

№	ФИО	Форма реализации научно-исследовательской деятельности	Ссылка/документ
1.	Боровикова Е.Ю. 44.04.04 ПРО Современные физико-математические технологии	Участие научных мероприятий	статья
2.	Исхакова В.В. 44.04.04 ПРО Современные физико-математические технологии	Участие научных мероприятий	статья
3.	Ишбулатова А.И. 44.04.04 ПРО Современные физико-математические технологии	Участие научных мероприятий	статья
4.	Кадырбердина А.А. 44.04.04 ПРО Современные физико-математические технологии	Участие научных мероприятий	статья
5.	Карнаух А.Ю. 44.04.04 ПРО Современные физико-математические технологии	Участие научных мероприятий	статья
6.	Ладин П.А. 44.04.04 ПРО Современные физико-математические технологии	Участие научных мероприятий	статья
7.	Мухаметрахимова А.И. 44.04.04 ПРО Современные физико-математические технологии	Участие научных мероприятий	статья
8.	Нагаева Г.Ф. 44.04.04 ПРО Современные физико-математические технологии	Участие научных мероприятий	диплом
9.	Никитина Д.В. 44.04.04 ПРО Современные физико-математические технологии	Участие научных мероприятий	статья
10.	Рахматова Л.И. 44.04.04 ПРО Современные физико-математические технологии	Участие научных мероприятий	статья
11.	Севостьянова Е.Г. 44.04.04 ПРО Современные физико-математические технологии	Участие научных мероприятий	статья
12.	Солодовников Р.А. 44.04.04 ПРО Современные физико-математические технологии	Участие научных мероприятий	статья

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "
«БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. М.АКМУЛЛЫ»

**«ЭКСПЕРИМЕНТ КАК МЕТОД НАУЧНОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ»**

Выполнили: Исхакова В.В.

Боровикова Е.Ю.

Гарифуллин Э.Д.

Уфа 2017

"EXPERIMENT AS A METHOD OF SCIENTIFIC RESEARCH"

Iskhakova V.V., Borovikova E.Yu., Garifullin E.D.

Bashkir State Pedagogical University

Ufa 2017

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО И СТРУКТУРУ СУБМИКРОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК

© Д.Д. Карамов, В.М. Корнилов, А.Н. Лачинов, Е.Ю. Боровикова

Представлены результаты влияния термической обработки на морфологию поверхности и надмолекулярную структуру субмикронных пленок термостойкого полимера. Методами атомно-силовой микроскопии показано, что шероховатость поверхности и толщина пленок полидифениленфталида не меняется при термообработке на воздухе вплоть до температуры 350°C. Визуализирована динамика термоокислительной деструкции, предложена модель, объясняющая стадии наблюдаемого процесса.

Ключевые слова: тонкие пленки, полидифениленфталид, АСМ, надмолекулярная структура, термоокислительная деструкция

Введение. Одна из важнейших задач современного материаловедения – это совершенствование имеющихся и создание новых диэлектрических покрытий для использования в микро- и нанoeлектронике. Главной проблемой здесь представляется создание тонкого бездефектного и воспроизводимого диэлектрического слоя на разных подложках. Широко используемые в настоящее время окисные пленки хорошо формируются только на соответствующих металлах или полупроводниках, а более сложные соединения требуют соответствующего технологического оборудования, которое в настоящее время еще не гарантирует высокой воспроизводимости образцов. Интересным подходом к решению данной проблемы представляется использование в качестве диэлектрического слоя полимерной пленки. Требуется, чтобы полимер покрывал поверхность по возможности тонким слоем, имел достаточную механическую прочность и термостойкость. Оказалось, что таким условиям удовлетворяют полимеры из класса полигетероариленов – полиариленфталиды. Кроме того, в субмикронных пленках этих несопряженных полимеров были обнаружены и исследованы эффекты электронно-

го переключения, электролюминесценции, электронной эмиссии [1]. Интенсивно исследуются процессы переноса заряда в области квазидвумерного электронного газа, сформированного на интерфейсе двух полимерных слоев [2].

Полидифениленфталид относят к полимерам с высокой термостойкостью. Температура начала разложения на воздухе выше 400°C. Однако традиционные методы исследования термостойкости полимеров (например, термогравиметрия) позволяют определить суммарную потерю массы полимерных образцов. При использовании субмикронных полимерных слоев принципиально важными становятся вопросы о качестве (шероховатости) поверхности, о точном измерении толщины слоя, о внутренней (надмолекулярной) структуре и о влиянии на параметры полимерной пленки термообработки при разных температурах. Для ответа на эти вопросы целесообразно использовать комплекс методов атомно-силовой микроскопии.

Ранее в работе [3] было показано, что при ровной и гладкой поверхности субмикронных пленок полидифениленфталида в объеме толщиной более 100 nm существует надмолекулярная структура, которая образована из ассоциатов макро-

КАРАМОВ Данфис Данисович, Уфимский научный центр РАН, e-mail: karamov_danf@bk.ru

КОРНИЛОВ Виктор Михайлович, Башкирский государственный педагогический университет им. Акмуллы, e-mail: kornilov@anrb.ru

ЛАЧИНОВ Алексей Николаевич, Уфимский научный центр РАН, e-mail: lachinov@anrb.ru

БОРОВИКОВА Елена Юрьевна, Башкирский государственный педагогический университет им. Акмуллы, e-mail:



ФАДН РОССИИ
Федеральное агентство
по делам национальностей



**БОЛЬШОЙ
ЭТНОГРАФИЧЕСКИЙ
ДИКТАНТ**
2018



**ФОНД
ПРЕЗИДЕНТСКИХ
ГРАНТОВ**



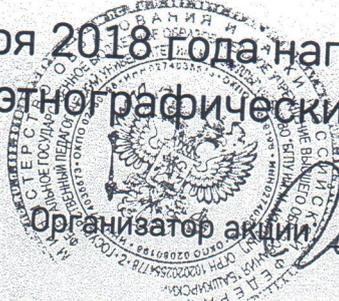
**МИННАЦ
УДМУРТИИ**

СЕРТИФИКАТ

удостоверяет, что

Боровикова Елена Юрьевна

2 ноября 2018 года написал(а)
«Большой этнографический диктант».



Организатор акции

Миретнов

www.fadn.gov.ru

www.miretno.ru

ГРАММОТА

награждается

Боровикова Елена

студент(-ка) I курса за активное участие в
научной жизни физико-математического факультета

Декан

Э.Р.Жданов

Э.Р.Жданов





БЛАГОДАРСТВЕННОЕ ПИСЬМО

Физико-математический факультет БГУ им.М.Акмоллы выражает
благодарность

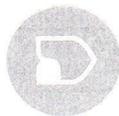
Боровиковой Елене

за достижения в учебе и активное участие в исследовательской и
общественной жизни факультета

ДЕКАН ФМФ

Э.Р.ЖДАНОВ

ДЕКАБРЬ 2018



Фонд развития
науки и образования



БЛАГОДАРСТВЕННОЕ ПИСЬМО

физико-математический факультет БГПУ им.М.Акмоллы выражает
благодарность

Боровиковой Елене

студенту(-ке) 2 курса магистратуры за активное участие в научно-
исследовательской деятельности

ДЕКАН ФМФ

Э.Р.ЖДАНОВ

ДЕКАБРЬ 2018



СЕРТИФИКАТ

УЧАСТНИКА

X МЕЖДУНАРОДНОЙ
СТУДЕНЧЕСКОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«СТУДЕНЧЕСКИЙ НАУЧНЫЙ ФОРУМ 2018»

**Боровикова Е.Ю., Исхакова
В.В., Гарифуллин Э.Д.**

ЭКСПЕРИМЕНТ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

<http://scienceforum.ru/2018/article/2018000774>

Председатель оргкомитета

д.м.н., проф., академик РАН

М.Ю.Ледванов



**ЭЛЕКТРОННЫЕ, СПИНОВЫЕ
И КВАНТОВЫЕ ПРОЦЕССЫ
В МОЛЕКУЛЯРНЫХ
И КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

1994



2019

Сборник тезисов докладов и сообщений

*Всероссийской конференции-школы
с международным участием*

посвященной 25-летию

Института физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН
и 100-летию создания

Уфимского физического института (1919-1937 гг.)

Уфа - 2019

УДК 53
ББК 22.3
Э 45

Э 45 **Электронные, спиновые и квантовые процессы в молекулярных и кристаллических системах:** Сб. тезисов докладов и сообщений на Всерос. конф. – Уфа: Изд-во БГПУ, 2019. – 158 с.

ISBN 978-5-907176-12-6

Сборник подготовлен по материалам, предоставленным участниками Всероссийской конференции-школы с международным участием "Электронные, спиновые и квантовые процессы в молекулярных и кристаллических системах", приуроченной к 25-летию Института физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН и 100-летию создания Уфимского физического института (1919–1937 гг.) и проводимой с 22 по 25 мая 2019 года в ИФМК УФИЦ РАН, г. Уфа. Конференция охватывает широкий спектр актуальных фундаментальных и прикладных проблем, связанных с электронными, спиновыми и квантовыми процессами, происходящих в молекулярных структурах, органических, магнитных, наноструктурных материалах и жидких кристаллах.

Издание предназначено для научных сотрудников, аспирантов и студентов физических и физико-химических специальностей.

**Конференция проводится при поддержке Главы Республики
Башкортостан**

Материалы сборника напечатаны с представленных авторами оригиналов на основании решения рецензионной комиссии.

Рецензионная комиссия: Академик РАН Салихов К.М., чл. корр. РАН Разумов В.Ф., д.ф.-м.н. Асфандиаров Н.Л., д.ф.-м.н. Гареева З.В., д.ф.-м.н. Горюнков А.А., д.ф.-м.н. Гундеров Д.В., д.ф.-м.н. Иванов А.И., д.ф.-м.н. Лачинов А.Н., д.ф.-м.н. Скалдин О.А.

Редакционная коллегия: Пшеничнюк С.А., Цеплин Е.Е., Хатымов Р.В.

ISBN 978-5-907176-12-6

© ИФМК УФИЦ РАН, 2019

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСТОЙКОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК

Боровикова Е.Ю., Корнилов В.М.

БГПУ им. М. Акмуллы, г. Уфа,

e-mail: elena.borovikovayu@mail.ru, kornilov@anrb.ru

Термостойкие полимеры представляют в настоящее время одну из наиболее перспективных областей полимерной химии. Одним из представителей термостойких полимеров является полидифениленфталид (ПДФ). Информация о термостойкости была получена методом термогравиметрии, для работ с субмикронными пленками важно иметь возможность более точной диагностики состояния пленок.

Для проведения АСМ-исследований был использован сканирующий мультимикроскоп СММ-2000Т с кантилевером CSG01, работавший в контактной моде. Исследования методом атомно-силовой микроскопии показали, что поверхности исходных образцов однородные, гладкие, с шероховатостью, сравнимой с шероховатостью подложек, на которые они были нанесены. Нагревание образцов на воздухе до температур 350°C и последующее охлаждение не влияет на шероховатость поверхности и не изменяет толщины полимерных пленок. Заметное уменьшение толщины полимерной пленки наблюдается только после отжига при температуре 450°C. Одновременно на поверхности регистрируется зернистая структура, с размерами структурных элементов 6-10 нм.

Установлено, что пленки ПДФ обладают высокой термостабильностью без потери качества при нагреве на воздухе. При термоокислительной деструкции наблюдаются глобулы, объемы которых сопоставимы с объемом полимерной молекулы. Активный кислород приводит к распаду полимерных макромолекул с образованием фрагментов тетрафенилметанового, гексафенилэтанового, антраценового и флуоренового типа, которые летучи при температурах деструкции.

**ЭЛЕКТРОННЫЕ, СПИНОВЫЕ
И КВАНТОВЫЕ ПРОЦЕССЫ
В МОЛЕКУЛЯРНЫХ
И КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

1994



2019

Сборник тезисов докладов и сообщений

***Всероссийской конференции-школы
с международным участием***

посвященной 25-летию

Института физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН
и 100-летию создания

Уфимского физического института (1919-1937 гг.)

Уфа - 2019

УДК 53
ББК 22.3
Э 45

Э 45 **Электронные, спиновые и квантовые процессы в молекулярных и кристаллических системах:** Сб. тезисов докладов и сообщений на Всерос. конф. – Уфа: Изд-во БГПУ, 2019. – 158 с.

ISBN 978-5-907176-12-6

Сборник подготовлен по материалам, предоставленным участниками Всероссийской конференции-школы с международным участием "Электронные, спиновые и квантовые процессы в молекулярных и кристаллических системах", приуроченной к 25-летию Института физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН и 100-летию создания Уфимского физического института (1919–1937 гг.) и проводимой с 22 по 25 мая 2019 года в ИФМК УФИЦ РАН, г. Уфа. Конференция охватывает широкий спектр актуальных фундаментальных и прикладных проблем, связанных с электронными, спиновыми и квантовыми процессами, происходящих в молекулярных структурах, органических, магнитных, наноструктурных материалах и жидких кристаллах.

Издание предназначено для научных сотрудников, аспирантов и студентов физических и физико-химических специальностей.

**Конференция проводится при поддержке Главы Республики
Башкортостан**

Материалы сборника напечатаны с представленных авторами оригиналов на основании решения рецензионной комиссии.

Рецензионная комиссия: Академик РАН Салихов К.М., чл. корр. РАН Разумов В.Ф., д.ф.-м.н. Асфандиаров Н.Л., д.ф.-м.н. Гареева З.В., д.ф.-м.н. Горюнков А.А., д.ф.-м.н. Гундеров Д.В., д.ф.-м.н. Иванов А.И., д.ф.-м.н. Лачинов А.Н., д.ф.-м.н. Скалдин О.А.

Редакционная коллегия: Пшеничнюк С.А., Цеплин Е.Е., Хатымов Р.В.

ISBN 978-5-907176-12-6

© ИФМК УФИЦ РАН, 2019

ИЗУЧЕНИЕ ФОТОПРОВОДИМОСТИ ПЛЕНОК ПОЛИДИФЕНИЛЕНФТАЛИДА

Рахматова Л.И., Исхакова В.В., Юсупов А.Р.

ФГБОУ ВО БГПУ им. М.Акмиллы, г. Уфа, e-mail: rahmatova.liliya@mail.ru

В работе [1] было показано, что в пленках полидифениленфталида (ПДФ) наблюдается длительное послесвечение, которое объясняется в рамках представлений об электронных состояниях в запрещенной зоне полимера. Наличие долгоживущих ловушек в пленках ПДФ, очевидно, должно оказывать вклад в итоговую электропроводность. В связи с этим, целью данной работы являлось исследование влияния ультрафиолетового (УФ) фотовозбуждения на вольт-амперные характеристики (ВАХ) структуры ИТО-ПДФ-АІ. На рисунке 1 представлены вольтамперные характеристики полученные на экспериментальных структурах. Согласно полученным данным, УФ облучение через прозрачный слой ИТО приводит к росту электропроводности. В докладе обсуждаются полученные результаты, в частности, влияние УФ облучения на величину потенциального барьера и подвижность носителей заряда.

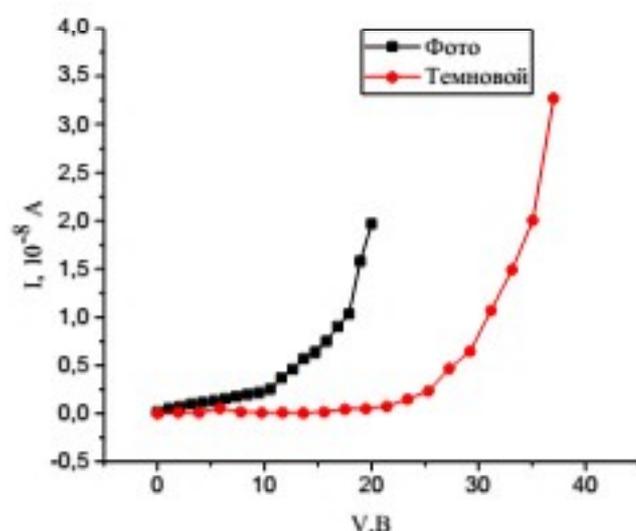


Рис. 1. Влияние УФ облучения на ВАХ структуры ИТО-ПДФ-АІ

Список литературы:

1. Антипин В.А., Лачинов А.Н., и др. // ХВЭ 2010. Т. 44. № 4. С. 345.

**ЭЛЕКТРОННЫЕ, СПИНОВЫЕ
И КВАНТОВЫЕ ПРОЦЕССЫ
В МОЛЕКУЛЯРНЫХ
И КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

1994



2019

Сборник тезисов докладов и сообщений

***Всероссийской конференции-школы
с международным участием***

посвященной 25-летию

Института физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН
и 100-летию создания

Уфимского физического института (1919-1937 гг.)

Уфа - 2019

УДК 53
ББК 22.3
Э 45

Э 45 **Электронные, спиновые и квантовые процессы в молекулярных и кристаллических системах:** Сб. тезисов докладов и сообщений на Всерос. конф. – Уфа: Изд-во БГПУ, 2019. – 158 с.

ISBN 978-5-907176-12-6

Сборник подготовлен по материалам, предоставленным участниками Всероссийской конференции-школы с международным участием "Электронные, спиновые и квантовые процессы в молекулярных и кристаллических системах", приуроченной к 25-летию Института физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН и 100-летию создания Уфимского физического института (1919–1937 гг.) и проводимой с 22 по 25 мая 2019 года в ИФМК УФИЦ РАН, г. Уфа. Конференция охватывает широкий спектр актуальных фундаментальных и прикладных проблем, связанных с электронными, спиновыми и квантовыми процессами, происходящих в молекулярных структурах, органических, магнитных, наноструктурных материалах и жидких кристаллах.

Издание предназначено для научных сотрудников, аспирантов и студентов физических и физико-химических специальностей.

**Конференция проводится при поддержке Главы Республики
Башкортостан**

Материалы сборника напечатаны с представленных авторами оригиналов на основании решения рецензионной комиссии.

Рецензионная комиссия: Академик РАН Салихов К.М., чл. корр. РАН Разумов В.Ф., д.ф.-м.н. Асфандиаров Н.Л., д.ф.-м.н. Гареева З.В., д.ф.-м.н. Горюнков А.А., д.ф.-м.н. Гундеров Д.В., д.ф.-м.н. Иванов А.И., д.ф.-м.н. Лачинов А.Н., д.ф.-м.н. Скалдин О.А.

Редакционная коллегия: Пшеничниук С.А., Цеплин Е.Е., Хатымов Р.В.

ISBN 978-5-907176-12-6

© ИФМК УФИЦ РАН, 2019

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ТОНКИХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК ПРИ ПОМОЩИ АТОМНО-
СИЛОВОГО МИКРОСКОПА С ПРОВОДЯЩИМ ЗОНДОМ**

Ишбулатова А.И., Корнилов В.М.

*БГПУ им. М. Акмуллы, г. Уфа, ул. Октябрьской Революции 3а,
e-mail: ishbulatova.aim@yandex.ru, kornilov@anrb.ru*

Эффективным инструментом экспериментального исследования поверхности, локальных электрофизических свойств полимерных пленок является метод атомно-силовой микроскопии с проводящим зондом. Знание взаимосвязи микроструктуры полимерного пленочного образца и его электронных свойств может обладать ценным предсказательным качеством при проектировании каких-либо электронных устройств. Эта методика позволяет производить одновременное картографирование морфологии поверхности и регистрацию электрических неоднородностей в пленке полимера. Для эксперимента были использованы субмикронные пленки полидифениленфталида (ПДФ) на подложке из нержавеющей стали. Режимы исследования электрических характеристик реализованы в виде комплекса дополнительных аппаратных и программных средств, подсоединённых к базовым системам сканирующего мультимикроскопа СММ-2000.

Установлено, что пленка ПДФ на поверхности металла изначально обладает хорошими диэлектрическими свойствами вплоть до толщины в несколько нанометров. При деформации этой пленки образуется некоторое количество дефектов, которые и служат местами протекания тока. Наиболее плотно дефекты сконцентрированы в области прямого механического воздействия. Таким образом, использование атомно-силового микроскопа с проводящим зондом позволяет одновременно исследовать топографические и электрические особенности поверхности ультратонких диэлектрических пленок в нанометровом масштабе.

УДК 53.086

*Корнилов В.М., д.ф.-м.н., профессор
Ишбулатова А.И., магистрант
Аккужин Ф.Р., студент
ФГБОУ ВО «БГПУ им. М. Акмуллы
(Уфа, Россия)*

ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОМЕТРОВЫХ СЛОЕВ ДВУОКСИ КРЕМНИЯ ПРИ ПОМОЩИ АТОМНО- СИЛОВОГО МИКРОСКОПА С ПРОВОДЯЩИМ ЗОНДОМ

Аннотация: в статье представлены исследования нанометровых слоев двуокиси кремния на поверхности кремния методом атомно-силовой микроскопии с электропроводящим зондом. Было установлено, что естественный слой окисла является хорошим диэлектриком. При деформации этого слоя образуется большое количество дефектов, которые и служат местами протекания тока. Использование атомно-силового микроскопа с проводящим зондом позволяет одновременно исследовать топографические и электрические особенности поверхности в нанометровом масштабе.

Ключевые слова: *двуокись кремния, МДП-структура, диэлектрик.*

Введение

Граница раздела кремний – двуокись кремния обладает набором уникальных электрофизических свойств, которые во многом обусловили бурное развитие кремниевой микроэлектроники. Особенности накопления и переноса заряда вблизи этой границы сделали возможной реализацию широкого круга полупроводниковых устройств. Это МДП-структуры, приборы с зарядовой связью, энергонезависимые запоминающие устройства и т.д. [1]. Уменьшение размеров элементной базы позволяет снизить потребляемую мощность и повысить быстродействие полупроводниковых приборов. В то же время размеры элементов приближаются к величинам, при которых становятся заметными квантовые эффекты.

В связи с этим большой интерес представляет исследование процессов перераспределения заряда на гетерогранице Si-SiO₂ и регистрация их в нанометровом масштабе. При работе в сверхвысоком вакууме со специально очищенной поверхностью реализуется случай прямого туннелирования на незанятые состояния, и изображение, полученное методом сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) наилучшим образом соответствует морфологии поверхности.

Уже в первых работах по СТМ-исследованию кремния на воздухе было отмечено, что наличие окисла на поверхности кремния сильно затрудняет измерение и поддержание туннельного тока [2], что заставляет использовать различные методы травления и пассивации поверхности кремния [3–5]. В любом случае необходимым этапом является удаление слоя SiO₂, в результате чего можно получить информацию только о геометрических параметрах исследуемой поверхности. В работе [6] показана необходимость учитывать вклад в туннельный ток от локализованных состояний, обусловленных примесями, дефектами или наличием адсорбата в туннельном микроконтакте.

В работе [7] экспериментально исследовано электрополевое индуцирование туннельно-токового контраста на поверхности кремния с тонкими слоями оксида. Используемая методика (режим постоянной высоты) требует очень высокого качества поверхности, что ограничивает возможности метода небольшими участками с неровностями не выше атомарных.

В связи с этим была поставлена задача исследования нанометровые слои двуокиси кремния на поверхности кремния методом атомно-силовой микроскопии с электропроводящим зондом. Эта методика позволяет производить одновременное картографирование морфологии поверхности и регистрацию электрических неоднородностей в пленке SiO₂.

Объекты и методы

Для эксперимента были использованы пластины монокристаллического кремния *p*-типа, предназначенные для изготовления интегральных схем. Поверхность кремния, полированная в ходе технологического процесса, дополнительной обработке не подвергалась. Известно, что в этом случае на

поверхности присутствует естественный (нативный) слой двуокиси кремния толщиной порядка нескольких нанометров. Говоря в дальнейшем о поверхности кремния, мы будем иметь в виду именно эту ситуацию. Для создания дефектных областей поверхность деформировалась методом скрайбирования стальной иглой.

Режимы исследования электрических характеристик реализованы в виде комплекса дополнительных аппаратных и программных средств, подсоединённых к базовым системам сканирующего мультимикроскопа СММ-2000 с незначительным изменением этих базовых систем. В результате одновременно со снимаемой картой рельефа становится возможным снятие поточечно соответствующих этой карте рельефа дополнительных карт, несущих информацию о электрической проводимости (сопротивлении) или о электрических потенциалах, с локальностью снятия этих карт вплоть до единиц ангстрем.

Для формирования сигналов локальной электрической проводимости и локальных электрических потенциалов рельеф образца снимается в режиме атомно - силовой микроскопии (АСМ), в котором для снятия рельефа нет необходимости в приложении напряжения и в прохождении тока между зондом (кантилевером) и образцом. Изгиб кантилевера, огибающего рельеф при сканировании образца, регистрируется независимой лазерной системой. Кантилевер устанавливается на АСМ - столик микроскопа СММ-2000, который имеет электрическую развязку в виде поликорковых пластинок в ножках, на которых он стоит. На образец базовой системой микроскопа подаётся туннельное напряжение $U(mV)$, которое управляется из контрольной панели СТМ - режима в диапазоне от $-5B$ до $+5B$ с точностью до $1 мВ$.

При переходе в режим АСМ с помощью переключения кнопок «Mode» в режим «F» на образце остаётся то же туннельное напряжение $U(mV)$, которое было установлено из контрольной панели СТМ - режима. Чтобы использовать возможность независимой установки значения напряжения на образце $U(mV)$ вне зависимости $F_0(nN)$ в режиме АСМ в микроскопе СММ-2000 с режимом исследования электрических характеристик отключено регулирование силы давления кантилевера на образец параметром

$F_0(nN)$, и этот параметр $F_0(nN)$ аппаратно настроен на величину 10, которую надо установить и в контрольной панели. Регулирование силы давления кантилевера на образец можно продолжать осуществлять предварительной установкой параметра $F(nN)$ до приближения кантилевера к образцу, а также выбором более или менее жёсткого кантилевера. При этом после успешного приближения параметр $F(nN)$ всегда будет принимать значения около 300, что соответствует настройке $F_0(nN)=10$ [8].

Результаты измерений

На первом этапе работы были получены изображения поверхности, снятые одновременно в режиме АСМ (поддержание постоянной силы) и в режиме регистрации тока, протекающего в месте контакта проводящего кантилевера с образцом. Было установлено, что естественный слой окисла является хорошим диэлектриком, какие-либо токовые особенности на полученных изображения отсутствовали.

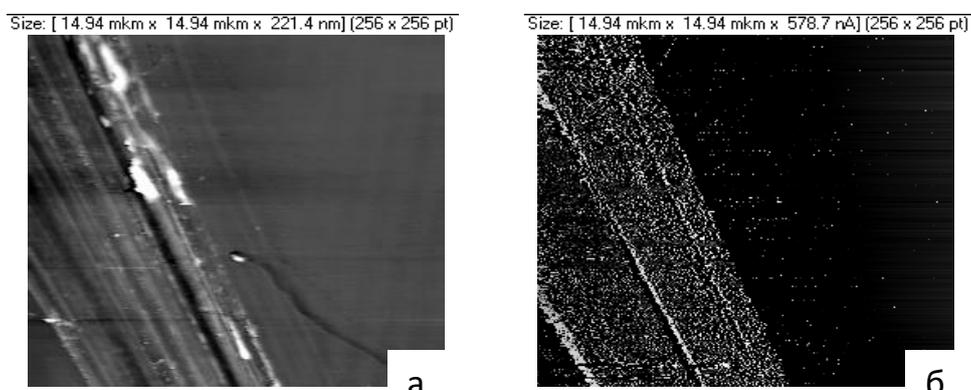


Рис. 1. Изображение поверхности образца с нанесенной царапиной в режиме регистрации морфологии поверхности а) и в токовом режиме б).

Для искусственного создания электропроводящих участков в слое двуокиси кремния использовалась методика скрайбирования (царапания) этого слоя стальной иглой

На рис. 1 представлено изображение поверхности образца с нанесенной царапиной в режиме регистрации морфологии поверхности а) и в токовом режиме б). Видно, что в токовом режиме изображение формируется из отдельных ярких точек, интенсивность которых зависит от величины тока. Интересным представляется тот факт, что места протекания тока наблюдаются также на некотором расстоянии от царапины. На рис. 2 представлено увеличенное изображение участка поверхности вблизи царапины. Методы обработки изображения позволяют определить параметры объектов на изображении (рис.2, б). Вид профиля свидетельствует о том, что ток, протекающей в анализируемой точке образца, составляет 130нА , а линейные размеры порядка нескольких нанометров.

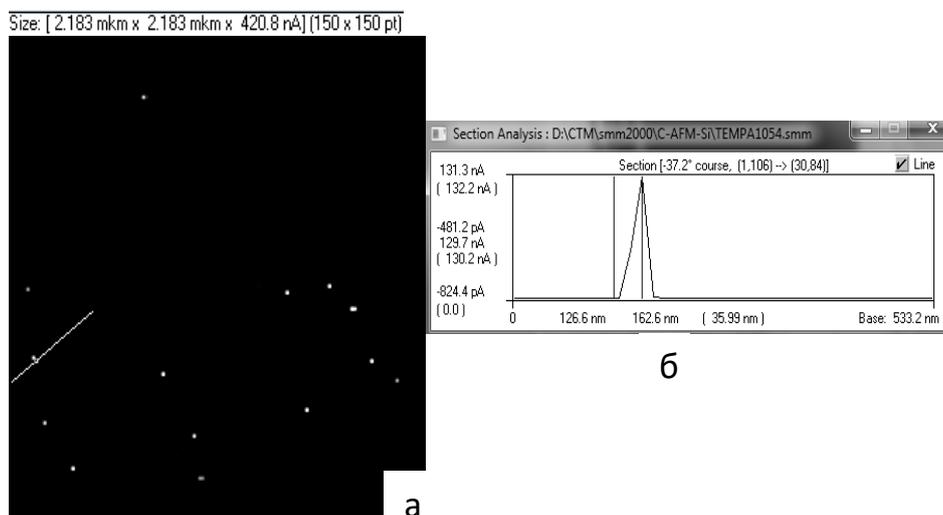


Рис. 2. Увеличенное изображение участка поверхности вблизи царапины, токовое изображение а), распределение тока вдоль измерительной линии, проведенной через яркую точку б).

Обсуждение результатов.

Установлено, что естественный слой двуокиси кремния на поверхности кремния изначально обладает хорошими диэлектрическими свойствами. При деформации этого слоя образуется большое количество дефектов, которые и служат местами протекания тока. Наиболее плотно дефекты сконцентрированы в области прямого механического воздействия, в то же время некоторое количество дефектов генерируется на расстоянии в несколько микрон от места царапины. Следует отметить, что аналогичное распределение дефектов наблюдалось в работе [9].

Таким образом, использование атомно-силового микроскопа с проводящим зондом позволяет одновременно исследовать топографические и электрические особенности поверхности в нанометровом масштабе. Можно прогнозировать использование таких методик для целенаправленного создания электропроводящих дефектов в двуокиси кремния с последующим наблюдением и исследованием таких объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – Т.1,2.
2. Бухараев, А.А. Назаров, А.В. Петухов, В.Ю. Салихов, К.М. Письма в ЖТФ, 16, 8 (1990).
3. Хайкин, М.С. Трояновский, А.М. Эдельман В.С. и др. Письма в ЖЭТФ, 44, 193 (1988).
4. Levenets, V.V. Beklemishev, V.I. Kirilenko, E.P. et al. Jpn. J. Appl. Phys. 34, 1723 (1995).
5. Вялых, Д.В. Федосеенко, С.И. ФТП, 33, 708 (1999).
6. Арсеев, П.И. Маслова, Н.С. ЖЭТФ, 102, 1056 (1992).
7. Юхневич, А.В. Лосик, О.П. Кузнецов, В.Л. Паненко, А.В. Поверхность, 8, 95 (2001).
8. Сканирующий мультимикроскоп СММ-2000Т (ЗАО «КПД», Технопарк МИЭТ, Зеленоград, Москва, 1997).
9. Корнилов, В.М. Лачинов, А.Н. Логинов, Б.А. Беспалов, В.А. ФТП, 43, 850 (2009).

УДК 517.925.51+531.8

ОБ АСИМПТОТИЧЕСКОМ ПОВЕДЕНИИ РЕШЕНИЙ ОДНОЙ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА.

© А. Р. Сагитова^{1*}, А. А. Кадырбердина²

¹Башкирский государственный университет

Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

²Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы

Россия, Республика Башкортостан, 450000 г. Уфа, ул. Октябрьской революции, 3а.

Тел.: +7 (917) 344 17 77.

*Email: mohlesnoy@yandex.ru

В [1] доказана теорема об асимптотическом поведении фундаментальной системы решений для системы вида

$$\frac{dz}{dt} = (A + \varphi(t) + B(t))z,$$

где A – постоянная матрица с простыми собственными значениями, причем собственные значения $\lambda_i(t)$ матрицы $A + \varphi(t)$ имеют различные вещественные части, $\varphi \rightarrow 0$, при $t \rightarrow \infty$, а $\int_x^\infty \|d\varphi/dt\|dt < \infty$. Кроме того в ней накладывается весьма жесткое условие $\int_x^\infty \|B(t)\|dt < \infty$ на элементы матрицы $B(t)$.

В представленной работе доказана теорема об асимптотическом поведении фундаментальной системы решений системы

$$\frac{dz}{dt} = (A + Bf(t))z,$$

где $z = (z_1, z_2)^T$, B – постоянная матрица, A – матрица с различными вещественными собственными значениями, а $f(t)$ имеет суммируемую на бесконечности первообразную $\varphi(t) = \int_t^\infty f(\tau)d\tau < \infty$.

Ключевые слова: асимптотическое поведение решений систем дифференциальных уравнений.

Необходимость исследовать устойчивость систем в механике первоначально возникла при изучении равновесных положений систем. После чего потребовалась общая постановка задачи об устойчивости не только равновесия, но и движения.

Исследование критериев устойчивости движения многих механических систем часто сводится к анализу асимптотического поведения и устойчивости решений линейных дифференциальных уравнений. Рассматриваемые в работе уравнения представляют собой не только математический интерес, но и возникают в классической механике, электродинамике, теории колебаний [2].

В [1] доказана следующая теорема.

Теорема 1. Пусть

$$\frac{dy}{dt} = (A + \varphi(t) + B(t))y, \quad (1)$$

а) A – постоянная матрица с простыми собственными значениями;

б) $\varphi \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$, а $\int_x^\infty \|d\varphi/dt\|dt < \infty$;

в) $\int_x^\infty \|B(t)\|dt < \infty$;

г) собственные значения $\lambda_i(t)$ матрицы $A + \varphi(t)$ имеют различные вещественные части.

Тогда существует n независимых решений $z^{(k)}(t)$ ($1 \leq k \leq n$) уравнения (1) таких, что при $t \rightarrow \infty$

$$z^{(k)}(t) = \left(\exp \int_{t_1}^t \lambda_k(t_1) dt_1 \right) (c_k + o(1)),$$

где c_k – постоянный не нулевой вектор.

Условие (в) является весьма жестким и, по сути, означает, что элементы матрицы $B(t)$ являются убывающими функциями. В частности, условие (в)

означает, что в качестве элемента матрицы $B(t)$ нельзя брать функции вида $\sin e^t$. Мы докажем следующую теорему.

Теорема 2. Пусть

$$\frac{dz}{dt} = (A + Bf(t))z, \quad (2)$$

$z = \text{colon}(z_1, z_2)$, B – постоянная матрица, A – матрица с различными простыми вещественными собственными значениями, а первообразная функции $f(t)$, $\varphi(t) = \int_t^\infty f(\tau)$ – суммируема на бесконечности, тогда справедливы асимптотические формулы предыдущей теоремы.

Перейдем к доказательству теоремы 2. Известно, что существует невырожденная матрица T , которая приводит матрицу A к диагональному виду. Положим в системе (2) $z = Ty$, где y – новая неизвестная вектор-функция. Из этих преобразований следует $Ty' = ATy + BTf(t)y$. Умножая на T^{-1} , получим, что

$$y' = T^{-1}ATy + T^{-1}BTf(t)y = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} y + f(t) \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix} y,$$

где $\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}$ – диагональная матрица, $C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix}$ – постоянная матрица.

С помощью замены $y = e^{\Lambda t}u$ получим систему дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{du_1}{dt} = (c_{11}u_1 + c_{12}u_2)f(x) \\ \frac{du_2}{dt} = (\lambda_2 - \lambda_1)u_2 + (c_{21}u_1 + c_{22}u_2)f(x) \end{cases} \quad (3)$$

Эта система эквивалентна системе интегральных уравнений

$$\begin{cases} u_1(x) = 1 - \int_x^\infty (c_{11}u_1(t) + c_{12}u_2(t))f(t)dt \\ u_2(x) = - \int_x^\infty e^{-(\lambda_2-\lambda_1)(t-x)}(c_{21}u_1(t) + c_{22}u_2(t))f(t)dt \end{cases} \quad (4)$$

Используем метод последовательных приближений. Суть этого метода состоит в том, что сходимость рядов $u_1^0 + (u_1^1 - u_1^0) + (u_1^2 - u_1^1) + \dots$, $u_2^0 + (u_2^1 - u_2^0) + (u_2^2 - u_2^1) + \dots$ равносильна сходимости последовательностей $u_1^{(n)}$, $u_2^{(n)}$. Положим, что $u_1^0 = 1$, $u_2^0 = 0$.

Применяя интегрирование по частям, получаем

$$\begin{aligned} u_1(x) &= 1 - \int_x^\infty (c_{11}u_1(t) + c_{12}u_2(t))f(t)dt = \\ &= \left| \begin{array}{l} u = c_{11}u_1(t) + c_{12}u_2(t) \\ du = (c_{11}u_1'(t) + c_{12}u_2'(t))dt \\ dv = f(t)dt \\ v = \varphi(t) \end{array} \right| = \\ &= 1 + (c_{11}u_1(x) + c_{12}u_2(x))\varphi(x) + \\ &+ \int_x^\infty \varphi(t)(c_{11}u_1'(t) + c_{12}u_2'(t))dt \\ u_2(x) &= - \int_x^\infty e^{(\lambda_2-\lambda_1)(x-t)}(c_{21}u_2(t) + c_{22}u_2(t))f(t)dt = \\ &= \left| \begin{array}{l} u = e^{(\lambda_2-\lambda_1)(x-t)}(c_{21}u_1(t) + c_{22}u_2(t)) \\ dv = e^{(\lambda_2-\lambda_1)(x-t)} \left[-(\lambda_2 - \lambda_1)(c_{21}u_1(t) + c_{22}u_2(t)) + \right. \\ \left. + (c_{21}u_1'(t) + c_{22}u_2'(t)) \right] dt \\ dv = f(t)dt \\ v = \varphi(t) \end{array} \right| = \\ &= (c_{21}u_1 + c_{22}u_2)\varphi(x) + \\ &+ \int_x^\infty \varphi(t)e^{(\lambda_2-\lambda_1)(x-t)} [-(\lambda_2 - \lambda_1)(c_{21}u_1(t) + c_{22}u_2(t)) + \\ &+ (c_{21}u_1'(t) + c_{22}u_2'(t))] dt \end{aligned}$$

На первом шаге найдем u_1^1 .

$$\begin{aligned} u_1^1 &= 1 + (c_{11}u_1^0(x) + c_{12}u_2^0(x))\varphi(x) + \\ &+ \int_x^\infty \varphi(t)(c_{11}u_1^{0'} + c_{12}u_2^{0'})dt = 1 + c_{11}\varphi(x) \end{aligned}$$

Получаем $|u_1^1(x) - u_1^0(x)| \leq c_{11}\varphi^\varepsilon\varphi^{(1-\varepsilon)}$.

На втором шаге найдем $u_2^1(x)$.

$$\begin{aligned} u_2^1(x) &= 1 + (c_{11}u_1^1(x) + c_{12}u_2^1(x))\varphi(x) + \\ &+ \int_x^\infty \varphi(t)(c_{11}u_1^{1'}(t) + c_{12}u_2^{1'}(t))dt = \\ &= 1 + c_{11}\varphi + c_{11}^2\varphi^2 + c_{12}c_{21}\varphi^2 - c_{12}c_{21}(\lambda_2 - \lambda_1) \\ &\varphi(x) \int_x^\infty \varphi(t)e^{(\lambda_2-\lambda_1)(x-t)}dt + \\ &+ c_{12}c_{21} \int_x^\infty \varphi(t)f(t) + c_{11}^2 \int_x^\infty \varphi(t)f(t)dt \end{aligned}$$

Отсюда

$$|u_2^1(x) - u_1^1(x)| \leq 2c_{11}^2\varphi^{2\varepsilon}\varphi^{2(1-\varepsilon)} + 3c_{12}c_{21}\varphi^{2\varepsilon}\varphi^{2(1-\varepsilon)}.$$

По индукции аналогичная оценка устанавливается для $u_1^{(n)}$ приближения.

Далее рассмотрим $u_2^1(x)$. На первом шаге получим

$$u_2^1(x) = (c_{21}u_1^0(x) + c_{22}u_2^0(x))\varphi(x) +$$

$$\begin{aligned} &+ \int_x^\infty [-(\lambda_2 - \lambda_1)(c_{21}u_1^0 + c_{22}u_2^0)dx + \\ &+ (c_{21}u_1^{0'} + c_{22}u_2^{0'})\varphi(t)e^{(\lambda_2-\lambda_1)(x-t)}] = \\ &= c_{21}\varphi - c_{21}(\lambda_2 - \lambda_1) \int_x^\infty \varphi e^{(\lambda_2-\lambda_1)(x-t)} dt \end{aligned}$$

Получаем $|u_2^1(x) - u_1^1(x)| \leq 2c_{21}\varphi^\varepsilon\varphi^{(1-\varepsilon)}$.

На втором шаге получаем $u_2^2(x)$.

$$\begin{aligned} u_2^2(x) &= (c_{21}u_1^1(x) + c_{22}u_2^1(x))\varphi(x) + \\ &+ \int_x^\infty [(c_{21}u_1^{1'}(t) + c_{22}u_2^{1'}(t)) - \\ &- (\lambda_2 - \lambda_1)(c_{21}u_1^1(t) + c_{22}u_2^1(t)) \\ &\varphi(t)e^{(\lambda_2-\lambda_1)(x-t)}] dt = \\ &= c_{21}(\varphi(x) + c_{11}^2\varphi(x)) + \\ &+ c_{21}\varphi(x) \left(\int_x^\infty \varphi(t)e^{(\lambda_2-\lambda_1)(x-t)} dt \right) + \\ &+ \int_x^\infty [c_{11}c_{21}f(t) \\ &+ c_{21}c_{22}f(t) - (\lambda_2 - \lambda_1)(c_{21} + c_{21}\varphi(t)(c_{11} + c_{22}) - \\ &- c_{21}c_{22}(\lambda_2 - \lambda_1) \int_t^\infty \varphi(\tau)e^{(\lambda_2-\lambda_1)(t-\tau)}d\tau) \varphi(t)e^{(\lambda_2-\lambda_1)(x-t)}] dt \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} |u_2^2 - u_2^1| &\leq 3c_{11}c_{21}\varphi^{2\varepsilon}\varphi^{2(1-\varepsilon)} + \\ &+ 5c_{21}c_{22}\varphi^{2\varepsilon}\varphi^{2(1-\varepsilon)} \end{aligned}$$

По индукции аналогичная оценка устанавливается для n -ого приближения.

Таким образом, ряды мажорируются сходящейся геометрической прогрессией. Поэтому все ряды сходятся равномерно на интервале (x_0, ∞) . Тогда согласно лемме 1 из [2] наша система (3) имеет два решения $z_1(t)$ и $z_2(t)$, такие, что $\lim_{x \rightarrow \infty} u_1(x) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ и $\lim_{x \rightarrow \infty} u_2(x) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$. Возвращаясь к вектору $z(t)$, получаем, что для него справедливы асимптотические формулы

$$z^{(k)}(t) = e^{\int_{t_1}^t \lambda_k(t_1)dt_1} (c_k + o(1)),$$

где c_k – постоянный ненулевой вектор. Отсюда, в частности, следует, что если λ_1 и λ_2 отрицательны, то ненулевое решение системы (2) асимптотически устойчиво по Ляпунову.

Замечание. Все сказанное справедливо и в случае, когда собственные значения являются комплексными с отрицательными вещественными частями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беллман Р. Э. Теория устойчивости решений дифференциальных уравнений. М: изд-во иностранной литературы. 1954. С. 196.

2. Меркин Д. Р. Введение в теорию устойчивости движения. М.: Наука. 1987. С. 304.
3. Наймарк М. А. Линейные дифференциальные операторы. М.: Наука. 1969. С. 476.
4. Назирова Э. А., Сагитова А. Р., Кадырбердина А. А. Об асимптотической устойчивости по Ляпунову одной системы дифференциальных уравнений // Вестник Башкирского университета. 2017. Т. 22. №3. С. 632–634.
5. Сагитова А. Р., Кадырбердина А. А. Об устойчивости линейных систем дифференциальных уравнений с быстро осциллирующей матрицей // Спектральная теория и смежные вопросы. Сб. тезисов междунар. конф. Уфа. 2018. С. 137–138.
6. Федорюк М. В. Обыкновенные дифференциальные уравнения // 3-е изд. СПб.: Лань. 2003. С. 448.
7. Федорюк М. В. Асимптотические методы для линейных обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Наука. 1983. С. 354.
8. Костюченко А. Г., Саргсян И. С. Распределение собственных значений (самосопряженные обыкновенные дифференциальные операторы). М.: Наука. 1979. С. 400.
9. Валеев Н. Ф., Назирова Э. А., Султанаев Я. Т. О новом подходе к изучению асимптотического поведения решений сингулярных дифференциальных уравнений // Уфимск. матем. журн., 2015. Т. 7. №3. С. 9–15.
10. Муртазин Х. Х., Султанаев Я. Т. К формулам распределения собственных чисел неполуограниченного оператора Штурма-Лиувилля // Математические заметки. 1980. Т. 28:4. С. 545–553.
11. N. F. Vfliev, Ya. T. Sultanaev On the deficiency indices of a singular Sturm-Liouville operator with a rapidly oscillating perturbation // Doklady Mathematics. 2000. V. 62. №2. P. 271–273.
12. Валеев Н. Ф., Назирова Э. А., Султанаев Я. Т. О распределении собственных значений сингулярных дифференциальных операторов в пространстве вектор-функций // Тр. ММО. 2014. Вып. 2. С. 107–123.
13. Myakinova O. V., Nazirova E. A., Valeyeva L. R. On asymptotic behavior of solutions of the first-order differential equations with a strongly oscillating coefficient // Vestnik Bashkirskogo universiteta. Vol. 21. 2016. No. 3. Pp. 549–550.
14. Макина Н. К., Назирова Э. А., Султанаев Я. Т. О методах исследования асимптотического поведения сингулярных дифференциальных уравнений // Математические заметки. 2014. Т. 96. С. 627–632.
15. Султанаев Я. Т. Об асимптотике спектра дифференциального оператора в пространстве вектор-функций // Диф. Уравнения. 1974. Т. 10. №9. С. 1673–1683.
16. Исмагилов Р. С. Об асимптотике спектра дифференциального оператора в пространстве вектор-функций. // Математические заметки. 1971. Т. 9. №6. С. 66–675.
17. Султанаев Я. Т., Сагитова А. Р. Сингулярные дифференциальные уравнения // Фундамент. пробл. мат. и мех. Мат. Ч. 1, МГУ. М. 1994. С. 189–191.
18. Levinson N. The asymptotic behavior of a system of linear differential equations. // Amer. Journ. Math. 68. 1946. P. 1–6.
19. Cronwall T. H. Note on the derivatives with respect to a parameter of the solutions of a systems of differential equations // Ann. of Math. 20. 1918. P. 292296.
20. Хартман Ф. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Мир. 1970. С. 720.

Поступила в редакцию 19.05.2019 г.

**ON THE ASYMPTOTIC BEHAVIOUR OF SOLUTIONS
OF A SYSTEM OF SECOND ORDER DIFFERENTIAL EQUATIONS**

© A. R. Sagitova^{1*}, A. A. Kadirberdina²

¹*Bashkir State University
32 Zaki Validi Street, 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

²*M. Akmulla Bashkir State Pedagogical University
3a Oktyabrskoi Revolutsii Street, 450008 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

Phone: +7 (917) 344 17 77.

*Email: mohlesnoy@yandex.ru

The need to study the stability of systems in mechanics arose for the first time while studying the equilibrium positions of a system. After which a general formulation of the problem of motion stability was required. The study of the stability criteria of many mechanical systems' motion often comes down to analysis of asymptotic behavior and stability of linear differential equations' solutions. The equations considered in the paper are not only of mathematical interest, but also arise in classical mechanics, electrodynamics, and oscillation theories. Levinson's method of reducing systems to the L-diagonal form is widely known. Levinson studied systems of the form $Y' = WY + CY$, where W is a diagonal matrix and C is a matrix with summable coefficients. This method is the basis of many studies of the asymptotic behavior of solutions of singular high order differential equations. Yet for systems considered in this article, Levinson's method is not applicable. Bellman proved the theorem on asymptotic behavior of the fundamental system of solutions of the system

$$\frac{dz}{dt} = (A + \varphi(t) + B(t))z.$$

Here A is a constant matrix with simple eigenvalues. The eigenvalues $\lambda_i(t)$ of the matrix $A + \varphi(t)$ have different real parts. $\varphi \rightarrow 0$, when $t \rightarrow \infty$. $\int_x^\infty \|d\varphi/dt\| dt < \infty$. Moreover, a rather strong descending condition $\int_x^\infty \|B(t)\| < \infty$ is imposed on elements of matrix $B(t)$, which, in fact, means that the elements of matrix $B(t)$ are decreasing functions. This implies in particular that sine^t -type functions cannot be taken as elements of matrix $B(t)$. In the presented work, the authors proved the theorem on asymptotic behavior of solutions of the fundamental system

$$\frac{dz}{dt} = (A + Bf(t))z,$$

where $z = (z_1, z_2)^T$, B – is a constant matrix, A – is a matrix with various real eigenvalues, and $f(t)$ has a summable at infinity primitive $\varphi(t) = \int_t^\infty f(\tau) d\tau < \infty$. The latter makes it possible to expand the scope of the theorem in comparison with the previous cases. From the obtained asymptotic formulas, it follows in particular that if the eigenvalues are negative, then the non-zero solution of the system is Lyapunov asymptotically stable. The obtained result can be widely used to study systems of differential equations in the case of complex eigenvalues with negative real parts.

Keywords: asymptotic behavior, solutions, system, differential equations.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Bellman R. E. Teoriya ustoichivosti reshenii differentsial'nykh uravnenii [The theory of stability of solutions of differential equations]. M: izd-vo inostrannoi literatury. 1954. Pp. 196.
2. Merkin D. R. Vvedenie v teoriyu ustoichivosti dvizheniya [Introduction to the theory of motion stability]. M: Nauka. 1987. Pp. 304.
3. Naimark M. A. Lineinye differentsial'nye operatory [Linear differential operators]. Moscow: Nauka. 1969. Pp. 476.
4. Nazirova E. A., Sagitova A. R., Kadyrberdina A. A. Vestnik Bashkirskogo universiteta. 2017. Vol. 22. No. 3. Pp. 632–634.
5. Sagitova A. R., Kadyrberdina A. A. Spektral'naya teoriya i smezhnye voprosy. Sb. tezisov mezhdunar. konf. Ufa. 2018. Pp. 137–138.
6. Fedoryuk M. V. 3 ed. Saint Petersburg: Lan'. 2003. Pp. 448.

7. Fedoryuk M. V. Asimptoticheskie metody dlya lineinykh obyknovennykh differentsial'nykh uravnenii [Asymptotic methods for linear ordinary differential equations]. Moscow: Nauka. 1983. Pp. 354.
8. Kostyuchenko A. G., Sargsyan I. S. Raspredelenie sobstvennykh znachenii (samosopryazhennye obyknovennye differentsial'nye operatory) [Distribution of eigenvalues (self-adjoint ordinary differential operators)]. Moscow: Nauka. 1979. Pp. 400.
9. Valeev N. F., Nazirova E. A., Sultanaev Ya. T. Ufimsk. matem. zhurn., 2015. Vol. 7. No. 3. Pp. 9–15.
10. Murtazin Kh. Kh., Sultanaev Ya. T. Matematicheskie zametki. 1980. Vol. 28:4. Pp. 545–553.
11. N. F. Vfleev, Ya. T. Doklady Mathematics. 2000. Vol. 62. No. 2. Pp. 271–273.
12. Valeev N. F., Nazirova E. A., Sultanaev Ya. T. Tr. MMO. 2014. No. 2. Pp. 107–123.
13. Myakinova O. V., Nazirova E. A., Valeyeva L. R. Vestnik Bashkirskogo universiteta. Vol. 21. 2016. No. 3. Pp. 549–550.
14. Makina N. K., Nazirova E. A., Sultanaev Ya. T. Matematicheskie zametki. 2014. Vol. 96. Pp. 627–632.
15. Sultanaev Ya. T. Dif. Uravneniya. 1974. Vol. 10. No. 9. Pp. 1673–1683.
16. Ismagilov R. S. Matematicheskie zametki. 1971. Vol. 9. No. 6. Pp. 66–675.
17. Sultanaev Ya. T., Sagitova A. R. Fundam. probl. mat. i mekh. Mat. Pt. 1, MGU. M. 1994. Pp. 189–191.
18. Levinson N. Amer. Journ. Math. 68. 1946. Pp. 1–6.
19. Cronwall T. H. Ann. of Math. 20. 1918. Pp. 292–296.
20. Hartman P. Obyknovennye differentsial'nye uravneniya [Ordinary differential equation]. Moscow: Mir. 1970. Pp. 720.

Received 19.05.2019.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
ПРИВОЛЖСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ С ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ ЦЕНТРОМ УФИЦ РАН
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ ИМ. Р.Р. МАВЛЮТОВА УФИЦ РАН
ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЧЕЛЯБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. М. АКМУЛЛЫ**

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА
И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В ЕСТЕСТВОЗНАНИИ:
спутник Международной научной конференции
«Уфимская осенняя математическая школа-2020»**

**Тезисы докладов
XI Международной школы-конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых**

**11 – 14 ноября 2020 г.
г. Уфа**

**НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «АЭТЕРНА»
УФА - 2020**

УДК 51+53
ББК 22.1+22.3
Ф94

*Сборник издан за счёт финансовых средств
Научно-образовательного математического центра
Приволжского федерального округа,
дополнительное соглашение № 075-02-2020-1421/1
к соглашению № 075-02-2020-1421*

Редакционная коллегия:

д-р физ.-мат. наук, профессор **Б.Н. Хабибуллин** (отв. за выпуск);
д-р физ.-мат. наук, профессор **Е.Г. Екомасов** (отв. редактор);
канд. физ.-мат. наук, доцент **Л.А. Габдрахманова** (отв. редактор)
д-р физ.-мат. наук, профессор **О.А. Кривошеева**;
канд. физ.-мат. наук, доцент **Ф.К. Закирьянов**;
аспирант ФМИИТ БашГУ **А.С. Белова**

Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании:
Ф94 тезисы докладов XI Международной школы-конференции студентов,
аспирантов и молодых ученых (г. Уфа, 11 – 14 ноября 2020 г.) / отв.
ред. Е.Г. Екомасов, Л.А. Габдрахманова. – Уфа: НИЦ «АЭТЕРНА»,
2020. – 255 с.

ISBN 978-5-00177-062-6

В сборник помещены тезисы докладов участников XI Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании»: спутник Международной научной конференции «Уфимская осенняя математическая школа-2020».

Тезисы докладов воспроизводятся с представленных авторами оригиналов.

УДК 51+53
ББК 22.1+22.3

ISBN 978-5-00177-062-6

© БашГУ, 2020
© НИЦ «АЭТЕРНА», 2020
© Коллектив авторов, 2020

УДК 538.97

ЭЛЕКТРОННОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА

Карнаух А.Ю., Байбулова Г.Ш., Алтыншина Г.Р.
Башкирский государственный педагогический университет
им. М. Акмуллы, г. Уфа, Россия

Общим свойством всех материалов органической электроники является повышенная чувствительность их свойств к условиям внешней среды. Одним из факторов, влияющим на электропроводность полимерных материалов, является атмосферный кислород, который наряду с другими газами может влиять на электронные свойства полимеров [1-2].

В работе [3] был проведен анализ экспериментальных результатов и теоретических расчетов органических соединений, нашедших применение в электронике, с целью систематизации данных о природе ловушечных состояний в органических материалах. В связи с этим целью настоящей работы является исследование влияния кислорода на электропроводящие свойства полиметилметакрилата (ПММА).

Экспериментальные исследования влияния химического состава газов на электропроводность полимерных пленок показали, что с увеличением концентрации содержания кислорода проводимость уменьшается (рис.1).

В работе были смоделированы и проанализированы фрагменты ПММА с кислородом. Квантово-химические расчеты модельных систем проводились полуэмпирическим методом в параметризации AM1 и методом теории функционала плотности (DFT) в приближении B3LYP/6-31+G(d).

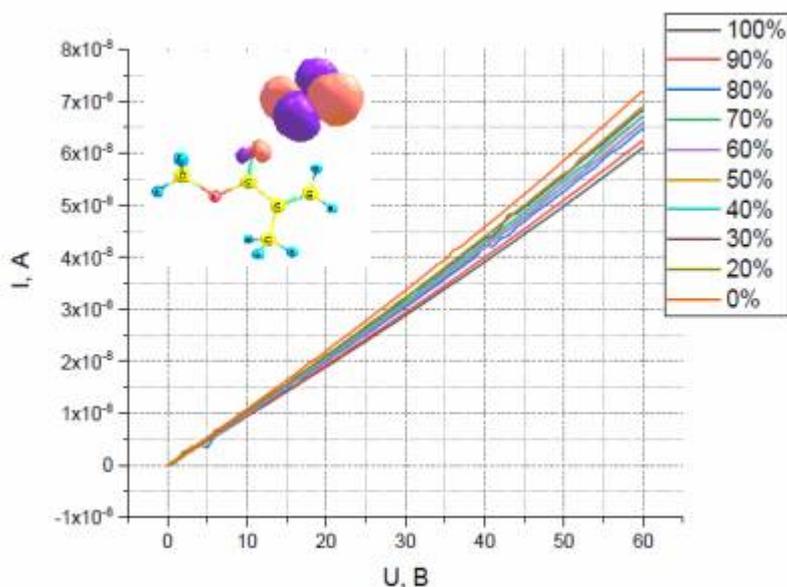


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика 5% ПММА в зависимости от содержания кислорода в камере и распределение электронной плотности комплекса MMA+O₂

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
ПРИВОЛЖСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ С ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ ЦЕНТРОМ УФИЦ РАН
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ ИМ. Р.Р. МАВЛЮТОВА УФИЦ РАН
ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЧЕЛЯБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. М. АКМУЛЛЫ**

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА
И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В ЕСТЕСТВОЗНАНИИ:
спутник Международной научной конференции
«Уфимская осенняя математическая школа-2020»**

**Тезисы докладов
XI Международной школы-конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых**

**11 – 14 ноября 2020 г.
г. Уфа**

**НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «АЭТЕРНА»
УФА - 2020**

УДК 51+53
ББК 22.1+22.3
Ф94

*Сборник издан за счёт финансовых средств
Научно-образовательного математического центра
Приволжского федерального округа,
дополнительное соглашение № 075-02-2020-1421/1
к соглашению № 075-02-2020-1421*

Редакционная коллегия:

д-р физ.-мат. наук, профессор **Б.Н. Хабибуллин** (отв. за выпуск);
д-р физ.-мат. наук, профессор **Е.Г. Екомасов** (отв. редактор);
канд. физ.-мат. наук, доцент **Л.А. Габдрахманова** (отв. редактор)
д-р физ.-мат. наук, профессор **О.А. Кривошеева**;
канд. физ.-мат. наук, доцент **Ф.К. Закирьянов**;
аспирант ФМИИТ БашГУ **А.С. Белова**

Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании:
Ф94 тезисы докладов XI Международной школы-конференции студентов,
аспирантов и молодых ученых (г. Уфа, 11 – 14 ноября 2020 г.) / отв.
ред. Е.Г. Екомасов, Л.А. Габдрахманова. – Уфа: НИЦ «АЭТЕРНА»,
2020. – 255 с.

ISBN 978-5-00177-062-6

В сборник помещены тезисы докладов участников XI Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании»: спутник Международной научной конференции «Уфимская осенняя математическая школа-2020».

Тезисы докладов воспроизводятся с представленных авторами оригиналов.

УДК 51+53
ББК 22.1+22.3

ISBN 978-5-00177-062-6

© БашГУ, 2020
© НИЦ «АЭТЕРНА», 2020
© Коллектив авторов, 2020

УДК 538.971

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЭФФЕКТА

Ладин П.А., Киан М.Ф., Лачинов А.Н.

Башкирский государственный педагогический университет
им. М. Акмуллы

В работе [1] был обнаружен дистанционный эффект при исследовании проводимости структуры металл/полимер/металл (МППМ) вблизи фазового перехода в одном из металлов. Этот эффект объяснялся перераспределением контактных потенциалов при изменении эффективной работы одного из электродов вследствие фазового перехода в нем. При условии справедливости предложенного объяснения существует большое количество вариаций реализации дистанционного эффекта, например, за счет выбора схем подключения металла с изменяемой работой выхода электрона. В связи с этим в настоящей работе было проведено исследование влияния условий контактирования тестируемого металла с гетероструктурой МППМ на электронные характеристики последней. Предметом исследования явились такие параметры, как высота потенциального барьера на контакте с полимерной пленкой, концентрация и подвижности носителей заряда полимера. Изменение условий контактирования производили путем изменения схемы соединения массивного металлического образца с одним из электродов МППМ структуры. Металлические образцы выбирались с разной работой выхода электрона. Были использованы две схемы подключения: потенциальная и токовая. В качестве полимерного материала использовали полидифениленфталид. Электроды были медными, которые были изготовлены методом термодиффузионного осаждения в вакууме. Металлические образцы были в форме пластин из Al и Cu, с близкой массой $\sim 29 \pm 1$ г. Основным методом исследования был метод вольтамперных характеристик (ВАХ).

На рис. 1 представлено типичное поведение ВАХ структуры МППМ при различных способах подключения дополнительного металлического образца. Полученные ВАХ были интерпретированы в рамках инжекционной модели, которая позволила оценить изменение концентрации и подвижности носителей заряда в полимерной пленке согласно формулам, приведенным ниже.

Формула для расчета подвижности носителей заряда:

$$\mu = J \cdot L^3 / \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U_n^2, \quad (1)$$

где U_n – пороговое напряжение, соответствующее точке перехода, J – плотность тока, L – расстояние между электродами, ε – диэлектрическая проницаемость материала.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
ПРИВОЛЖСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ С ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ ЦЕНТРОМ УФИЦ РАН
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ ИМ. Р.Р. МАВЛЮТОВА УФИЦ РАН
ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЧЕЛЯБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. М. АКМУЛЛЫ**

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА
И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В ЕСТЕСТВОЗНАНИИ:
спутник Международной научной конференции
«Уфимская осенняя математическая школа-2020»**

**Тезисы докладов
XI Международной школы-конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых**

**11 – 14 ноября 2020 г.
г. Уфа**

**НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «АЭТЕРНА»
УФА - 2020**

УДК 51+53
ББК 22.1+22.3
Ф94

*Сборник издан за счёт финансовых средств
Научно-образовательного математического центра
Приволжского федерального округа,
дополнительное соглашение № 075-02-2020-1421/1
к соглашению № 075-02-2020-1421*

Редакционная коллегия:

д-р физ.-мат. наук, профессор **Б.Н. Хабибуллин** (отв. за выпуск);
д-р физ.-мат. наук, профессор **Е.Г. Екомасов** (отв. редактор);
канд. физ.-мат. наук, доцент **Л.А. Габдрахманова** (отв. редактор)
д-р физ.-мат. наук, профессор **О.А. Кривошеева**;
канд. физ.-мат. наук, доцент **Ф.К. Закирьянов**;
аспирант ФМИИТ БашГУ **А.С. Белова**

Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании:
Ф94 тезисы докладов XI Международной школы-конференции студентов,
аспирантов и молодых ученых (г. Уфа, 11 – 14 ноября 2020 г.) / отв.
ред. Е.Г. Екомасов, Л.А. Габдрахманова. – Уфа: НИЦ «АЭТЕРНА»,
2020. – 255 с.

ISBN 978-5-00177-062-6

В сборник помещены тезисы докладов участников XI Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании»: спутник Международной научной конференции «Уфимская осенняя математическая школа-2020».

Тезисы докладов воспроизводятся с представленных авторами оригиналов.

УДК 51+53
ББК 22.1+22.3

ISBN 978-5-00177-062-6

© БашГУ, 2020
© НИЦ «АЭТЕРНА», 2020
© Коллектив авторов, 2020

**РАВНОМЕРНАЯ РЕЗОЛЬВЕНТНАЯ СХОДИМОСТЬ ДЛЯ
ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ОПЕРАТОРОВ В ОБЛАСТЯХ,
ПЕРФОРИРОВАННЫХ ВДОЛЬ ЗАДАННОГО МНОГООБРАЗИЯ**

Борисов Д.И., Мухаметрахимова А.И.

Башкирский государственный педагогический университет
им. М. Акмуллы, г. Уфа, Россия

Пусть $x = (x_1, \dots, x_n)$ – декартовы координаты в \mathbb{R}^n , $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ – область с границей класса C^2 , $S \subset \Omega$ – многообразие без края класса C^2 коразмерности 1, ε – малый положительный параметр, $\eta = \eta(\varepsilon)$ – функция, удовлетворяющая неравенству: $0 < \eta(\varepsilon) \leq 1$, $M^\varepsilon \subseteq \mathbb{N}$ – произвольное множество, M_k^ε , $k \in M^\varepsilon$ – точки, принадлежащие окрестности S и удовлетворяющие условию: $dist(M_k^\varepsilon, S) \leq R_0\varepsilon$, где $R_0 > 0$ – константа, не зависящая от k и ε , $\omega_{k,\eta} \subset \mathbb{R}^n$, $k \in M^\varepsilon$ – ограниченные области с границами класса C^2 . Обозначим: $\omega_k^\varepsilon := \{x: (x - M_k^\varepsilon)\varepsilon^{-1}\eta^{-1} \in \omega_{k,\eta}\}$, $\Omega^\varepsilon := \Omega \setminus \bigcup_{k \in M^\varepsilon} \omega_k^\varepsilon$. Введём множества: $\theta^\varepsilon = \theta_D^\varepsilon \cup \theta_R^\varepsilon$, $\theta_i^\varepsilon = \bigcup_{k \in M_i^\varepsilon} \omega_k^\varepsilon$, $i = D, R$, где $M_D^\varepsilon \cap M_R^\varepsilon = \emptyset$, $M_D^\varepsilon \cup M_R^\varepsilon = M^\varepsilon$. Обозначим через $A_{ij} = A_{ij}(x)$, $A_i = A_i(x)$, $A_0 = A_0(x)$ функции, заданные в Ω и удовлетворяющие условиям: $A_{ij}, A_i \in W_\infty^1(\Omega)$, $A_0 \in L_\infty(\Omega)$, $A_{ij} = A_{ji}$, $i, j = 1, \dots, n$, $\sum_{i,j=1}^n A_{ij}(x) \xi_i \xi_j \geq C_0 |\xi|^2$, $x \in \Omega$, $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_n) \in \mathbb{R}^n$, где $C_0 > 0$ – константа, не зависящая от x и ξ . Пусть $a = a(x, u)$ – функция, удовлетворяющая условиям: $|a(x, u_1) - a(x, u_2)| \leq a_0 |u_1 - u_2|$, $a(x, 0) = 0$, где a_0 – константа, не зависящая от x , u_1 и u_2 . Рассматривается краевая задача:

$$\left(-\sum_{i,j=1}^n \frac{\partial}{\partial x_j} A_{ij} \frac{\partial}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^n A_j \frac{\partial}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{A}_j + A_0 - \lambda \right) u_\varepsilon = f \text{ в } \Omega^\varepsilon, \quad u_\varepsilon = 0 \text{ на } \partial\Omega,$$

$$u_\varepsilon = 0 \text{ на } \partial\theta_D^\varepsilon, \quad \frac{\partial u_\varepsilon}{\partial n} + a(x, u_\varepsilon) = 0 \text{ на } \partial\theta_R^\varepsilon, \quad \frac{\partial}{\partial n} = \sum_{i,j=1}^n A_{ij} \cos(\vartheta, Ox_i) \frac{\partial}{\partial x_j},$$

где $f \in L_2(\Omega)$, λ – вещественное число, $\cos(\vartheta, Ox_i)$ – косинус угла между осью Ox_i и единичной нормалью ϑ к $\partial\theta_R^\varepsilon$, направленной внутрь множества θ_R^ε .

Введем еще одну краевую задачу:

$$\left(-\sum_{i,j=1}^n \frac{\partial}{\partial x_j} A_{ij} \frac{\partial}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^n A_j \frac{\partial}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{A}_j + A_0 - \lambda \right) u_0 = f \text{ в } \Omega, \quad u_0 = 0 \text{ на } \partial\Omega \cup S.$$

Наш основной результат утверждает, что при условии $\frac{\varepsilon}{\eta^{n-2}(\varepsilon)} \rightarrow +0$,

$\varepsilon \rightarrow +0$ и некоторых дополнительных предположениях относительно многообразия S и отверстий ω_k^ε верно неравенство:

$$\|u_\varepsilon - u_0\|_{W_2^1(\Omega^\varepsilon)} \leq C \left(\frac{\varepsilon}{\eta^{n-2}(\varepsilon)} \right)^{\frac{1}{2}} \|f\|_{L_2(\Omega)},$$

где константа C не зависит от ε , η и f .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-11-19995).

© Борисов Д.И., Мухаметрахимова А.И., 2020 г.



Международный образовательный портал «Солнечный Свет»
лицензия на осуществление образовательной деятельности №9757-л
свидетельство о регистрации СМИ №ЭЛ ФС 77-65391

ДИПЛОМ

Награждается

Нагаева Гульнара Фанилевна

ФГБОУ ВО «БГУ им. М. Акмуллы»
г. Уфа

ПОБЕДИТЕЛЬ (1 МЕСТО)

Международной интернет-олимпиады «Солнечный свет»
по математике для студентов
Номер диплома: Д01596127



Космы Ирина
Ирина



[Handwritten signature]

12 ноября 2019 г.
Председатель оргкомитета
Ирина Космынина



ФГОСкласс.рф
Конкурс для педагогов и детей

ДИПЛОМ

Награждается

Нагаева Гульнара Фанилевна

Преподаватель математики
ГБПОУ УКРТБ
Республика Башкортостан,
Г. Уфа

Победитель (I место)

Всероссийский конкурс "ФГОС класс"
Блиц-олимпиада: "Реализация ФГОС на уроках"

Дата участия в конкурсе: 24.09.2019
Номер диплома: FK-62404

Директор учебного центра



Наталья Хаустова
Хаустова Н.А.

Организатор: Учебный центр Натальи Хаустовой.
Лицензия на образовательную деятельность № 909 от 13.08.2014 г., серия 45Л01 № 0000092.

фгоскласс.рф



ДИПЛОМ

Награждается

Нагаева Гульнара Фанилевна

ФГБОУ ВО "БГПУ им. М. Акмуллы"

2 место

В Международной викторине
по математике для студентов

Номер диплома: ДВ71183



Руководитель образовательного
издания



Шахов В.А.
28 ноября 2019 г.

Коминь берина
Шахов

Международный образовательно-просветительский
портал "ФГОС онлайн"
свидетельство о регистрации СМИ
ЭЛ № ФС 77 - 72602

13,14

Влияние кислорода на электропроводящие свойства тонких пленок полимерного диэлектрика

© А.Р. Юсупов¹, А.Н. Лачинов^{1,2}, Л.Р. Калимуллина¹, Р.М. Гадиев¹, Д.В. Никитина¹

¹ Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы,
Уфа, Россия

² Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН,
Уфа, Россия

E-mail: Azat.yusupov@bk.ru

(Поступила в Редакцию 14 июня 2018 г.

В окончательной редакции 15 октября 2018 г.)

Обсуждается влияние атмосферы на электропроводность пленок полидифениленфталата (ПДФ) в структуре типа „сэндвич“ ПТО-ПДФ-Sb. На основе электрофизических измерений, а также квантово-химического моделирования делается вывод об основном вкладе кислорода на электропроводность пленок ПДФ.

DOI: 10.21883/FTT.2019.03.47254.165

1. Введение

Общим свойством всех материалов органической электроники является повышенная чувствительность их свойств к условиям внешней среды. Одним из факторов влияющим на электропроводность полимерных материалов является атмосферный кислород, который наряду с другими газами может влиять на электронные свойства полимеров [1,2]. В работе [3] показано, что взаимодействие с кислородом подобно допированию, при котором происходит формирование поляронных состояний в области запрещенных энергий, что повышает проводимость материала. Часто подобную чувствительность органических полимеров к окружающим газам стараются использовать. Например, в работе [4] рассматривается имплантация атомов кислорода в полимерный материал для повышения сенсорных свойств устройства. В работе [5] обращается внимание на уникальные возможности электропроводящих полимеров при их использовании в качестве материалов для газовых сенсоров. Однако, как правило, воздействие окружающей атмосферы носит негативный характер, приводя к деструкции органического слоя, к возникновению новых электронных состояний, приводящих к существенному изменению электрофизических свойств. В работе [6] был проведен анализ экспериментальных результатов и теоретических расчетов органических соединений, нашедших применение в электронике с целью систематизации данных о природе ловушечных состояний в органических материалах. Было установлено, что в пленках всех электроактивных полимеров имеется ловушечный уровень с близкой энергией $\sim 3-3.5$ eV ниже уровня вакуума. Наличие такого уровня объяснялось результатом взаимодействия с кислородом атмосферы. Было сделано предположение о том, что подобный ловушечный уровень может быть типичным для большинства органических материалов органической электроники,

содержащих делокализованные π -сопряженные электроны (МЕН-PPV, РЗНТ и т.п.). Однако до сих пор продолжается дискуссия об обоснованности подобного обобщения. Помимо традиционных полисопряженных материалов в качестве электропроводящих или электроактивных материалов часто используются несопряженные полимеры [7]. В тонких пленках таких полимеров наблюдается высокая проводимость и высокая чувствительность электропроводности к малому давлению [8], электрическому полю [9], магнитному полю [10]. В частности, к подобным полимерам относятся полиарилефталаты — материалы с большой шириной запрещенной зоны, хорошо растворимые, хемо- и термостойкие. Кроме того, они демонстрируют стабильность своих свойств от сверхнизких температур [11] вплоть до 360°C и чрезвычайно устойчивы к кислотам и щелочам [12]. Используя высокую химическую стабильность этого полимера, процесс изготовления экспериментальных структур и большая часть опубликованных результатов измерений [7] была получена на открытом воздухе при нормальных условиях без ограничения доступа кислорода к материалу. В связи с этим, актуальным является вопрос о влиянии кислорода, а также различных газов, входящих в состав атмосферы воздуха, на электрофизические параметры тонких пленок несопряженных полимеров и сравнение полученных результатов с выводами работ проведенных на сопряженных структурах [6].

2. Объекты и методы исследования

В качестве полимерного материала были использованы пленки полидифениленфталата (ПДФ). Экспериментальные образцы представляли пленочные структуры типа „сэндвич“ ПТО-ПДФ-Sb (рис. 1), где ПТО — это смесь окислов индия и олова, Sb — сурьма. В работе [14] влияние кислорода среды на электро-

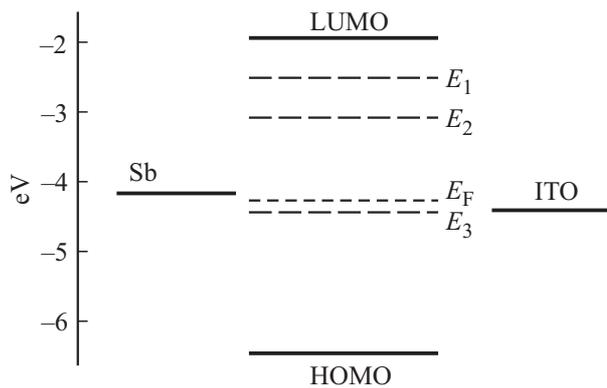


Рис. 1. Диаграмма энергетических уровней электродов и полимера. E_1, E_2, E_3 энергии групп ловушек относительно уровня вакуума [13]. E_F — уровень Ферми полимера.

проводящие свойства было обнаружено в структуре ИТО–ПДФ–АІ, имеющей практически важное значение для электролюминесцентных диодов. Однако в такой структуре сложно учесть влияние окисления алюминия на изменение свойств структуры. В связи с этим в настоящей работе было предложено использовать в качестве металлического электрода сурьму. Работа выхода сурьмы (4.01 eV) наиболее близка по значению к работе выхода алюминия (4.08 eV) [15]. В отличие от алюминиевых электродов, электроды из сурьмы менее требовательны к окружающей атмосфере и устойчивы к окислению при комнатных условиях, что позволяет применять данный материал для проведения измерений на воздухе в течении длительного времени.

Пленки ПДФ формировали методом центрифугирования из раствора полимера (5%) в циклогексаноне, электроды наносились методом термодиффузионного напыления в вакууме на установке TES 12-18. Толщина получаемых экспериментальных структур контролировалась методами атомно-силовой микроскопии и интерферометрии и составляла порядка ~ 420 nm. В качестве основного метода исследования был выбран метод, основанный на измерении вольтамперных характеристик. Вольтамперные характеристики (ВАХ) были получены на измерителе параметров полупроводниковых приборов SourceMeter KEITHLEY 2400. Все измерения проводились в специальной камере с регулируемой газовой атмосферой.

Квантово-химическое моделирование возможного взаимодействия комплексов мономер — ПДФ с атомами газов контрольной группы (O_2, N_2, Ar, He, CO_2) проводилось методом теории функционала плотности с использованием гибридного функционала B3LYP.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены типичные ВАХ экспериментальной структуры ИТО/ПДФ/Sb в зависимости от

давления в измерительной камере в интервале от атмосферного до 16.5 kPa. Для учета возможного влияния эффекта формовки полимерной пленки в электрическом поле, предварительно на экспериментальных образцах была проведена серия измерений ВАХ на воздухе при атмосферном давлении. Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что эффект формовки не наблюдается, так как форма ВАХ и величины токов от измерения к измерению не меняются в пределах погрешности измерений.

В процессе уменьшения давления ток, протекающий через полимерную пленку, на разных образцах увеличивался в интервале от 3 до 5 раз. Известна сильная зависимость проводимости тонких пленок ПДФ от одноосного давления [16]. Однако, описанная ранее зависимость противоположна наблюдаемой и не может объяснить рост проводимости при уменьшении гидростатического давления. Естественно предположить, что в заданных условиях эксперимента увеличение проводимости при уменьшении давления может быть связано с уменьшением концентрации определенной компоненты воздушной смеси.

На вставке рис. 2 показано изменение тока, протекающего через экспериментальную структуру, от давления при разности потенциалов на электродах 10 V. Анализ полученных результатов показал, что при выдержке образца при минимальном давлении продолжает наблюдаться увеличение проводимости. Однако через 75–80 min изменение проводимости прекращается и ток стабилизируется. Подобное изменение тока связано, по-видимому, с дегазацией полимерной пленки от адсорбированных газов из состава атмосферы.

Необходимо отметить, что данный процесс является обратимым: при увеличении давления путем напуска

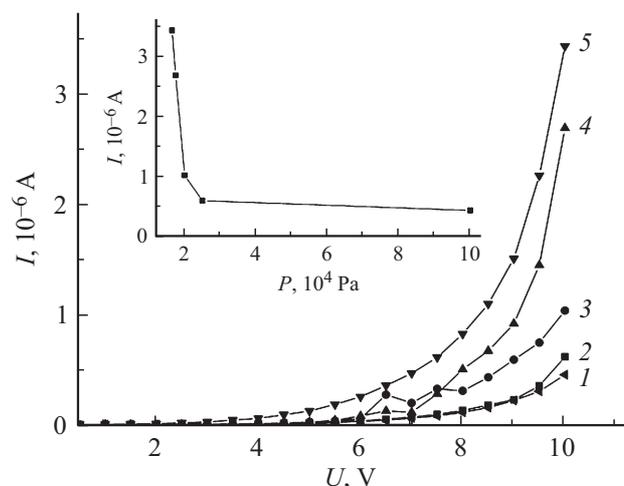


Рис. 2. ВАХ, измеренные последовательно при уменьшении давления в измерительной камере в процессе ее вакуумирования до 16.5 kPa (1 — 100, 2 — 25, 3 — 20, 4 — 17.5, 5 — 16.5 kPa). На вставке приведена зависимость максимальных токов (при 10 V) от давления.

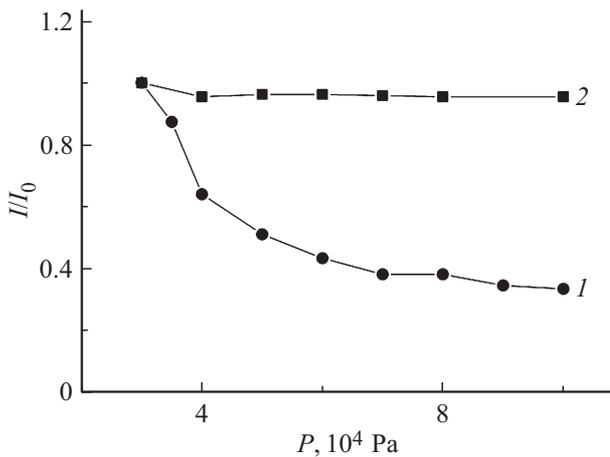


Рис. 3. Зависимость относительного изменения тока от давления при изменении концентрации воздуха (кривая 1) и (кривая 2) для структуры Al/ПДФ/Sb при напряжении 10 В.

воздуха в вакуумную камеру, величина тока уменьшается до первоначального значения (рис. 3, кривая 1). При напуске в камеру инертного газа уменьшения проводимости с ростом давления не наблюдалось. На рис. 3 (кривая 2) это продемонстрировано на примере использования аргона.

Известно, что присутствие молекул воды и кислорода может сильно влиять на электронные свойства структуры металл/полимер/металл [17]. Уместно предположить, что именно кислород, как один из важных компонентов атмосферы (второй по концентрации после азота) оказывает негативное влияние на электропроводимость полимерной пленки. Пары воды были исключены, так как известно их обратное влияние на проводимость полимера: с увеличением концентрации паров проводимость возрастает [18].

Полученные нелинейные ВАХ были проанализированы в рамках теории токов, ограниченных объемным зарядом (ТООЗ), модифицированной теорией Пула–Френкеля (ТПФ), подробно описанной в работах [19,20]. Согласно этой модели ток, протекающий через тонкую пленку в отсутствие ловушек, описывается хорошо известной формулой:

$$J = \frac{9}{8} \mu \epsilon \epsilon_0 \frac{V^2}{L^3}, \quad (1)$$

где J — плотность тока, ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость (в расчетах принимали $\epsilon = 3.4$), ϵ_0 — электрическая постоянная, μ — эффективная подвижность носителей заряда, L — толщина пленки.

В случае, когда в материале есть ловушки, величина тока зависит от соотношения концентрации свободных носителей заряда (n) к концентрации носителей, захваченных в ловушки ($n_{trapped}$) — Θ . Величина тока в этом случае определяется соотношением:

$$J = \mu \epsilon \epsilon_0 \Theta_{modern} \frac{V^2}{L^3}. \quad (2)$$

Для учета эффекта Пула–Френкеля в теории токов, ограниченных объемным зарядом, было использовано распределение Ферми–Дирака [20]. В связи с этим параметр Θ_{modern} с учетом положения квазиуровня Ферми принимает следующий вид:

$$\Theta_{modern} = \frac{n}{n_{trapped}} = \frac{N_c}{N_t} \left[\exp \left[\frac{E_{FQ} - E_C}{kT} \right] + \exp \left[\frac{E_t - E_C}{kT} \right] \right], \quad (3)$$

где N_c и N_t — плотность состояний в зоне проводимости и плотность ловушечных состояний соответственно, E_{FQ} — квазиуровень Ферми, E_C — зона проводимости, E_t — энергия равновесного уровня Ферми [20].

Из соотношения (3) следует, что изменение концентрации ловушечных состояний $n_{trapped}$, например, уменьшение, должно привести к увеличению протекающего тока.

Для проведения анализа полученных данных ВАХ были перестроены в логарифмических координатах и выделены участки линейной аппроксимации (рис. 4). Было установлено, что существует достаточно оснований считать, что при уменьшении давления в рабочей камере (уменьшения концентрации кислорода) происходит снижение концентрации ловушечных состояний в объеме полимерной пленки. В частности, согласно рис. 4 можно заключить, что наблюдается увеличение проводимости образца, увеличение крутизны кривой в области напряжений предельного заполнения ловушек (ПЗЛ), а также происходит смещение режима ПЗЛ в область более слабых полей. Все это наблюдается при таких неизменных условиях, как толщина полимерной пленки, одинаковой равновесной концентрации собственных носителей заряда, работ выхода электрода и полимера и т.д. Кроме того, как показал анализ полученных ВАХ (рис. 4) по мере откачки воздуха из вакуумной

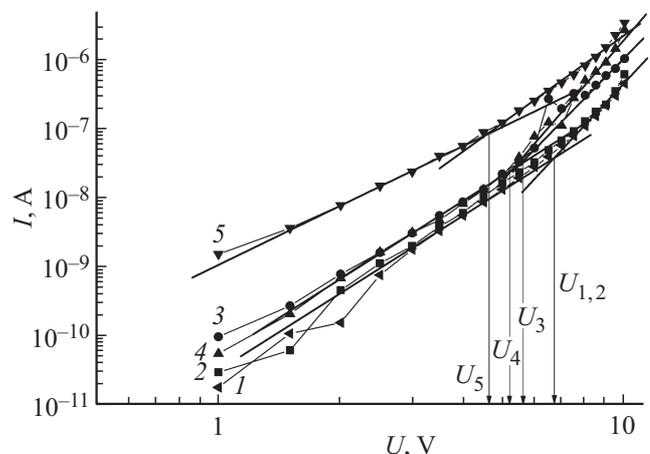


Рис. 4. ВАХ исследуемой структуры при различных значениях давления в вакуумной камере в двойных логарифмических координатах. (1 — 100, 2 — 25, 3 — 20, 4 — 17.5, 5 — 16.5 kPa). U_1 – U_5 напряжения соответствующие точке перегиба.

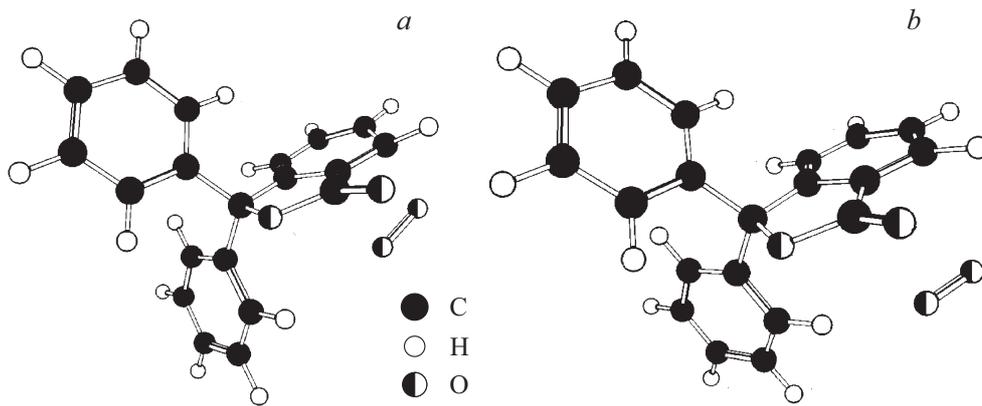


Рис. 5. Трехмерное изображение комплекса ПДФ/ O_2 : *a* до оптимизации, *b* после оптимизации. ● — атомы углерода, ○ — водорода, ◐ — кислорода.

камеры изменяется начальный наклон ВАХ. Так при 16.5 кПа в рабочей камере, начальный наклон становится равным 3. В то время как при атмосферном давлении он составляет ~ 3.4 . При этом согласно модели ТООЗ такое поведение связывают с условием полного заполнения ловушек либо уменьшения их концентрации [21].

Оценки подвижности носителей заряда, а также концентрации ловушек, проведенные согласно (1)–(3), в зависимости от давления в измерительной камере представлены в табл. 1.

По мере откачки воздуха (уменьшения давления до 16.5 кПа) подвижность носителей заряда возрастает в ~ 8 раз, что достаточно хорошо согласуется с ранее полученными результатами [22]. В то же время, концентрация ловушечных состояний уменьшается почти на 10%.

Уместно предположить, что уменьшение электропроводности в условиях воздушной атмосферы может быть связано с наличием ловушек, образованных комплексом ПДФ — O_2 . Наличие диффундировавшего в объем пленки кислорода подтверждается длительным периодом выхода проводимости на стационарный режим. Повидимому, кислород хорошо диффундирует в объем полимерной пленки, создавая дополнительные ловушечные центры. Возможность существования последних можно исследовать, используя соответствующие квантово-химические расчеты совместно с экспериментальными результатами.

Таблица 1. Зависимость подвижности и концентрации носителей заряда в структуре ИТО/ПДФ/Sb от давления в вакуумной камере

№	P , кПа	μ , $cm^2/V \cdot s$	n , cm^{-3}
1	100	$1.1 \cdot 10^{-6}$	$5.4 \cdot 10^{15}$
2	25	$1.1 \cdot 10^{-6}$	$5.4 \cdot 10^{15}$
3	20	$1.6 \cdot 10^{-6}$	$5.2 \cdot 10^{15}$
4	17.5	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$5.1 \cdot 10^{15}$
5	16.5	$8.9 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{15}$

В модельном эксперименте молекулы газов помещались вблизи фталидного цикла, поскольку ранее проведенные квантово-химические расчеты показали, что именно в области фталидного цикла локализована нижняя вакантная молекулярная орбиталь. Это означает, что вероятность захвата электрона в этой области максимальна. Также при проведении расчета аниона мономера было установлено, что спиновая плотность максимальна в области фталидного цикла.

На рис. 5. представлены трехмерные изображения комплекса мономер– O_2 до и после оптимизации. Следует отметить, что оптимизация для всех комплексов проводилась идентично. Молекулы газа отклонялись на различные расстояния для достижения минимальной энергии, в данном случае молекула кислорода удалялась от мономера на 0.5–0.9 Å.

Были получены данные о спиновых плотностях для комплексов мономер ПДФ с инертными газами Ar, Ne и с молекулами CO_2 , N_2 , O_2 . Оценка спиновой плотности проходила в комплексах до и после оптимизации. Из результатов следует, что изменения спиновой плотности в комплексах с инертными газами и молекулой CO_2 незначительны и максимальны при взаимодействии с кислородом. Можно предположить, что в результате подобного взаимодействия будут формироваться глубокие электронные ловушки, приводящие к уменьшению плотности протекающего тока.

Результаты этих расчетов согласуются с выводами работы [6], где говорится об уменьшении электронной плотности на фрагменте молекулы, взаимодействующем с O_2 . Большой интерес представляют результаты квантово-химических расчетов энергий сродства к электрону и потенциала ионизации комплексов мономер–ПДФ с молекулами Ar, O_2 и N_2 (табл. 2).

Полученные значения энергий свидетельствуют о существенном влиянии кислорода на молекулу мономера. Так сродство к электрону комплекса мономера с кислородом изменяется практически в 2 раза, по сравнению со сродством исходного мономера. В соответствии с

Таблица 2. Энергии потенциала ионизации и сродства к электрону для комплексов мономер/газ

Параметр	Мономер ПДФ	Комплекс мономер		
		ПДФ/O ₂	ПДФ/Ar	ПДФ/N ₂
Потенциал ионизации, eV	6.9	6.3	6.9	6.9
Сродство к электрону, eV	1.7	4.3	1.7	1.7

моделью Свораковского [22], наличие примесных состояний с энергией сродства к электрону большего, чем в основном материале, приводит к формированию электронных ловушек глубиной:

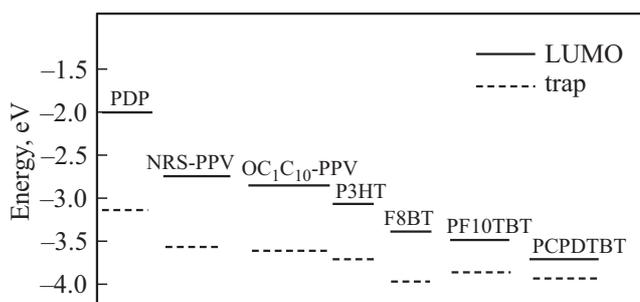
$$\Delta E = \xi_G - \xi_H + E_P, \quad (4)$$

где ξ_G — энергия электронного сродства примеси (гость), ξ_H — энергия электронного сродства основного материала (хозяин), E_P — энергия поляризации среды.

Можно сделать вывод о том, что результаты проведенных квантово-химических расчетов говорят о влиянии O₂ на ПДФ и свидетельствуют о возможном возникновении в полимерном материале глубоких кислородных ловушек. Как и в работе [6] подобные ловушки понижают подвижность носителей заряда и уменьшают проводимость материала.

Аналогичные расчеты были проведены для комплексов с азотом и аргоном и углекислым газом, которые показали либо отсутствие, либо значительно более слабое по сравнению с кислородом взаимодействие с молекулой полимера.

В работе [6] изменение энергий комплексов PPV/H₂O связывают с образованием продуктов окисления, которые играют роль ловушек и понижают подвижность носителей заряда. Представляет большой интерес диаграмма, на которой авторы [6] показали результаты измерений нижних вакантных молекулярных орбиталей (НВМО) и энергию ловушек для 6 наиболее известных полимеров: NRS-PPV, OC₁C₁₀-PPV, P3HT, F8BT, PF10TBT, PCPDTBT.

**Рис. 6.** Схематическое изображение энергий НВМО и центр распределения ловушек. Сплошные линии обозначают НВМО уровни, пунктирные линии показывают ловушечные уровни.

PF10TBT, PCPDTBT (рис. 6). Анализ представленных данных позволил авторам установить схожее для разных соединений распределение электронных ловушек с глубиной залегания на 3.6 eV ниже уровня вакуума, с типичной шириной распределения 0.1 eV и концентрацией ловушек $\sim 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. В отличие от соотношения (4) в работе [1] отчет энергий электронных состояний проводили относительно уровня вакуума.

Мы дополнили эту диаграмму результатами для полидифениленфталаида (крайняя левая позиция на диаграмме рис. 6). Можно видеть, что эти результаты не противоречат выводам, сделанным в работе [6].

Ранее [6] было сделано предположение, согласно которому электронные ловушки имеют общую природу, обусловленную образованием комплексов гидратированного кислорода. Следствием этого факта является то, что ловушка, ограничивающая электронный ток, может быть предсказана для любого полимера. Согласно результатам исследования тонких полимерных пленок ПДФ [13] методами термостимулированных токов и вольтамперных характеристик, в запрещенной зоне полимера можно выделить три группы электронных ловушек с максимумами плотности состояния при энергиях 0.5, 1.06 и 2.4 eV относительно дна зоны проводимости. Следовательно, можно говорить о нахождении ловушки с энергией 3.06 eV ниже уровня вакуума для ПДФ, которая определяется наличием кислорода в объеме полимера [13].

4. Заключение

Таким образом, установлено, что наличие кислорода приводит к уменьшению проводимости пленок полидифениленфталаида за счет формирования ловушек носителей заряда. Причем при взаимодействии кислорода с фрагментами полимерной молекулы не возникает химической связи, что приводит к обратимому изменению электропроводности при изменении концентрации кислорода. Благодаря этому пленки ПДФ демонстрируют высокую стабильность электрофизических характеристик в течение нескольких лет при проведении повторных измерений в условиях открытой атмосферы и при комнатной температуре.

Авторы выражают благодарность д.х.н. профессору С.Н. Салазкину за помощь в получении объекта исследования.

Список литературы

- [1] N.T. Kemp, G.U. Fianagan, A.B. Kaiser, H.J. Trodahl, B. Chapman, A.C. Partridge, R.G. Buckley. *Synthetic Met.* **101**, 1–3, 434 (1999).
- [2] E. Vitoratos, S. Sakkopoulos, N. Paliatsas, K. Emmanouil, S.A. Choulis. *J. Organic Polymer Mater.* **2**, 7 (2012).
- [3] S.K. Singh, X. Crispin, I.V. Zozoulenko. *J. Phys. Chem. C* **121**, 22, 12270 (2017).

- [4] K.V. Aneesh Kumar, G.N. Kumaraswamy, C. Ranganathaiah, H.B. Ravikumar. *J. Appl. Polymer. Sci.* **134**, 44962 (2017).
- [5] Hua Bai, Gaoquan Shi. *Sensors* **7**, 267 (2007).
- [6] T. Nicolai, M.G. Kuik, A.H. Wetzelaer, B. Boer, C. Campbell, C. Risko, P.W.M. Blom. *Nature Mater.* **11**, 882 (2012).
- [7] А.Н. Лачинов, Н.В. Воробьева. *УФН* **176**, 12 (2006).
- [8] А.Н. Лачинов, А.Ю. Жеребов, В.М. Корнилов. *Письма в ЖЭТФ* **52**, 2, 742 (1990).
- [9] А.Ю. Zherebov, A.N. Lachinov. *Synth. Met.* **44**, 99 (1991).
- [10] Н.В. Воробьева, А.Н. Лачинов, Б.А. Логинов. *Поверхность: Рентген-, синхротрон. и нейтрон. исследование* **5**, 22 (2006).
- [11] A.N. Ionov, A.N. Lachinov, M.M. Rivkin, V.M. Tuchkevich. *Solid State Commun* **82**, 8, 609 (1992).
- [12] С.Н. Салазкин. *Высокомолекуляр. соединения* **46**, 7, 1244 (2004).
- [13] А.С. Накаряков, А.Н. Лачинов, А.Ф. Пономарев, Е.Е. Цеплин, В.А. Антипин. *ФТТ* **53**, 12, 2397 (2011).
- [14] А.Р. Юсупов, А.Р. Тамеев, А.Н. Лачинов, В.С. Любцов, А.В. Ванников. *Письма в ЖТФ* **38**, 24 (2012).
- [15] A.M. Eugene. *Properties of Materials. In: Reference Data For Engineers: Radio, Electronics, Computer and Communications / Eds Mac E. Van Valkenburg, Wendy M. Middleton. Woburn, MA: Butterworth-Heinemann (2002).*
- [16] A.N. Lachinov, A.Yu. Zherebov, V.M. Kornilov. *Synth. Met.* **44**, 111 (1991).
- [17] S.A. Abdou Mohamed, P. Orfino Francesco, S. Yongkeun, S. Holdcroft. *J. Am. Chem. Soc.* **119**, 4518 (1997).
- [18] Р.Б. Салихов, А.Н. Лачинов, Р.Г. Рахмеев, Р.М. Гадиев, А.Р. Юсупов, С.Н. Салазкин. *Измерительная техника* **4**, 62 (2009).
- [19] P.N. Murgatroyd. *J. Phys. D* **3**, 51 (1970).
- [20] D.F. Barbe. *J. Phys. D* **4**, 1812 (1971).
- [21] Ф. Гутман, Л. Лайонс. *Органические полупроводники / Под ред. Е.Л. Франкевича. Мир, М. (1970). С. 696.*
- [22] J. Sworakowski. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **11**, 1 (1970).

Редактор Д.В. Жуманов

**Ассоциация студентов-физиков и молодых учёных России
Башкирский государственный университет
Уральский федеральный университет
Челябинский государственный университет
Институт электрофизики УрО РАН
при участии**

**Магнитогорского государственного технического университета
Института проблем сверхпластичности металлов РАН
Института физики молекул и кристаллов Уфимского ФИЦ РАН
Детского оздоровительного образовательного центра «Уральские Зори»**

В Н К С Ф – 26

**Двадцать шестая Всероссийская
научная конференция студентов-физиков и молодых учёных**



Россия

**Материалы конференции
Информационный бюллетень**

Уфа, Башкортостан, 2020

**Альтаир
Ростов-на-Дону
2020**

ISBN 978-5-93667-204-0

УДК 53

ББК В3я431

В 850

ОТВЕТСТВЕННЫЙ ЗА ВЫПУСК:

Александр Арапов

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Связь по интернет, общее редактирование: Александр Арапов (Екатеринбург)

Обработка содержательной части тезисов по секциям: научные секретари – эксперты секций - члены научного комитета конференции ВНКСФ-26, данные о которых напечатаны в разделе *«Состав научного комитета конференции ВНКСФ-26»*, *страницы 33-36*

Компьютерная верстка, редактирование: Арапов Александр, Арапова Елизавета, Бураева Елена (Ростов-на-Дону).

Составление информации первой части сборника: Арапов Александр, Вилена Валиуллина (Уфа).

Фото: Александр Арапов, Антон Харчевский (Москва), Роман Морячков (Красноярск).

Дизайн: Кайгородова Ольга (Екатеринбург), Александр Арапов, и творческий коллектив конференции.

Работа над диском, обработка базы данных флэш-диск: Арапова Елизавета, Арапов Александр.

Поддержка сайта: Александр Арапов.

Программирование, автоматизация: Алексей Исаков (Екатеринбург), Елизавета Арапова.

Сборник тезисов, материалы Двадцать шестой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-26, Уфа, Башкортостан): материалы конференции, тезисы докладов: В 1 т.Т.1 – Екатеринбург – Ростов-на-Дону – Уфа: ООО "Альтаир", 2020. – 444 стр.

В сборнике представлены тезисы докладов, посвященных различным аспектам современной физики, представленные на Двадцать шестой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых, проходившей в г. Уфе, ДООЦ «Уральские зори» с 27 марта по 3 апреля 2020 г., а также итоги конференции ВНКСФ-25 и материалы, посвященные деятельности АСФ России за 2019 год.

289 тезисов, 442 страницы формата А4. Копия сборника на флэш-диске с персональными анкетами и фото участников конференции, а также архивы конференций ВНКСФ: 11-25 прилагается. С публикацией на сайте www.asf.ural.ru

Сборник предназначен для преподавателей, аспирантов, студентов, научных работников и прочих интересующихся современной физикой людей, работающих в области физических наук и смежных с ней областях.

ВНКСФ-26 проводится при поддержке: Института электрофизики УрО РАН, Башкирского государственного университета, Уральского федерального университета, Челябинского государственного университета, Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

Оргкомитет конференции выражает благодарность всем ученым – физикам Уфы, Екатеринбурга, Челябинска, Магнитогорска и Российской Федерации за активное участие в конференции!

ISBN 978-5-91951-593-7

© Ассоциация студентов – физиков и молодых ученых России, 2020

© ООО "Альтаир", 2020

ЖК проводилось из раствора комплекса краун-эфира с неорганической солью NaCl (1:1) в хлороформе и этаноле. Концентрация краун-эфира (дибензо-18-краун-6 эфир) составляла 2 wt.%. Измерения спектров импеданса проводились с использованием потенциостата-измерителя импеданса Autolab (Metrohm B.V. Netherlands) по двухэлектродной схеме при напряжении 25 мВ в частотном диапазоне 10^{-3} - 10^5 Гц. Анализ спектров основывался на модели электродной поляризации. Сравнение результатов анализа чистого и допированного комплексом краун-эфира с NaCl жидкого кристалла позволило оценить концентрацию и коэффициенты диффузии положительных и отрицательных ионов.

Список публикаций:

[1] Лебедев Ю. А., Чувывров А. Н // Кристаллография. Москва. Изд-во Академия наук СССР. 1983. № 2. С.538.

Изучение фотопроводимости пленок полидифениленфталата

Рахматова Лилия Илфатовна

Юсупов Азат Равилевич, Куян Амин

Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы

Лачинов Алексей Николаевич, д.ф.-м.н.

rahmatova.liliya@mail.ru

Ранее было выявлено, что в пленках полидифениленфталата (ПДФ) наблюдается длительное послесвечение, которое объясняется в рамках представлений о электронных состояниях в запрещенной зоне полимера, которые могут участвовать в излучательной рекомбинации и процессе транспорта зарядов [1].

В данной работе проведены измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) тонких пленок ПДФ при воздействии УФ-излучения (рис.1). Образцы представляли собой структуру полупроводник-диэлектрик-металл - ПТО/ПДФ/Al, за основу была взята стеклянная подложка со слоем ПТО. Диэлектрическая полимерная пленка наносилась методом центрифугирования, толщина которой контролировалась микроинтерферометром и составляла порядка ~150 нм. Металлический электрод формировался термодиффузионным напылением в вакууме.

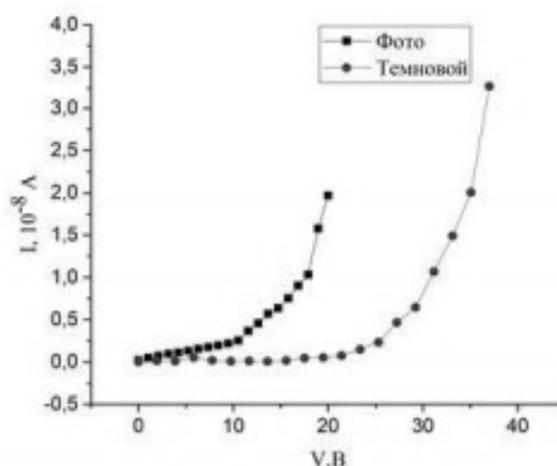


рис. 1. Экспериментальные вольт-амперные характеристики

Проведены оценки таких параметров, как подвижность носителей заряда и высота барьера по формулам (1) и (2):

$$\varphi = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{T^2 A}{j} \right) \quad (1)$$

где k - постоянная Больцмана, T - температура на образце, q -заряд электрона, j -плотность тока, A - постоянная Ричардсона

$$\mu = \frac{jL^3}{4,4 \cdot 10^{-14} \cdot \epsilon \cdot U^2} \quad (2)$$

где j -плотность тока, L - толщина пленки, ϵ - диэлектрической проницаемость, U - напряжение в образце.

За прямое включение приняты измерения, когда положительный потенциал на ПТО и обратное включение – при положительном потенциале на Al. Результаты приведены в таблице:

Высота потенциального барьера, эВ				Подвижность носителей заряда, см ² /(В·с)			
Обратное включение		Прямое включение		Обратное включение		Прямое включение	
Темн.	Фото	Темн.	Фото	Темн.	Фото	Темн.	Фото
0,78	0,72	0,75	0,72	$1,96 \cdot 10^{-9}$	$4,5810^{-9}$	$1,1910^{-9}$	$1,8410^{-8}$
$\Delta\varphi=0,06$		$\Delta\varphi=0,03$		$\Delta\mu=2,6210^{-9}$		$\Delta\mu=1,7310^{-8}$	

Установлено, что УФ-облучение приводит к незначительному росту электропроводности и уменьшению высоты потенциального барьера на границе ПГО/ПДФ и ПДФ/Al. Обнаружена длительная релаксация проводимости к исходному значению после облучения.

В докладе обсуждаются полученные результаты и их интерпретация.

Список публикаций:

[1] Антипин В. А., Лачинов А. Н., Мамыкин Д.А., Ковалёв А. А., Остахов С. С., Шапошникова В. В., Салазкин С. Н., Казаков В. П. Рекомбинационная люминесценция пленок полиарилэфталидов. II. Послесвечение, индуцированное электровозбуждением пленок полиарилэфталидов // Химия высоких энергий. 2010. т. 44, № 4. С. 345–347.

Электрические характеристики стекла при высокочастотном импульсно-периодическом воздействии

Сагадатов Илмир Халитович

Башкирский государственный университет

Вальшин Алыс Мустафович

pro100ilmirsagadotov@gmail.com

При напряженности электрического поля, превосходящей предел электрической прочности диэлектрика, наступает пробой. Пробой представляет собой процесс разрушения диэлектрика, в результате чего диэлектрик теряет электроизоляционные свойства в месте пробоя. Величину напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, называют пробивным напряжением, а соответствующее значение напряженности электрического поля называется электрической прочностью диэлектрика.

Пробой твердых диэлектриков представляет собой или чисто электрический процесс (электрическая форма пробоя), или тепловой процесс (тепловая форма пробоя). В основе электрического пробоя лежат явления, в результате которых в твердых диэлектриках имеет место лавинное возрастание электронного тока, подобно тому, как это наблюдается в процессе ударной ионизации в газообразных диэлектриках.

Тепловой пробой имеет место при повышенной проводимости твердых диэлектриков и больших диэлектрических потерях, а также при подогреве диэлектрика посторонними источниками тепла или при плохом теплоотводе. Процесс теплового пробоя твердого диэлектрика состоит в следующем. Вследствие неоднородности состава отдельные части объема диэлектрика обладают повышенной проводимостью. Они представляют собой тонкие каналы, проходящие через всю толщину диэлектрика. Вследствие повышенной плотности тока в одном из таких каналов будут выделяться значительные количества тепла. Это повлечет за собой еще большее нарастание тока вследствие резкого уменьшения сопротивления этого участка в диэлектрике. Процесс нарастания тепла будет продолжаться до тех пор, пока не произойдет тепловое разрушение материала (расплавление, науглероживание) по всей его толщине - по ослабленному месту.

При пробое твердых диэлектриков часто наблюдаются случаи, когда до определенной температуры имеет место электрический пробой, а затем в связи с дополнительным нагревом диэлектрика наступает процесс теплового пробоя диэлектрика. Аналогичный переход электрической формы пробоя в тепловую происходит в зависимости от времени выдержки твердого диэлектрика под напряжением.

В данной работе осуществляется высокочастотный импульсно-периодический режим воздействия на стеклянную трубку с целью исследования электрических характеристик стекла на предмет пробоя и измерения электропроводности.

В экспериментах использовались ВЧ генераторы собственной разработки, которые перекрывали диапазон частот от 1 МГц до 6 МГц, могли работать в импульсно-периодическом режиме. Импульсно-периодический режим осуществляется в 2 этапа: на 1 этапе мы пробиваем стекло, на втором этапе проводится измерение электропроводности стекла.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
ПРИВОЛЖСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ С ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ ЦЕНТРОМ УФИЦ РАН
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ ИМ. Р.Р. МАВЛЮТОВА УФИЦ РАН
ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЧЕЛЯБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. М. АКМУЛЛЫ**

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА
И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В ЕСТЕСТВОЗНАНИИ:
спутник Международной научной конференции
«Уфимская осенняя математическая школа-2020»**

**Тезисы докладов
XI Международной школы-конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых**

**11 – 14 ноября 2020 г.
г. Уфа**

**НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «АЭТЕРНА»
УФА - 2020**

УДК 51+53
ББК 22.1+22.3
Ф94

*Сборник издан за счёт финансовых средств
Научно-образовательного математического центра
Приволжского федерального округа,
дополнительное соглашение № 075-02-2020-1421/1
к соглашению № 075-02-2020-1421*

Редакционная коллегия:

д-р физ.-мат. наук, профессор **Б.Н. Хабибуллин** (отв. за выпуск);
д-р физ.-мат. наук, профессор **Е.Г. Екомасов** (отв. редактор);
канд. физ.-мат. наук, доцент **Л.А. Габдрахманова** (отв. редактор)
д-р физ.-мат. наук, профессор **О.А. Кривошеева**;
канд. физ.-мат. наук, доцент **Ф.К. Закирьянов**;
аспирант ФМИИТ БашГУ **А.С. Белова**

Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании:
Ф94 тезисы докладов XI Международной школы-конференции студентов,
аспирантов и молодых ученых (г. Уфа, 11 – 14 ноября 2020 г.) / отв.
ред. Е.Г. Екомасов, Л.А. Габдрахманова. – Уфа: НИЦ «АЭТЕРНА»,
2020. – 255 с.

ISBN 978-5-00177-062-6

В сборник помещены тезисы докладов участников XI Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании»: спутник Международной научной конференции «Уфимская осенняя математическая школа-2020».

Тезисы докладов воспроизводятся с представленных авторами оригиналов.

УДК 51+53
ББК 22.1+22.3

ISBN 978-5-00177-062-6

© БашГУ, 2020
© НИЦ «АЭТЕРНА», 2020
© Коллектив авторов, 2020

УДК.538.97

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УФ НА ФОТОПРОВОДИМОСТЬ ТОНКИХ ПЛЕНОК ПОЛИМЕРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА

Севостьянова Е.Г.

Башкирский государственный педагогический университет
им. Акмуллы, г. Уфа, Россия

Исследование электроактивных полимеров связано с перспективами применения данных материалов в современных электронных устройствах. В большинстве случаев, исследуются материалы, ограниченные в объеме, такие как полиарилефталиды, в которых наблюдается эффект электронного переключения, т.е. переход полимера из диэлектрического состояния в высокопроводящее [1].

Объектом исследования был выбран полидифениленфталид (ПДФ). В качестве источника монохроматического излучения были выбраны лазеры мощностью 5 мВт и длинами волн 405нм, 520нм и 650нм. Измерения проводились последовательно в темновом режиме, зеленом и фиолетовом облучении. Было установлено, что ток в отсутствии освещения и освещении зеленым лазером существенно отличаются от тока при освещении фиолетовым лазером. Исследования структур показало, что образец после освещения возвращается в исходное состояние в течении длительного времени.

Анализ полученных результатов влияния ультрафиолетового излучения на свойства границы раздела полимер/полимер показал, что электропроводность границы раздела и подвижность носителей заряда возрастает. Наблюдается длительный процесс возвращения образца в исходное состояние после отключения источника УФ.

Литература

1. Антипин, В. А., А. Н. Лачинов, Д.А. Мамыкин, А. А. Ковалёв, С. С. Остахов, В. В. Шапошникова, С. Н. Салазкин, В. П. Казаков.// Химия высоких энергий, 2010 - Т. 44, № 4, С. 345–347.

© Севостьянова Е.Г., 2020 г.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
ПРИВОЛЖСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ С ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ ЦЕНТРОМ УФИЦ РАН
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ ИМ. Р.Р. МАВЛЮТОВА УФИЦ РАН
ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЧЕЛЯБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. М. АКМУЛЛЫ**

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА
И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В ЕСТЕСТВОЗНАНИИ:
спутник Международной научной конференции
«Уфимская осенняя математическая школа-2020»**

**Тезисы докладов
XI Международной школы-конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых**

**11 – 14 ноября 2020 г.
г. Уфа**

**НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «АЭТЕРНА»
УФА - 2020**

УДК 51+53
ББК 22.1+22.3
Ф94

*Сборник издан за счёт финансовых средств
Научно-образовательного математического центра
Приволжского федерального округа,
дополнительное соглашение № 075-02-2020-1421/1
к соглашению № 075-02-2020-1421*

Редакционная коллегия:

д-р физ.-мат. наук, профессор **Б.Н. Хабибуллин** (отв. за выпуск);
д-р физ.-мат. наук, профессор **Е.Г. Екомасов** (отв. редактор);
канд. физ.-мат. наук, доцент **Л.А. Габдрахманова** (отв. редактор)
д-р физ.-мат. наук, профессор **О.А. Кривошеева**;
канд. физ.-мат. наук, доцент **Ф.К. Закирьянов**;
аспирант ФМИИТ БашГУ **А.С. Белова**

Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании:
Ф94 тезисы докладов XI Международной школы-конференции студентов,
аспирантов и молодых ученых (г. Уфа, 11 – 14 ноября 2020 г.) / отв.
ред. Е.Г. Екомасов, Л.А. Габдрахманова. – Уфа: НИЦ «АЭТЕРНА»,
2020. – 255 с.

ISBN 978-5-00177-062-6

В сборник помещены тезисы докладов участников XI Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании»: спутник Международной научной конференции «Уфимская осенняя математическая школа-2020».

Тезисы докладов воспроизводятся с представленных авторами оригиналов.

УДК 51+53
ББК 22.1+22.3

ISBN 978-5-00177-062-6

© БашГУ, 2020
© НИЦ «АЭТЕРНА», 2020
© Коллектив авторов, 2020

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАБОТЫ ВЫХОДА МЕТАЛЛА В ОБЛАСТИ ЕГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

Солодовников Р.А.

Башкирский государственный педагогический университет
им. М Акмуллы, г. Уфа, Россия

В данном докладе представлены результаты исследования проводимости плёнки в структуре нитинол/ПДФ/индий в области фазового превращения нитинола. Основным методом исследования являлся метод вольт-амперных характеристик (ВАХ).

Для проведения исследования была изготовлена структура нитинол/ПДФ/индий, где полидифениленфталид был нанесён методом центрифугирования на поверхность нитинола. Индий наносился на поверхность плёнки из расплава. Переход нитинола из одного фазового состояния в другое производилось посредством изменения температуры на нагревателе.

ВАХ измерялись с помощью регулируемого источника тока GwInstekPSM-6003 и вольтметра Agilent-34401A. Графики зависимости и значения тока и напряжения получались в программе LabView. Полученные данные были отображены в графиках зависимости тока от приложенного напряжения.

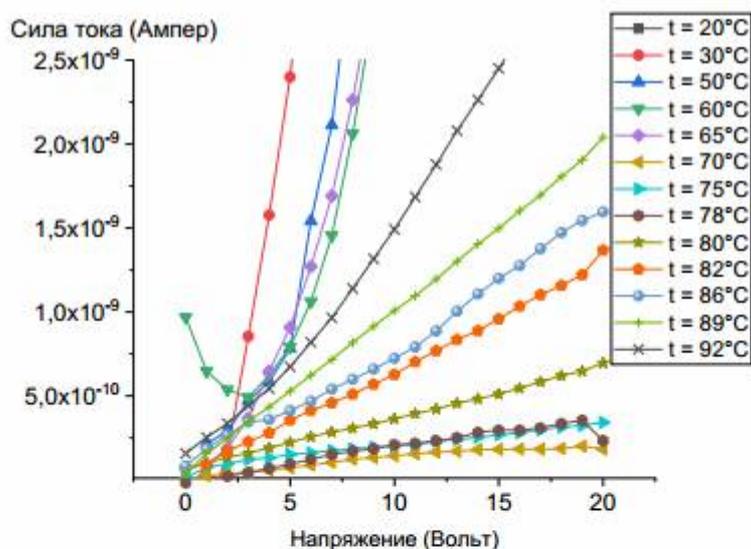


Рис.1. График зависимости силы тока от напряжения при нагревании

На рис.1 представлены типичные ВАХ при нагревании образца до 92°C. На графике видно, что при 70°C происходит резкое уменьшение проводимости структуры.