrons are released from the plasma in the form of three dense bunches and enter the electric field region, where they drift to the anode inducing impulses in the external circuit. Over time, electrons are captured by deep donor E12 centers, which leads to a decrease in the photocurrent peaks. The contribution of holes to the current pulse is minimal, due to their lower charge mobility. Further, the decay of the plasma state continues, which leads to the observed signal delay.

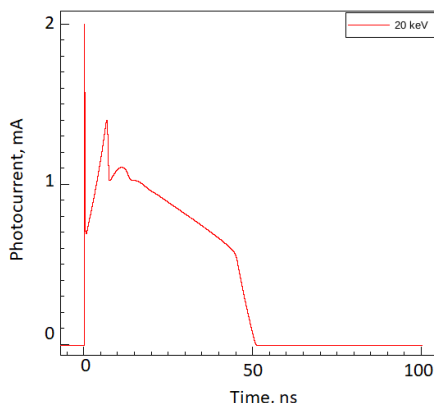


Fig. 1. Calculated photocurrent pulse when irradiating an HR-GaAs:Cr sensor with pulsed X-ray radiation with a photon energy of 20 keV

It is worth noting that significant increase in the duration of the photocurrent pulse is observed only at X-ray photon energies up to 20 keV, which is associated with the shallow penetration depth of the radiation and, as a consequence, with the formation of a denser electron-hole plasma.

As a result of this work, a physical model was built that allows one to calculate HR-GaAs:Cr sensor photocurrent pulses, as well as quantitatively describe the kinetics of charge carrier transport when exposed to synchrotron radiation. The results obtained are new and have great practical and scientific significance in the field of semiconductor detector electronics based on HR-GaAs:Cr

The research was support of the Russian Federation Government (Grant No. 075-15-2022-1132), July 1, 2022 in accordance with the Order No. 220, April 9, 201

References

1. Khludkov S., Okaevich L., Potapov A., Tolbanov O. GaAs structures with deep centres for ionizing radiation detection // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1997. – Vol. 395, No. 1. – P. 132–133.
2. Tyazhev A.V. et al. GaAs radiation imaging detectors with an active layer thickness up to 1 mm // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2003. – Vol. 509, No.1, –P. 34 – 39.
3. Budnitsky D. et al. Chromium-compensated GaAs detector material and sensors // JINST. – 2014. – Vol. 9. – C07011.
4. Prudaev I.A., Verkholetov M.G. Nonlinearity of volt-ampere characteristics of homogeneous compensated detector GaAs structures // Tech. Phys. Let. – 2019. – Vol. 45. – P. 566–569.

СОДЕРЖАНИЕ

РАДИОФИЗИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Прототип многоканальной пассивной РЛС кругового обзора на базе SDR <i>С.А. Аббас, Р.С. Хаддур, М.А. Щелоков</i> 4	Структурные и магнитные свойства никелевой феррошпинели, синтезированной методом золь-гель горения <i>В.В. Лемешов</i> 27
Разработка схемы для фиксации двигательной активности ребенка при диагностике и реабилитации <i>Т.Л. Болтрукевич</i> 7	Микрофлюидная спектроскопия воды и водно-солевых растворов (NaCl и $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) в терагерцовом диапазоне частот <i>Л.О. Лобова, Д.А. Пидотова</i> 29
Разработка фантома для радиотомографии инсультов <i>В.В. Васин, Е.Н. Мидони</i> 9	Исследование спектров диэлектрической проницаемости магнитных жидкостей конденсаторным методом <i>Д.А. Мазилев</i> 31
Автоматизированный шнековый экструдер для производства композиционных филаментов для 3D печати <i>И.А. Вертопрахов, А.Н. Елясов</i> 11	Измерение и моделирование вольт-амперных характеристик арсенид-галлиевых сенсоров высокоэнергетических электронов <i>А.А. Маковский</i> 33
Моделирование эффективности сбора заряда и отношения сигнал/шум сенсоров рентгеновского излучения на основе арсенида галлия, компенсированного хромом <i>М.С. Голубев</i> 13	Моделирование параметрического изменения профиля на поверхности композита <i>С.В. Митрофанов, К.В. Карева</i> 37
Исследование свойств наночастиц магнетита синтезированного методом химического соосаждения <i>Р.Д. Капитанов</i> 15	Устройство для измерения магнитного поля на основе Arduino <i>Р.Ш. Сайидулов</i> 39
Разрушение когерентности в системе связанных автогенераторов с хаотической динамикой <i>В.С. Костерова</i> 17	Программно-аппаратный комплекс для сбора агроклиматических данных на основе ESP 32 <i>С.А. Ситников, И.В. Спешилов</i> 41
Моделирование распределения электрофи- зических параметров по пластине арсенида галлия, компенсированного хромом <i>К.М. Косухин</i> 19	Влияние СВЧ-нагрева на изменение внутренней температуры фантомов конечностей человека <i>П.П. Смыгалина</i> 43
Разработка принципиальной электрической схемы портативного трехканального электрокардиографа <i>Д.С. Ладынская, В.И. Куприянова, А.И. Мауль, А.В. Острияков</i> 22	Разработка зонда системы сбора агро- климатических параметров с функцией локального резервирования данных <i>И.В. Спешилов</i> 45
Разработка и исследование композиционных радиоматериалов на основе оксидных ферритмагнетиков в широком диапазоне частот <i>К.С. Ланг</i> 24	Влияние продольной деформации на электро- магнитный отклик анизотропной структуры в терагерцовой области частот <i>Д.А. Фролова, Д.А. Пидотова</i> 47
	Измерение фазы с использованием двух- канальной радиосистемы SDR <i>Р.С. Хаддур, С.А. Аббас, М.А. Щелоков</i> 49

Терагерцовая визуализация многослойных полимерных материалов в аддитивном производстве <i>Р.Е. Холодов, Д.С. Кателина, А.А. Комарова</i>	52
---	----

Автоматизированная система управления высокотемпературного нагревателя <i>Д.В. Чернышев, А.А. Яценко</i>	54
---	----

ОПТИКА, ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА

Банк данных и анализ оптических характеристик ледяных частиц для интерпретации данных лазерного зондирования перистых облаков <i>А.Е. Бабинович, Е. Бакуте</i>	58
---	----

Азотсодержащие центры окраски алмаза в спектрах электролюминесценции <i>Л.А. Васильева, З.И. Бородулин</i>	62
---	----

Картины дифракции структур 1x2 и 2x1 при эпитаксии Si на Si(100) <i>О.И. Ворсин, И.Ю. Дюков, А.В. Гнеушев, О.И. Кукенов</i>	64
--	----

Выбор ширины спектральной линии лазерного излучения для формирования натриевой лазерной опорной звезды <i>С.А. Ермаков</i>	66
---	----

Оптическая и спектральная время-разрешенная диагностика плазмы наносекундного разряда в атмосферном воздухе в условиях высокого перенапряжения <i>Б. Зайцев</i>	68
--	----

Приуроченность событий на временных рядах численности планктона, зарегистрированных цифровой голографической камерой in situ <i>Д.В. Куркова</i>	71
---	----

Оценка длительности существования конденсационных следов самолета по данным поляризационного лидара и спутникового спектрорадиометра MODIS <i>О.Ю. Локтюшин</i>	74
--	----

Расчет характеристик синего светодиода GaN с одной квантовой ямой <i>Г.А. Шабанов, В.Д. Катренко</i>	77
---	----

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Разработка информационных программ для работы с комплектом приборов NI ELVIS III <i>А.С. Духанов, А.А. Фоминых</i>	82
---	----

Применение модели расширенного автомата для проверки знания студентом алгоритма раскраски графа <i>Е.В. Корытников</i>	85
---	----

Программно-аппаратный комплекс LabView-NI ELVIS II+ для работы с цифровыми и аналоговыми устройствами ввода-вывода <i>Н.А. Косарев</i>	87
---	----

Автоматизированный поиск полуволнового напряжения на фазомодуляторе интерферометра системы квантового распределения ключей <i>З.Г. Кузубаев</i>	89
--	----

Нейросетевой алгоритм распознавания и классификации черноморского зоопланктона <i>М.М. Курков</i>	91
--	----

Разработка программного обеспечения для портативного электрокардиографа <i>А.И. Мауль, В.И. Куприянова, Д.С. Ладынская, А.В. Остряков</i>	95
--	----

Проверка программного обеспечения с учётом требований к информационной безопасности <i>В.В. Ни</i>	98
---	----

Разработка набора функций базовых гейтов для эмулятора квантового компьютера <i>М.А. Олейник</i>	101
---	-----

Программно-аппаратный комплекс LabVIEW-NI ELVIS II+ для измерения вольтамперных характеристик полевых транзисторов с управляющим р-n-переходом <i>Н.С. Седов</i>	104
---	-----

Проектирование оптимальной структуры беспроводной внутренней сенсорной сети <i>А.А. Сиротинин</i>	106
--	-----

Определение параметров сигналов цифровой модуляции <i>К.К. Слесарчик</i>	108
Разработка прототипа аппаратно-программного комплекса для управления манипулятором <i>Р.А. Сотников, А.Н. Смирнов, М.В. Шевчук, О.К. Якименко</i>	113
Применимость веб-компонентов для математических вычислений при реализации системы контроля знаний студентов в рамках курса «Аналитическая геометрия» <i>В.И. Тишкова</i>	116
Программно-аппаратный комплекс LabVIEW-NI ELVIS II+ для управления источником тока <i>М.А. Черкашин</i>	118

Применение наземной системы мониторинга климата для обеспечения достоверности данных дистанционного зондирования <i>М.С. Южаков, В.А.Казанин</i>	120
Беспилотный авиационный комплекс на основе бортовых систем с элементами искусственного интеллекта для использования в сфере сельского хозяйства <i>Г.Р. Янгалин, А.В. Перевалов, К.А. Хромея</i>	124

**RECENT DEVELOPMENTS
IN RADIOPHYSICS, OPTICS, PHOTONICS,
OPTOINFORMATICS AND INFORMATION
TECHNOLOGIES**

RHEED patterns from 2x1 and 1x2 superstructures during epitaxy of Si on Si(100) <i>I.Y. Dyukov, A.A. Burnashov</i>	128
Transport of nonequilibrium charge carriers in sensors based on chromium-compensated gallium arsenide under the influence of high-intensity synchrotron radiation <i>M.S. Trofimov</i>	129

Научное издание

**ДВАДЦАТЬ ПЕРВАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
СТУДЕНЧЕСКИХ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИНКУБАТОРОВ**
г. Томск, 13–17 мая 2024 г.
Сборник трудов

Верстка, техническое редактирование,
дизайн – С.В. Алексеев, Ю.А. Алексеева

Издательство “СТТ”
Россия, 634028, г. Томск, проспект Ленина, 15/Б–1
Тел.: (3822)421-455
E-mail: sttonline@mail.ru



ИЗДАТЕЛЬСТВО

Усл. печ. лист 14,1. Уч.-изд. л. 5,45.
Бумага SvetoСору. Печать цифровая. Гарнитура Times.
Подписано к печати 16.08.2024 г. Формат 60x84/16.
Тираж 300 экз. Заказ № 716.