

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**МАТЕРИАЛЫ  
XLI МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНОЙ СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**«Студент и научно-технический прогресс»**

**ФИЗИКА**

**Новосибирск  
2004**

**УДК 55**

ББК Д.я 431

Материалы XLII Международной научной студенческой конференции  
«Студент и научно-технический прогресс»: Физика / Новосиб. гос. ун-т.  
Новосибирск, 2004. 230 с.

Конференция проведена при поддержке Федеральной целевой программы «Интеграция науки и высшего образования России на 2002–2006 гг.», президиума Сибирского отделения Российской академии наук.

Редакционная коллегия

Председатель – чл.-кор. РАН, проф. В.М. Фомин  
Отв. секретарь – канд. физ.-мат. наук, доц. А.Е. Зарвин

Члены бюро: чл.-кор. РАН, проф. С.В. Алексеенко,

д-р физ.-мат. наук, проф. В.М. Аульченко,

д-р физ.-мат. наук Е.А. Багрянская,

д-р физ.-мат. наук, проф. Ю.И. Бельченко,

д-р физ.-мат. наук, проф. Л.А. Боярский,

канд. техн. наук, доц. Е.В. Козырев,

д-р физ.-мат. наук А.В. Латышев,

д-р физ.-мат. наук, доц. В.П. Мальцев,

д-р физ.-мат. наук, проф. В.И. Тельнов,

зам. зав. каф. АФТИ М.Ю. Шадрин,

чл.-кор. РАН, проф. А.М. Шалагин.

## ДИФФУЗИЯ ИТТРИЯ В КРЕМНИИ

Базарбаев С.И., Базарбаев М.И.

Национальный Университет Узбекистана, Ташкент

Настоящая работа посвящена исследованию диффузии РЗЭ иттрия в кремнии. Ранее диффузия иттрия в кремнии не исследовалась.

Источник диффузии создавался напылением металлического иттрия (чистота ~ 99,99) или нанесением из раствора на поверхность образцов кремния марки КЭФ-15 ( $\rho=15 \text{ }\Omega\cdot\text{см}$ , площадь  $\sim 1,5\div 3 \text{ см}^2$ , толщина  $\sim 350\div 400 \text{ }\mu\text{м}$ ) слоя хлорида иттрия. Ампулы с образцами помещались в диффузионную печь СУОЛ, обеспечивающую точность поддержания температуры  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Диффузионный отжиг проводился в интервале температур  $1100\text{--}1250^\circ\text{C}$ . на воздухе, либо вакуумированных ( $\sim 10^{-4} \text{ мм рт.ст.}$ ) ампулах, в рабочей камере ВУП-5 ( $\sim 10^{-5} \text{ мм рт.ст.}$ ), или в реакторе, представляющем собой запаянную с одного конца кварцевую трубу, с внутренним диаметром 40 мм откачанную до рабочего давления  $\sim 10^{-6}\div 10^{-7} \text{ мм рт.ст.}$ . Длительность диффузионного отжига варьировалась от 1 мин. до 48 часов в зависимости от температуры диффузии. Профиль определялся методом травли тонких слоев (в растворе  $1\text{HF}:50\text{HNO}_3$ ) и измерения поверхностного сопротивления образца четырехзондовым методом, а также методом эффекта Холла (с использованием зондов Ван-дер-Пау). Толщина снятых слоев определялась взвешиванием образца на весах ВЛР-20г. Обычно она составляла 0,02-0,5  $\mu\text{м}$ .

Вычисленный из кривых остаточного удельного сопротивления образцов коэффициент диффузии иттрия увеличивается от  $2\cdot 10^{-13}$  при  $1100^\circ\text{C}$  до  $2\cdot 10^{-12} \text{ см}^2\cdot\text{s}^{-1}$  при  $1250^\circ\text{C}$ . Температурная зависимость коэффициента диффузии носит Аррениусовский характер и может быть описана соотношением  $D = 8\cdot 10^{-2}\cdot\exp[-2,9 eV/kT] \text{ см}^2\cdot\text{s}^{-1}$ .

Обнаружено, что иттрий проявляет, как и другие редкоземельные элементы, исследованные нами, акцепторную природу ( $p$ -тип проводимости) на поверхности кремния  $n$ -типа после диффузионного отжига.

Методом эффекта Холла определена подвижность носителей заряда – дырок в диффузионно-легированных иттрием слоях кремния. Она практически не зависит от их концентрации и равна  $\sim 120\div 180 \text{ см}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ . Концентрационное распределение электрически активных атомов иттрия (носителей заряда–акцепторов) в кремнии, определенное с помощью электрических измерений, и кривой Ирвина, может быть описано соотношением:  $C = 10^{17}\cdot\text{erfc } x/2\sqrt{D}\cdot t, \text{ см}^{-3}$ .

*Научный руководитель: д.ф.-м.н., проф. Власов С.И.*

# КОНТРОЛЬ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВАКУУМЕ МЕТОДОМ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ

З.В.Бальжинимаев

Восточно-Сибирский государственный технологический университет

Зарегистрированы температурные зависимости эллипсометрических параметров оптически полированных образцов полупроводниковых материалов на различных стадиях очистки от адсорбированных газов и следов окисла. Очистка проводилась высокотемпературным отжигом в условиях сверхвысокого вакуума.

Установленная прямая пропорциональная зависимость эллипсометрического параметра  $\Psi$  от температуры для монокристаллов Si(111) свидетельствует об эффективности эллипсометрического метода в нетрадиционном его использовании – для бесконтактной регистрации изменений температуры полупроводников в условиях вакуума.

Измерения выполнены в цельнометаллической вакуумной ((2+3)·10<sup>-7</sup> Па) системе, позволяющей проводить, в частности, регистрацию изменений эллипсометрических параметров со степенью покрытия их поверхностей различными адсорбатами, а также наблюдение и запись термодесорбционного масс-спектра с поверхности исследуемых образцов на любой стадии образования или удаления адсорбата [1].

Элементы установки и способ регистрации эллипсометрических параметров также приведены ранее [2]. По проведенной работе сделаны выводы:

1. Диэлектрическая проницаемость двойного электрического приповерхностного слоя, образованного энергетическими уровнями молекул адсорбата и энергетическими уровнями приповерхностной области кристалла изменяется вследствие десорбции молекул при отжиге кристалла.

2. Электрическое поле двойного слоя, напряженность которого нормальна к поверхности кристалла, при суперпозиции с электрическим полем падающей на поверхность поляризованной световой волны изменяет состояние ее поляризации.

3. При постоянной степени покрытия нагрев полупроводника приводит к возрастанию числа свободных электронов и, следовательно, к возрастанию  $\Delta$ . Рост концентрации свободных электронов более резко уменьшает напряженность поля двойного слоя.

---

1. Асалханов Ю.И., Иванов К.Н., Ширапова Д.Ц. // ПТЭ. 1991. №1. С.167.

2. Асалханов Ю. И., Санеев Э.Л. // ФХОМ. 2002. №3. С. 66 - 72.

*Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доц. Ю.И Асалханов.*

# ПРОВОДИМОСТЬ МАССИВА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ge/Si В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А. А. Блошкин

Новосибирский государственный университет

Экспериментально исследованы температурная и магнитополевая зависимости проводимости массива квантовых точек (КТ) Ge/Si. Плотность островков Ge  $\sim 3 \times 10^{11}$  см<sup>-2</sup>, средний размер островков в плоскости роста  $\sim 12$  нм, высота островков  $\sim 2$  нм, разброс размеров 20%. Контролируемое заполнение точек дырками осуществлялось введением  $\delta$ -легированного бором слоя Si на расстоянии 10 нм ниже слоя КТ. Концентрация бора составляла  $8.2 \times 10^{12}$  см<sup>-2</sup>.

Показано, что температурная зависимость проводимости в отсутствие магнитного поля при температурах выше 5 К подчиняется закону Эфроса-Шкловского, с независимым от температуры предэкспоненциальным множителем, равным  $e^2/h$ . При понижении температуры обнаружен переход к закону Аррениуса, с независимой от температуры энергией активации  $E_a = 1$  мэВ. Наблюдение закона Аррениуса при низких температурах свидетельствует о том, что в диапазоне энергий шириной  $2E_a$  отсутствуют энергетические состояния дырок. Энергия активации линейно возрастает в магнитном поле и насыщается в полях выше 4 Т.

Обнаружено, что магнитосопротивление (МС) является сильно анизотропным: при ориентации магнитного поля перпендикулярно направлению протекания тока МС положительно, при ориентации магнитного поля параллельно направлению протекания тока МС отрицательно. Абсолютные величины магнитосопротивления различаются между собой на два порядка при перпендикулярной и параллельной ориентации магнитного поля. Логарифм магнитосопротивления пропорционален растет квадратично с увеличением магнитного поля и, в более сильных полях, рост становится линейным.

Для объяснения полученных результатов была предложена модель, в основе которой лежит расщепление возбужденного состояния дырок в квантовых точках при приложении магнитного поля вследствие эффекта Зеемана. На основе анализа полученных результатов определена величина фактора Ланде  $g = 2.1 \pm 0.2$ .

*Научный руководитель д-р физ. мат. наук, с. н. с. Якимов А. И.*

# ФОТОИНДУЦИРОВАННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ ТИТАНАТА ВИСМУТА, ЛЕГИРОВАННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ ПРИМЕСЯМИ

Бочанова Н.В., Иванова Н.В., Плинта К.С.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Кристаллы титаната висмута ( $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ ) обладают хорошими фоторефрактивными свойствами и находят применение во многих приложениях динамической голографии, таких как обращение и самообращение волнового фронта световых пучков, мониторинг вибраций объектов, адаптивная интерферометрия. Процесс формирования фоторефрактивных решеток в кристаллах титаната висмута световым излучением сопровождается изменением его коэффициента поглощения. Известно, что на фотоиндуцированное изменение спектров поглощения и фоторефрактивные свойства кристаллов титаната висмута значительное влияние оказывают легирующие примеси.

В настоящей работе экспериментально исследовалась динамика фотоиндуцированного поглощения света и релаксация в темновых условиях в кристаллах  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}$ ,  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}+\text{Ga}$ ,  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Cu}+\text{Fe}$ . В качестве источников освещения использовалось некогерентное узкополосное излучение полупроводниковых светодиодов с центральными длинами волн  $\lambda \approx 525, 570$  и  $660$  нм.

В экспериментах регистрировалось изменение интенсивности прошедшего через кристалл светового пучка, которое в процессе обработки результатов нормировалось на величину входной интенсивности. Плотность мощности падающего на кристаллы излучения составляла для красного света  $40$  мВт/см<sup>2</sup>, для зеленого  $5$  мВт/см<sup>2</sup> и для желтого  $1.5$  мВт/см<sup>2</sup>.

При освещении кристаллов светом из красной области спектра изменения коэффициента фотоиндуцированного поглощения  $\Delta\alpha(t)$  были наибольшими для кристалла, легированного кальцием ( $\Delta\alpha \sim 0.5$  см<sup>-1</sup>). При освещении светом из зеленой области спектра наибольшие изменения фотоиндуцированного поглощения были у кристалла, легированного комбинацией примесей меди и железа ( $\Delta\alpha \sim 7.26$  см<sup>-1</sup>).

Настоящая работа выполнялась в рамках совместного Белорусско-Российского проекта при поддержке РФФИ (проект № 02-02-81044).

*Научные руководители – д-р физ.-мат. наук, проф. С.М.Шандаров, канд. физ.-мат. наук, доц. А.Е.Мандель*

# **КИНЕТИКА ФОРМИРОВАНИЯ ЭШЕЛОНОВ АТОМНЫХ СТУПЕНЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ Si(111) ПРИ СУБМОНОСЛОЙНОМ ОСАЖДЕНИИ ЗОЛОТА**

К.Н. Гарбузов

Новосибирский государственный университет

Адсорбция металлов на поверхности кремния может приводить к изменению распределения атомных ступеней вследствие зарождения и разрастания сверхструктурных доменов в процессе формирования новой фазы [1]. В этом случае на поверхности кремния возможно формирование эшелонов атомных ступеней и фасеток, инициированных термодинамическими процессами направленными на понижение свободной поверхностной энергии. Однако изменение распределения атомных ступеней на поверхности кремния в процессе осаждения атомов золота также может происходить и при малых значениях покрытия золотом, когда не происходит изменения сверхструктуры [2]. В этом случае изменение морфологии поверхности связывается с кинетическими эффектами на поверхности кремния. В последних экспериментах обнаружено влияние субмонослойного осаждения золота при различных температурах на перераспределение ступеней. Для того, чтобы выяснить какие, термодинамические или кинетические, процессы лежат в основе данных перестроек плотности ступеней, необходимо исследование временных зависимостей формирования эшелонов.

В работе методом сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии (СВВ-ОЭМ) детально исследуется процесс эшелонирования атомных ступеней на поверхности Si(111) вызванный адсорбцией атомов золота. Получены зависимости изменения ширины террас и среднего расстояния между эшелонами атомных ступеней от покрытия поверхности атомами золота и времени отжига кристалла. Проведен анализ кинетики процесса эшелонирования атомных ступеней на поверхности Si(111) при субмонослойном осаждении золота. Полученные результаты проанализированы в рамках современных теорий нестабильности поверхности.

---

1 Н. Minoda and K. Yagi, Phys. Rev. B 60, 2715-2719 (1999)

2 A.V. Latyshev, Н. Minoda, Y. Tanishiro, K. Yagi, Appl. Surf. Sci. 130-132 (1998) 60-66.

*Научные руководители – н.с. Д.А. Насимов, асп. С.С. Косолобов*

## **ИЗУЧЕНИЕ ЛАТЕРАЛЬНОГО ПЕРЕНОСА НЕРАВНОВЕСНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ GaAs/AlGaAs**

А.С. Гончаров  
Новосибирский Государственный Университет.

Гетероструктуры GaAs/AlGaAs используются для создания широкого ряда полупроводниковых приборов, в том числе лазеров, светодиодов, транзисторов с высокой подвижностью, фотодетекторов на квантовых ямах, фотокатодов с эффективным отрицательным электронным средством (ОЭС). Фотокатоды с ОЭС являются важнейшим элементом электронно–оптических преобразователей, вакуумно–полупроводниковых фотодиодов и фотоумножителей. Одним из основных параметров фотокатода является его квантовая эффективность, то есть отношение числа эмитированных электронов к числу падающих фотонов. Количество эмитированных в вакуум электронов зависит, как от значения диффузионной длины  $L_D$ , неравновесных электронов, скорости поверхностной рекомбинации  $S$  на границе раздела буферного AlGaAs слоя фотокатода с активным GaAs слоем, так и от качества приготовления поверхности с ОЭС. Для улучшения квантовой эффективности фотокатода необходимо раздельное определение влияния каждой составляющей. Для определения рекомбинационных параметров обычно используется анализ формы спектра фотоотклика. Однако, при толщине активного слоя фотокатода  $\leq L_D$  этим методом невозможно раздельно определить значение диффузионной длины и скорости поверхностной рекомбинации. Для решения этой проблемы мы предлагаем использовать анализ распределения интенсивности фотолюминесценции при точечной засветке активного слоя лазерным излучением.

В докладе представлены результаты расчетов распределения концентрации неравновесных электронов в активном слое фотокатода для различных значений рекомбинационных параметров и толщин активного слоя. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными.

*Научный руководитель – к.ф.-м.н. Г.Э. Шайблер.*

## **МЕХАНИЗМ ПРОВОДИМОСТИ НИТРИДА КРЕМНИЯ В СЛАБЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ: ЭКСПЕРИМЕНТ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Д. В. Гриценко  
Новосибирский государственный университет

Аморфный нитрид кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  является, наряду, с двуокисью кремния одним из ключевых диэлектриков в современных кремниевых



интегральных схемах. Нитрид кремния обладает эффектом памяти, который состоит в способности локализовать инжектированные в него электроны и дырки с гигантским временем удержания носителей в локализованном состоянии (более 10 лет при 400 К). Эффект памяти в нитриде кремния широко используется в электрически перепрограммируемых постоянных запоминающих устройствах (ЭПЗУ), сохраняющих информацию при отключенном питании. В настоящее время разрабатываются ЭПЗУ на эффекте памяти в нитриде кремния гига- и терабитной емкости.

Процессы перепрограммирования ЭПЗУ на нитриде кремния определяются механизмами инжекции зарядов, а время хранения локализованного заряда - механизмом ионизации ловушек. На сегодняшний день изучена, как экспериментально, так и теоретически, проводимость нитрида кремния в сильных электрических полях (более  $4 \cdot 10^6$  В/см). В таких полях проводимость нитрида кремния экспоненциально возрастает с ростом электрического поля и температуры. Было установлено, что ионизация ловушек в нитриде кремния в сильных полях осуществляется по многофононному механизму. Проводимость нитрида кремния в слабых полях (менее  $4 \cdot 10^6$  В/см) имеет слабую (степенную) зависимость от электрического поля, и, кроме того, является нестационарной (уменьшается со временем). Механизм проводимости нитрида кремния в слабых электрических полях не изучен. Целью настоящей работы является экспериментальное и теоретическое исследование механизма проводимости нитрида кремния в слабых электрических полях ( $1-4 \cdot 10^6$  В/см).

В данной работе изучались металл-нитрид-окисел-полупроводник (МНОП) структуры Al-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub>-Si с толщиной SiO<sub>2</sub> 17 Å, и толщиной нитрида кремния 670 Å. Эксперименты проводились на автоматизированной установке управляемой ПК, позволяющей измерять зависимость тока от напряжения и времени, а также получать вольт-фарадные характеристики.

Для теоретических расчетов переноса заряда в диэлектрике использовалась система нелинейных уравнений, включающая уравнения Шокли – Рида, описывающее заполнение ловушек и уравнение Пуассона, учитывающее пространственную неоднородность электрического поля в нитриде кремния. Использовалась биполярная модель, описывающая инжекцию электронов при отрицательном смещении на затворе, и инжекцию дырок при положительном смещении на затворе. Для описания ионизации ловушек использовался многофононный механизм.

В результате эксперимента установлено, что в слабых полях, в диапазоне времен  $4 \cdot 10^{-2}$ -100 сек, ток является нестационарным, спадает со временем по гиперболическому закону  $J \sim 1/t$ . Зависимость тока от приложенного напряжения близка к омической.

Экспериментальные данные не описываются инжекцией на контакте по механизму Фаулера-Нордгейма. Для описания переноса заряда в слабых полях рассмотрена модель прямого захвата инжектированных носителей на ловушки в диэлектрике. Релаксация тока обусловлена накоплением пространственного заряда на ловушках в нитриде кремния вблизи инжектирующего контакта, и, следовательно, понижением приконтактного электрического поля.

Для описания переноса заряда в слабых электрических полях, были использованы, параметры ловушек (оптическая, термическая энергии ловушек, концентрация, сечение захвата, сечение рекомбинации, энергия фонона), определенные из сопоставления эксперимента и расчета в сильных электрических полях. В слабых электрических полях получено качественное согласие экспериментальных данных и теоретических расчетов.

Таким образом, в настоящей работе впервые установлено, что в слабых электрических полях, ток в нитриде кремния является нестационарным. Предложена модель, описывающая основные зависимости, наблюдаемые в эксперименте.

*Научный руководитель введ. инженер - технолог С. С. Шаймеев,  
научный руководитель к.ф.-м.н. Ю. Н. Новиков*

## **МДП-ДИОДЫ, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ К АММИАКУ**

**В.Ю. Грицык, С.С. Назаров**  
Томский государственный университет

Представлены результаты исследований влияния  $\text{NH}_3$  на электрические характеристики структур  $\text{Pd-SiO}_2$ - $n$ - $\text{Si}$ . Диоды получали термическим испарением палладия в окна, вскрытые в пленке  $\text{SiO}_2$ , выращенной на поверхности кремния  $n$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho = (5-7) \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Для исследования влияния газа в измерительную камеру подавали пары аммиака, которые образуются над поверхностью 10%-водного раствора  $\text{NH}_3$ .

При воздействии паров аммиака наблюдается увеличение прямого и обратного токов диодов, их емкости и проводимости. Зависимость отклика диодов на аммиак от напряжения описывается кривыми с максимумом. Наибольший эффект изменения электрических характеристик получен для обратных и прямых токов в интервале  $(-0,5 \div +0,15)\text{В}$  и для емкости и проводимости на переменном сигнале - при смещении на диоде  $U=(0,3-0,4) \text{ В}$ . С повышением температуры наблюдается уменьшение отклика емкости и проводимости в атмосфере аммиака.

Исследовалось также влияние потенциала на барьерном электроде (Pd) на изменение проводимости и емкости диодов со временем. Показано, что при положительном потенциале на Pd-электроде ( $U_{\text{доп}} \gg U_p$ ) ускоряется процесс восстановления, и повышается быстродействие сенсора. Отрицательный потенциал замедляет возвращение параметров сенсора к исходным значениям, которые диод имел до воздействия аммиака.

Можно предположить следующий механизм формирования отклика диодов в атмосфере аммиака. За счет несоответствия параметров решеток кремния и пленки силицидов палладия возникают механические напряжения, при релаксации которых в барьерном электроде появляются микротрещины. Молекулы  $\text{NH}_3$ , адсорбированные на внешней поверхности барьерного электрода, диффундируют сквозь металлическую пленку и достигают границы раздела  $\text{Pd}_2\text{Si-SiO}_2$ . Дипольный момент молекул аммиака  $\mu = 1,46 \text{ D}$ , и, по аналогии с моделью влияния водорода, можно считать, что образовавшийся слой диполей снижает работу выхода электронов из барьерного электрода. В результате уменьшается отрицательный изгиб зон на поверхности  $n\text{-Si}$ , что приводит к росту прямых и обратных токов, емкости и проводимости диодов.

*Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доц. В.М.Калыгина*

## **НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ МЕТОДИКА ПРИГОТОВЛЕНИЯ ГА-СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ $\text{GaAs}(100)$ -(4X2)/C(8X2) ОБРАБОТКОЙ В АТОМАРНОМ ВОДОРОДЕ**

М. А. Дубовичев

Новосибирский государственный университет

Приготовление структурно-упорядоченной поверхности полупроводника является важной задачей физики полупроводников, а также важнейшим технологическим этапом изготовления многих приборов. Изготовление таких поверхностей невозможно без тщательной их очистки от посторонних загрязнений, которые увеличивают шероховатость поверхности. Одним из эффективных способов такой очистки является обработка в атомарном водороде. Целью работы являлось изучение условий очистки и влияния экспозиции в атомарном водороде на стехиометрию и структуру поверхности  $\text{GaAs}(100)$ .

В качестве образцов использовались пленки  $\text{GaAs}(100)$ , выращенные методом жидкофазной эпитаксии. Исходная поверхность образцов была покрыта пленкой собственных оксидов галлия и мышьяка толщиной 0.5 nm. Экспозиция поверхности  $\text{GaAs}(100)$  в атомарном водороде

проводилась в сверхвысоковакуумной камере при  $T=450^{\circ}\text{C}$  и различных дозах экспозиции. Структура поверхности GaAs(100) изучалась методом дифракции медленных электронов (ДМЭ). Состав и стехиометрия поверхности контролировались методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС).

Обработка поверхности GaAs в атомарном водороде при дозе экспонирования  $2 \cdot 10^3 \text{ L}$  приводила к удалению с поверхности кислорода и остаточных углеродосодержащих загрязнений. Подтверждением десорбции кислорода являлось также исчезновение химически сдвинутых компонент РФЭ-линий  $2p \text{ Ga}$  и  $2p \text{ As}$ . Помимо углерода и кислорода, с поверхности была удалена часть атомов мышьяка, что подтверждается уменьшением отношения интенсивностей линий  $3d \text{ As}$  к  $3d \text{ Ga}$ . При дозе экспонирования  $2 \cdot 10^3 \text{ L}$  и температуре образца  $450^{\circ}\text{C}$  поверхность становилась структурно-упорядоченной с реконструкцией  $(4 \times 2)/c(8 \times 2)$ . Известно, что при прогреве в вакууме поверхность становится Ga-стабилизированной лишь при температуре выше  $540^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, с помощью атомарного водорода нам удалось не только очистить поверхность, но и получить на ней Ga-стабилизированную реконструкцию при температуре, практически на  $100^{\circ}\text{C}$  меньшей, чем при обычном прогреве в вакууме.

*Научный руководитель – к.ф.-м.н. Терещенко Олег Евгеньевич*

## **НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ СТРУКТУР ИЗ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

А.Н. Ерохин

Томский государственный университет

Целью работы явилось создание метода измерения параметров структур из полуизолирующего арсенида галлия (SI-GaAs), предназначенных для детекторов ионизирующих излучений. После проведения ряда экспериментальных работ и выяснения характера токопереноса через систему электролит- SI-GaAs была предложена методика, основанная на простой, физически ясной идее. К структуре из полуизолирующего арсенида галлия прикладывают напряжение через прозрачные контакты из электролита. С использованием светодиодов красного и инфракрасного диапазонов освещают локальную область пластины через специальный коллиматор. Светодиодами с различной длиной волны сканируют детекторную структуру на различную глубину. Измеряемый выходной сигнал имитирует сигнал детектора. В нем содержится информация о временах жизни носителей, подвижности

носителей тока и т.д. Путем сканирования детекторной структуры по толщине удается определить зависимость толщины слоя объемного заряда от напряжения.

Данная методика апробирована для двух типов полуизолирующего материала: нелегированного полуизолирующего материала и полуизолятора, полученного компенсацией хрома в результате высокотемпературной диффузии хрома в монокристалл n-типа проводимости. Показано кардинальное различие между этими материалами. Предложенный метод позволяет проводить экспресс-анализ серийного материала при производстве координатных детекторов ионизирующих излучений.

*Научный руководитель – к-т физ.-мат. наук Г.И. Айзенштат*

## **ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА В ЛЕГИРОВАННЫХ КАЛЬЦИЕМ КРИСТАЛЛАХ ТИТАНАТА ВИСМУТА**

М. А. Жныкина, А. Н. Дубровин, С. И. Иткин, Ю. М. Суховерхов  
Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния температуры на динамику фотоиндуцированного поглощения в кристалле  $\text{Vi}_{12}\text{TiO}_{20}$ : Са при его освещении узкополосным некогерентным излучением из красной области спектра ( $\lambda = 660$  нм) и на релаксацию наведенных изменений в темновых условиях.

Исследуемый образец имел толщину  $d = 1,5$  мм и оптически полированные грани (100). Динамика изменений коэффициента поглощения света  $\Delta\alpha(t)$  изучалась при засветке кристалла излучением светодиода с интенсивностью  $38$  мВт/см<sup>2</sup> при температурах  $25^{\circ}$ ,  $50^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$  и  $100^{\circ}$  С. Засветка проводилась в течение интервала времени  $1800$ - $3600$  с, необходимого для достижения стационарного уровня изменений в поглощении. Для изучения процесса релаксации фотоиндуцированного поглощения кристалл подвергался пяти циклам облучения. После каждого из таких циклов, в течение которого изменения в поглощении выходили на стационарный уровень, время выдержки в темноте увеличивалось в 2 раза. Стационарный уровень изменений в поглощении кристалла уменьшался с ростом температуры (от  $0.36$  см<sup>-1</sup> при температуре  $25^{\circ}$ С до  $0.22$  см<sup>-1</sup> при температуре  $100^{\circ}$ С). Времена достижения стационарного уровня и релаксации кристалла к исходному состоянию сокращались с увеличением температуры от нескольких часов при комнатной температуре до  $\sim 600$  с при температуре  $100^{\circ}$ С. Установлено, что скорость роста

фотоиндуцированного поглощения на начальном участке увеличивается с температурой по закону Аррениуса.

Для анализа температурной зависимости коэффициента поглощения использовалась модель переноса зарядов, включающая в рассмотрение донорные и ловушечные центры, каждый из которых характеризуется дискретной системой энергетических уровней, между которыми возможны внутрицентровые переходы. Предполагалось наличие дырочной проводимости в темновых условиях и фотопроводимости электронного типа.

Настоящая работа выполнялась в рамках совместного Белорусско-Российского проекта при поддержке РФФИ (проект № 02-02-81044).

*Научные руководители – д-р физ.-мат. наук, проф. С.М.Шандаров и, канд. физ.-мат. наук, доц. А.Е.Мандель*

## **АДСОРБЦИОННЫЕ СОСТОЯНИЯ ЦЕЗИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ**

Журавлёв Андрей Григорьевич  
Новосибирский государственный университет

Вопросы о микроскопической природе электронных состояний и механизмах формирования изгиба зон на поверхности полупроводников с адсорбированными слоями металлов исследуются и обсуждаются в литературе уже несколько десятилетий, однако ясные и убедительные ответы не получены даже для систем, которые важны для применений и считаются модельными, например, такой как Cs/GaAs. Большая часть ранних исследований поверхностных состояний, возникающих при адсорбции щелочных металлов, проводилась на неполярной грани GaAs(110), которую легко получить сколом в вакууме. Эта поверхность имеет простую структуру (1×1), и не претерпевает сложных сверхструктурных перестроек. В отличие от GaAs(110), на полярной грани GaAs(100) наблюдаются различные сверхструктурные перестройки, поэтому можно ожидать, что механизмы взаимодействия адатомов с полупроводником и спектр электронных поверхностных состояний на этой грани существенно сложнее.

В данной работе в экспериментах по адсорбции цезия на Ga-стабилизированной поверхности GaAs(100) и последующей термодесорбции впервые удалось экспериментально наблюдать различные адсорбционные состояния. Установлено, что при комнатной температуре происходит неравновесное заполнение этих состояний. Эксперименты проводились с помощью методики спектроскопии фотоотражения, которая обеспечивает наиболее высокую точность измерения изгиба зон  $\varphi_s$  и его

относительных изменений. При нанесении цезия обнаружено немонотонное изменение  $\varphi_S(\theta)$  в виде нескольких максимумов и минимумов, свидетельствующее о последовательном заполнении метастабильных адсорбционных состояний вблизи середины запрещенной зоны. В зависимости  $\varphi_S(\theta)$ , измеренной при адсорбции цезия и последующем прогреве обнаружен гистерезис, который проявляется в том, что одному и тому же покрытию  $\theta$  при адсорбции соответствует значительно большее значение изгиба зон, чем при прогреве. Наблюдение гистерезиса означает, что при прогреве наряду с частичной десорбцией цезия происходит перестройка структуры и электронного спектра поверхности.

*Научный руководитель: д.ф.-м.н. В. Л. Альперович.*

## **О ВОЗМОЖНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК АТОМОВ МАРГАНЦА В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ**

С. Исомов

Самаркандский государственный университет им. А. Навои

В последнем десятилетии прошлого столетия появился интерес к созданию структур с размерами элементов в области нанометров и большой плотностью таких элементов  $N \sim 10^{11} \div 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Этот интерес в основном связан с обнаружением кванто-размерных эффектов. Такие структуры в основном реализуются в гетероструктурах. В них с пространственным ограничением носителей зарядов во всех трех измерениях реализуются квантовые точки как предельный случай размерного квантования в полупроводниках. Гетероструктуры с кванто-размерными элементами в настоящее время получают главным образом молекулярно-лучевой эпитаксией. Наибольшие успехи были получены при создании квантово-размерных систем на полупроводниках соединений  $A^{III}B^V$  и на твердых растворах Si-Ge.

В последнее время интенсивно проводится работы по синтезу наноразмерных элементов в имплантированных полупроводниках. В связи с этим в данном сообщении рассматриваются эффекты самоорганизации и формирование квантовых точек в монокристаллическом кремнии, легированного атомами марганца методом ионной имплантации.

Для случая Si<B,Mn> наиболее подходящей методикой определения наличия квантовых точек является исследования спектральной зависимости фотопроводимости этих образцов до и после предварительного заселения дискретных состояний, а также температурной зависимости фотопроводимости.

Выше указанная методика позволило определить сечения фотоионизации центров ответственных за гашения фотопроводимости.

Спектральные и температурные зависимости фотопроводимости сильно компенсированных образцов Si<B,Mn> проводились по стандартной методике.

На основе полученных результатов сделана следующие выводы:

1. Наблюдаемый эффект анально глубокое гашения фотопроводимости при наличии инфракрасном и температурном воздействии нельзя отнести к образованию локальных центров, связанными одиночными атомами марганца.
2. Можно предположить, что столь глубокое гашения фотопроводимости связано с наличием квантовых точек, образуемых атомами марганца.

*Научный руководитель к.ф.-м.н., доц. Э. У. Арзуюлов*

## **КООПЕРАТИВНОЕ ТУШЕНИЕ ДОНОРОВ ПАРАМИ АКЦЕПТОРОВ В АКТИВИРОВАННЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ: РЕШЕНИЕ МИКРОСКОПИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ**

И. В. Кочубей

Кубанский государственный университет

Указанные кооперативные процессы экспериментально наблюдались в Исследовательском центре лазерных материалов и технологий ИОФ РАН и вносят важные штрихи в картину генерации излучения. Нет сомнения, что дальнейший прогресс лазеростроения связан, в частности, с теоретическим овладением этими процессами в активной среде [1].

Мы рассматривали релаксацию донорного возбуждения для донора в узле с радиус-вектором  $\mathbf{r}$ . Кинетическое уравнение для этого процесса:

$$\frac{dn_D(\mathbf{r})}{dt} = -A_D n_D(\mathbf{r}) - n_D(\mathbf{r}) \sum_{\mathbf{r}', \mathbf{r}''} W_{DA}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \mathbf{r}'') p_A(\mathbf{r}') p_A(\mathbf{r}''),$$

где  $n_D(\mathbf{r})$  – вероятность обнаружить возбужденный донор в узле  $\mathbf{r}$ ,  $A_D = 1/\tau_D$  – скорость внутрицентральной донорной релаксации,  $W_{DA}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \mathbf{r}'')$  – вероятность кооперативного тушения донора в узле  $\mathbf{r}$  парой акцепторов в узлах  $\mathbf{r}'$  и  $\mathbf{r}''$ ,  $p_A(\mathbf{r}')$ ,  $p_A(\mathbf{r}'')$  – операторы проектирования на узлы  $\mathbf{r}'$  и  $\mathbf{r}''$ .

Выполнив интегрирование и проделав все промежуточные преобразования, которые занимают несколько страниц, мы получили окончательно:

$$n_D(t) = n_D(0) \exp\left(-A_D t - \frac{4\pi}{3} N_A^2 \sqrt{C_1 C_2} \sqrt{t}\right),$$



где  $N_A$  – концентрация акцепторов,  $C_1, C_2$  – микроскопические константы донор-акцепторного взаимодействия.

Выводы. Итак, кинетика распада донорной подсистемы примесных центров при кооперативном тушении доноров парами акцепторов будет ферстеровской, однако функция потерь, сохраняя пропорциональность  $t^{1/2}$ , оказывается пропорциональной не концентрации акцепторов, а ее квадрату. Тот факт, что скорость каскадного тушения доноров парами акцепторов пропорциональна квадрату концентрации акцепторов, хорошо известен и неоднократно наблюдался в эксперименте. Проведенное нами исследование показывает, что и при кооперативном тушении доноров имеет место пропорциональность скорости тушения квадрату концентрации.

Глубочайшая благодарность – руководителям за неоценимую помощь.

- 
1. Basiev T. T., Doroshenko M. E., Osiko V. V. et al. // ASSL-2001: Technical Digest. 2001 стр.93–95.

*Научные руководители – канд. физ.-мат. наук, доц. Е. Н. Тумаев, д-р физ.-мат. наук, проф., член-корреспондент АИИ РФ А. Г. Аванесов*

## **ИЗМЕНЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА И ПРОЗРАЧНОСТИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО БАРЬЕРА МОНОКРИСТАЛЛОВ W(100) И GaAs(110) ПРИ УДАЛЕНИИ ЕСТЕСТВЕННОГО ОКИСЛА С ПОВЕРХНОСТИ**

Р.С.Кузнецов

Восточно-Сибирский государственный технологический университет

Работа выхода реальной поверхности твердых тел обычно экспериментально фиксируется методами термо-, фото-, и автоэлектронной эмиссии. Но необходимо отметить, что модель свободных электронов Зоммерфельда, на которой основана интерпретация большинства экспериментальных данных, не вполне применима для объяснения некоторых особенностей вторичной электронной эмиссии и изменения работы выхода большого класса эмиттерных материалов.

Однако существует метод измерения работы выхода твердых тел, позволяющий исключить большинство проблем, возникающих при последующей интерпретации экспериментальных результатов – метод задерживающего потенциала Андерсона [1]. Поскольку данный метод позволяет измерять величину изменения работы выхода различных твердых тел, то его использование представляет значительный теоретический и практический интерес.

Суть метода заключается в том, что коллимированный пучок медленных ( $E_p=0-10$  эВ) моноэнергетических электронов направляется нормально на поверхность исследуемого образца. Часть электронов проходит в образец, а часть – отражается от его поверхности и улавливается цилиндром Фарадея. Для исследуемого материала измеряется вольтамперная характеристика (ВАХ) тока через образец от энергии электронов. Затем производится замена образца (коллектора) и повторное измерение ВАХ. По смещению положения ВАХ на оси энергии электронов определяется изменение работы выхода образца относительно эталонного.

Целью данной работы является демонстрация эффективности использования метода задерживающего потенциала для регистрации изменения работы выхода и прозрачности поверхностного потенциального барьера твердых тел, поверхность которых покрыта субмонослоем адсорбата, на примере монокристаллов W(100) и GaAs(110) при поэтапной очистке поверхностей от естественного окисла.

---

1. Anderson P.A. The work function of lithium. Phys.Rev., 1949, v.75, No.8, p.1205-1208.

*Научный руководитель – к.ф.-м.н., доц. Ю. И. Асалханов.*

## **КОМПОЗИЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ТИПА «ЯДРО-ОБОЛОЧКА» НА ОСНОВЕ МИКРОКРИСТАЛЛОВ ГАЛОГЕНИДОВ СЕРЕБРА**

Ю. В. Лапшина, Н. В. Гаврилова  
Кемеровский государственный университет

Микрокристаллы галогенидов серебра (МК AgHal) сложной структуры типа «ядро-оболочка» (ЯО) и «двойная структура» (ДС) обладают повышенной эффективностью образования скрытого изображения.

Технология создания композиционных систем достаточно сложна. Вначале методом контролируемой двухструйной кристаллизации (КДК) синтезировались эмульсии с МК  $AgBr_xI_{1-x}$  заданной формы, размера и состава. В работе использовались МК октаэдрического габитуса (111) со средним размером  $d=0.4-1.0$  мкм. Использование МК AgHal (111) в качестве ядерных обусловлено их повышенной вуалестойкостью и способностью к эффективной спонтанной сенсibilизации (СС).

На второй стадии создания композиционных систем ядерные МК подвергались химической сенсibilизации (ХС) в режиме спонтанного созревания (термическое выдерживание эмульсии в отсутствии фотографически активных добавок). Показано, что в процессе СС уровень светочувствительности МК AgHal (111) повышается в 3-4 раза по

сравнению с примитивной эмульсией. МК ядрового типа с различной степенью ХС далее использовались для создания сложных систем типа ЯО.

Наращивание оболочки AgBr проводили двумя способами: методом физического созревания (ФС) мелкозернистой эмульсии и методом КДК. В первом случае происходит оствальдовское созревание, при котором кристаллы мелкозернистой эмульсии растворяются, образуя равнотолщинные оболочки на ядровых МК (толщина оболочек составляет  $\delta=0,03-0,11$  мкм). Показано, что при этом формируется четкая октаэдрическая огранка поверхности МК ЯО. Использование метода КДК имеет ряд особенностей. Показано, что более эффективное наращивание происходит при малой скорости подачи реагентов ( $W=0.4$  мл/мин), при низких температурах ( $T^{\circ}=40-43$  С $^{\circ}$ ), в отсутствие растворителей и при постепенном изменении величины рВг (от 3.0 до 1.6) в ходе синтеза.

Поверхность оболочки систем типа  $AgBr_xI_{1-x} / AgBr$  в дальнейшем подвергалась различной степени ХС. Фотографические слои с МК ЯО подвергались экспонированию и последующей химико-фотографической обработке в поверхностном и глубинном проявителях. Результаты исследований показали, что чем выше степень ХС ядра, тем ниже поверхностная чувствительность оболочки. Таким образом, захват фотоиндуцированных электронов происходит на границе раздела ядра и оболочки.

*Научный руководитель – к.х.н., доцент Н. С. Звиденцова*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛОВ ГРАНАТА ПОДВЕРГНУТЫХ ДЕЙСТВИЮ РАДИАЦИИ**

Д.Ф. Мажидов

Самаркандского Государственного Университета им.А.Навои

Известно, что исследования теплопроводности и оптических спектров поглощения и люминесценции являются хорошими зондами для изучения процессов дефектообразования в кристаллах. Нами были изучены оптические и теплофизические свойства кристаллов иттрий алюминиевого граната (ИАГ)- $Y_3Al_5O_{12}$ , активированные ионами редких земель ( $Ti^{3+}$ ).

Оптические свойства ИАГ- $Ti^{3+}$  спектров поглощения и люминесценции были изучены до и после облучения  $\gamma$  - лучами. После облучения дозой  $10^9$  Р ( $T_{обж}=300$  К) активированные кристаллы приобретали заметную окраску, однако, облучение при 77 К приводило к ослаблению окраски. В кристаллах ИАГ-Dy и ИАГ-Tb возникают новые полосы дополнительного поглощения при 260 нм и 310 нм , которые

обнаруживают дозную зависимость. Так как полоса 260 нм появляется в кристаллах как содержащих, так и номинально не содержащих редкие земли, дефект можно связать с узлом, не содержащим активатора и следовательно, этот дефект сопутствует внедрению редкой земли.

Проведенные исследования радиолюминесценции показали, что интегральная интенсивность свечения исследованных кристаллов при 77 К падает, однако изменение в положении спектральных линий в группах не происходит. На возможное образование дефектов, связанных с нарушением однородности основной матрицы при введении ионов редких земель указывают исследования теплопроводности этих материалов в интервале 77-400 К.

Основным механизмом в осуществлении теплопроводности, по нашему мнению, является фонон-фононное взаимодействие. В легированных кристаллах возможны дополнительные механизмы: рассеяния на точечных дефектах рэлеевского типа и на уровнях парамагнитных ионов примеси, расщепленных кристаллическим полем решетки.

Поскольку метод термического высвечивания является одним из основных при изучении локальных центров в кристаллах, нами были зарегистрированы в ИАГ- $\text{Tr}^{3+}$  пики термовысвечивания в различных температурных областях в зависимости от введенного активатора. Это позволило указать на то, что в кристаллах ИАГ- $\text{Tr}^{3+}$  образуются локальные центры захвата носителей заряда в результате облучения гамма лучами. Температура отжига до 500-600 К приводит к разрушению этих центров, на что указывает отсутствие термовысвечивания оттащенных кристаллов. Спектры термолюминесценции всех исследованных кристаллов аналогичны спектру радио и фотолюминесценции ИАГ- $\text{Tr}^{3+}$ .

*Руководители: доц. Юсупов А.А, доц. Жабборов И.Ж.*

## **РАДИАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ $\text{Nd}^{3+}$**

Д.Ф. Мажидов

Самаркандского Государственного Университета им.А.Навои

Кристаллы иттрий алюминиевого граната (ИАГ) -  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , активированные ионами редких земель, находят широкое применение в оптических квантовых генераторах (ОКГ) в качестве рабочих тел, в квантовых счетчиках для регистрации и счета отдельных световых излучений, дозиметрах и т.д. Все это стало возможным благодаря высокой твердости, прозрачности в широком оптическом диапазоне, возможности введения в решетку граната трехвалентных ионов редких земель

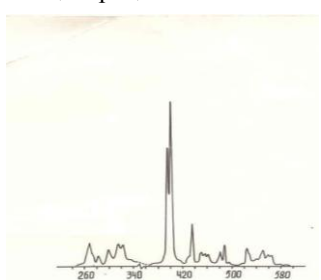
различной концентрации и генерации, в частности, кристаллов  $Y_3Al_5O_{12}$  - на длине волны 1,06 микрон, что находится в области прозрачности земной атмосферы.

Нами были изучены спектры поглощения радио- и фотолюминесценции кристаллов ИАГ-ND<sup>3+</sup> с различной концентрацией. В спектре поглощения были обнаружены линии, соответствующие энергетическим переходам ионов, а в спектре радио- и фотолюминесценции обнаружены линии свечения, длины волн которых были идентифицированы на основе положения как переходы с вышележащих энергетических уровней на основной уровень.

Хотя в литературе и имеется достаточно данных о механизмах радио- и фотолюминесценции кристаллов, однако, все еще остаются вопросы, ответы на которые требуют соответствующих анализов.

Представляет интерес преобразование энергий ядерных излучений в веществе: каким образом энергия излучения порядка 1,25 МэВ преобразуется в энергию возбуждения, локализованную у активатора.

Сравнение спектров радио- и фотолюминесценции кристаллов показало идентичность в положении спектральных линий, однако, наблюдается перераспределение в интенсивности линий, а также концентрационная зависимость свечения ИАГ-ND<sup>3+</sup>.



Свечения в видимой области при оптическом и  $\gamma$ -возбуждении можно отнести за счет оптических переходов из высоко лежащего уровня S на уровни  $F_{5/2}^4, H_{11/2}^2, G_{9/2}^2$ . Гамма-лучи видимо возбуждают уровни T и U с последующей релаксацией на уровни S, и уже с последнего, идет излучательный переход на основной уровень. На основе полученных данных по спектрам фотолюминесценции ИАГ-ND<sup>3+</sup> делается предположение об использовании интенсивности линий свечения 402 нм для создания ОКГ в видимой области спектра.

*Руководитель: доц. Юсупов А.А.*

## **СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СУЛЬФИДОВ $CO_xMN_{1-x}S$**

Е.А.Мальцева

Красноярский государственный университет

В данной работе синтезированы поликристаллические образцы сульфидов  $\text{Co}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  ( $0 < x \leq 0.4$ ), исследованы их структурные и электрические свойства.

Катион-замещенные твердые растворы  $\text{Co}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  синтезированы из высокочистых элементов кобальта, марганца и серы (чистотой 99,999%) в откачанных кварцевых ампулах при температуре  $960^\circ\text{C}$  в течение 10 дней.

Рентгеноструктурный анализ образцов проведен на дифрактометре ДРОН – 2.0 в монохроматическом  $\text{CuK}_\alpha$  - излучении при 300 К. Согласно данным рентгеноструктурного анализа образцы  $\text{Co}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  с  $0 < x \leq 0.3$  имеют ГЦК решетку типа NaCl, характерную для  $\alpha\text{-MnS}$ . С увеличением степени катионного замещения  $x$  параметр решетки линейно уменьшается от  $\sim 5,222 \text{ \AA}$  ( $x = 0$ ) до  $\sim 5,204 \text{ \AA}$  ( $x = 0.3$ ), что свидетельствует об образовании твердых растворов. На рентгенограмме образца  $x = 0.4$  наблюдается дополнительная линия (102), относящаяся к гексагональной никель – арсенидной структуре  $\text{CoS}$ .

Измерения удельного электросопротивления были проведены четырехзондовым компенсационным методом на постоянном токе в интервале температур  $77 - 300 \text{ K}$  в нулевом магнитном поле. Для твердых растворов  $x \leq 0.3$  найден полупроводниковый тип проводимости с изменением удельного электросопротивления от  $10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{см}$  ( $x=0$ ) до  $10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  ( $x=0.3$ ) при  $T = 80 \text{ K}$ . Следует заметить, что характер температурной зависимости удельного электросопротивления для малых концентраций кобальта с  $0.05 < x \leq 0.2$  аналогичен зависимости  $\lg\rho(1/T)$  для нестехиометричных сульфидов марганца  $\alpha - \text{Mn}_x\text{S}$  при изменении концентрации  $x$ . Возрастание концентрации кобальта в сульфидах от  $x \sim 0.2$  до  $x \sim 0.4$  приводит к существенному уменьшению удельного электросопротивления на  $\sim 12$  порядков при  $80 \text{ K}$ . Для сульфидов  $\text{Co}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$  с  $x = 0.4$  найден металлический тип проводимости с величиной удельного электросопротивления  $\rho \sim 0,016 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  при  $T = 80 \text{ K}$ .

Таким образом, в работе синтезированы новые сульфидные соединения  $\text{Co}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ , в которых реализуется концентрационный переход металл-диэлектрик [1] и которые являются перспективными для изучения эффекта колоссального магнитосопротивления.

---

[1] Мотт Н.Ф. Переходы металл-изолятор. – М.: Наука, 1979. – 344 с.

## **НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕЖПРИМЕСНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЕРЫ С ЦИНКОМ В КРЕМНИИ**

С. Махмудов

Самаркандский государственный университет

Исследованию подвергались последовательно легированные образцы кремния серой при 1250°C, а затем при 1250°C цинком. Результаты исследований показали, что параметры образцов Si<B,S,Zn> оказались сравнимыми с параметрами Si<B,S>. Такое совпадение между удельными сопротивлениями образцов Si<B,S,Zn> и Si<B,S> может быть интерпретировано либо отсутствием взаимодействия между собой и цинком в кремнии, или нестабильностью их комплексов при данных температурах отжига. Для выяснения этого вопроса образцы Si<B,S,Zn>, последовательно легированные серой и цинком при 1250°C и контрольные образцы Si<B,S> подверглись последующему термоотжигу в интервале температур 975-1200°C в течении 0,5 часов. Параметры образцов Si<B,S> при T=1000°C приобретают р-тип с  $\rho \sim 18$  Ом-см, а при дальнейшем увеличении температуры отжига  $\rho$  образцов растет и при T=1050°C меняется тип проводимости. Эти данные можно объяснить восстановлением концентрации электроактивных атомов серы в кремнии с ростом температуры, уже превышающей электронейтральное состояние.

При температуре отжига 1100°C образцы Si<B,S,Zn> практически приобретали параметры исходного материала. Дальнейшее увеличение температуры отжига приводило вновь к повышению  $\rho$  образцов. Такая необычная температурная зависимость изменения  $\rho$  образцов Si<B,S,Zn> относительно  $\rho$  контрольных образцов Si<B,S> может быть связано с образованием дополнительных акцепторных центров в объеме образцов Si<B,S,Zn> в процессе последующих термоотжигов или образованием электронейтральных химически связанных комплексов серы с цинком.

Что касается захвата междоузельных атомов цинка вакансиями, образующимися при распаде неравновесной части серы в процессе повторного отжига, то это тоже исключается, так как из анализа изменения  $\rho$  образцов Si<B,S> от температуры повторного отжига следует, что скорость распада твердого раствора Si-S по мере повышения температуры монотонно увеличивается. Такая зависимость, в свою очередь, должна бы сопровождаться монотонным увеличением концентрации акцепторных центров и в соответствии с этим, привести к монотонному изменению  $\rho$  образцов Si<B,S,Zn> с температурой отжига. Поэтому остается лишь предположить, что при T=1100°C происходит интенсивное образование электронейтральных комплексов между атомами цинка и серы в кремнии. Эти данные позволяют считать, что действительно только между Zn и S образуются электронейтральные комплексы.

*Научный руководитель к.ф.-м.н., доц. Т.У.Тошбоев*

# КИНЕТИКА ФОТОПРОВОДИМОСТИ В АНСАМБЛЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ge В Si

А.В. Перегоедов  
Новосибирский государственный университет

Исследовано влияние освещения, вызывающего межзонные переходы, на прыжковую проводимость дырок по плотному массиву квантовых точек (КТ) Ge в Si. Изучалась кинетика фотопроводимости при включении и выключении света в зависимости от интенсивности света и зарядового состояния КТ. Измерения проводились при температуре 20 - 4.2 К на образцах с КТ Ge, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, а также на тестовых образцах без квантовых точек. Германиевый слой толщиной 8 монослоев вводился в середину 400 нм слоя Si при температуре 300 °С. Среднее количество дырок в квантовых точках варьировалось в интервале от 0,5 до 6 изменением концентрации бора в  $\delta$ -легированном слое Si. Для освещения образца использовался GaAs светодиод с максимумом излучения на длине волны 0,9 мкм.

Обнаружено, что фотопроводимость имеет как положительный, так и отрицательный знак в зависимости от исходного заполнения точек дырками. Как при включении освещения, так и при его выключении наблюдалась аномально медленная кинетика фотопроводимости, причем после выключения света даже через времена  $\sim 10000$  сек система не возвращалась в исходное состояние (эффект остаточной фотопроводимости). Был замечен эффект ускорения кинетики фотопроводимости при повторном включении света из состояния с остаточной фотопроводимостью. В образцах без квантовых точек описанных явлений не наблюдалось.

Для объяснения наблюдаемых экспериментальных данных предложена модель, основанная на пространственном разделении неравновесных электронов и дырок из-за формирования потенциального барьера положительно заряженными точками. Изменение высоты барьера при освещении за счет рекомбинации неравновесных электронов с равновесными дырками в КТ и зависимость сечения захвата дырок в КТ от степени их заполнения приводит к неэкспоненциальной кинетике фотопроводимости. Изменение знака фотопроводимости в зависимости от исходного числа дырок в ансамбле КТ объяснено осциллирующим характером прыжковой проводимости. Ускорение релаксации проводимости при повторном включении света обусловлено эффектом выравнивания высот потенциальных барьеров, создаваемых заряженными квантовыми точками за счет захвата в них фотодырок в процессе освещения и релаксации.



*Научный руководитель - к. ф.-м. н., с. н. с. Н. П. Степина*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЕВ GaAs И ТВЕРДОГО РАСТВОРА $Al_xGa_{1-x}As$ ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

И.В. Пономарев, О.Г. Шмаков  
Томский государственный университет

Актуальной задачей является создание эффективных полупроводниковых детекторов ионизирующих излучений (альфа- и бета-частиц, гамма-квантов и рентгеновского излучения), в частности, для медицинских рентгеновских камер.

В работе проводились исследования электрофизических параметров слоев арсенида галлия и твердого раствора  $Al_xGa_{1-x}As$  ( $x=0.1$  и  $0.3$ ), предназначенных для изготовления детекторных структур. Переход к твердому раствору  $Al_xGa_{1-x}As$  является попыткой увеличения удельного сопротивления за счет увеличения ширины запрещенной зоны полупроводника, понижения темнового тока и шумовых свойств детекторной структуры.

Нелегированные, легированные оловом и легированные одновременно оловом и хромом слои были выращены методом жидкофазной эпитаксии на подложках из n-GaAs и имели толщину 25-50 мкм. При этом использовались две температуры начала роста слоев: 965 и 865<sup>0</sup>С. Состав слоев твердого раствора  $Al_xGa_{1-x}As$  оценивался методом рентгеноспектрального микроанализа.

Нелегированные слои GaAs и  $Al_xGa_{1-x}As$ , выращенные при высоких температурах, имели р-тип проводимости. Слои, выращенные при температурах ниже 865<sup>0</sup>С были n-типа. При легировании мелкой донорной примесью олова были получены слои с концентрацией электронов  $2 \cdot 10^{16} \div 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Для получения высокоомных активных областей детекторов была проведена компенсация слоев глубокой акцепторной примесью хрома. Компенсация осуществлялась либо путем сложного легирования слоя в процессе роста, либо посредством диффузии атомов хрома в выращенный слой твердого раствора. Исследованы профили распределения удельного сопротивления в полученных слоях.

На основе выращенных слоев были изготовлены детекторные структуры, измерены их электрические характеристики. Проведены измерения чувствительности детекторов к альфа-частицам и гамма-квантам.

*Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. В.П. Гермогенов*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАВЛЕНИЯ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СВЕРХТОНКИХ ПЛЕНОК АМОРФНОГО ГЕРМАНИЯ МЕТОДОМ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ IN-SITU

В.Ю. Прокопьев

Новосибирский государственный университет

Современные технические потребности заставляют исследователей и разработчиков переходить к нанометровым технологиям. Такой переход требует дополнительных знаний о физике процессов в системах с пониженной размерностью. В данной работе исследуются процессы плавления, рекристаллизации и затвердевания сверхтонких (не толще 8 нм) аморфных пленок германия.

Основным методом исследования выбрана лазерная эллипсометрия на длине волны 632,8 нм с высоким пространственным (до 50 мкм) и временным (до 1 мс) разрешением. Этот метод основан на анализе изменения поляризации света при отражении от исследуемого образца и является наиболее чувствительным к изменению оптических свойств материалов. Процессы плавления и кристаллизации сопровождаются скачками показателя преломления и поглощения, следовательно, легко регистрируется по эллипсометрическим данным. Высокое пространственное разрешение позволяет исследовать образцы небольших размеров (1x3 мм<sup>2</sup>), уходя при этом от нежелательных краевых эффектов. При малом времени измерения возможно исследование динамики процессов.

Исследуемые пленки германия помещались между слоями диоксида кремния, толщины которых были оптимизированы для обеспечения наибольшей чувствительности эллипсометра. Наличие верхнего слоя диоксида кремния предотвращало окисление германия, что позволило проводить эксперименты с высокотемпературным нагревом на воздухе. Нагреватель изготавливался из полосок низкоомного кремния, и обеспечивал прогревы до 1000°C. В процессе нагрева постоянно производился контроль температуры поверхности образца посредством термопары. Для обеспечения большей точности эксперимента были проведены калибровки термопары и тестовые измерения на образцах чистого кремния. Для дополнительного контроля результатов отжига образцов привлекались методы спектральной эллипсометрии и комбинационного рассеяния. Эти методы дают однозначную информацию о составе и структуре образцов.

В результате исследования зарегистрировано понижение температуры плавления тонких пленок аморфного германия с 930°C до 700°C, а также наблюдалось переохлаждение жидкой фазы примерно на 100°C. Получены

температурные зависимости оптических параметров аморфного германия в диапазоне температур от 0°C до 500°C. Попутно в образцах изучены процессы, сопровождающие плавление и кристаллизацию пленок германия. Экспериментально показано, что при многократном прогреве образцов до температуры 1000°C происходит полное окисление германия.

*Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук В. А. Швец*

## **ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ GAN КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В МАТРИЦЕ AlN**

Ри Д. Д.

Новосибирский Государственный Университет

В настоящей работе проводилось исследование фотолюминесценции (ФЛ) структур с самоорганизованными КТ GaN/AlN, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

Кристаллическая решетка GaN, как правило, имеет гексагональную структуру (вюрцит), что приводит к появлению внутреннего электрического поля вдоль оси (0001). Большое электрическое поле порядка МВ/см обусловлено различием поляризации (спонтанной и пьезоэлектрической) между барьером и материалом КТ. Предполагается, что внутреннее электрическое поле в структурах КТ GaN/AlN является причиной зависимости энергии излучения ФЛ от размера КТ и от мощности лазерного возбуждения [1], а также огромного энергетического сдвига ФЛ со временем после возбуждения лазерным импульсом [2].

Вторая гармоника  $Ag^+$  лазера с длиной волны около 244 нм ( $E_1 = 5.08$  эВ) и вторая гармоника перестраиваемого Ti:Sapphire лазера с длиной волны, меняющейся от 353 до 361 нм ( $E_1 = 3.432-3.502$  эВ) были использованы для возбуждения стационарной ФЛ. Импульсный  $N_2$  лазер применялся для измерений ФЛ с временным разрешением. Отметим, что энергия фотона всех перечисленных лазеров была меньше ширины запрещенной зоны AlN (6.2 эВ).

При температуре  $T = 10$  К и энергии возбуждающего света  $E_1 = 5.08$  эВ спектр ФЛ имел максимум возле 2.8 эВ, что примерно на 0.5 эВ меньше ширины запрещенной зоны GaN (3.47 эВ). Было установлено, что спектральная форма, интенсивность, длина волны остаются практически без изменений в области температур 10 - 300 К. В то время как спектр ФЛ сдвигался в красную область с уменьшением мощности лазера и со временем после возбуждения лазерным импульсом. Этот сдвиг может быть объяснен как изменение относительных интенсивностей отдельных полос ФЛ. Подобные полосы ФЛ не были найдены для пленок GaN и AlN.

Предполагается, что данная структура спектра связана с дефектами, возникающими в процессе роста GaN КТ.

- 
1. F. Widmann et al. Phys.Rev.B58, R15989 (1998).
  2. T.Bretagnon et al. submitted to Phys.Rev.B.

*Научный руководитель - к.ф.-м. н., Журавлев К. С.*

## **К ТЕОРИИ ПОГЛОЩЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

Ф.А.Саттаров

Самаркандский государственный университет

В последние годы интенсивно исследуются акустические свойства полупроводников. Такой интерес обусловлен тем, что акустические свойства могут давать ценные информации об электронных процессах, протекающих в таких материалах.

В работе [1] исследовано распространение звука промежуточных частот в пьезоэлектрических полупроводниках. Звук промежуточных частот назван такой звук, для которого выполняются условия

$$ql \ll 1 \text{ и } \omega\tau_\varepsilon \gg 1 \quad (1)$$

где,  $q$ ,  $\omega$  – волновой вектор и частота звука,  $l$  – длина свободного пробега носителей заряда,  $\tau_\varepsilon$  - время релаксации энергии.

исследования показывают [1], что при выполнении условий (1) происходит разогрев электронов эффективным электрическим полем, созданным звуком, вследствие чего функция распределения становится существенно неравновесной. Если условие  $ql \ll 1$  позволяет описывать распространение звука в полупроводниках в рамках макроскопической теории, то условие  $\omega\tau_\varepsilon \gg 1$  заставляет нас рассмотреть этот вопрос микроскопически, т.е. с помощью кинетического уравнения Больцмана.

В данной работе решением кинетического уравнения найдена переменная добавка к равновесной функции распределения. С помощью такой добавки построен закон дисперсии звуковых волн. Из этого закона как мнимой части волнового вектора звука найден коэффициент поглощения, который существенно отличается от формулы Уайта [2] своим частотным зависимостям. Показано, что найденный коэффициент при некоторых механизмах рассеяния зависит от частоты звука в дробных степенях.

- 
1. Пардаев А. Автореферат кандидатской диссертации. – Ташкент: 1974.
  2. White D. Phys. Rev., 149, 628, 1966.

## О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СЕРЫ С КАДМИЕМ В КРЕМНИИ

Д.Синдаров

Самаркандский государственный университет

Для исследований особенностей межпримесного взаимодействия серы с кадмием в кремнии образцы были легированны серой при  $T=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а затем последовательно легировали кадмием в интервале температур  $1000\div 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при этом нами также отжигались образцы  $Si\langle B,S\rangle$  и  $Si\langle B\rangle$ , легированные лишь кадмием, чтобы сравнивать параметры этих образцов. Из результатов исследований видно, что в контрольных образцах  $Si\langle B\rangle$ , легированных  $Cd$  в интервале температур  $600\text{--}1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , практически не существенно меняется удельное сопротивление ( $\rho$ ) по отношению к исходному материалу, то есть образец остается  $p$ -типа с удельным сопротивлением  $\rho=10\text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Эти данные показывают исключительно акцепторный характер кадмия в кремнии при низкой концентрации его электроактивных атомов, что подтверждает литературные данные. Образцы  $Si\langle B,S\rangle$ , легированные кадмием, и оттоженные образцы  $Si\langle B,S\rangle$  при  $T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$  имеют практически одинаковые свойства и  $p$ -тип проводимости с удельным сопротивлением  $\rho=10\div 12\text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Такая ситуация сохраняется до температуры отжига  $T=1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Эти данные могут быть объяснены распадом электроактивных атомов серы и низкой концентрацией электроактивных атомов кадмия в кремнии. При  $720\text{ }^{\circ}\text{C}$  происходит существенное изменение. Образцы  $Si\langle B,S\rangle$ , легированные дополнительно кадмием, при  $T=720\text{ }^{\circ}\text{C}$  остаются  $p$ -типа с  $\rho\sim 10\text{ Ом}\cdot\text{см}$ . В то же время оттоженные образцы  $Si\langle B,S\rangle$  при той же температуре меняют тип проводимости и становятся  $n$ -типа с удельным сопротивлением  $\rho\sim 3\text{ Ом}\cdot\text{см}$ . А при  $T=1150\text{ }^{\circ}\text{C}$   $Si\langle B,S,Cd\rangle$  также меняет тип проводимости и  $\rho$  этих образцов равно  $350\text{ Ом}\cdot\text{см}$ , а  $\rho$  образцов  $Si\langle B,S\rangle$  начинает падать, и только при  $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$  образцы  $Si\langle B,S\rangle$  и  $Si\langle B,S,Cd\rangle$  практически имеют одинаковые свойства. Такие существенные изменения свойств  $Si\langle B,S\rangle$  при  $T=720\text{ }^{\circ}\text{C}$  можно объяснить резким увеличением электроактивных атомов серы в кремнии, что наблюдалось и раньше. Тогда не понятно почему это не происходит в  $Si\langle B,S,Cd\rangle$ . Тем более в образцах  $Si\langle B,S,Cd\rangle$  концентрация электроактивных атомов  $Cd$  даже при такой температуре достаточно низка и не может комментировать донорные состояния серы в кремнии. Тогда остается лишь предположить, что температура  $T=720\text{ }^{\circ}\text{C}$  является эффективной температурой комплексообразования атомов серы и электронейтральных

атомов *Cd* в кремнии, концентрация которых такая же как концентрация *S* в *Si* при данной температуре. Таким образом, установлено, что между кадмием и серой происходит образование электронейтральных комплексов, концентрация которых максимальна при  $T=720$  °C.

*Научный руководитель к.ф.-м.н., доц. Т.У.Тошбоев*

## **ИЗУЧЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОКЛАСТЕРОВ КРЕМНИЯ В АМОРФНОЙ МАТРИЦЕ SiO<sub>2</sub> МЕТОДОМ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ IN SITU.**

А.П.Сметанников

Новосибирский государственный университет

В последнее десятилетие был проявлен значительный интерес к полупроводниковым наноструктурам, особенно к нанокристаллам Si (nc-Si) по причине их потенциального применения в кремниевых оптоэлектронных устройствах и схемах памяти.

Целью данной работы является углубление понимания процессов, сопровождающих образование и рост нанокластеров Si в аморфной матрице SiO<sub>2</sub>, а также объяснение некоторых структурных и электронных свойств этих преципитатов.

Во всех работах, посвящённых этому вопросу, nc-Si изучались уже после термообработки, при температурах 300К и ниже. Метод же быстройдействующей высокотемпературной эллипсометрии *in situ* позволяет изучать процесс образования новой фазы непосредственно в ходе высокотемпературных (до 1200<sup>0</sup>C) изохронных или изотермических отжигов. Это позволяет найти ответ на некоторые фундаментальные вопросы, в частности, определить, в какой фазе (кристаллической, аморфной или жидкой) находится Si в процессе образования и роста нанокластеров.

В настоящей работе исследовались образцы, представляющие собой слой термического SiO<sub>2</sub> толщиной 610-615 нм на подложке Si (100), имплантированный ионами Si<sup>+</sup> (E=150кэв, доза  $2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup>). Образцы подвергались термическим отжигам (T~800-1200<sup>0</sup>C, t~1-10с), в ходе которых снимались эллипсометрические параметры  $\Psi$  и  $\Delta$  с временным разрешением 0,1с. Решая прямую задачу эллипсометрии в рамках многослойной модели с варьируемыми параметрами, были получены зависимости n и k нанокластеров от температуры отжига и расстояния до поверхности.

На основании полученных данных была установлена минимальная температура образования нанокластеров, а также определено оптимальное

окно температур отжига для изучения кинетики образования этой наноструктуры.

*Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент Чикичев С.И.*

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХЛОРАТА НАТРИЯ

В.А. Тарасов

Кемеровский государственный университет

В последнее время нелинейные оптические материалы получили самое широкое распространение в лазерных технологиях. Одним из таких активно используемых материалов является кристалл хлората натрия [1]. Теоретическими же методами оптические свойства этих кристаллов ранее не изучались, и эта задача впервые решена в настоящей работе.

Расчет зонной структуры выполнен в рамках теории функционала локальной электронной плотности методом псевдопотенциала в базе численных атомных  $sp^3d^5$  псевдоорбиталей. Необходимые значения энергий валентной зоны и зоны проводимости в большом числе точек зоны Бриллюэна получены путем схем интерполирования энергетических зон симметризованными рядами Фурье. Для вычисления интеграла по зоне Бриллюэна применялись кубатуры Гаусса.

Экспериментальные измерения спектров отражения хлората натрия выполнены в работе [2]. Из экспериментов следует наличие низкоэнергетической полосы  $5\div 7$  эВ и высокоэнергетической, начиная с 9 эВ. В высокоэнергетической области выделяются максимумы при энергиях 9, 14, 20 и 26 эВ.

В настоящей работе получены спектральные зависимости комбинированной плотности состояния, мнимой и реальной частей диэлектрической проницаемости, коэффициентов отражения и поглощения, а также показателя преломления. Начало отсчета в теоретическом спектре смещено на  $\Delta E_g = 1.5$  эВ, это связано с некорректностью вычисления ширины запрещенной зоны в теории функционала плотности.

В теоретическом спектре мнимой части диэлектрической проницаемости выделяется главный максимум в районе 10 эВ, а также максимумы при 18, 24 эВ. Имеются провалы в области 16 и 21 эВ. Таким образом, наблюдается удовлетворительное согласие экспериментального и теоретического спектров, и это свидетельствует о правомерности применения расчетных методик к таким сложным кристаллическим системам.

2. Vorob'eva E.A., Kozhevnikov A.V., Timchenko N.A., Shevtsov A.A. // Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research. – 1989. - V. A282. - P. 615-615

*Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Журавлев Юрий Николаевич*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВОЛНОВЫХ ФУНКЦИЙ ДЫРОК В МАССИВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Ge/Si**

М. Н. Тимонова

Новосибирский государственный университет

Исследуемые квантовые точки (КТ) Ge/Si представляют собой островки Ge пирамидальной формы, самоформирующиеся при эпитаксии германия на подложке кремния. Размеры островков  $\sim 15$  нм. Уникальность данного объекта заключается в большой плотности массива КТ ( $\sim 3 \cdot 10^{11}$  см $^{-2}$ ), обеспечивающей туннельную связь между КТ. Перенос заряда вдоль массива КТ при низких температурах осуществляется путем прыжковой проводимости. Температурная зависимость прыжковой проводимости  $G$

имеет вид  $G(T) = G_0 \exp\left(-\left(T_0/T\right)^x\right)$ , где  $T_0 = C \frac{e^2}{k_B k \xi}$ ,  $k_B$  – постоянная

Больцмана,  $k$  – диэлектрическая проницаемость,  $\xi$  – длина локализации,  $C$  – численный параметр, представляющий собой безразмерное  $T_0$  и содержащий информацию о механизме проводимости, в частности о роли многоэлектронных кулоновских корреляций. Из экспериментальных данных [1] по прыжковой проводимости был получен параметр  $T_0$ . Для определения численного параметра  $C$  необходимо знать длину локализации  $\xi$ . Простые оценки дают значение длины локализации в изолированной точке около 1 нм.

В данной работе численными методами исследовалась длина локализации волновой функции в массиве КТ, расположенных в одном слое (туннельная связь по горизонтали). Учитывался возможный вклад возбужденных состояний в изменение длины локализации. Нахождение энергетического спектра дырок в системе КТ проводилось в рамках приближения ЛКАО с базисом  $sp^3$ , содержащим по 8 атомных орбиталей на каждом атоме [2]. Результаты усреднялись по 5000 реализаций массива точек. Интегралы перекрытия спадают экспоненциально с ростом расстояния между островками; характерная длина убывания составляет 0.9 нм.

Получено, что длина локализации увеличивается от 1,51 нм (при учете только одного энергетического состояния дырки) до 2,06 нм (десять энергетических уровней), т.е. чем больше энергетических состояний в КТ,



тем больше длина локализации. Учет возбужденных состояний необходим для численного анализа процесса прыжковой проводимости в массиве квантовых точек.

Полученные значения параметра  $C = 0,98 \pm 0,5$  [1] близки к теоретическим значениям [3] для примесной зоны в режиме многочастичных кулоновских корреляций.

---

[1] А.И.Якимов, А.В.Ненашев, А.В.Двуреченский, М.Н.Тимонова, том 78, вып. 4, с. 276 (2003).

[2] A.V.Dvurechenskii, A.V.Nenashev and A.I.Yakimov, Nanotechnology 13, 75 (2002).

[3] A.Perez-Garrido, M.Ortuno, E. Cuevas, and J.Ruiz, Phys. Rev. B55, R8630 (1997).

*Научный руководитель* *д-р физ.-мат. наук, проф. А. В. Двуреченский*  
*Соруководитель* *н.с. А. В. Ненашев*

## **CS – ИНДУЦИРОВАННАЯ АДСОРБЦИЯ КИСЛОРОДА НА ПОВЕРХНОСТЬ GAAS(001)**

К.В. Торопецкий, Д.А. Петухов  
Новосибирский Государственный Университет

Одной из главных трудностей в получении высокой квантовой эффективности полупроводниковых фотоэммиттеров с отрицательным электронным средством является создание упорядоченного (Cs-O) слоя на поверхности полупроводника. Известно, что стандартная методика активирования поверхности GaAs(001) цезием и кислородом приводит к аморфному (Cs-O) покрытию. Наличие на поверхности GaAs(001) аморфного слоя может приводить к дополнительному рассеянию электронов на границе GaAs/(Cs-O), и, как следствие к уменьшению квантового выхода электронов в вакуум. Другим важным аспектом является химическое состояние поверхностных атомов галлия и мышьяка при взаимодействии с цезием и кислородом. Целью данной работы являлось изучение взаимодействия кислорода с поверхностью GaAs(001) покрытой субмонослойным количеством атомов цезия.

Эксперименты проводились на сверхвысоковакуумном (СВВ) электронном спектрометре ADES-500. Состав поверхности изучался методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Структура поверхности изучалась методом дифракции медленных электронов.

Адсорбция цезия и кислорода проводилась на Ga- стабилизированную поверхность (4x2)/c(8x2).

В работе изучена кинетика адсорбции кислорода на поверхность GaAs(001) покрытой 0.3, 0.5 и 0.8 монослоями цезия. Для всех исследуемых покрытий поверхности Cs наблюдалось резкое увеличение количества адсорбированного кислорода при малых дозах экспозициях (0-2 L). Дальнейшее увеличение экспозиции (2-15 L) на поверхностях с малым покрытием Cs (0.3, 0.5 ML) приводило к насыщению, уровень которого увеличивался пропорционально количеству цезия на поверхности. Для поверхности покрытой 0.8 ML Cs экспонирование в атмосфере кислорода при дозах 2-15 L приводило к линейному росту количества кислорода на поверхности и образованию оксидов  $As_2O_3$  и  $Ga_2O_3$ . При малых покрытиях поверхности цезием образование оксидов не наблюдалось. Для количественного анализа полученных кривых адсорбции кислорода использовалась модель Ленгмюра, в которой предполагалось, что количество адсорбированных молекул пропорционально количеству мест адсорбции (атомов цезия) на поверхности и коэффициенту прилипания. Из полученных зависимостей определены коэффициенты прилипания молекул кислорода на поверхность GaAs(001) с различным покрытием цезием. Обнаружен эффект уменьшения энергии связи остовных уровней атомов цезия при адсорбции кислорода, связанный с возвратом электронной плотности от GaAs на атомы Cs. В работе обсуждаются микроскопические механизмы адсорбции кислорода, его взаимодействие с поверхностными атомами As, Ga, Cs, а также электронная структура границы раздела GaAs/(Cs-O).

*Научный руководитель – к.ф.-м.н. Терещенко Олег Евгеньевич*

## **ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО СТРОЕНИЯ МОНОКЛИННОГО НИТРИТА КАЛИЯ**

И.А. Федоров

Кемеровский государственный университет

Нитрит калия в зависимости от температуры обладает различным кристаллическим строением.  $KNO_2(III)$  вплоть до температуры 264 К имеет моноклинную решетку, в которой только при 4 К нитрит-ионы занимают фиксированные положения. В этой структуре атомы кислорода образуют с азотом две неэквивалентные связи с расстояниями  $O1-N=1.2501 \text{ \AA}$  и  $O2-N=1.2563 \text{ \AA}$ . Из четырех атомных подрешеток, две образованы неэквивалентными кислородами. В элементарной ячейке содержится 4 формульные единицы. Задача работы выяснить, как

проявляется неэквивалентность кислорода в электронном строении кристалла  $\text{KNO}_2(\text{III})$ .

Расчет зонного спектра нитрита калия выполнен в рамках теории функционала локальной электронной плотности методом псевдопотенциала в базисе численных атомных  $sp^3d^5$  псевдоорбиталей. В энергетическом спектре можно выделить связки зон разделенных запрещенными участками энергий. В валентной области можно выделить 5 связок зон. Нижние связки имеют практически плоский характер и разделены запрещенными зонами  $\sim 5-7$  эВ. С ростом энергии ширина связок увеличивается, ширина же запрещенных зон уменьшается. Вклад неэквивалентных кислорода в образовании зон является различным. Например, нижняя связка образована преимущественно из s-состояний O2, а следующая из s-состояний O1.

Для установления характера химической связи в кристалле, удобно использовать разностную плотность, представляющую собой разность между кристаллической и всеми подрешеточными плотностями. Распределение разностной плотности указывает на различный для атомов O1 и O2 характер перераспределения заряда при взаимодействии подрешеток. Области вытекания и натекания заряда имеют гантелеобразную форму p-орбитали  $\sigma$ - и  $\pi$ -типа. Для атома O1 наблюдается вытекание заряда из  $\pi$ -области и натекание в  $\sigma$ -область. В результате на линии связи O1-N появляется максимум разностного заряда, а это показывает, что между ними существует ковалентная связь. Для атома O1, наоборот, заряд вытекает из  $\sigma$ - и натекает в  $\pi$ -область. А значит, на линии связи O2-N появляется минимум разностной плотности. Таким образом, силы химического связывания атомов кислорода и азота являются различными. Более прочно связан атом O1 с кратчайшим расстоянием O-N, тогда как связь O2-N является менее прочной.

*Научный руководитель - канд. физ.- мат. наук, доцент Ю.Н. Журавлев*

## **ВЛИЯНИЕ ФОНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК КРТ МЛЭ**

М.Ф. Филатов, Д.В. Ходкевич  
Томский государственный университет

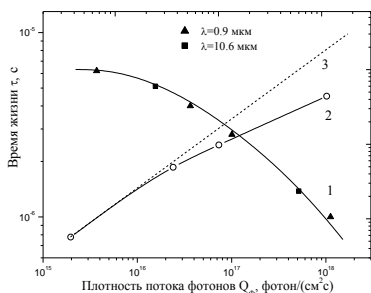
Основным материалом для создания собственных фотоприемников для ИК области спектра являются узкозонные твердые растворы  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ . Использование метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) позволяет получать гетероэпитаксиальные слои  $\text{CdHgTe}$  (ГЭС КРТ) с высокой

степенью однородности и с заранее заданными профилями состава и уровня легирования.

В данной работе представлены результаты исследования влияния постоянного фонового оптического излучения ( $T_{\phi}=300\text{K}$ ) на фотоэлектрические характеристики эпитаксиальных пленок КРТ  $n$ -типа проводимости, выращенных методом МЛЭ ( $x=0.22$ ,  $n_0=5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ). Измерения проводились в диапазоне 77-300 К, при использовании источников фотосигнала с  $\lambda=10.6 \text{ мкм}$  и  $\lambda=0.9 \text{ мкм}$ . Для изменения уровня фонового излучения в работе использовались охлаждаемые диафрагмы, обеспечивающие изменение апертурного угла в диапазоне 6-180 градусов.

Проведенные экспериментальные исследования, показали сильную зависимость параметров эпитаксиальных пленок от угла раскрыва диафрагмы  $\theta$ . Значения времени жизни менялись в диапазоне от 1 до 6 мкс, а сопротивление образца при этом увеличивалось почти в три раза. В работе был проведен теоретический расчет зависимости параметров эпитаксиальных пленок КРТ от плотности потока фотонов  $Q_{\phi}$ .

Расчет проводился для времени жизни носителей заряда при Оже-рекомбинации в  $n$ -CdHgTe при наличии неравновесной концентрации



носителей заряда  $\Delta n_{\phi}$ . На рисунке представлены экспериментальные результаты значений времени жизни и неравновесной фотопроводимости при 77 К, и построена расчетная кривая зависимости времени жизни от потока фотонов фонового излучения  $Q_{\phi}$ . Наблюдается хорошее соответствие между экспериментом и расчетными значениями.

Показано, что зависимость времени жизни носителей заряда от температуры и уровня фонового излучения определяется Оже-механизмом рекомбинации.

*Научный руководитель – д-р. физ.-мат. наук, проф. А.П. Коханенко*

## ОСОБЕННОСТИ ВХОЖДЕНИЯ ИОНОВ ХРОМА В КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ ВГО

Н.В. Черней

Новосибирский государственный университет

Германат висмута –  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO), в настоящее время широко применяется как сцинтилляционный материал для регистрации высокоэнергетических частиц в ядерном и медицинском приборостроении, в системах антикомptonовской защиты, в позитронно-эмиссионной томографии. Рентгеноструктурные исследования показали, что симметрия кристаллов BGO соответствует пространственной группе  $I43d-T^6_d$ . Известно, что примесные центры могут влиять на световыход и временные характеристики люминесценции, а также ухудшать сцинтилляционные характеристики кристаллов BGO. Одной из нежелательных примесей для BGO являются ионы хрома. В литературе известны только данные по оптическим характеристикам, на основании которых сделаны весьма неоднозначные выводы о структурном положении и зарядовом состоянии ионов хрома – Cr(III), замещающего висмут. В данной работе для определения структурного положения и электронного состояния ионов хрома в кристаллах BGO проведены комплексные исследования методами ЭПР и оптической спектроскопии кристаллов BGO, легированных ионами хрома. В качестве объектов исследования были кристаллы германата висмута, выращенные в ИНХ СО РАН низкоградиентным методом Чохральского. Допирование кристаллов ионами хрома осуществлялось добавкой в шихту окислов хрома.

В спектрах ЭПР исследуемых образцов BGO наблюдается сложная система линий, исследование которой на двух частотах (9.5 и 35.5 ГГц) доказывает, что наблюдаемая структура спектра ЭПР обусловлена анизотропией Зеемановского взаимодействия и тонкой структурой спектра. Исследование угловой зависимости спектра и анализ ее с помощью оригинальной разработанной программы показали, что исследуемый спектр обусловлен центром с электронным спином  $S = 1$ , имеет симметрию  $D_{4h}$  и описывается спин-гамильтонианом с параметрами  $g_{xx}=g_{yy}=1.915$ ,  $g_{zz}=1.932$ ,  $D= 550$  Гаусс и  $E=10$  Гаусс. Значения g- факторов меньше g- фактора для свободного электрона говорят о том, что состояние иона, ответственное за данный спектр ЭПР, содержит d- оболочку заполненную меньше половины. Учитывая тот факт, что исследуемые кристаллы легировались ионами хрома и интенсивность спектра ЭПР зависит от концентрации хрома, можно предположить, что исследуемый спектр ЭПР обусловлен  $\text{Cr}^{4+}$ , два электрона на внешней оболочке которого определяют электронное состояние иона хрома с  $S= 1$ . Исследование угловой зависимости спектра ЭПР показывает, что главное значение D- тензора направлено по оси четвертого порядка и центр занимает в соответствии с количеством магнитно-неэквивалентных положений в структуре кристалла (3 магнитно- неэквивалентных положения) положение в центре тетраэдра. Такое положение в структуре BGO реализуется только для позиции германия.

Исследование оптических спектров показало, что наблюдаемый спектр поглощения для ионов хрома несмотря на наличие трех переходов не соответствует положению переходов для ионов Cr(III). Люминесценция, наблюдаемая в области 1200 - 1400 нм, соответствует проявлению ионов Cr(IV) в тетраэдрическом кислородном окружении для других оксидных кристаллов.

## **МЕХАНИЗМЫ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ РЕЗИСТИВНЫХ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК SnO<sub>2</sub> ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ**

Черных Р.В.

Томский государственный университет

Для создания портативных газоанализаторов несомненный интерес представляют резистивные сенсоры на основе металлооксидных полупроводников, проводимость которых обратимо изменяется при адсорбции ряда восстановительных и окислительных газов. При высокой чувствительности, миниатюрности, высоком быстродействии, низком энергопотреблении широкое внедрение таких датчиков в практику затруднено недостаточной стабильностью их параметров при эксплуатации. Природа этих явлений остаётся до конца не выясненной.

В настоящей работе изучены особенности характеристик сенсоров метана на основе тонких (100 нм) плёнок Pt/SnO<sub>2</sub>:Sb в зависимости от влажности и температуры окружающей среды в диапазонах 0 – 100 % и – 60 - +50 °С, соответственно. Исследования выполнены в режимах постоянного и пульсового внутреннего нагрева датчиков.

Образцы формировали катодным распылением в кислородно-аргонной плазме мишени из металлического олова с добавлением 1.5 ат. % сурьмы на сапфировые подложки толщиной 150 мк. На поверхность плёнок катодным распылением наносили сверхтонкие слои каталитической платины. Контакты к чувствительному слою и нагреватель на обратной стороне подложки получали до нанесения SnO<sub>2</sub> путём напыления платины с последующей фотолитографической гравировкой. Измеряли сопротивление образцов в чистом воздухе  $R_0$  и сопротивление при подаче метановоздушной смеси  $R_1$ . За адсорбционный отклик принимали относительное изменение проводимости, которое в условиях нашего эксперимента соответствует  $R_0/R_1 - 1$ .

Показано, что при комнатной температуре при понижении влажности сопротивление плёнок в чистом воздухе увеличивается, адсорбционный отклик на воздействие метана растёт, причём эти эффекты особенно ярко выражены при относительной влажности ниже 15 %. При снижении

температуры окружающей среды в указанном выше диапазоне также происходит рост сопротивления и отклика на метан.

Установленные закономерности объясняются участием адсорбции молекул воды в процессах на поверхности полупроводника. Для снижения влияния влажности использовали пульсовый режим нагрева сенсоров. Изучены особенности характеристик образцов в зависимости от амплитуды и длительности импульсов нагрева и охлаждения.

*Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, ст. н. сопр. Максимова Н.К.*

## **СОСТАВ И СТРУКТУРА ХИМИЧЕСКИ ПРИГОТОВЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ (001) $\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.26}\text{P}_{0.74}$**

А. Н. Шорников, В.С. Головин  
Новосибирский государственный университет

Материалы на основе твердых растворов InGaAsP перспективны для создания фотокатодов с отрицательным электронным средством (ОЭС), работающих на длине волны 1,06 мкм. Хорошо известно, что в полупроводниковых фотокатодах с ОЭС поверхность полупроводника играет ключевую роль в достижении высокой квантовой эффективности выхода фотоэлектронов, поэтому исследование и оптимизация состава и структуры поверхности фотокатода является важным шагом на пути создания высокоэффективных фотоэмиттеров, работающих в ближней инфракрасной области. Целью данной работы являлось изучение условий очистки поверхности (001) $\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.26}\text{P}_{0.74}$ , её стехиометрии и структуры после химической обработки в растворе HCl в изопропиловом спирте (HCl-ИПС) и прогреве в вакууме.

В работе изучались образцы  $\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.26}\text{P}_{0.74}$  ориентации (001), выращенные методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Состав поверхности изучался методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии на сверхвысоковакуумном (СВВ) электронном спектрометре ADES-500. Структура поверхности изучалась методом дифракции медленных электронов. Химическая обработка поверхности образцов проводилась в растворе HCl-ИПС в атмосфере сухого азота. Перенос образцов в СВВ камеру осуществлялся в герметичном контейнере в атмосфере азота.

Исходная поверхность (001) $\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.26}\text{P}_{0.74}$ , загруженная с воздуха, покрыта несколькими монослоями собственных оксидов полупроводника и монослойным загрязнением углеродом и кислородом. Химическая обработка в растворе HCl-ИПС удаляет оксиды и обогащает поверхность приблизительно монослоем элементного As. Отношение интенсивностей линий C1s/In3d и O1s/In3d после химической обработки

уменьшается в 3 и 7 раз, соответственно. Прогрев в вакууме десорбирует элементный As и вместе с ним удаляет углерод и кислород. При температуре прогрева выше 350°C поверхность реконструируется в катион - стабилизированную поверхность с реконструкцией (4x2)/c(8x2). Установлено, что химическая обработка и низкотемпературный прогрев образца вызывают уменьшение изгиба зон на поверхности InGaAsP на величину 0.2-0.3 эВ. Таким образом, химическая обработка поверхности твердого раствора полупроводника в растворе HCl-ИПС и низкотемпературный прогрев в вакууме позволяют приготовить структурно упорядоченную катион – стабилизированную поверхность InGaAsP.

*Научный руководитель – кандидат ф.-м. наук Терещенко О. Е.*

## **УСТАНОВКА НА БАЗЕ СПЕКТРОФОТОМЕТРА ИКС-14 ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ФОТО-ЭДС**

Шуйская Е. Н.

Воронежский государственный университет

Разработана установка для измерения зависимости фото-ЭДС полупроводниковых гетероструктур от длины волны падающего на образец излучения в спектральном диапазоне 0.7-8.0 мкм.

Установка состоит из монохроматора спектрометра ИКС - 14, синхронного детектора с усилителем, блока коррекции синхросигнала, оригинального интегрирующего выходного блока, безвакуумного криостата.

Инфракрасное излучение от глобара попадает на монохроматор. Между эллиптическим зеркалом и болометром спектрофотометра нами установлено параболическое зеркало, отражающее излучение на плоское зеркало, установленное над безвакуумным азотным криостатом. Эта система зеркал фокусирует ИК-лучи в плоскости предметного столика на площади, занимаемой образцом (~1см<sup>2</sup>). Образец, представляющий собой полупроводниковую гетероструктуру, включен между общим проводом измерительной системы и входом предварительного операционного усилителя по неинвертирующей схеме. С выхода предварительного усилителя сигнал попадает на синхродетектор и после вторичного усиления – на оконечный интегрирующий блок. Синхросигнал, вырабатываемый электрической системой зеркального прерывателя спектрофотометра поступает на блок коррекции синхросигнала, который сдвигает его по фазе и изменяет длительность так, чтобы фазовый сдвиг между ним и сигналом фото-ЭДС был близок к нулю.



Напряжение с выхода синхронного детектора попадает на вход оконечного интегрирующего блока, функция которого состоит в подавлении помех, связанных сетевыми наводками на входе цепи и с искажением прямоугольной формы сигнала фото-ЭДС усиленными и детектирующими звеньями. Входной коммутатор на полевых транзисторах подключает синхродетектор к интегратору с периодом, кратным периоду изменения напряжения в цепи переменного тока. После накопления заряда на конденсаторе интегратора коммутатор отсоединяет его от синхродетектора, при этом к входу интегратора присоединяется усилитель и происходит считывание неизменного выходного сигнала регистрирующим прибором. Преимущество электронной системы установки перед аналогичными заключается в предотвращении ее самовозбуждения при высоком эффективном коэффициенте усиления, так как усилители до и после интегратора работают в разное время.

Установка использована для определения спектральных характеристик фото-ЭДС гетероструктур n-In Sb-SiO<sub>2</sub>-p-Si.

*Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Ю. А. Никольский.*

## **ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШИРОКОЗОНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ ZnSe(Te,O)**

Д.Б. Эльмуротова  
Национальный Университет Узбекистана, Ташкент

Широкозонные бинарные соединения A<sub>2</sub>B<sub>6</sub>, в частности кристаллы ZnSe, имеют большие перспективы использования в радиометрических устройствах в качестве малогабаритных датчиков ионизирующих излучений, а также в оптоэлектронике как светоизлучающие диоды. Для создания p-n переходов применяется легирование (примеси замещения катиона – Au, Cu, Ni, Mn, или аниона - Te, S, O, N, Cl) или обработка в парах цинка. Избыток цинка (~51 вес.% при идеальном 45.53) создает в приповерхностном слое ZnSe собственные дефекты кристаллической решетки типа межзельных атомов цинка Zn<sub>i</sub>, которые являются донорами электронов, и вакансии Se, F-центры, ловушки для электронов, а их концентрация определяет величину и тип электропроводности, а также фоточувствительность. Достижение стабильно высокой проводимости и квантовой эффективности фотоприемников связано со структурой приповерхностного слоя кристаллов ZnSe и является сложной технологической проблемой.

Целью настоящей работы было изучение влияния структурных дефектов в приповерхностном слое на фотоэлектрические свойства монокристаллов ZnSe с изовалентными примесями Te и O. Кристаллы выращивались методом Бриджмена в восстановительной среде в НИИ Монокристаллов (Харьков, Украина) и обозначены ниже как AN (0.2-0.25 вес.% Te). Для повышения интенсивности сцинтилляции образцы, обозначенные BN (0.17-0.19 вес.% Te) и CN (<0.009 вес.% Te), подвергались кислородной обработке. Затем половина образцов были обработаны в парах цинка для увеличения проводимости (обозначены AT, BT и CT). Отношение Se/Zn, определенное рентгено-флуоресцентным методом, изменялось в пределах 0.84-0.85 и в необработанных образцах было ниже, чем у обработанных в парах Zn. Рентгено-структурный анализ показал присутствие фазы ZnO во всех образцах, кроме AN. Микротвердость  $H_{\mu}$  приповерхностного слоя полированных пластин измерялась методом Викерса (прибор ПМТ-3) при нагрузках от 20 до 200 грамм с точностью 10 %. Величина  $H_{\mu}$  для CN образцов, отожженных в кислороде, оказалась ниже, чем у остальных, что может быть обусловлено образованием поверхностного слоя ZnO. Микротвёрдость образцов AT, BT и CT в результате обработки в парах цинка выросла во всем интервале нагрузок до глубины ~100 мкм. Для всех образцов величина  $H_{\mu}$  в приповерхностном слое до 50 мкм был на 20-25 % ниже, чем для более глубоких слоев кристалла, где значение  $H_{\mu}$  уже практически не зависело от нагрузки и характеризовало однородную стехиометричную структуру.

Для измерений Вольт-Амперных характеристик, ВАХ, при 300 К в темноте и при освещении лампой накаливания (сплошным спектром излучения) на торцовые грани пластин наносили металлический индий ультразвуковым паяльником. Измерительная ячейка имела 4 прижимных электрических контакта. В схеме были использованы стандартные приборы: усилитель У5-4, вольтметры Ф-116/2, Ц-300, Ф-136, блок питания Б5-50. Удельное сопротивление необработанных образцов серии AN и CN было  $6 \cdot 10^9$  Ом-см и  $4.5 \cdot 10^9$  Ом-см, соответственно. ВАХ имели омический характер при токах порядка нано-Ампер и напряжениях до 300 Вольт, причем наклон прямой увеличивался при освещении за счет вклада неравновесных фото-генерированных носителей. Фотопроводимость (разность проводимостей на свету и в темноте) кристаллов ZnSe обусловлена собственным поглощением света с энергией квантов  $E > E_g \approx 2.8$  эВ и ионизацией глубоко-уровневых примесных центров. В образцах BN сформировался p-n-переход с запирающим напряжением  $U_{зап.} = 50$  В и токами порядка сотен мкА. При освещении и более высоких смещениях крутизна ВАХ возрастала в результате столкновительных ионизационных процессов по закону  $I = KU^{\beta}$ . В образцах AT, BT и CT, обработанных в парах Zn тоже образовался p-n- переход с S-образной ВАХ, но

запирающие напряжения оказались на порядок ниже, чем у BN. Соответственно, проводимость этих образцов значительно выросла до  $\sim 10^3 - 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  по сравнению с необработанными образцами за счет роста концентрации свободных электронов, поставляемых донорными центрами Zn. Темновая ВАХ у АТ образца (где отсутствует примесная фаза ZnO) была практически симметричной, как у светоизлучающих диодов, тогда как при освещении ее крутизна резко выросла. Только в образцах СТ (с большим содержанием ZnO фазы) разница между темновой и световой ВАХ была незначительной. Наибольшие значения фототока наблюдались у образцов ВТ, допированных как теллуром, так и кислородом, а затем отожженных в парах цинка. Фоточувствительность определялась как отношение  $\sigma_f / \sigma_t$  и для высокоомных образцов серии N была выше в 5-10 раз, чем у низкоомных.

Таким образом, нестехиометричность приповерхностного слоя кристаллов ZnSe обуславливает образование фазы ZnO и снижение микротвердости до глубины  $\sim 50$  мкм, а также соответствующие изменения фотоэлектрических характеристик кристаллов. Наиболее фоточувствительным оказались высокоомные образцы AN, BN, CN. В результате обработки в парах Zn во всех образцах формируется *p-n*-переход и возрастает фотопроводимость. Возможно, что низкоомные образцы найдут применение в качестве светоизлучающих диодов.

Работа выполнена при поддержке Центра по науке и технологии Узбекистана Контракт Ф2.1.2 и Академии Наук Узбекистана Контракт № 4-04.

*Научный руководитель - д-р физ.-мат. наук Э. М. Ибрагимова, ИЯФ АН РУзб, E-mail: [ibragimova@inp.uz](mailto:ibragimova@inp.uz)*

## **ИЗУЧЕНИЕ ЭМИССИИ МЕДЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ *p*-GaN(Cs,O) С ЭФФЕКТИВНЫМ ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ СРОДСТВОМ МЕТОДОМ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

А.В. Язьков

Новосибирский Государственный Университет.

Интерес к изучению широкозонных нитридов металлов третьей группы обусловлен их успешным применением для создания источников света, излучающих в сине-зеленой и ультрафиолетовой (УФ) областях спектра, мощных высокотемпературных СВЧ-приборов и фотоприемников УФ-диапазона. Создание совершенных фотокатодов с эффективным отрицательным электронным сродством (ЭОЭС) на основе соединений GaN и фотоприёмников УФ-диапазона на их основе позволит решить

важные научные и практические задачи. Несмотря на важность практических применений GaN-фотокатода, энергетические распределения электронов, эмитированных из p-GaN(Cs,O), до сих пор не изучались. Данные распределения содержат важную информацию о типах оптических переходов, формирующих внешний фотоэффект, о кинетических явлениях с участием термализованных и “горячих” неравновесных электронов, об электрон-фононном взаимодействии в полупроводнике. Например, энергетические распределения, измеренные при энергии фотонов  $\hbar\omega < E_g$  и  $\hbar\omega > E_g$ , дают работу выхода и эффективную массу дырок, а энергетическая ширина распределения, измеренная при энергии фотонов  $\hbar\omega = E_g$ , с высокой точностью совпадает с величиной ЭОЭС, являющейся важнейшей характеристикой поверхности p-GaN(Cs,O).

В данной работе исследовались слои p-GaN, выращенные на лейкосапфире, которые содержат большое количество дефектных состояний. Измеренный спектр квантового выхода свидетельствовал о наличии этих состояний. Энергетические распределения, впервые измеренные для поверхности p-GaN(Cs,O) с ЭОЭС, позволили разделить фотоэмиссионные переходы из валентной зоны и из дефектных состояний в запрещённой зоне, измерить такие важные характеристики поверхности, как ЭОЭС и работа выхода, а также эффективную массу дырок.

*Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор А.С. Терехов*

## Б ИОНИЗАЦИИ ЖИДКОГО РАЗРЯДНОГО ПРОМЕЖУТКА ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ

Е. А. Малашевская

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

Физической основой электроэрозионной обработки металлов служит разрушение металлов под действием электрических импульсов в жидкой диэлектрической среде. Формообразующий электрод – катод, обрабатываемая деталь – анод. Основой формообразования в таком случае служит эрозионный массовый поток, причем разрушение анода в силу физических особенностей образования и развития искрового

разряда протекает более интенсивно. В связи с повышенной диэлектрической проницаемостью жидкости, которая ослабляет силу притяжения электрона в металле, значение работы выхода электронов из металла значительно меньше и при нормальных температурах возможны как авто- так и термоэлектронная эмиссия электронов с катода [1].

В общем случае рассматривают следующие причины увеличения концентрации носителей заряда в жидких диэлектриках: диссоциация молекул жидкости и примесей; ударная ионизация в объеме жидкости; термо- и автоэлектронная эмиссия с поверхности катода.

Энергообмен на поверхности катода определяет влияние катодных процессов на ионизацию межэлектродного промежутка (МЭП). Ионизация МЭП увеличивается за счет энергии, уносимой с катода эмитируемыми электронами, и уменьшается за счет энергии, приносимой на катод обратными электронами и положительно заряженными ионами, которая успевает перейти в тело катода за счет теплопроводности [2]. Оставшаяся часть этой энергии тратится на эрозионное разрушение катода и перенос продуктов эрозии в МЭП, что в свою очередь увеличивает проводимость жидкости (за счет увеличения катафоретической проводимости). Подобные же процессы происходят и на аноде.

Таким образом, образование плазмы в МЭП зависит от всей совокупности процессов, происходящих не только в МЭП, но и на поверхности и в объеме электродов. Необходимо совместное изучение процессов как в МЭП так и на поверхностях электродов и в их объеме.

- 
1. Лагарьков А. Н., Руткевич И. М. Волны электрического пробоя в ограниченной плазме. – М.: Наука, 1989.
  2. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах/ Жуков М. Ф., Козлов Н. П., Пустогаров А. В. и др. – Новосибирск: Наука, 1982.

Научный руководитель – канд. тех. наук, доцент  
В. Д. Бердоносков.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ

# ПРОТЕКАЮЩИХ В КАНАЛЕ МГД - УСКОРИТЕЛЯ ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО ЭФФЕКТ Т- СЛОЯ.

**А. В. Минаков**  
**Красноярский Государственный Технический**  
**Университет**

Перспективные проекты пилотируемых полетов к планетам солнечной системы потребует разработки электрического ракетного двигателя (ЭРД) с высокой тягой и удельным импульсом. Это позволит существенно сократить время пребывания человека в условиях жесткой космической радиации. При высоком удельном импульсе можно снизить расход рабочего тела и, соответственно, уменьшить необходимый запас топлива на борту корабля. Решить поставленную задачу позволит создание индукционного ЭРД фарадеевского типа с неоднородной токовой структурой.

Цель данной работы – провести двумерное моделирование МГД ускорителя и проанализировать влияние эффекта Холла на поршневую структуру токового слоя. Для этого в двумерной постановке была решена задача о нестационарном МГД - процессе ускорения неоднородного газоплазменного потока в канале электрического ракетного двигателя, основанного на использовании явления Т-слоя. Для моделирования этого процесса численно решалась полная система двумерных уравнений магнитной газодинамики, которая помимо трех законов сохранения массы, импульса и энергии включала уравнение индукции магнитного поля.

По итогам проведённой работы можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что в канале ЭРД действительно образуется устойчивый токовый слой, стабилизированный радиационными потерями и джоулевой диссипацией.

2. Показано, что параметр Холла в токовом слое не превышает 1, влияние эффекта Холла в волне разряжения приводит к образованию азимутальных альфвеновских волн, но в целом поршневая структура токового слоя сохраняется.

3. Установлено, что среднее значение скорости потока на выходе из канала может достигать 40-50 км/с и асимптотически стремится к величине  $E/B$ , что характерно для процессов с большим магнитным числом Рейнольдса. Это означает, что обмен энергией между системой

питания ЭРД и плазмой Т-слоев может быть организован в безэлектродной схеме через индуктивную связь.

Научный руководитель - д-р физ.-мат. наук, проф. В. С. Славин.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ НЕОДНОРОДНОГО  
ГАЗО-ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА ПРИ ИНДУКЦИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ  
ПЛАЗМЫ С ВНЕШНЕЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

И.О. Михалёв

Красноярский государственный технический университет

Одним из перспективных предложений в области создания эффективных космических источников энергии является газоохлаждаемый ядерный реактор в сочетании с МГД генератором [1]. В результате термодинамического анализа работы такой энергоустановки по циклу Ренкина с высокотемпературными радиационными панелями была определена оптимальная температура на входе в канал МГД генератора в 4000 К. Такая энергоустановка сможет обеспечить удельную мощность на уровне 2000 Вт/кг. Для данных условий целесообразно использование индукционного МГД генератора. В целях оптимизации его работы предполагается использование неоднородного газо-плазменного потока рабочего тела в канале. В потоке провоцируется развитие перегретой неустойчивости, в результате которого из плазменных ступок формируются Т-слои.

В данной работе выполняется математическое моделирование процессов в канале МГД генератора, предполагающее численное решение полной системы уравнений магнитной гидродинамики в одномерном приближении. В настоящее время выполнена отладка численного алгоритма и создан программный код, реализующий данную задачу. Описание численной методики приведено в работе [2]. Численное моделирование показало возможность достижения требуемых значений эффективности по адиабатическому КПД и степени преобразования энтальпии. Найден автоколебательный режим, в котором энергия магнитного поля, запасённая в выходящем из канала Т-слое, перебрасывается в форме джоулевой диссипации в новое температурное возмущение на входе в канал, из которого далее формируется следующий Т-слой.

---

1. [http://www.spacetransportation.com/ast/presentations/7g\\_knigh.pdf](http://www.spacetransportation.com/ast/presentations/7g_knigh.pdf)

2. Slavin V.S., Gavrilov A.A. MHD Accelerator of the Non-Uniform Gas-Plasma Flow Utilized as an Effective Rocket Engine. Proc. of 14-th Intern. Conf. on MHD Power Generation and High Temperature Technologies, 2002.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. В.С. Славин.

# ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ ДУГОВОГО РАЗРЯДА НА ДИСПЕРСНОСТЬ ПРОДУКТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА МЕДНЫХ ПРОВОДНИКОВ

А.Н. Григорьев, Д.В. Тихонов  
Томский государственный университет

В настоящее время интенсивно разрабатываются интенсивные методы получения ультрадисперсных порошков. Одним из наиболее эффективных методов получения наночастиц является взрыв проводников (ЭВП). При ЭВП фазовые превращения твердое тело – металлическая плазма (пар, жидкость) – нанопорошок происходят под действием кратковременной дозы энергии при больших градиентах температуры и высоких скоростях охлаждения. Техническая реализация данного метода основывается на распылении металлических проводников импульсами тока за счет разряда батареи конденсаторов. Имеющиеся на сегодняшний день сведения о путях и способах повышения дисперсности продуктов электрического взрыва не позволяют однозначно выделить фактор, наиболее сильно влияющий на дисперсность конечных продуктов взрыва [1].

Целью данной работы является нахождение условий, при которых зависимость от энергии непосредственно введенной в проводник и энергии дуговой стадии дисперсность конечных продуктов максимальна.

В работе была исследована серия нанопорошков меди, полученная методом ЭВП. Взрыв проводников осуществляется в среде аргона при избыточном давлении 1,5 атм. При этом менялось зарядное напряжение конденсаторной батареи  $U_0$  от 18 до 30 кВ при прочих равных условиях. Диаметр медных проводников составлял 0,3 мм, длина – 75 мм. Для определения дисперсности ( $S_{уд}$ ) порошки анализировались методом низкотемпературной адсорбцией аргона (метод БЭТ). Полученные зависимости показывают, что в области малых энергий ( $E/E_c < 1,3$ ; где  $E$  – введенная энергия,  $E_c$  – энергия сублимации взрывающегося проводника) при отсутствии дуговой стадии ( $E_d/E_c=0$ ,  $E_d$  – энергия дуговой стадии) для медных проводников средняя дисперсность продуктов взрыва остается практически неизменной. При  $E/E_c \approx 1,6...1,8$  и  $E_d/E_c \approx 0,3...0,4$  обнаруживается экстремум (максимум  $S_{уд}$ ), который объясняется



интенсификацией процессов спекания продуктов, за счет более высоких плотностей и скоростей ввода энергии.

---

1. А.Р. Пуйн, О.В. Nazsrenko, D.V. Tikhonov e. a. Structural and Energy Processes in Electrically Exploded Conductors. Russian Physics Journal, v. 45, № 12, 2002, PP/ 1176 – 1180.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. А.П. Ильин.

## **ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЙТРОНОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ МИШЕНИ ИСТОЧНИКА ЭПИТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ**

В. А. Киндюк

Новосибирский государственный университет

В настоящее время в Институте ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН разрабатывается компактный новаторский источник эпитепловых нейтронов на основе ускорителя для осуществления возможности проведения бор-нейтронозахватной терапии рака в условиях онкологической клиники. Стационарный пучок отрицательных ионов водорода инжектируется в электростатический ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, и после перезарядки отрицательных ионов водорода в протоны в перезарядной мишени на выходе из тандема формируется протонный пучок, ускоренный до энергии, соответствующей удвоенному потенциалу высоковольтного электрода. При сбросе протонного пучка на литиевую мишень в результате пороговой реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  генерируется поток эпитепловых нейтронов. Одной из основных частей установки является нейтронообразующая мишень, которая должна обеспечить длительный режим генерации нейтронов под мощным протонным пучком с как можно меньшим потоком сопутствующего  $\gamma$ -излучения и потоком паров лития и радиоактивного бериллия.

Основным вариантом мишени в настоящее время представляется мишень, выполненная в виде диска с тонким напыленным слоем лития с одной стороны, и интенсивным водяным охлаждением с другой стороны. В данной работе представлены результаты расчета гидродинамического сопротивления течения охлаждающей жидкости в мишени, приведены результаты эксперимента по определению зависимости падения давления от расхода и предлагается оптимизация каналов охлаждения. Также в работе представлены результаты измерения температуры поверхности мишени при ее нагреве с плотностью мощности до  $0,5 \text{ кВт см}^{-2}$ . При увеличении мощности нагрева идентифицированы 3 режима теплосъема водой: интенсивное турбулентное без закипания, пузырьковое и пленочное кипение. Проведено сравнение с расчетом и определен оптимальный режим теплосъема.

Результаты работы предполагается использовать при проектировании окончательного варианта мишенного узла сооружаемого источника нейтронов.

Научный руководитель – канд. физ. -мат. наук, доцент С.Ю. Таскаев.

Исследование неустойчивостей в гравитирующем диске

Е.А.Бреусов

Новосибирский государственный университет

В рамках интеграционного проекта СО РАН №148 ведутся исследования по изучению происхождения планет солнечной системы. Основой моделирования является решение кинетических уравнений для межзвездного вещества и уравнения для гравитационного потенциала. Численное моделирование является единственным источником получения сведений об этом процессе, поскольку аналитических решений нет, а эксперименты не возможны. Поэтому большую роль играет исследования правильности полученных решений. Именно это является основной целью данной работы.

**Для того чтобы было возможно предсказывать, что будет происходить с первоначальным протопланетным облаком, строится теоретическая модель развития неустойчивостей. Из проведенных численных экспериментов следует, что в начале неустойчивость развивается в радиальном направлении и уже после этого в угловом. Зная это, делается упрощение: из трехмерной цилиндрической системы координат, мы переходим в одномерную, в которой все переменные зависят только от радиуса. Считая по остальным координатам (по углу и высоте) все функции стационарными, исследуется развитие неустойчивости по радиусу. Из системы гидродинамических уравнений для гравитирующей системы тел находим дисперсионное соотношение в зависимости от радиуса. Далее**

**считая, что система по радиусу пришла в стационарное состояние, рассматривается развитие неустойчивостей уже по углу. Таким образом, получаем зависимость развития облака от параметров системы.**

**Результаты, полученные теоретически, проверяются сравнением с результатами численного моделирования.**

**Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, в.н.с. ИВМиМГ СО РАН В.А. Вшивков.**

**РЕГИСТРАЦИЯ ДИНАМИКИ И СОСТАВА ПЛАЗМЫ,  
ВОЗНИКАЮЩЕЙ В ПЛАНАРНОМ МАЗЕРЕ ПРИ ГЕНЕРАЦИИ СВЧ  
ИМПУЛЬСА**

Е. А. Бянкин  
Новосибирский государственный университет

На установке ЭЛМИ в ИЯФ СО РАН проводятся эксперименты по генерации микросекундных импульсов мощного 4-х мм излучения по схеме мазера на свободных электронах. В экспериментах установлено, что при генерации импульса излучения в вакуумном канале мазера возникает плазма. При появлении плазмы непосредственно в резонаторе генерация излучения прекращается. В связи с этим возникла необходимость изучить свойства этой плазмы и найти условия предотвращения ее возникновения.

Для регистрации динамики и состава плазмы в канале мазера была использована оптическая диагностика на основе регистрации свечения плазмы на различных участках по длине канала. Свет плазмы выводится через отверстия диаметром 1.5мм в пяти точках по длине канала и направляется по световодам на блок из 5-ти ФЭУ. В отдельных опытах

свет, поступающий по одному из световодов, подается на входную щель монохроматора, в котором производится его спектральный анализ.

В докладе описана спектральная диагностика света плазмы, возникающей в канале планарного лазера, и представлены результаты изучения ее поведения в различных экспериментальных условиях.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. А.В.

Аржанников.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА ИОНОВ Н<sup>-</sup>**

И.А. Иванов

Новосибирский Государственный Университет

В Институте ядерной физики создается тандемный ускоритель для бор-нейтронозахватной терапии. Одним из ключевых элементов ускорителя является поверхностно-плазменный источник, обеспечивающий получение интенсивного, непрерывного пучка отрицательных ионов. Качество формирования пучка ионов определяет эксплуатационные характеристики ускорителя, что делает актуальным вопрос расчета и оптимизации формирующей ионно-оптической системы источника.

Настоящая работа посвящена численному моделированию формирования пучка отрицательных ионов в источнике. Для моделирования использовалась универсальная программа PBGUNS (ver. 5.04), разработанная в США и используемая для расчетов вытягивания, ускорения, фокусировки и транспортировки пучка заряженных частиц во многих лабораториях мира. Преимуществом программы является расчет положения и формы границы плазмы при вытягивании пучка, также программа позволяет интерактивно изменять параметры плазмы (около 100 параметров) и получать характеристики формируемого пучка (траектории, эмиттанс, распределение тока, положение эквипотенциалей).

Задачей данной работы было исследование возможностей программы PBGUNS для моделирования трехмерного аксиально-симметричного эмиттера отрицательных ионов поверхностно-плазменного источника. В процессе работы были установлены ограничения программы, связанные с двухмерностью моделирования плазмы и приводящие к искажению

плазменной границы. Для корректировки этого эффекта была использована специальная форма эмиттера, исключаящая стягивание траекторий частиц на ось пучка.

С учетом выявленных ограничений проведено численное моделирование формирования аксиально-симметричного пучка в геометрии ионно-оптической системы, близкой к экспериментальной. Исследовано влияние параметров эмиссии (формы эмиттера, начальной энергии ионов, плотности тока, плотности расчетных траекторий, углового разброса скоростей отрицательных ионов) на положение границы плазмы и качество сформированного пучка.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. Ю.И. Бельченко.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИОННОГО ПУЧКА В ИОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С РАЗЛИЧНЫМИ АПЕРТУРАМИ**

А.В. Киселев

Новосибирский государственный университет

Активная корпускулярная диагностика является важным инструментом для исследования параметров плазмы в крупных термоядерных установках. С помощью этой диагностики измеряются такие параметры плазмы, как ионная температура и плотность нейтральных атомов, вид функции распределения ионов по скоростям, локальные измерения концентрации ионов примесей легких элементов и др. Наша лаборатория разрабатывает диагностические инжекторы для таких диагностик.

Важным параметром диагностики является пространственное разрешение. Плазма в современных термоядерных установках имеет размер порядка 1м, а требуемый размер диагностического пучка должен составлять  $\leq 10$  см. Для этого необходимы диагностические пучки с малой угловой расходимостью. Угловая расходимость сформированного пучка ионов должна быть на уровне  $10^{-2}$  рад. Для достижения столь малой

угловой расходимости требуется тщательная оптимизация ионно-оптических систем (ИОС).

В данной работе проводилось исследование зависимости расходимости пучка в одноапертурной ИОС с различной геометрией элементарной ячейки. Инжектор состоял из источника плазмы и четырех-электродной одноапертурной ИОС. Диагностика пучка производилась на расстоянии 2,8 м от инжектора набором 16-ти вторично – эмиссионных датчиков, расположенных в виде креста, и находящимся по центру креста болометрическим датчиком.

Эксперименты с различными ИОС показали существенную зависимость расходимости пучка от геометрии ячейки. Исследования, проведенные с ячейкой диаметром 10мм, вместо использующихся сейчас 4мм, дали хорошие результаты по расходимости и току пучка. Это дает возможность при изготовлении многоапертурных ИОС увеличить размер ячеек и при том же коэффициенте прозрачности уменьшить их количество, а следовательно упростить процесс изготовления ИОС.

В результате экспериментов была показана возможность улучшить параметры инжектора путем подбора геометрии ИОС.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук И.В. Шиховцев.

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕНОГО ИМПУЛЬСА КОНЕЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ С БЕЗСТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМОЙ**

С.Е. Козьмин

Новосибирский государственный университет

Сейчас, изучение взаимодействия лазерного излучения с плазмой вызывает повышенный интерес, потому что при использовании мощного лазера, мы ионизуем ту среду, в которой он работает, что меняет ее характеристики. Настоящая работа посвящена исследованию взаимодействия лазерного импульса конечной продолжительности, со слоем бесстолкновительной плазмы хорошо известным методом частиц в ячейках (Particles in cells).

В настоящее время получены результаты, хорошо согласующиеся с реальными данными физических явлений.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, в.н.с. ИВМиМГ СО РАН В.А. Вшивков.

# **ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛИНИИ $H_{\alpha}$ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИФфуЗИИ АТОМОВ ВГЛУБЬ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-3**

А. И. Губанов

Новосибирский государственный университет

На установке ГОЛ-3 ИЯФ СО РАН проводятся исследования по нагреву и удержанию плазмы в гофрированном магнитном поле. Плазма нагревается релятивистским электронным пучком за счёт коллективных процессов.

Для исследования процесса удержания плазмы был создан спектральный прибор с пространственно-временным разрешением, позволяющий измерять абсолютное распределение интенсивности свечения выбранной линии по радиусу хорды. С помощью прибора была исследована эволюция радиального профиля излучения линии  $H_{\alpha}$ . Для восстановления профиля радиального распределения по хордовым измерениям был предложен и программно реализован метод решения уравнения Абеля. Знание абсолютной интенсивности линии  $H_{\alpha}$  и решение обратной задачи позволяют определить диффузию атомов водорода вглубь горячей плазмы.

В результате исследования было показано, что на установке ГОЛ-3 удерживается стабильная однородная плазма с временем существования 2 мс. Измеренное распределение интенсивности линии  $H_{\alpha}$  показывает наличие атомов водорода в горячей области плазмы.

Научный руководитель – м.н.с. И. А. Иванов.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА ПУЧКА И ЕГО УГЛОВОЙ РАСХОДИМОСТИ ПО ДОПЛЕРОВСКИ СМЕЩЕННОЙ ЛИНИИ $H_{\alpha}$**

В.В. Ханаев

Новосибирский государственный университет

Диагностика, основанная на инжекции в плазму пучков ионов и атомов, получила широкое распространение на крупных термоядерных установках. С ее помощью можно определять такие параметры плазмы как локальная плотность и ионная температура плазмы, концентрация и температура примесей и т.д.

Важными параметрами пучка являются его состав и угловая расходимость. Наличие примесей в ионном источнике приводит к появлению в пучке частиц с энергией  $E/2$  и  $E/3$  помимо энергии  $E$ . Для диагностических целей обычно требуется иметь в пучке как можно больше частиц с полной энергией  $E$ . Также угловая расходимость пучка должна быть минимальна.

Измерение состава и угловой расходимости нейтрального пучка является достаточно сложной и важной задачей. Для определения этих параметров очень удобно использовать оптические методы измерения.

В данной работе используется бесконтактный метод, основанный на эффекте Доплера. Исследовался пучок диагностического атомарного инжектора с энергией 50КэВ и током 2А.

По отношению интенсивностей доплеровски смещенных линий определяется процентное содержание пучка. А по уширению спектральных линий определяется угловая расходимость каждой компоненты пучка.

Излучение  $H_{\alpha}$  инжектируемых атомов пучка, возбужденных столкновениями с фоновым газом, наблюдается под углом к оси пучка и попадает на входную щель монохроматора МДР-23. Спектр регистрируется с помощью CCD матрицы цифровой фотокамеры. Далее изображение обрабатывается в программе MATLAB.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук П.П. Дейчули.

## **ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА НЕЙТРАЛОВ НОВОГО НАГРЕВНОГО ИНЖЕКТОРА**



## А. В. Киреенко

Новосибирский государственный университет

Газодинамическая ловушка (ГДЛ) представляет собой осесимметричный пробкотрон с большим пробочным отношением. Плазма на данной установке состоит из двух компонент – мишенной плазмы с температурой  $\sim 100$  эВ и популяции быстрых ионов со средней энергией 7,5 кэВ и плотностью в точках останова до  $3 \cdot 10^{13} \text{см}^{-3}$  [1]. Популяция быстрых ионов возникает в результате захвата инжектируемых атомарных пучков, создаваемых системой инжекторов установленных под углом  $45^\circ$  к оси установки двумя группами по три инжектора. При этом в мишенную плазму инжектируются атомы водорода или дейтерия с суммарным током 250 эквивалентных ампер, средней энергией 17 кэВ и угловой расходимостью  $1^\circ$  в направлении перпендикулярном оси установки и  $2.5^\circ$  вдоль оси. Длительность атомарной инжекции в настоящее время составляет 1 мс, полная инжектируемая мощность 4 МВт.

С целью повышения параметров плазмы, планируется провести модернизацию системы атомарной инжекции. При этом, время инжекции составит 4 мс, полный инжектируемый ток атомов с энергией 25 кэВ составит 300 экв.А [2]. Новая система инжекции впервые будет опробована в эксперименте с мини-пробкотроном, который будет вставлен в центральную часть установки ГДЛ.

Угловая расходимость пучка, его энергосодержание, а также мощность, захваченная в плазму – важные параметры, которые желательно контролировать при каждом выстреле. Для этой цели нами собрана и приспособлена к условиям эксперимента на ГДЛ штатная диагностика. Она состоит из системы вторично-эмиссионных датчиков (с их помощью измеряется профиль плотности тока пучка) и калориметра, представляющего из себя вольфрамовую проволоку, по которой пропускается постоянный ток. По изменению сопротивления нагретой выстрелом инжектора проволоки рассчитывается энергосодержание в пучке. Экспериментально измерен профиль плотности тока пучка нового нагревного инжектора, вычислена угловая расходимость

- 
1. V.V.Mirnov, D.D.Ryutov, Sov. Tech. Phys. Lett. 5 (1979) 279.
  2. P.P.Deichuli et al. The 10th International Conference on ION SOURCES JINR. Dubna 2003

Научный руководитель – к. ф.-м. н, мл. науч. сотр. С. В. Мурахтин.

# КВАНТОВАЯ ОПТИКА

## РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ МАЛОГАБАРИТНОГО ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ЭКСИМЕРНОГО KrF ЛАЗЕРА С ВЫСОКОЙ ЧАСТОТОЙ СЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ

С.А. Благодарный  
Новосибирский государственный университет

По мере увеличения средней мощности и надежности импульсно-периодических электроразрядных эксимерных лазеров расширяется область их применения во многих научных и промышленных направлениях.

Для достижения высокой частоты следования импульсов необходима реализация следующих задач:

1. Создание высокоэффективной схемы накачки лазера, позволяющей работать с высокой частотой следования импульсов. Ключевым моментом при создании высокочастотной схемы возбуждения, является разработка сильноточных коммутирующих устройств. В данной работе предлагается схема накачки, в которой роль коммутатора выполняет последовательный искровой разряд. Такая схема обладает более высокой эффективностью, так как в ней отсутствуют магнитные ключи.

2. Создание газодинамического контура лазера, обеспечивающим высокую скорость прокачки газа через рабочий объем с высокой однородностью и с последующим его конвективным охлаждением. Это позволит снизить неустойчивость разряда к возмущениям плотности газа в рабочем объеме.

Разрабатываемый в данной работе лазер может быть применен для решения следующего ряда задач:

1. Визуализация газодинамической структуры, создаваемой яркими быстроизменяющимися объектами.

2. Исследования пламен методом спонтанного комбинационного рассеяния.

3. Исследования биологических тканей лазерно-индуцированной флюоресценции излучения эксимерных лазеров.

---

1. Борисов В. М., Виноходов А. Ю., Водчиц В. А., Демин А. И., Ельцов А. В., Бастинг Д., Штамм У., Фосс Ф. Квантовая электроника., 1998, том 25, N2, с 126-130.

2. Bragin I., Klafit I., Kleinschmidt K., Osmanov R., Schoeder T., Vogler W., Zschocke W., Basting D. Proc. SPIE, 1999, Vol.3679, p1050.

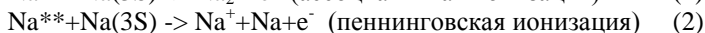
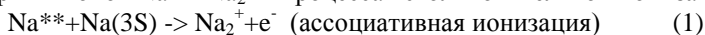
Научный руководитель – канд. техн. наук А.Н. Малов

## ТЕПЛОВАЯ И СТОЛКНОВИТЕЛЬНАЯ ИОНИЗАЦИЯ РИДБЕРГОВСКИХ $nS$ И $nD$ АТОМОВ НАТРИЯ

И.И. Бетеров

Новосибирский государственный университет

В последнее время значительное развитие получила теория столкновений с участием высоковозбужденных (ридберговских) атомов. Столкновения ридберговских  $nS$  и  $nD$  атомов натрия с атомами натрия в основном состоянии  $3S$  приводят к образованию атомарных и молекулярных ионов  $Na^+$  и  $Na_2^+$  в процессах столкновительной ионизации:



Атомарные ионы  $Na^+$  также образуются в результате взаимодействия ридберговских атомов с тепловым излучением:



Теоретические расчеты констант скорости столкновительной ионизации достаточно хорошо согласуются с имевшимися ранее экспериментальными данными. В связи с этим возникла необходимость в уточнении экспериментальных данных, анализе физических процессов, приводящих к ионизации атома в условиях эксперимента, проверке и уточнении теоретических моделей.

Для определения констант скорости столкновительной ионизации нами применена оригинальная экспериментальная методика, основанная на измерении отношения вероятностей образования атомарных и молекулярных ионов. Особый интерес представляет исследование фотоионизации ридберговских атомов натрия тепловым излучением, так как расчетные значения скорости тепловой фотоионизации в данной методике используются при определении констант скорости столкновительной ионизации. В результате работы были измерены константы скорости ассоциативной ионизации в столкновениях и скорость тепловой фотоионизации ридберговских  $nS$  и  $nD$  ( $n=9-20$ ) состояний

атомов натрия, сделано сравнение с теоретическими расчетами, проведенными на основе модели DSMJ и ее нелинейной модификации.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук И.И. Рябцев.

# **НЕЛИНЕЙНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ АТОМАРНЫХ ГАЗОВ В ЭЛЛИПТИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПОЛЯХ**

Д.В. Бражников

Новосибирский государственный технический университет

Нелинейная спектроскопия атомарных газов является одной из приоритетных направлений современной лазерной физики и квантовой оптики. В частности, можно указать спектроскопию сверхвысокого разрешения, фундаментальную метрологию (стандарты частоты и времени, магнитометрию), нелинейную оптику и т.д. И хотя общие причины формирования внутريدоплеровского спектроскопического сигнала хорошо известны, тем не менее, имеется ряд принципиальных вопросов, требующих более детального теоретического и экспериментального исследования. Одним из таких вопросов является поляризационный аспект взаимодействия атомов с полем и его влияние на нелинейные резонансы.

В настоящей работе исследовалась внутريدоплеровская спектроскопия атомарного газа во встречных эллиптически поляризованных световых пучках, резонансных оптическому переходу  $F_g \rightarrow F_e$ , энергетические уровни которого вырождены по проекциям углового момента ( $F_g$ ,  $F_e$  – полные угловые моменты основного и возбужденного состояний, соответственно). При этом учитывались различные типы релаксационных процессов (радиационная, пролетная и столкновительная). Показано, что форма (симметрия или асимметрия) и параметры нелинейного резонанса

(амплитуда, положение) существенным образом зависят от поляризационных характеристик светового поля. Особое внимание было уделено выявлению качественно новых особенностей, отсутствующих для линейно и циркулярно поляризованных волн, и которые в принципе нельзя объяснить в рамках простой модели двухуровневого атома. Так, было обнаружено, что в эллиптически поляризованном поле матрица плотности в основном и возбужденном состояниях приобретает новые вклады, зависящие от отстройки нечетным образом. Это приводит к тому, что в случае встречных волн с одинаковой частотой резонанс поглощения пробного поля может приобретать асимметрию и сдвиг даже без учета эффектов отдачи и квадратичного по скорости доплеровского сдвига частоты. Данное обстоятельство может оказаться принципиальным с метрологической точки зрения, поскольку приводит к постановке задачи о степени влияния неконтролируемых параметров поляризации световых полей в оптических стандартах частоты на точность определения положения резонанса.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук В.И. Юдин

## РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩЕГО СЕЛЕКТОРА ДЛИН ВОЛН ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДВУОСНОГО КРИСТАЛЛА

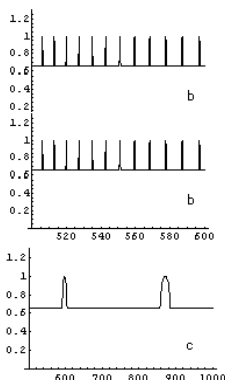
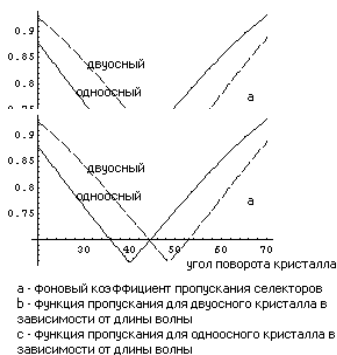
А.О. Завьялов

Новосибирский государственный университет

В данной работе впервые исследованы характеристики лазерного двулучепреломляющего селектора (ДС) длин волн излучения на основе двуосного кристалла. Определены: функция пропускания селектора, скорость перестройки длины волны излучения, скорость изменения контраста функции пропускания при перестройке длины волны излучения. Расчет параметров селектора базировался на системе уравнений Максвелла и уравнении Снелиуса с использованием матричного формализма для решения задачи определения пропускания ДС в оптическом резонаторе.

При сравнительном анализе основных характеристик ДС на основе одноосного и двуосного кристаллов рассматривались варианты ДС из кристаллического кварца и моногидрата муравьинокислого лития ( $\text{LiCNO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) с одинаковыми параметрами. Установлено, что ДС на основе двуосного кристалла имеет существенно меньшую область свободной дисперсии (7 нм, в то время как у ДС на основе кварца ~275 нм)

и меньшую скорость перестройки длины волны излучения (~1.5 нм/град., у ДС на основе кварца ~2.9 нм/град.). Зависимости фоновых коэффициентов пропускания (см. рис.), характеризующих контраст функции пропускания ДС, имеют схожий характер и отличаются только значением угла поворота, при котором достигается наибольший контраст.



Важной особенностью ДС на основе двуосного кристалла является существенно меньшая (в ~40 раз) область свободной

дисперсии при сравнимой скорости перестройки по сравнению с селектором из одноосного кристалла при одинаковых толщинах пластинок. Это позволит создать более избирательные по длине волны лазерные ДС на основе двуосных кристаллов при относительно небольших толщинах пластин.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук С.М. Кобцев  
 ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХДЛИННОПЕРИОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ  
 МЕТОДОМ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ  
 ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

А.В. Пятигорец  
 Новосибирский государственный университет

Изучение сверхдлиннопериодных колебаний Земли было начато сравнительно недавно – четверть века назад. Данными колебаниями, впервые обнаруженными Санкт-Петербургскими исследователями, называют колебания Земли в области периодов от 1 до 12 часов. В

настоящее время не существует определенной теории, раскрывающей их природу, и эта тема остается дискуссионной.

Для регистрации сверхдлиннопериодных колебаний используются в основном сейсмометры, маятники, лазерные деформографы. Последние обычно выполнены по схеме интерферометра Майкельсона, причем оптический путь зондирующего пучка от лазерного источника до отражателя проходит в вакуумированных лучеводах. Это продиктовано необходимостью уменьшения помех, вносимых в регистрацию нестабильностью атмосферных параметров.

Существенным отличием лазерного деформографа, используемого нами в штольневых измерениях, является то, что оптические пути зондирующих лазерных лучей лежат в открытой атмосфере. Практически полное отсутствие влияния метеопараметров (главным образом давления) на результаты длительных непрерывных измерений (1-3месяца) обеспечивается оригинальной схемой и методикой обработки данных. Благодаря такому способу регистрации удалось получить ряд новых результатов, касающихся происхождения сверхдлиннопериодных колебаний Земли.

В работе показано, что сверхдлиннопериодные колебания носят цуговой характер, а их спектр дискретен. Временной и спектральный анализ колебаний земной коры и атмосферного давления с периодами  $T \geq 1 \text{ час}$  позволил впервые обосновать существование жесткой коррелированной связи между ними, указывая на общий источник их возбуждения. Явление нестационарности сверхдлиннопериодных колебаний и их спектров подтверждается не только зависимостью амплитуд регистрируемых гармоник от времени, но и впервые наблюдаемым авторами эффектом дрейфа частот. С целью интерпретации ранее известных и новых экспериментальных фактов высказано предположение о гравитационном механизме возбуждения сверхдлиннопериодных колебаний. Рассматривая в качестве источника вариаций гравитационного поля Земли вынужденные малые колебания ее внутреннего ядра, сделана оценка амплитуды его сдвиговых колебаний.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук В.А. Орлов  
**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЙ ЭКСИМЕРНЫЙ  
KrCl ЛАЗЕР (223 НМ) С АКТИВНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДОЙ НА ОСНОВЕ  
БУФЕРНОГО ГАЗА He**

Д.С. Чуркин  
Новосибирский государственный университет

Представлены результаты экспериментального исследования влияния параметров накачки на энергию излучения и кпд эксимерного

электроразрядного *KrCl* лазера (223 нм) с активной средой состава *He-Kr-HCl*.

Показано, что для получения высоких значений энергии излучения и кпд *KrCl* лазера с активной средой на основе буферного газа *He* необходимо достичь удельной мощности накачки активной газовой среды не менее 6 МВт/см<sup>3</sup>.

Разработана электрическая схема возбуждения типа *LC* – инвертор с искровым разрядником РУ – 65 в качестве высоковольтного коммутатора, автоматической УФ предыонизацией среды и низкоиндуктивным разрядным контуром, позволяющая обеспечить требуемую удельную мощность накачки активной газовой среды.

Впервые в активной среде состава *He-Kr-HCl* при полном давлении смеси 3,5 атм и зарядном напряжении 30 кВ получены значения энергии лазерного излучения 300 мДж, при этом кпд лазера составил 0,5%.

На основе *KrCl* лазера впервые была разработана УФ офтальмологическая лазерная установка «Медилекс» для коррекции аномалий рефракции зрения (близорукость, дальнозоркость, астигматизм) на длине волны 223 нм.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук А.М. Ражев

## **АЛГОРИТМ СИНТЕЗА МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ. ПРОЦЕСС КОРРЕКЦИИ ФАЗЫ, ЧИРПОВАННЫЕ СТРУКТУРЫ**

**П.А. Холохонова**

**Новосибирский государственный университет**



Дизайн полупроводниковых многослойных структур с заданными спектральными и/или фазовыми свойствами остается одной из актуальных проблем лазерной техники. Тонкопленочные покрытия широко используются в качестве отражающих, просветляющих элементов, оптических фильтров, делителей света. Также с развитием фемтосекундной оптики возникла потребность в оптических элементах, обладающих определенными фазовыми характеристиками. Многослойные структуры, выполняющие эту функцию, были названы «чирпованными» зеркалами. Они обеспечивают спектральную зависимость групповой скорости волнового пакета, позволяющую сжать во времени лазерный импульс.

В работе представлен численный метод дизайна многослойного покрытия. Расчетная программа выполнена в среде MatCad на базе описания, приведенного В. Саусвеллом [1].

В отличие от [1] в процессе синтеза структуры была использована не только коррекция по спектру, но и фазовая коррекция. Этот подход позволяет конструировать оптические покрытия с заданными фазовыми свойствами.

Эмпирически установлены наиболее удачные способы задания фазы.

---

1.W. H. Southwell. Coating desing using very thin high- and low-index layers, Appl. Opt., v.24(4), 1985

Научный руководитель – гл. специалист Г.В. Эрг

## СЛОЖНАЯ ДИНАМИКА В МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ДВУХЧАСТОТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

И.В. Измайлов, А.В. Лячин, Д.А. Шергин  
Томский государственный университет

Излагается методика исследования динамических систем на примере математической модели процессов в нелинейном кольцевом интерферометре (НКИ) в форме дискретного отображения (ДО):

$$U_{i+1} = K \{ 1 + \gamma \{ Q_a \cos[(1+q)(\Phi+U_i)] + (1-Q_a)\cos[(1-q)(\Phi+U_i)] \} \}, \quad (1)$$

где  $U$  - нелинейный фазовый набег в керровской среде,  $Q_a$  - доля интенсивности высокочастотного компонента в спектре входного сигнала,  $q$  - параметр бихроматичности,  $K$  - параметр нелинейности,  $\gamma$  - удвоенный параметр потерь,  $\Phi$  - линейный фазовый набег в контуре обратной связи.

Показана продуктивность сопоставления двух способов описания процессов в НКИ (с помощью ОДУ и ДО) на базе построения линий бифуркаций, бифуркационных диаграмм (БД), карт ляпуновских характеристических показателей (ЛХП) и фрактальной размерности (см. рис. 1). Для количественного анализа карт предложено вычислять и строить: а) плотность вероятности значений фрактальной размерности, отображенных на карте; б) долю площади карты ЛХП, соответствующей хаотическому режиму.

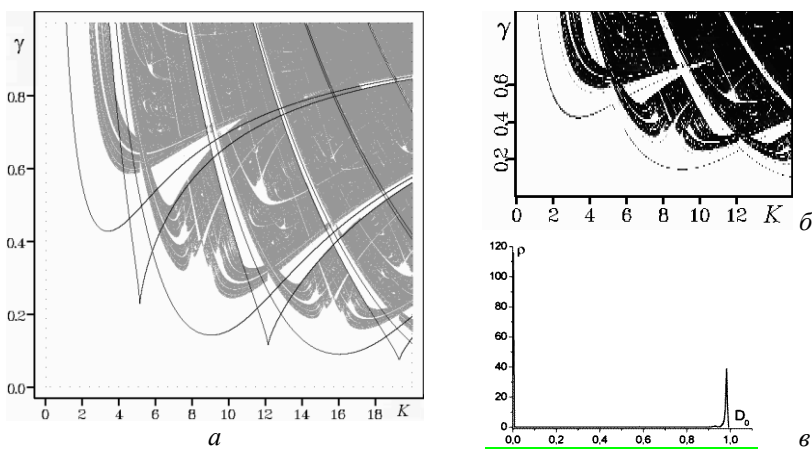


Рис. 1. Контрастная карта ЛХП ( $sgn \Lambda$ ) с аппликацией линий бифуркаций (а), карта фрактальной размерности  $D_0(K, \gamma)$  (б) и плотность вероятности  $\rho(D_0)$  на карте  $D_0(K, \gamma)$  (в) при  $q=0,1$ ,  $Q_a=0,1$ ,  $\Phi=0$ .

**Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Б.Н. Пойзнер**

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ ПО ЛИНИЯМ СВЯЗИ С БОЛЬШОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

А.Д. Шапиро  
Новосибирский государственный университет

Рассмотрена задача о распространении одиночного импульса в линии связи с управляемой дисперсией. Моделирование периодической волоконной линии выполнялось в рамках обобщенного уравнения Шредингера. Найден оптимальный диапазон значений отрицательной средней дисперсии, при которых импульс не уширяется.

Показано, что в терминах Q-фактора линии связи с большой отрицательной дисперсией обеспечивают лучшую передачу битовых последовательностей по сравнению с нулевой средней дисперсией. При  $\langle D \rangle = 0$  ps/nm/km Q- фактор равен 3.5, если  $\langle D \rangle = -0.8$  ps/nm/km Q- фактор составляет 5.2.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук А.М. Ражев

## **МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ В НЕЛИНЕЙНОМ ОПТОВОЛОКОННОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ**

**И.В. Романов, И.В. Измайлов**

**Томский государственный университет**

Изучение нелинейных кольцевых систем перспективно с точки зрения использования в оптических устройствах (де)шифрования. Авторами предложена структурная схема (рис. 1) трёхконтурного нелинейного оптоволоконного интерферометра (НОВИ) с запаздыванием. С учётом представлений, имеющих в литературе,

построена математическая модель процессов в НОВИ. Составлена компьютерная программа, моделирующая процессы интерференции и нелинейного взаимодействия в НОВИ на основе волокна со ступенчатым профилем без дисперсии Разработана и проведена процедура верификации модели и программы.

Проведённое компьютерное моделирование показало, что результаты не противоречат данным для модели четырехзеркального интерферометра с поворотом оптического поля на  $120^\circ$ . С помощью вычислительных экспериментов изучено поведение НОВИ при изменении параметров модели, построены фазовые портреты, имитировалось "вскрытие" параметров шифратора средствами корреляционного анализа. Показано, что в модели процессов в НОВИ реализуются устойчивые и неустойчивые режимы динамики, в частности режим детерминированного хаоса (рис. 2).

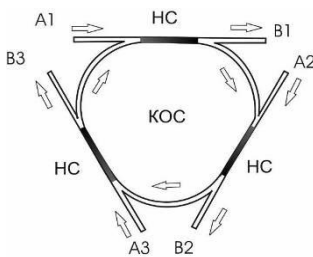


Рис 1.

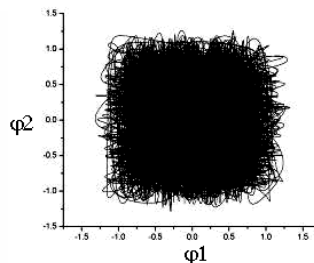


Рис 2.

Полученные результаты позволяют перейти к задачам синтеза дешифратора, совершенствования модели процессов в НОВИ и оптимизации устройства скрытия информации оптического диапазона.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Б.Н. Пойзнер

## **ВЫНУЖДЕННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В РАСТВОРЕ АЦЕТОН-ВОДА**

**М.Е. Нагорный**

**Самаркандский государственный университет**

Целью работы является изучение зависимости энергетических параметров ВРМБ от температуры в растворе с особой точкой. Задачей исследования является измерение энергетических параметров ВРМБ в растворе ацетон-вода вблизи и в особой точке, а также в чистой воде и ацетоне.

Для проведения экспериментов по изучению ВРМБ использовалась лазерная установка, состоящая из задающего генератора, двухпроходного усилителя, кристалла КДР для преобразования излучения во вторую гармонику, фильтра СЗС-22 для выделения излучения 0,53 мкм. Излучение с  $\lambda=1,06$  мкм поглощается СЗС-22. ОКГ на неодимовом стекле работает в режиме генерации гигантского импульса с пассивной модуляцией добротности на одной продольной и одной поперечной модах. Длительность импульса составляла 25 нс.

Было показано, что зависимости  $R$ ,  $K$ ,  $B$  от энергии возбуждающего излучения в чистом ацетоне и воде имеют существенные различия. Так, порог ВРМБ в воде в 4 раза выше порога возбуждения в ацетоне. Зависимость  $B$  от энергии возбуждающего излучения также отличаются при энергиях лазерного излучения ниже пороговых значений возбуждения ВРМБ. В допороговой области величина  $B$  в ацетоне уменьшается с увеличением энергии возбуждающего излучения от 1 до  $\sim 0,75$ . С возникновением ВРМБ она остаётся постоянной в измеренном интервале энергий возбуждающего излучения. В воде величина баланса энергии  $B$

постоянна ( $\approx 0,75$ ) при всех исследованных значениях энергии возбуждающего излучения.

На основании проведённых исследований энергетических

параметров ВРМБ в растворе ацетон-вода и чистых ацетоне и воде

можно сделать следующие выводы:

1. Процесс ВРМБ в растворе ацетон-вода определяется наличием ацетона в растворе.

2. Пороги возникновения ВРМБ в чистой воде приблизительно в 3 раза выше, чем в растворе ацетон-вода и чистом ацетоне.

3. Пороги ВРМБ в растворе ацетон-вода при температурах  $24^{\circ}\text{C}$  и  $24,5^{\circ}\text{C}$  различаются в 1,5 раза, и такое отличие, по-видимому, объясняется различием поглощения гиперзвука при этих температурах.

Научный руководитель - д-р физ.-мат. наук, проф. Л.М. Сабиров

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ  
КОМПЬЮТЕРНОЙ МАТЕМАТИКИ В МАТЕМАТИЧЕСКОМ  
МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ЖЁСТКОГО  $\gamma$ -ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Р.Д. Сулейманов

**Самаркандский государственный университет**

Целью данной работы является исследование процессов взаимодействия тормозного излучения релятивистских электронов с энергией  $E=10$  МэВ с веществом методом математического моделирования. Моделирование проводится на СКМ Mathematica 5 методом статистических испытаний (метод Монте-Карло). “Численная природа” метода Монте-Карло вовсе не означает, что аналитические вычисления не применяются, напротив, в данной работе применение систем компьютерной алгебры продиктовано именно тем, что эффективность (и достоверность!) метода Монте-Карло определяется предварительными в большей степени аналитическими вычислениями, от

корректности и оптимальности которых зависит “численный” алгоритм Монте-Карло. Именно исходя из этих соображений автор использовал СКМ Mathematica 5 выполняющую как аналитические вычисления, так и численные, причём последние выполняются в режиме векторных вычислений, что позволяет наиболее оптимально использовать возможности современных микропроцессоров, поддерживающих многопоточные параллельные вычисления.

Моделирование эксперимента методом статистических испытаний в данной работе сводится к обработке так называемой матрицы эволюции (терминология автора), состоящей из векторов состояния  $\gamma$ -квантов. Таким образом вектор состояния описывает только один  $\gamma$ -квант, а матрица эволюции – весь пучок  $\gamma$ -квантов. В начальный момент времени производится инициализация матрицы эволюции, то есть разыгрывается энергия  $\gamma$ -квантов, начальные координаты и проекции векторов начальной скорости  $\gamma$ -квантов. Моделирование взаимодействия пучка  $\gamma$ -квантов с веществом сводится к розыгрышу комптоновского рассеяния  $\gamma$ -квантов и образования пар  $e^+e^-$  с их последующей аннигиляцией. Фотоэффектом и когерентным рассеянием  $\gamma$ -квантов пренебрегаем в виду незначительности их сечений в рассматриваемом диапазоне энергий.

Научный руководитель – доц. Р.М. Эшбуриев

## **АНАЛИЗ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ АТТРАКТОРОВ В МОДЕЛИ КОЛЬЦЕВОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА**

А.В. Лячин, С.В. Лесина  
Томский государственный университет

Исследуется модель процессов в кольцевом интерферометре, содержащем элемент с керровской нелинейностью. Эти интерферометры

способны генерировать как регулярные оптические структуры, так и детерминированный хаос в поперечном сечении лазерного пучка. Поэтому такие устройства интересны как прототип устройств обработки информации, в том числе её шифрации/дешифрации. В свою очередь, это требует исследовать особенности типов и строения аттракторов в модели указанного устройства.

Как показали исследования авторов, в нелинейно-динамическом плане изучаемый интерферометр характерен, во-первых, тем, что его модель демонстрирует многообразие типов поведения (устойчивая точка, предельный цикл, хаотический аттрактор) и переходов между ними. Во-вторых, хаотический аттрактор сохраняется в относительно широких интервалах значений параметров модели. Но остаётся невыясненным вопрос о пространственном строении (о характеристиках «странности») хаотического аттрактора при различных параметрах модели. Этот вопрос актуален в связи с задачами оптимизации интерферометра в контексте обработки информации.

Исследуется пространственный детерминированный хаос в модели процессов в нелинейном кольцевом интерферометре, функционирующем в статическом режиме. Для описания динамики нелинейного фазового набег  $U$  в кольцевом интерферометре используется аппарат дискретных отображений применительно к случаям одно- и двухчастотного излучения на его входе. Количественной характеристикой «странности» аттрактора для пространственного детерминированного хаоса служит фрактальная размерность  $D_0$ .

Для того чтобы выявить области параметров интерферометра, обеспечивающих наибольшую степень скрытности передачи сообщения, зашифрованного пространственным детерминированным хаосом, рассчитаны фрактальные размерности  $D_0$  аттрактора в модели НКИ. Построена серия карт размерности  $D$  для различных параметров бихроматичности на плоскости: параметр нелинейности  $K$  и параметр  $\gamma$  – потеря излучения за один проход через НКИ.

Научный руководитель - канд. физ. -мат. наук, доц. Б.Н. Пойзнер

## **КОЛЬЦЕВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР С НАСЫЩАЮЩЕЙСЯ**



# НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ: БИФУРКАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ

**П.Е. Денисов, И.В. Измайлов**

Томский государственный университет

С развитием нелинейной оптики, лазерной физики возникает интерес к проблемам оптической обработки информации и её скрытой передачи. Анализ бифуркационного поведения в нелинейном кольцевом интерферометре (НКИ) с насыщающейся нелинейностью перспективен в плане использования НКИ для решения поставленных выше проблем.

Насыщение нелинейности в среде описывается следующим законом:

$$n = n_0 + \frac{n_2 \cdot |E_{\text{вх}}|^2}{1 + \frac{|E_{\text{вх}}|^2}{I_{\text{sn}}}}$$

С учётом этого, была получена математическая модель процессов в НКИ. Получены семейства бифуркационных диаграмм (БД), на плоскостях нелинейный фазовый набег  $U(r,t)$  – параметр нелинейности  $K$  и нелинейный фазовый набег  $U(r,t)$  – фазовая задержка в контуре обратной связи (КОС)  $\omega t_c$ .

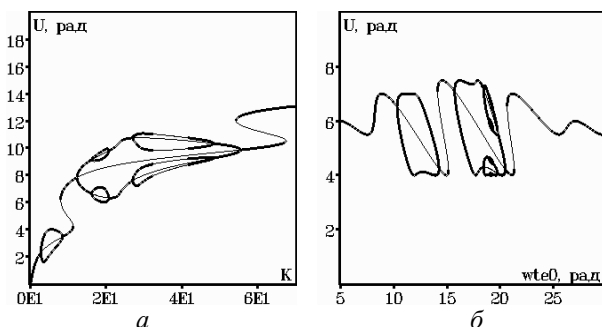


Рис. 1. Бифуркационные диаграммы при значении времени запаздывания поля в КОС  $\nu = 0$  значения коэффициента нелинейности насыщения  $K_s = 15$  и угла поворота поля в КОС  $\Delta = \pi/4$ :  $a - q = 0$ ;  $b - q = -0.14$

Из диаграмм видно, что область значительных изменений структуры БД появляется при достаточно большой нелинейности, а при дальнейшем увеличении коэффициента нелинейности ветвь БД стремится к значению  $U(r,t)$ , равному выбранному  $K_s$ .

Полученные результаты интересны в плане разработки мультистабильных логических устройств оптического диапазона.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доц. Б.Н. Пойзнер

# **ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ФЛУКТУАЦИЙ В ИЗОТРОПНОЙ ФАЗЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ МЕТОДОМ НАВЕДЕННОГО ЗВУКОМ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ**

Ш.О. Тошпулатова

Самаркандский государственный университет

Согласно модели де Жена [1], фазовый переход «изотропная жидкость – жидкий кристалл» является слабым переходом первого рода с широким интервалом, в котором наблюдаются предпереходные явления, присущие фазовым переходам второго рода [2]. При исследовании кинетики изотропной фазы (ИФ) одним из информативных параметров является время релаксации флуктуаций параметра порядка  $\square$ . Наиболее эффективным методом его измерения является метод светорассеяния [3]. Однако, разрешающей силы обычных эталонов Фабри-Перо для исследования процессов с частотами релаксации 1-100 МГц зачастую недостаточно. В настоящей работе для изучения кинетики флуктуаций параметра порядка был использован эффект двулучепреломления, наведенного звуковой волной [4]. Исследования проводились в холестерическом жидком кристалле холестерилмирилат (ХМ) на частоте звука. 5.4 МГц в интервале температур 100-84 °С (температура просветления  $T_c=83.1$  °С).

Анализ результатов показал, что в ИФ ХМ поведение наведенного двулучепреломления  $\Delta n_{ac}$  описывается в рамках среднеполюгового приближения теории Ландау-де Жена [2]. В результате расчета по экспериментальным данным было получено выражение для температурной кинетики времени релаксации флуктуаций параметра порядка в виде  $\tau=[27\pm 3]\cdot 10^{-8}\cdot (T-T^*)^{-1}$ , где  $T^*$ -температура фазового перехода второго рода. Рассчитанные времена релаксации находятся в хорошем согласии со значениями, полученными для этого же образца ХМ методом неупругого рассеяния света [5]. Таким образом метод

наведенного двулучепреломления является достаточно простым, по сравнению со спектроскопическим, и надежным при исследовании температурной кинетики флуктуаций параметра порядка в изотропной фазе жидких кристаллов.

1. де Жен П., "Физика жидких кристаллов", М.:Мир,1977.
2. Вальков А.Ю. и др., УФН, 1994, т.164(2), с.149-193.
3. Фабелинский И.Л., "Молекулярное рассеяние света", М.:Наука, 1965.
4. Сабиров Л.М. и др., Узбекский Физ. Журнал, 2002, в.4(3), с.169-174.
5. Лерман В.Ю., Сабиров Р.Л., Оптика и спектроскопия, 1997, в.82(4), с.651-652.

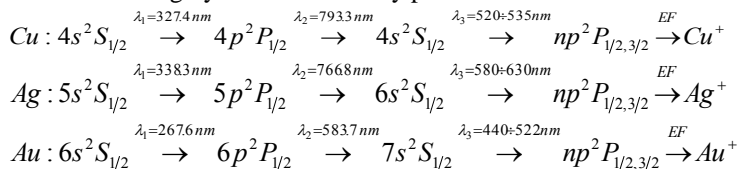
Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук., проф. Л.М. Сабиров

DETERMINATION OF THE SPECTROSCOPIC PARAMETERS  
OF I-GROUP ATOMS (*Cu*, *Ag*, and *Au*) BY METHOD OF  
LASER SPECTROSCOPY

A.S. Kholikov  
*Samarkand State University*

In the present work by method of laser selective step-by-step photoionization [1] we determined the spectroscopic parameters of I-group atoms (*Cu*, *Ag*, and *Au*), and revealed the most effective scheme of excitation and ionization to be used in further laser photoionization analysis [2]. Elements of this group attract attention of many geologists and analysts as non-ferrous, expensive metals, and good-conducting materials for needs of electronics.

Analysis of diagrams of the energy levels and transition spectra showed that the optimal scheme is that of three-step excitation of Rydberg states and ionization of the highly excited atoms by pulse electric field:



As a result of processing the photoionic spectra we determined the magnitudes of energy ( $E_n$ ) and quantum defects ( $\Delta = n - n^*$ ) of  $np^2P_{1/2,3/2}$  states of atoms *Cu* ( $n = 4 \div 70$ ), *Ag* ( $n = 5 \div 75$ ) and *Au* ( $n = 6 \div 75$ ). The

revealed states were identified with the help of quantum defects, which were equal to  $\Delta_{Cu} = 2.06$ ,  $\Delta_{Ag} = 3.02$  and  $\Delta_{Au} = 4.00$ . We determined the cross-sections of photoionization  $\sigma$  with ionization from the excited states of Rydberg atoms by method of saturation of ionic signal [1]. They were equal to  $2 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2$ ,  $5 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2$  and  $3 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2$  for atoms of *Cu*, *Ag*, and *Au*, respectively. These magnitudes are higher by 3 orders of magnitude than the cross-sections of direct photoionization from the basic state [3] that significant factor for analytical spectroscopy.

Thus, the obtained results give valuable information for chemist-analysts and spectroscopists working in the field of laser spectroscopic analysis.

1. Letokhov V.S., Mishin V.I., Tursunov A.T., and Eshkobilov N.B., *Opt.Comm.*, 41(1) 381(1982)
2. Bekov G.I., Letokhov V.S., *Appl. Phys.*, B30 161 (1983)
3. Cantu A.M., Janniti E., Pettini M., Tondello G., *Phys. Scripta*, 19 283 (1979)

Scientific adviser – prof. N.B. Eshkobilov

## ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ СИНХРОНИЗМА В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛОВ ТИПА $A^1B^3C^6_2$

Е.П. Коцубинская

Томский государственный университет

В последние годы продолжается поиск новых нелинейных кристаллов на основе тройных халькогенидов типа  $A^1B^3C^6_2$ , с высокой квадратичной нелинейностью и широким диапазоном прозрачности. Однако, упомянутые кристаллы в общем случае не позволяют выполнить условия некритичного фазового синхронизма для любой выбранной заранее длины волны накачки. Для решения этой проблемы наиболее подходят четырехкомпонентные кристаллы смешанного типа, представляющие собой твердые растворы исходных трехкомпонентных кристаллов.

В данной работе установлены коэффициенты дисперсионных уравнений Сельмейера, рассчитаны и построены и проанализированы диаграммы фазового синхронизма. Исследовано влияние процентного состава элемента  $C^6$  (теллура, серы и селена) на реализацию условий синхронизма при параметрической генерации с накачкой излучением  $YAG:Ho^{3+}$  ( $\lambda=2,1 \text{ мкм}$ ) лазера и генерации второй гармоники  $CO_2$  лазера

Усложнение состава кристаллов дает возможность варьировать в достаточно широком диапазоне их физические свойства и удовлетворять требованиям, предъявляемым на практике к нелинейным средам [1, 2].

---

1. Гейко П.П., Коцубинская Е.М. Оптические свойства и условия фазового синхронизма в твердых растворах  $\text{AgGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ . Межд. конф. «Современные проблемы физики и высокие технологии», Материалы, Томск, 2003, с.224-226.

2. Гейко П.П., Гусамов А.И., Андреев Ю.М. Оптические свойства и условия фазового согласования в нелинейных кристаллах  $\text{AgGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}_2$ . // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т.12. №7. С.606-610.

Научный руководитель - канд. физ.-мат. наук, доц. П.П. Гейко

# **ОПТИМИЗАЦИЯ ПРЯМОЙ ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ ДОЭ С НЕПРЕРЫВНЫМ МИКРОРЕЛЬЕФОМ**

Р.К. Насыров

Новосибирский государственный университет

В настоящей работе рассмотрен метод повышения дифракционной эффективности для ДОЭ, изготавливаемых методом прямой записи сфокусированным пучком. Основным ограничителем дифракционной эффективности многоуровневых ДОЭ является величина обратного ската зон, которая при записи сфокусированным пучком определяется, в основном, его размером. В результате свертки расчетного профиля «с блеском» и гауссового распределения интенсивности возникает обратный скат и эффективность элемента падает. Существуют методы оптимизации формы распределения экспозиции в дифракционных зонах, позволяющие частично компенсировать влияние размера записывающего пучка. В известных работах оптимизация распределения попиксельной импульсной экспозиции основана на итерационных алгоритмах подбора уровня экспозиции для каждого пиксела (~0.5 мкм) по критерию минимизации геометрических отклонений или достижения максимума дифракционной

эффективности. Основным недостатком таких методов является то, что для реальных ДОО, в которых период дифракционных зон меняется в широких пределах, время оптимизационных расчетов резко увеличивается.

В настоящей работе предлагается проводить лишь упрощенную оптимизацию: изменять распределение экспозиции только в узком участке вдоль границы дифракционных зон с шириной порядка 2 диаметров записывающего пучка. Этот участок дает определяющий вклад.

В результате оптимизации только этих небольших участков, а так же упрощении формы скорректированного распределения экспозиции удается получить универсальные решения, применимые для широкого диапазона периодов с существенным ростом эффективности.

Проверка предложенного метода проводилась в приложении к круговой лазерной записывающей системе CLWS-300IAE с диаметром пучка 0.3 мкм. Ниже в таблице приведены результаты расчетов эффективности для оптимизированной и неоптимизированной экспозиции:

Период, мкм	3	5	7	10	15
Без опт / с	59 /	74 /	81 /	86.5 /	91 /
опт, %	74.5	82.2	87	90	93.5

Полученные данные показывают перспективность реализации предложенного метода в программном обеспечении записывающих устройств.

Научный руководитель – канд. техн. наук В.П. Корольков

## НЕЛИНЕЙНАЯ КОЛЬЦЕВАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ

А.Г. Филинков

Томский государственный университет

В начале 1970-х гг. появился универсальный метод исследования всех скачкообразных переходов, разрывов, внезапных изменений. Он разрабатывается в рамках *теории катастроф*. Обобщённость методов теории катастроф проявляется в сходстве (типичности) результатов из самых разнообразных областей науки. Данная теория позволяет, в частности, свести многообразие динамических систем к небольшому числу "стандартных" случаев, для которых исследованы все особенности. Примером динамических систем являются нелинейные кольцевые, демонстрирующие сложное поведение, в том числе хаотическое. В

оптическом диапазоне это, например, нелинейный кольцевой интерферометр (НКИ) [1], исследуемый в плане развития приёмов обработки информации [2]. Процессы в НКИ описываются дифференциальными уравнениями, содержащими функцию  $\cos$ .

Насколько можно судить по литературе, подобные уравнения не изучались методами теории катастроф. Традиционными при изучении поведения в модели НКИ являются методы теории бифуркаций, позволяющие строить серии бифуркационных диаграмм. Наряду с ними принято строить карты динамических режимов на плоскости параметров системы. В ходе начавшихся исследований структуры карт появляется предположение о том, что некоторые точки на картах являются особыми точками типа сборки, по классификации в теории катастроф.

Данная работа направлена на исследование математической модели процессов в НКИ средствами теории катастроф. Рассматривается её основной математический аппарат. С этой целью компьютерная программа для проверки на конечную определённость и нахождения трансверсальных деформаций [3, с. 545] адаптирована к модели [2] процессов в НКИ.

1. Новые физические принципы оптической обработки информации: Сб. ст. / Под ред. С.А Ахманова, М.А Воронцова. М.: Наука, 1990. С. 13-33; 263-325.

2. Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н. Варианты реализации нелинейно-оптического устройства скрытой передачи информации // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. N 11. С. 1074-1086.

3. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и её приложения. М.: Мир, 1980. 608 с.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Б.Н. Пойзнер

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО КОЛЬЦЕВОГО ЗЕРКАЛА ДЛЯ

ОПТИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ СИГНАЛА В ВОЛОКОННО-

ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

А.И. Латкин

Новосибирский государственный университет

Нелинейное оптическое кольцевое зеркало (НОКЗ) в простейшем случае состоит из оптического соединителя и петли сильно-нелинейного оптического волокна. Благодаря нелинейной передаточной характеристике, НОКЗ обладает способностью "очищать" сигнал от шумов, вносимых усилителями и тем самым увеличивает быстродействие волоконно-оптической линии связи (ВОЛС).

Выполнено численное моделирование конфигурации ВОЛС, где компенсация потерь в волокне осуществляется, в основном за счет рамановского усиления (обратной накачки). После каждого типа волокна стоит свой накачивающий лазер. В этой линии проводился эксперимент (в Aston

University, Birmingham, UK) и было показано, что добавление НОКЗ позволяет значительно увеличить производительность ВОЛС. Результаты наших расчетов находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Передача данных осуществлялась в одном канале на скорости 40 Гб/с.

Таким образом, НОКЗ может использоваться как полностью оптический регенератор импульсов, что значительно повышает производительность ВОЛС.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук М.П. Федорук

## **РАСЧЕТ РЕЗОНАТОРА ШИРОКОАПЕРТУРНОГО АРГОНОВОГО ЛАЗЕРА С УДВОЕНИЕМ ЧАСТОТЫ**

С.Р. Абдуллина  
Новосибирский государственный университет



**В работе решалась задача об эффективном внутриврезонаторном удвоении частоты широкоапертурного аргонового лазера. Широкоапертурный лазер характеризуется большим диаметром разрядного канала и соответственно мощностью генерации. Удвоение частоты реализуется в кристалле ВВО, который помещается внутрь резонатора лазера. Одним плечом резонатора является трубка лазера и зеркала  $R_1$  и  $R_2$  с большими радиусами кривизны (порядка 10 м), во втором плече, которое образуют зеркала  $R_3$  и  $R_4$  с радиусами кривизны порядка 0.01 м, помещен кристалл. Резонатор должен обеспечивать большой размер пучка в трубке лазера и оптимальную фокусировку в кристалле. Это достигается подбором радиусов кривизны зеркал и других параметров резонатора.**

**Расчет производился для нескольких моделей 4-зеркального резонатора с различными радиусами кривизны зеркал. Метод расчета - метод ABCD-матриц преобразования гауссовских пучков. Расчет для тангенциальной (x) и сагиттальной (y) плоскостей проводился отдельно. Для каждой модели найдены зоны устойчивости резонатора, исследованы зависимости размеров пучка на зеркалах и размера перетяжки от длины плеча, содержащего кристалл, и от положения кристалла. Исследована зависимость апертурного эффекта (снос энергии пучка второй гармоники) от положения перетяжек в кристалле. Выбрана оптимальная схема для проведения эксперимента. При этом  $R_1 = 10$  м,  $R_2 = \infty$ ,  $R_3 = 0.127$  м,  $R_4 = 0.06$  м, радиусы пучка на зеркалах  $R_1$  и  $R_2$   $w_{1x} = 2.3$  мм,  $w_{1y} = 0.9$  мм,  $w_{2x} = 1.9$  мм,  $w_{2y} = 0.8$  мм, радиусы перетяжек в кристалле  $w_{0x} = 11$  мкм,  $w_{0y} = 16$  мкм.**

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук С.А. Бабин

# ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА

А.В. Михайлов

Новосибирский государственный университет

При создании новых многоэлементных твердотельных детекторов (ТТД) для многоканального анализатора атомно-эмиссионных спектров МАЭС необходимо контролировать их квантовую эффективность в диапазоне длин волн 180 - 800 нм. Квантовая эффективность (КЭ) это отношение числа рождённых фотоэлектронов к числу падающих на фотодиод фотонов.

Суть использовавшегося метода состоит в том, что по известной КЭ калиброванного фотодиода AXUV-100G можно определить мощность падающего на него монохроматического излучения. Установив ТТД вместо калиброванного фотодиода (КФ), можно найти КЭ ТТД для той же длины волны. Изменяя с помощью двойного монохроматора Сагу-16 длину волны излучения, можно построить график КЭ для исследуемого диапазона длин волн (от 185 нм до 800 нм).

КЭ КФ и измеренная КЭ ТТД приведены на рис.1.



Рис.1 Зависимость квантовой эффективности от длины волны

Наличие синусоидальной составляющей в КЭ ТТД, по-видимому, связано с интерференцией света на покрывающих фотоячейки ТТД слоях.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОГНУТЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЁТОК

А.В. Михайлов

Новосибирский государственный университет

В настоящее время в спектрометрах для атомно-эмиссионного анализа элементного состава вещества происходит замена традиционных регистрирующих систем - фотопластинок и ФЭУ на многоэлементные твердотельные детекторы (ТТД). Это выдвигает новые требования к характеристикам вогнутых дифракционных решёток в спектрометрах построенных по схеме Пашена - Рунге: уменьшение астигматизма спектральной линии и смещение угла блеска в коротковолновую область спектра (220нм). При создании новых решёток необходимо контролировать их характеристики.

Исследование характеристик новых дифракционных решёток ВМК-1 и ВМК-2 со скомпенсированным астигматизмом (радиус кривизны 1000мм, 2400 штр/мм) проводилось путем сравнения их разрешающей способности и светосилы с решётками лучших отечественных спектрометров: МФС-8, ДФС-51, ДФС-458. На рис.1 приведена зависимость ширины спектральных линий исследуемых решёток с 2400 штр/мм от длины волны. На рис.2 показана зависимость интенсивностей спектральных линий решёток по отношению к интенсивностям спектральных линий решётки МФС-8 от длины волны. Решётка ВМК-2 обладает наибольшей светосилой и удовлетворительным спектральным разрешением.

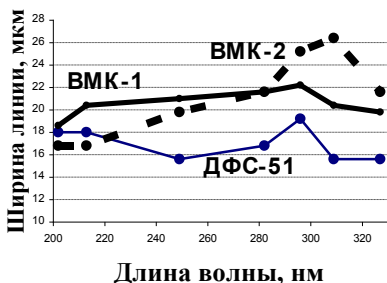


Рис.1 Зависимость ширины спектральных линий от длины волны

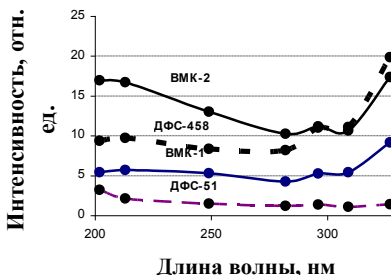


Рис.2 Зависимость интенсивности спектральных линий от длины волны

**Научный руководитель – научный сотрудник В.А. Лабусов**

## РАСSEЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АНСАМБЛЕМ СФЕРИЧЕСКИХ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МИКРОЧАСТИЦ

А.Л. Цыренова

Томский государственный университет

Проблема взаимодействия электромагнитных волн оптического диапазона со сферическими полидисперсными частицами до сих пор представляет интерес, как в фундаментальном, так и в прикладном плане. Так в задачах лазерного зондирования микроструктуры облаков очень важно знать угловое распределение интенсивности излучения, рассеянного частицами облаков.

Одним из перспективных методов определения размеров частиц в облаках является лидарный метод, основанный на явлении многократного рассеяния лазерного излучения в плотных аэрозольных образованиях.

Потоки излучения многократного рассеяния в аэрозольных средах в полной мере описываются уравнением переноса излучения (УПИ), которое выражает условие баланса световой энергии при ее поглощении и рассеянии. Однако аналитического решения УПИ до сих пор нет, что значительно затрудняет использование его для решения обратной задачи. И.В. Самохваловым и Б.В. Каулем было получено уравнение лазерного зондирования с учетом двукратного рассеяния [1]. Чтобы описать лидарный сигнал с удовлетворительной точностью от плотных аэрозольных образований до оптических толщ зондирования  $\tau \leq 4$ , можно ограничиться приближением двукратного рассеяния.

Для решения уравнения лазерного зондирования в приближении двукратного рассеяния необходимо знание в аналитическом виде диаграммы рассеяния электромагнитного излучения (индикатрисы рассеяния) облачного аэрозоля.

Нами предлагается однопараметрическая модель индикатрисы рассеяния, состоящая из двух основных частей - дифракционной и геометрооптической.

**В докладе приводится сравнительный анализ  
вышеприведенной модели индикатрисы  
рассеяния с моделями индикатрис рассеяния  
Хеньи–Гринштейна и Дейрменджана.**

Работа выполнена при финансовой поддержке Минпромнауки и технологий РФ (рег. № 06-21).

1. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Лазерное зондирование индустриальных аэрозолей. - Изд-во "Наука", 1986 г.

Научные руководители – д-р физ.-мат. наук, проф. И.В. Самохвалов,  
ст. преп. В.В. Брюханова

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ND:YVO<sub>4</sub> ЛАЗЕРА НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ  $\lambda=914$  НМ**

А.М. Шилов

Новосибирский государственный университет

Для исследования перехода  $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$  атома Mg<sup>24</sup> по атомно-оптической интерферометрии требуется создание перестраиваемого источника излучения на 457 нм мощностью 200 мВт. На данный момент таким источником служит вторая гармоника титан-сапфирового лазера с аргоновой накачкой. При эксплуатации этой системы выявлен ряд недостатков. Перспективным источником излучения для этих целей является вторая гармоника твердотельного лазера на кристалле YVO<sub>4</sub>, активированного ионами Nd<sup>3+</sup> с диодной накачкой. В работе [1] сообщается о создании Nd:YVO<sub>4</sub> лазера на 914 нм с мощностью 3Вт. Тем не менее, создание перестраиваемого одночастотного высокостабильного источника актуально и сейчас.

В настоящей работе представлены результаты исследований Nd:YVO<sub>4</sub> лазера длины волны  $\lambda=914$  нм и  $\lambda=1064$  нм с накачкой Ti-Sa лазером с длиной волны 808 нм. Исследованы кристаллы с различной концентрацией ионов Nd<sup>3+</sup>. Измерение мощности излучения показало, что наиболее выгодным является кристалл с концентрацией  $n_{Nd}=0,5\%$ . При больших

- 
1. P. Zeller, P. Peuser, Opt. Lett. **25** (2000) 35

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук А.Н. Гончаров

концентрациях существенную роль играют процессы ап-конверсии и кросс-релаксации, которые ухудшают генерационные характеристики лазеров. Измерена мощность генерации для зеркал с различным коэффициентом пропускания. Найдено, что оптимальное пропускание составляет  $T=0.7\%$ . Для указанных параметров при мощности накачки  $P_p=2,2\text{Вт}$  выходная мощность составляет  $P_g=0,2\text{Вт}$ . Также, проверено, что лазер может работать на длине волны, соответствующей частоте магниевого перехода.

Использование лазерного диода на 808 нм с мощностью 3 Вт в качестве источника излучения накачки позволяет получить 800 мВт непрерывной мощности на длине волны  $\lambda = 1064$  нм. В качестве преимущества следует отметить эргономичность установки и более высокая стабильность мощности излучения.

## ВОЗБУЖДЕНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ПРОДОЛЬНЫХ СТРУКТУР В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА ПРЯМОМ КРЫЛЕ

*А. П. Брыляков*

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН*

**Образование продольных структур является распространенным явлением, наблюдающимся в широком спектре пограничных слоев. В данной работе представлены экспериментальные результаты по изучению стационарных продольных структур, возникающих в пограничном слое на прямом крыле при различных режимах обтекания, свойствах набегающего потока и внешних воздействиях.**

**Эксперименты проводились в дозвуковой аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН. В качестве модели использовался симметричный крыловой профиль (числа Рейнольдса по хорде  $1,54 \cdot 10^5 \dots 1,85 \cdot 10^5$ ).**

В первой серии экспериментов проводилось изучение влияния повышенной степени турбулентности набегающего потока (1%), созданной с помощью турбулизирующей сетки, на структуру пограничного слоя на наветренной поверхности крыла. С помощью метода жидкокристаллической визуализации в этом случае было зафиксировано образование в пограничном слое стационарных продольных структур с характерным поперечным масштабом в несколько раз превышающим толщину пограничного слоя. Термоанемометрические исследования пространственной структуры набегающего потока показали, что в данном случае ответственным за возникновение продольных структур является механизм растяжения завихренности.

**Во второй серии экспериментов изучалась структура пристенного течения на подветренной поверхности в присоединенном течении с отрывным пузырем. При угле атаки  $5.6^\circ$  в зоне присоединения за отрывным пузырем в области турбулентного пограничного слоя было обнаружено возникновение стационарных продольных структур. При увеличении угла атаки до  $18^\circ$  продольные структуры исчезают. В обоих вариантах акустическое воздействие в диапазоне неустойчивости течения, приводит к образованию в зоне присоединения продольных структур. Показано, что в случае акустического воздействия образование стационарных вихревых структур в зоне присоединения происходит при нелинейном развитии в области отрывного пузыря волны неустойчивости на частоте**

**воздействия. При этом характерный поперечный масштаб продольных структур оказывается примерно равен длине волны неустойчивости.**

*Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. В. В. Козлов*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ  
СТРУКТУР В ПЕРЕХОДЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ  
С НЕБЛАГОПРИЯТНЫМ ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ**

**А. П. Рошкетаев**

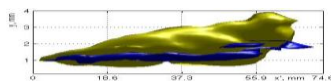
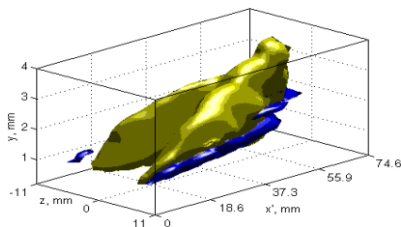
Институт теоретической и прикладной механики СО РАН

Доклад посвящён экспериментальному исследованию поздних нелинейных стадий перехода к турбулентности в автомодельном пограничном слое с неблагоприятным градиентом давления (НГД). Основное внимание уделяется изучению механизмов формирования и развития когерентных вихревых структур в процессе перехода при различных начальных спектрах волн неустойчивости и сопоставлению со случаем безградиентного пограничного слоя (Блазиуса), изученным ранее. Предыдущие исследования нелинейных стадий перехода в пограничном слое с НГД ограничивались либо слабо-нелинейными стадиями, либо изучением свойств турбулентных пятен, возбуждаемых «непосредственно», с помощью сильного импульсного воздействия на течение.

Настоящие эксперименты проведены в условиях возбуждения контролируемых возмущений. Формирование вихревых структур изучено в процессе перехода, инициируемого гармонической, почти двумерной первичной волной Толлмина-Шлихтинга в присутствии и в отсутствие слабого контролируемого «шума» волн неустойчивости сплошного частотно-волнового спектра. Обнаружено, что в обоих режимах возбуждения в потоке возникают схожие вихревые структуры (лямбда-вихри, слои сильного сдвига, шипы и кольцевые вихри), свойства которых обнаруживают значительную универсальность и независимость от начального спектра волн неустойчивости. Показано также сходство этих структур с теми, что наблюдаются в безградиентном пограничном слое и в других пристенных сдвиговых течениях.

Работа поддержана РФФИ (гранты № 00-01-00835 и 00-15-96164).





*Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. Ю. С. Качанов*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАПЕЛЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ С ПОДЛОЖКОЙ**

*И. П. Гуляев*

Новосибирский государственный университет

Газотермическое напыление (ГТН) широко используется для нанесения износостойких, коррозионностойких, теплозащитных, электроизоляционных покрытий. Однако, для формирования конечного продукта с заранее заданными параметрами необходимо детальное изучение всей цепочки процессов, происходящих в течение цикла напыления, и, в частности, сверхбыстрой закалки микрокапель расплавов наносимого материала. Длительное время считалось, что в процессе ГТН, при соударении капли диаметром десятки микрон с основой сначала происходит полное ее растекание, а лишь затем охлаждение и затвердевание. Это представление начало меняться, лишь в последнее время, после появления работы [1], согласно которой взаимодействие капли с основой описывается одним из четырех базовых сценариев в зависимости от температуры контакта, основных параметров частицы (температура, скорость и размер), свойств капли и основы (плотность, температуро- и теплопроводность), температуры и состояния поверхности основы.

Необходимость проведения работы обусловлена отсутствием систематических данных о соударении с подложкой при числах Рейнольдса  $Re > 10^4$  и Вебера  $We > 10^3$  для капли (например [2,3]) и контроле ключевых физических параметров (КФП) процесса. Получены предварительные результаты по взаимодействию капель легкоплавких металлов с основой при полном контроле КФП. Приводится описание модельной установки, позволяющей достигать значений чисел Рейнольдса

$Re \sim 10^5 - 10^6$  и Вебера  $We \sim 10^4 - 10^5$  за счет ускоренного основы навстречу капле.

1. Solonenko O.P. Fundamental problems of plasma-spraying // Thermal Spray: International Advances in Coating Technology / Proc. of 13th Intern. Thermal Spray Conference, 28 May – 5 June 1992. Orlando, Florida, USA. ASM International, 1992. P. 787–792.

2. Watanabe T., Kuribayashi I., Honda T., Kanzawa A. Deformation and solidification of a droplet on a cold substrate // Chem. Eng. Sci. 1992. Vol. 47, N 12. P. 3059–3065.

3. Madejski J. Solidification of droplets on a cold surface // J. Heat Mass Transfer. 1976. Vol. 19. P. 1009–1013.

*Научный руководитель – канд. техн. наук А. В. Смирнов*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY**

*В. М. Дулин*

Новосибирский государственный университет

Метод измерения мгновенных полей скорости жидкостей и газов при помощи трассерной визуализации - PIV (Particle Image Velocimetry) возник сравнительно недавно, и с активным развитием цифровых и оптических технологий его возможности увеличиваются. Основными преимуществами этого метода являются: бесконтактность, широкий динамический диапазон и возможность измерения мгновенных полей скорости, что необходимо, например, для расчета поля давления и баланса энергии в турбулентных потоках. Для минимизации погрешности при расчете дифференциальных характеристик необходимо предварительно осуществлять отсев и интерполяцию ошибочных векторов в мгновенных полях скорости.

Целью работы являлось развитие методов обработки экспериментальной информации, получаемой при помощи метода PIV – изучение свойств различных интерполяционных схем, полученных из предположения гладкости поля скорости как функции двух переменных, и схем расчета дифференциальных характеристик [2], а также применение

данных подходов к исследованию структуры затопленных струйных течений. В данной работе определялись характеристики осесимметричной, свободной, затопленной струи и были рассчитаны статистические моменты (до 4-го) по мгновенным полям скорости. Измерения проводились в области струи до 20 калибров сопла в трех режимах: один без внешнего воздействия, два с внешним периодическим возбуждением на срезе сопла, в одном из которых данные снимались с частотой кратной частоте возбуждения (число Рейнольдса равнялось 25000).

Работа проводилась при поддержке фонда РФФИ (проект № 02-02-08081-инно), а также СО РАН (Интеграционный проект №25).

---

1. J. L. Lumley, N. P. Panchapakesan Turbulence measurements in axisymmetric jets of air and helium. Part 1. Air Jet. // J. Fluid Mech. 1993. Vol. 246. P. 197–223.

2. J. M. Foucaut, M. Stanislas Some considerations on the accuracy and frequency response of some derivative filters applied to particle image velocimetry vector fields // J. Measur. Sci. Technol. 2002. Vol. 13, P. 1058-1071.

**Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Д. М. Маркович**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В СТЕКАЮЩЕЙ ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ

*О. В. Жуковская*

Новосибирский государственный университет

Изучение механизма теплоотдачи к стекающей пленке жидкости привлекает внимание большого числа исследователей в виду исключительной важности для технических приложений. Цель данной работы исследование совместного влияния испарения и трехмерных деформаций на теплообмен в пленке жидкости недогретой до температуры насыщения.

**Выполнено экспериментальное исследование теплообмена при течении диэлектрической жидкости FC-72 по вертикальной поверхности с нагревателем размером 60x120 мм в диапазоне значений чисел Рейнольдса от 4.5 до 50. Для анализа экспериментальных данных использовался осредненный  $\langle \alpha \rangle = \langle q \rangle / \Delta T$  коэффициенты теплоотдачи, который определялся по средней плотности теплового потока и разнице между средней температурой на нагревателе и начальной температурой пленки. Полученные из эксперимента осредненные значения  $\langle Nu \rangle = \langle \alpha \rangle \delta_0 / \lambda_0$  сравнивали с теоретической зависимостью Нуссельта.**

- Построена карта режимов теплообмена при течении пленок FC-72 по нагревателю размером 60x120 мм. Выделены области формирования структур и область, где возникает разрыв пленки жидкости и кипение в струях.
- Измерено распределение температур вдоль нагревателя и средняя плотность теплового потока с поверхности пленки жидкости, идущая на испарение.
- Возрастание значения коэффициента теплоотдачи наблюдается в области формирования структур. При образовании сухих пятен наблюдается ухудшение теплообмена. В области значений плотностей тепловых потоков более 10 кВт/м<sup>2</sup> наблюдается интенсификация теплообмена к струям жидкости, связанная с интенсивным испарением и кипением.
- Для области пленочного течения получена зависимость среднего числа Нуссельта от числа Рейнольдса. При  $Re > 17$  разница между экспериментальными данными и теоретической зависимостью составляет 30-70%, и объясняется влиянием термокапиллярно-волновых эффектов. При малых числах Рейнольдса эта разница возрастает до 300%, но учет испарения с поверхности пленки позволяет обобщить полученные результаты.

**Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Е. А. Чиннов**

# РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СТРУЙ В НАГРЕВАЕМОЙ ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ

*О. В. Жуковская, А. С. Форощенко*  
Новосибирский государственный университет

Исследование неустойчивости течения пленки жидкости, развитие и формирование струйных течений на ее поверхности является важным для понимания механизма теплообмена и возникновения кризисных явлений.

**Выполнено экспериментальное исследование формирования струй при течении нагреваемой пленки воды и диэлектрической жидкости FC-72 по вертикальной поверхности на нагревателях средних размеров 60x120 мм и 150x150 мм в диапазоне значений чисел Рейнольдса от 4.5 до 50.**

**Проведена видеозапись и компьютерная обработка экспериментов.**

- При течении диэлектрической жидкости FC-72 обнаружены струйные течения двух типов «А» и «Б» с противоположной зависимостью расстояния между струями от плотности теплового потока.
- При течении пленок воды на нагревателе 150x150 мм зарегистрировано формирование струй только в режиме «Б», так как разрыв пленки предшествовал образованию структур типа «А» и препятствовал их возникновению.
- Построена зависимость безразмерного расстояния между струями от плотности теплового потока. Замечено, что расстояние между струями структур типа «А» почти вдвое меньше, чем расстояние между струями структур типа «Б».
- Построена карта режимов течения пленок FC-72 по нагревателю размером 60x120 мм. Выделены области формирования структур и область, где возникает разрыв пленки жидкости и кипение в струях. При  $Re > 10$  на поверхности пленки формируются трехмерные волны, которые с ростом теплового потока

преобразуются в струи. Разрыв пленки происходит сразу после формирования структур.

**Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Е. А. Чиннов**

## **ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ ЕМКОСТНЫМ МЕТОДОМ**

**А. С. Форощенко**

Новосибирский государственный университет

Емкостным методом выполнено измерение волновых характеристик течения пленки воды по вертикальной пластине с нагревателем 150x150 мм для  $Re=22$  при разных длинах пробега пленки от сопла до верхнего края нагревателя ( $X_l=120$  мм и 200 мм). При нагреве пленки и формировании струй, пара датчиков располагалась в межструйной области, а другая пара в зоне движения гребня струи или его окрестности.

Воздействие плотности теплового потока на волновое течение пленки жидкости приводит к формированию струй и тонкой пленки между ними. В межструйной области амплитуда волн и частота пульсаций толщины уменьшаются. Трехмерные волны распространяются по гребням струй. Амплитуда волн определяется изменением толщины пленки жидкости под действием термокапиллярных сил. Относительная амплитуда практически не зависит от плотности теплового потока.

Рост относительной амплитуды волны в результате влияния термокапиллярных эффектов, предсказываемый для двумерных волн, не обнаружен. По-видимому, в данном случае определяющим является изменение толщины пленки под действием термокапиллярных сил при формировании струй. Амплитуда волны подстраивается под это изменение в соответствии с изменением толщины пленки (числа Рейнольдса).

**Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Е.А. Чиннов**

# ВЛИЯНИЕ РАВНОВЕСНОГО КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ НА ТЕРМОКАПИЛЛЯРНЫЙ РАЗРЫВ СТЕКАЮЩЕЙ ПЛЁНКИ ЖИДКОСТИ

**В. В. Чеведа**

Новосибирский государственный университет

Выполнено экспериментальное исследование разрыва пленки жидкости, стекающей по вертикальной пластине с нагревателем 150x150 мм. Используются различные жидкости (вода, 10% раствор спирта в воде и 50% раствор глицерина в воде) и различные рабочие поверхности (нержавеющая сталь и специальная паста). Основными варьируемыми параметрами в эксперименте являются число Рейнольдса  $Re=0.47\div 43.6$ , тепловой поток  $q=0\div 1.92$  Вт/см<sup>2</sup>. Для измерения равновесного краевого угла смачивания используется метод «Пузыря». Полученные значения краевых углов варьировались от 11 до 49 градусов.

Полученные данные, а также данные [1, 2] по разрыву плёнки на локальных нагревателях длиной вдоль течения 2.2÷6.5 мм, удовлетворительно описываются зависимостью

$$Kp = 1932 Re^{0.66} \left[ \frac{(v^2 / g \sin \Theta)^{1/3}}{L} \right]^{0.90} Pr^{-0.18} \quad (1)$$

где,  $g$  (м/с<sup>2</sup>) – ускорение свободного падения,  $v$  (м<sup>2</sup>/с) – кинематическая вязкость жидкости,  $\Theta$  – угол наклона пластины относительно горизонтали,  $L$  (м) – длина нагревателя,  $Pr = \mu c_p / \lambda$  – число Прандтля,  $Re = \Gamma / \mu$  – число Рейнольдса пленки,  $\lambda$  (Вт/(м·К)) – коэффициент теплопроводности,  $\mu$  (кг/(м·с)) – динамическая вязкость жидкости,  $\Gamma$  (кг/(м·с)) – удельный расход,  $c_p$  (Дж/(кг·К)) – изобарная теплоемкость жидкости. Параметр  $Kp$  есть отношение масштаба термокапиллярного касательного напряжения на поверхности пленки к масштабу касательного напряжения на стенке при чисто гравитационном течении пленки. Поскольку данные обобщаются без учета краевого угла, можно сделать вывод, что неизотермический разрыв пленки жидкости (в отличие от разрыва изотермического), практически не зависит от равновесного краевого угла смачивания.

1. Кабов О.А. Теплофизика и аэромехан. 2000. Т. 7, № 4. С. 537–545.

2. Chinnov E.A., Kabov O.A., Muzykantov A.V., Zaitsev D.V. Intern. J. Heat and Technology. 2001. Vol. 19, N 1. P. 1–14.

**Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Д. В. Зайцев**  
**ВЛИЯНИЕ СПЕКТР-СТРУКТУРЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ  
НА РАБОТУ ЛАЗЕРНОГО PSD-ТРИАНГУЛЯТОРА**

## **Д. В. Куликов**

Новосибирский государственный университет

Лазерные триангуляторы широко используются для измерения расстояния до светорассеивающих объектов. В последние годы созданы лазерные триангуляторы на основе позиционно-чувствительных (PSD) фотодиодов. В исследована фундаментальная неопределенность лазерных триангуляционных измерений, связанная с влиянием спеклов. Однако исследования были проведены для ПЗС линеек и не включали анализ поворота объектов различных классов.

В настоящей работе исследовано влияние спекл-структуры изображения на работу лазерного PSD-триангулятора для различных классов объектов (в т.ч. пленок жидкости переменной толщины). Принцип триангуляционного метода заключается в формировании с помощью осветительной системы на поверхности объекта пятна света и измерении под углом триангуляции перемещения изображения на детекторе, определяемого смещением объекта. При измерении расстояния до движущихся и вибрирующих объектов или объектов сложного профиля (например, поверхность компакт диска) необходимо локализация области измерения. Использование полупроводникового лазера (с размерами источника излучения  $1 \times 5$  мкм.) в осветителе позволяет уменьшить область измерения.

Для некогерентного источника на детекторе наблюдается равномерное по пространству распределение интенсивности и центр изображения однозначно связывается с энергетическим центром изображения. Для лазерного полупроводникового источника распределение интенсивности по пространству модулировано спеклами, что нарушает однозначность связи центра изображения с координатой энергетического центра пятна.

Экспериментально проведен анализ влияния спекл-структуры изображения на показания лазерного PSD-триангулятора. Установлено, что повороты, сдвиги объекта вдоль и поперек лазерного пучка изменяют модуляцию спеклами изображения и влияют на точность работы лазерного PSD-триангулятора. На основе проделанных экспериментов выработаны рекомендации для увеличения точности измерения лазерными PSD-триангуляторами.

---

1. Dorsch R., Häusler G., Herrmann J. Appl. Optics. 1994. V. 33. P. 1306.



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С НАНОЧАСТИЦАМИ

*С. В. Зимовец*

Новосибирский государственный университет

В работе численно моделируется рассеяние лазерного излучения на наночастицах. При рассеянии света на металлических наночастицах возникают плазмонные резонансы, приводящие к многократному усилению электромагнитного поля волны. Эти эффекты используются при наноструктурировании поверхностей [1], в одно-молекулярной спектроскопии (SMS) [2], в ближнепольной и туннельной микроскопии [3].

Для полного понимания процессов, происходящих при облучении наночастиц, необходимо решение двух сопряженных задач – задачи рассеяния света и задачи нестационарной теплопроводности. Дифференциальные уравнения этих задач с помощью функции Грина сводятся к системе граничных интегральных уравнений (уравнения Фредгольма 1-го или 2-го рода). Для численного решения применяется метод граничных элементов. На основе эрмитовской интерполяции был разработан метод граничных элементов повышенной точности, который позволяет значительно сократить время, требуемое для проведения вычислений. Задача решается для двумерного и осесимметричного случая. В двумерном случае проводится сравнение численного решения с точным решением Ми для рассеяния света на круговом цилиндре (для 100 точек – относительная погрешность имеет порядок  $10^{-5}$ ).

Для исследования вопроса о точности метода решается задача потенциального обтекания двумерного тела. Для этой задачи имеется множество точных решений. Сравнение численных решений с точными проводилось на обобщенных профилях Жуковского: на эллипсе, на руле Жуковского и на наиболее общем профиле с ненулевым углом излома. Для 100 контрольных точек, взятых на контуре тела, метод расчета позволяет получить 6 точных знаков в решении.

---

1. Jersch J., Dickmann K. Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68, N 6. P.868.

2. Xu H., et al. Phys. Rev. Lett. 1999. V. 23, N 21. P. 4357.

3. Klein S., Geshev P., et al. Electrochemistry. 2003. V. 71, N 2. P. 114.

*Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. П. И. Гешев*

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СИЛЬНО-НЕДОРАСШИРЕННОЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ

*В. Ж. Касенбаев*

Новосибирский государственный университет

Структура сильно-недорасширенной сверхзвуковой струи представляет значительный интерес, так как подобное течение реализуется при истечении струй ракетных двигателей на больших высотах. Для верификации численных методов расчёта также необходимо знание детальной структуры течения.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований некоторых особенностей структуры сильно-недорасширенной струи. Одной из таких особенностей является, практически неизученное, течение в области за диском Маха, в которой по результатам численного моделирования проведённого в работах Graug, Reijasse, Сквородко, при высоких степенях нерасчётности возникает циркуляционное течение. Другой интересной особенностью являются продольно-вихревые структуры, возникающие на поверхности её слоя смещения [1].

Экспериментальные исследования проводились на конвергентном сопле с диаметром выходного сечения  $D = 6$  мм. С помощью приёмников полного и статического давления, установленных на пилоне координатника, были сняты профили полного и статического давления в двух сечениях за диском Маха. Была проведена визуализация струи шлирен-методом и методом лазерного ножа, которые подтверждают наличие продольно-вихревых структур в сильно-недорасширенных воздушных струях. С помощью шлирен-фотографий были измерены характерные геометрические размеры струи (относительное расстояние от среза сопла до диска Маха и диаметр диска Маха), при газодинамических режимах истечения соответствующих отношению давления в форкамере сопла к давлению в окружающей среде от 10 до 774. Также представлены результаты расчета кривизны всячего скачка и ее зависимость от режима истечения струи.

---

1. Глазнев В.Н., Запрягаев В.И., Усков В.Н. и др. Струйные и нестационарные течения в газовой динамике. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 200 с.

*Научный руководитель – д-р техн. наук В. И. Запрягаев*

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ВНЕШНЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ТРЕХМЕРНОЕ ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ ЗА ОБРАТНЫМ УСТУПОМ

*А. Ю. Савчук*

Новосибирский государственный университет

Отрывные течения являются объектом пристального изучения вследствие их распространенности в природе и технике. К настоящему времени накоплен достаточно обширный теоретический и экспериментальный материал по изучению отрывных течений классического вида (внезапное расширение канала - уступ). В работе Терехова и др. [1] было показано существование трехмерных вихрей в пристенной области вблизи углов и влияние уровня внешней турбулентности на аэродинамику и теплоотдачу.

В настоящей работе было проведено численное моделирование трехмерного турбулентного течения за обратным уступом. Исследовалось влияние степени турбулентности входного течения на картину течения.

Моделируемый уступ имел ширину 0,02 м, высоту 0,003 м, длину канала 0,06 м. Скорость воздушного потока на входе была 20 м/с. При расчете решалась система уравнений Рейнольдса, замкнутая с помощью  $k - \varepsilon$  модели для больших чисел Рейнольдса. Уравнения модели решались с помощью пакета программ  $\sigma$ Flow, разработанного в ИТ СО РАН, в котором конечно-разностные уравнения решаются с помощью метода SIMPLEC. В результате расчетов были получены трехмерные поля скорости, давления, турбулентной энергии и диссипации. Проанализирована трехмерная структура поля скорости в рециркуляционной зоне вблизи уступа.

Исследована зависимость длины присоединения от степени турбулентности входного потока. Как и в экспериментальных данных, в расчетах получено снижение длины рециркуляционной зоны за уступом с увеличением степени внешней турбулентности. Сравнение рассчитанного пристенного поля скорости с экспериментальной визуализацией, проведенной в работе [1] показало неудовлетворительное воспроизведение вторичного вихря течения вблизи угла уступа. Проанализированные причины такого расхождения с экспериментом, среди которых основными представляются недостаточное разрешение расчетной сетки и недостаточная адекватность стандартной  $k - \varepsilon$  модели при расчетах отрывных течений.

---

1. Terekhov V. I., Yarygina N. I., Zhdanov R. F. Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. V. 46. P. 4535-4551.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук  
Д. Ф. Сиковский

# ПРИМЕНЕНИЕ ЭЖЕКТОРНЫХ СОПЕЛ ДЛЯ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

*А. А. Сова*

Новосибирский государственный университет

Холодное газодинамическое напыление (ХГН) является эффективным низкотемпературным методом нанесения порошковых покрытий [1]. В данной работе исследован один из оптимизационных шагов для процесса ХГН: исследован метод эжектирования частиц порошка в сверхзвуковой поток рабочего газа.

Произведена корректировка существующих методов проектирования эжекторных сопел с учетом их применимости к условиям ХГН, в частности, предложено проводить эжектирование смеси по оси осесимметричного сверхзвукового сопла. Спроектирован и изготовлен экспериментальный эжектор, исследованы его характеристики.

Исследования проводились на установке холодного газодинамического напыления, в качестве рабочего газа использовался воздух. Эксперимент направлен на исследование режимов работы эжектора при варьировании давления в форкамере сопла от 1,0 до 1,8 МПа и температуры рабочего газа в пределах 300 - 600 К, с целью нахождения режимов,

удовлетворяющих условиям ХГН. Целью эксперимента также являлось определение оптимальной длины камеры смешения эжектируемого и эжектирующего потоков.

В результате исследований доказана принципиальная возможность применения эжекторных сопел для процесса ХГН. Найдены оптимальные режимы работы данного сопла, обеспечивающие максимальный расход эжектируемого потока и формирующие смесь с числом  $M > 2$ .

---

1.Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Метод холодного газодинамического напыления // Докл. АН СССР. 1990. Т.315. С. 1062-1065.

*Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук В. Ф. Косарев*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОКАНАЛЬНОЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ГАЗОПИТАНИЯ УСТАНОВКИ ДЕТОНАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ**

*В. А. Томильцев*

*Новосибирский государственный университет*

**Многоканальные пневматические системы находят все более широкое применение в современных технических устройствах. Одним из таких аппаратов является установка детонационного напыления, в которой четыре**

газовых компоненты должны в определенном порядке подаваться в рабочий объем, причем в импульсном режиме с максимально возможной частотой. Газораспределительное устройство такой установки включает набор клапанов, соединяемых достаточно сложной системой каналов, которое в целом должно обеспечивать точное дозирование газов. При оптимизации конструкции газораспределителя возникает проблема компромисса минимальных размеров газопроводов с невысоким пневмосопротивлением, что требует соответствующих экспериментов, результаты которых представлены в докладе.

Измерены расходные характеристики и сопротивления газовых каналов диаметром от 4 до 11 мм с числом поворотов до 10. Исследовано влияние расширения и сужения каналов при стационарном течении и характеристики переходных процессов при переключении клапанов. На основе полученных результатов

**предложен способ бесконтактного контроля срабатывания быстродействующих клапанов путем регистрации скачка давления в зоне расходной диафрагмы.**

**Результаты проведенных исследований будут использованы при модернизации установки детонационного напыления.**

**Научный руководитель – д-р техн. наук В. Ю. Ульяницкий**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМУЩЕННОГО ТЕЧЕНИЯ НЕГЛУБОКОЙ ДВУХСЛОЙНОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ**

***Д. Г. Архипов***

**Новосибирский государственный университет**

В работе исследовано влияние стационарного потока на распространение нелинейных возмущений границы раздела двухслойной жидкости. В канале, ограниченном сверху и снизу горизонтальными поверхностями движутся жидкости, различные по плотности, вязкости и глубине. Под действием продольного градиента давления в каждом слое формируется параболический профиль течения. Ранее были получены уравнение, описывающее эволюцию возмущений в отсутствие потока [1], или уравнение для идеальной жидкости с заполненными профилями течений [2].

Для линейных возмущений подробно исследована картина течения в зависимости от скорости стационарного потока вязкой жидкости и волнового числа. Изучены профили вертикальной и горизонтальной скорости при различных параметрах системы. Для расчета внутренней картины течения решались уравнения Орра-Зоммерфельда для каждого слоя. Обнаружено, что при достаточно больших скоростях потока и определенных соотношениях глубин жидкостей, профиль вертикальной скорости становится нелинейным. При небольших скоростях течения и других отношениях глубин жидкостей профиль остается линейным с большой точностью.

Основными предположениями нелинейной модели являются: длина волны существенно больше глубин слоев, которые в свою очередь значительно больше амплитуды возмущения и толщин вязких пограничных слоев для возмущенного течения. С помощью этих допущений, а также предположения о линейности профиля вертикальной скорости исходная система уравнений гидродинамики сведена к одному нелинейному интегро-дифференциальному уравнению для возмущения границы раздела. Для случая, когда можно пренебречь диссипативными потерями, связанными с нестационарным трением на всех границах слоев, стационарно бегущие решения (кноидальные волны) найдены с помощью эллиптических функций Якоби. Показано, что величина и направление установившегося потока могут изменять не только длины волн, но и их полярность.

---

1. Хабахпашев Г.А. Изв. АН СССР, МЖГ. 1990. № 6. С. 118–123.

2. Пелиновский Е.Н. и др. Изв. РАН. ФАО. 1994. Т. 30, № 1. С. 79–85.

**Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Г. А.  
Хабахпашев**

## **ПРИМЕР АБСОЛЮТНОЙ ЛИНЕЙНОЙ ДЛИННОВОЛНОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СТАЦИОНАРНЫХ СТРУЙНЫХ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ**

**А. А. Гаврильева**

Новосибирский государственный университет

Работа представляет собой теоретическое исследование линейной устойчивости стационарных сдвиговых струйных МГД-течений (ССС МГД-течений) идеальной жидкости по отношению к осесимметричным длинноволновым возмущениям (ОДВ). В бесконечном пространстве



рассматривается цилиндрическая струя невязкой идеально проводящей жидкости с вмороженным в нее азимутальным магнитным полем. По поверхности струи течет постоянный продольный электрический ток, который создает ввне струи квазистационарное азимутальное магнитное поле. Применяя смешанное эйлерово-лагранжево описание и прямой метод Ляпунова [1], показано, что не существует достаточных условий устойчивости установившихся ССС МГД-течений относительно произвольных малых ОДВ.

Аналогичным образом получено необходимое и достаточное условие линейной устойчивости этих течений по отношению к специальным малым ОДВ. Однако оказалось, что подкласс стационарных течений, удовлетворяющих данному условию устойчивости, является пустым множеством. Следовательно, все установившиеся течения должны быть неустойчивыми. Действительно, в случае, когда найденное необходимое и достаточное условие устойчивости нарушено, построены двусторонние экспоненциальные оценки нарастания специальных возмущений. В то же время удалось определить семейство точных аналитических решений линеаризованных уравнений движения, которое не содержит ни одного экспоненциально нарастающего решения. Хотя это семейство аналитических решений и не образует полной системы решений линеаризованных уравнений движения, на данном этапе следует сделать вывод об абсолютной линейной длинноволновой устойчивости изучаемых стационарных течений и формальном характере сконструированных оценок роста возмущений. Дальнейшие исследования будут направлены на отыскание экспоненциально нарастающего возмущения вне обнаруженного семейства частных решений.

---

1. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. М.; Л., Гостехиздат. 1950.

**Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Ю. Н. Губарев**

*ОБТЕКАНИЕ БЕСКОНЕЧНОЙ ПОЛОСЫ  
ГИПЕРЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ СМЕСИ ГАЗОВ СИЛЬНО  
РАЗЛИЧАЮЩИХСЯ МАСС*

*Р. В. Мальцев*  
**Новосибирский государственный университет**

Задача возникла в связи с появлением новой вакуумной технологии – газоструйного напыления тонких пленок при ускорении тяжелых частиц в потоке легкого газа [1,2]. Целью настоящего исследования является изучение процесса прохождения тяжелых частиц сквозь сжатый слой. Особое внимание уделялось исследованию зависимости распределения по энергиям тяжелых частиц, прошедших сжатый слой, от параметров потока. Задача решалась методом прямого статистического моделирования [3]. В качестве модельного выбран газ, состоящий из гелия (молярная доля – 99%), и ксенона (1%). В расчете столкновений использована модель VSS (variable soft spheres). Детальные исследования проведены для числа Маха (по параметрам легкого газа)  $M = 5$ . При этом числе Маха в результате термодинамически равновесного струйного расширения от параметров торможения, почти вся энтальпия торможения переходит в энергию поступательного движения. Число Кнудсена (для легкой компоненты) в набегающем потоке варьировалось в интервале  $0.03 \div 1.0$ , отношение температуры полосы к температуре торможения  $T_w/T_0 = 1, 3.3$ ; также варьировалась вероятность прилипания тяжелых частиц к поверхности. При этих условиях изучена структура сжатого слоя перед полосой. Обращено внимание на температурную неравновесность, разницу температур и скоростей компонент.

Получены гистограммы распределения по энергиям тяжелых частиц, достигнувших полосы, представляющие собой, с одной стороны, новую информацию о процессах в сжатом слое в переходном режиме, с другой – полезные сведения для выбора оптимальных технологических режимов.

Работа поддержана грантом РФФИ (№ 03-01-00213) и грантом

президента РФ по поддержке ведущих научных школ (№910.2003.1).

---

1. Halpern B.L., Schmitt J.J., Golz J.W., Di. Y. and Johnson D.L. Gas jet deposition of thin films. // Appl. Surf. Sci. 1991. Vol. 48/49. P. 19–26.

2. Chen G., Boyd I.D., Roadman S.E., Engstrom J.R. Monte Carlo Analysis of a hyperthermal silicon deposition process. J. Vac. Sci. Technol. A. 1998.

Vol. 16, Issue 2. P. 689–699.

3. Bird G. A. Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows. Oxford University Press. 1996.

**Научный руководитель – академик А. К. Ребров**

## СТРУКТУРА И ЗАТУХАНИЕ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ В ЖИДКОСТИ С ПУЗЫРЬКАМИ ГАЗА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАЧАЛЬНЫХ СТАТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЯХ

*К. Р. Мухаметов*

Новосибирский государственный университет

В данной работе экспериментально исследовано влияние начального статического давления на структуру и затухание волн давления колоколообразной формы умеренной амплитуды в жидкости с пузырьками газа в широком диапазоне изменения параметров волн и среды. Опыты были проведены на установке «ударная труба». Рабочий участок установки представлял собой вертикально расположенную толстостенную стальную трубу с внутренним диаметром 53 мм и длиной 1,5 м. Он заполнялся дистиллированной водой и насыщался азотными пузырьками через генератор пузырьков, расположенный в нижней части рабочего участка. Среднее объемное газосодержание в жидкости измерялось по изменению уровня газожидкостной среды при введении газовых пузырьков в жидкость. Волны давления колоколообразной формы создавались электромагнитным излучателем, расположенным на дне рабочего участка. Волна давления в среде формировалась при отталкивании медной пластинки от электромагнитной катушки при прохождении через нее импульса тока. Профили волн давления регистрировались пьезоэлектрическими датчиками давления, расположенными по длине рабочего участка и заделанными заподлицо с его внутренней стенкой. Сигналы с датчиков подавались на АЦП и далее обрабатывались на компьютере.

Показано, что увеличение начального статического давления в газожидкостной среде приводит к увеличению частоты и амплитуды осцилляций в ударной волне (либо к уменьшению длительности уединенных волн – солитонов), а также к уменьшению затухания волны давления. Построены зависимости скорости волны и ее затухания от параметров волны и газожидкостной среды. Проведено сравнение опытных данных по структуре волны с расчетами по известным моделям.

*Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук В. Е. Донцов*

## **ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ И РАЗВИТИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВ НА ФРОНТАХ ПРОДОЛЬНЫХ СТРУКТУР В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРЯМОГО КРЫЛА**

**В. Н. Горев**

Новосибирский государственный университет

В данной работе рассмотрены особенности развития продольных возмущений, возникающих в пограничном слое вследствие влияния повышенной степени турбулентности внешнего течения [1]. Исследования в “естественных” условиях не позволяют сегодня в полной мере ответить на поставленные вопросы в силу того, что появление возмущений в пограничном слое носит случайный характер и отследить поведение конкретного возмущения в большинстве случаев - задача невыполнимая. Продольные структуры рассматриваемые в настоящем эксперименте, есть модельный аналог структур, возникающих в “естественных” условиях. Особое внимание в работе уделялось изучению волновых пакетов возникающих в областях, предшествующих резкому изменению скорости внутри пограничного слоя (фронты продольного возмущения). Исследованы их характеристики, динамика развития вниз по потоку, проведена аналогия между данным типом вихревых возмущений и волной Толлмина – Шлихтинга.

Эксперименты были выполнены в малотурбулентной дозвуковой аэродинамической трубе Т-324 (ИТПМ СО РАН). Продольные структуры генерировались в пограничном слое прямого крыла, расположенного под положительным углом атаки, таким образом, их развитие происходило в условиях градиентного течения. В пограничном слое прямого крыла вблизи фронтов продольных возмущений получены высокочастотные волновые пакеты - предвестники. Изучены причины различного поведения предвестников в зависимости от следующих характеристик: градиентов

скорости на переднем и заднем фронтах продольного возмущения, способа его генерации, а также от градиента давления над крылом. Показано, что предвестниками являются трехмерные пакеты волн Толлмина – Шлихтинга.

Работа поддержана грантом РФФИ (№ 02-01-00006), грантом Президента РФ по поддержке ведущих научных школ РФ (№ НШ-964.2003.1) и фондом INTAS (проект 00-00232).

---

1. Альфредссон П.Х., Катасонов М.М., Козлов В.В. Генерация и развитие “пассивных” возмущений в пограничном слое Блазиуса. Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8, №3. С. 363–370.

**Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. В. В. Козлов**

## ВСПЛЫТИЕ ОДИНОЧНОГО СНАРЯДА В ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КАНАЛАХ МАЛОГО СЕЧЕНИЯ

*И. Н. Ершов*

Новосибирский государственный университет

В работе представлены данные экспериментального исследования всплытия одиночных воздушных снарядов в покоящейся жидкости в вертикальных и наклонных прямоугольных каналах. Хотя бы одна из сторон канала меньше капиллярной постоянной. Показано, что скорость всплытия снарядов в таких каналах определяется в основном протеканием жидкостей в углах канала, и снаряды всплывают даже при маленьких числах Этвеша.

Измерения скоростей всплытия проводились для этанола, изопропанола-2, ацетона, водно-спиртовых растворов в каналах сечениями  $3*5\text{ мм}^2$ ,  $2*7\text{ мм}^2$ ,  $1*3\text{ мм}^2$ ,  $2*5\text{ мм}^2$ ,  $0.5*7\text{ мм}^2$ ,  $1.23*4.9\text{ мм}^2$  при углах наклона канала 30,45,60 и 90 градусов время-пролетным способом с помощью He-Ne лазера. Моменты прохождения снарядом лучей отмечались по изменению интенсивностей с фотодиодов.

По итогам работы можно сделать следующие выводы:

1. За счет использования наклонных каналов и различных жидкостей опыты данной работы проведены в широком диапазоне изменения определяющих параметров течения.

2. В прямоугольном канале его максимальный размер определяет характер формирования и всплывание снарядов.

3. Проведенная работа позволяет рассчитывать скорость всплывания снарядов в прямоугольных каналах малого размера заполненных вязкой жидкостью.

4. Определено критическое значение числа Этвеша, определённого по наибольшему размеру поперечного сечения канала, когда всплывание снарядов практически прекращается.

*Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. В. В. Кузнецов*

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА POD ДЛЯ АНАЛИЗА ПОЛЕЙ СКОРОСТИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА**

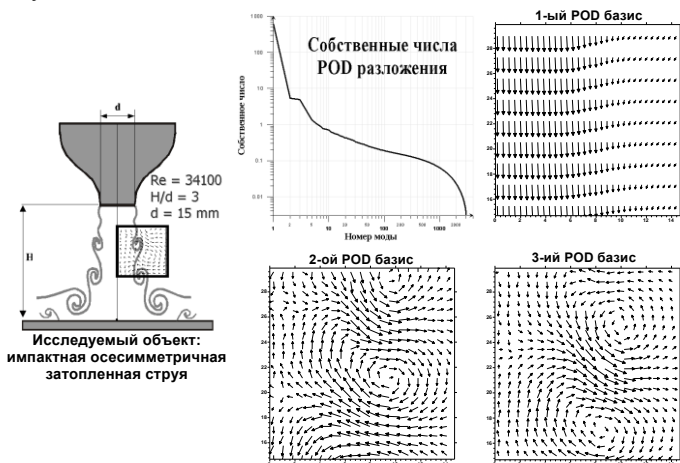
**П. Р. Каипов**

Новосибирский государственный университет

Одним из основных методов исследования характеристик турбулентного потока является выделение, и дальнейшее изучение эволюции средней по времени (или по ансамблю) и пульсационной (стохастической) составляющей. В работах по исследованию слоев смешения, кроме того, выделяется когерентная (квазипериодическая) составляющая потока. Выбор метода представления характеристики турбулентного потока зависит от специфики исследуемого гидродинамического объекта.

В данной работе использован метод точного ортогонального разложения (POD – proper orthogonal decomposition) мгновенного поля скорости турбулентного потока осесимметричной импактной струи (см. рисунок) полученного при помощи методики PIV. Основная идея POD метода заключается в представлении турбулентного поля скорости в виде конечного ряда произведений пространственных ортонормированных функций (базиса) с временными коэффициентами. При этом среднее значение временного коэффициента разложения (собственное число POD разложения) для каждой из базисных функций разложения пропорционально средней кинетической энергии. Данный факт позволяет выделить в турбулентном потоке структуры (базисы)

несущие основную часть кинетической энергии для дальнейшего изучения их эволюции.



Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Д. М. Маркович

## СОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БАРОИНДИКАТОРНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ

Е. А. Лопаткина

# Новосибирский государственный университет

Одной из основных задач современного аэрофизического эксперимента является изучение распределения давления на поверхности модели. Альтернативой традиционному методу дренажных отверстий стал сравнительно новый метод бароиндикаторных покрытий (PSP-метод). Этот метод основан на явлении тушения люминесценции органических красителей кислородом воздуха - интенсивность излучения обратно пропорциональна местному парциальному давлению кислорода и, соответственно, давлению воздуха. Основные преимущества такого метода по сравнению с дренажным – большая информативность, бесконтактность, меньшая стоимость.

Бароиндикаторное покрытие (молекулы люминофора, включенные в полимерную матрицу) наносится на исследуемую модель, облучается возбуждающим ультрафиолетовым излучением и по регистрируемой интенсивности люминесценции определяется панорамное распределение давления у поверхности модели.

Исследовательская часть данной работы посвящена изучению оптических характеристик различных покрытий. Созданы экспериментальные образцы – различные органические красители в полимерных матрицах и на пористых поверхностях. Изучены их спектры и чувствительность к давлению.

Другая часть работы посвящена отладке PSP-метода для получения панорамного распределения давления у поверхности модели в сверхзвуковом потоке. Эксперименты были выполнены на сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-326 при числе Маха  $M=6$ . В качестве моделей использовались плоская пластина с дренажом и угол сжатия; в качестве бароиндикаторного покрытия – LPS-B1.

Полученные результаты говорят о перспективности дальнейшего развития PSP-метода в аэрофизическом эксперименте.

---

1. J. Prieur, M. Lyonnet PSP as a mature test technique in the ONERA industrial wind tunnels from transonic to supersonic conditions. 2000.

2. Fonov S., Crafton J. et al. Near-real-time pressure-field visualization. 2001.

*Научный руководитель – д-р техн. наук Г. М. Жаркова*



# ВОЛНЫ НА ПЛЕНКЕ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ, СТЕКАЮЩЕЙ ПО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

**В. Ю. Шушеначев**

Новосибирский государственный университет

Рассматривается течение тонкой пленки реологической жидкости, стекающей в поле тяжести по вертикальной плоскости. Реология жидкости моделируется степенным законом:  $\tau_{ij} = 2\mu_n(2D_{ki}D_{lk})^{(n-1)/2}D_{ij}$ , где  $\tau_{ij}$  и  $D_{ij}$  – тензоры вязких напряжений и скоростей деформации соответственно.

Целью работы является исследование волновых режимов течения такой пленки, возникающих вследствие развития линейной неустойчивости исходного плоскопараллельного течения с постоянной толщиной. В случае малых чисел Рейнольдса задачу удается свести к исследованию одного уравнения, описывающего эволюцию пространственных возмущений толщины пленки:

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} + 4H \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + n \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) H = 0 \quad (1)$$

Здесь  $H$  преобразованное отклонение толщины пленки от невозмущенного уровня. Для плоских возмущений уравнение (1) переходит в хорошо известное уравнение Курамото-Сивашинского. В случае ньютоновской жидкости ( $n=1$ ) оно переходит в уравнение, полученное в работе [1].

Аналитически построены слабонелинейные стационарно бегущие решения уравнения (1). Показано, что, в зависимости от значений волновых чисел пространственных возмущений, имеют место как мягкий, так и жесткий типы ветвлений. Получены решения, для которых пространственная гармоника находится в резонансе с плоской волной, имеющей удвоенное волновое число по продольной координате.

---

1. Непомнящий А.А. Трехмерные пространственно-периодические движения в пленке жидкости, стекающей по вертикальной плоскости // Гидродинамика: Сб. науч. тр. – Пермь. – 1974. – Вып. 7. – С. 43–52.

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ, РАССЕЯННОЕ НЕЛИНЕЙНЫМ ОБЪЕКТОМ**

Д.С. Бардашов  
Томский государственный университет

В данной работе делается попытка описания процессов взаимодействия излучения с нелинейным объектом в рамках скалярной теории. Используя метод функции Грина, для выделенной составляющей электромагнитного поля в спектральной области можно получить интегральное уравнение [1]

$$E(\mathbf{r}, \omega) = E_0(\mathbf{r}, \omega) + \omega^2 \mu_0 \int \varepsilon_{нл}(\mathbf{r}, \omega) E(\mathbf{r}, \omega) \frac{e^{ikr}}{4\pi r} dV,$$

где  $E_0$  - первичная волна, а второе слагаемое описывает поле, рассеянное нелинейным объектом. Здесь  $\varepsilon_{нл}$  - нелинейная составляющая комплексной диэлектрической проницаемости,  $k = \sqrt{\varepsilon_{л}\mu_0}$  - волновое число фоновой линейной среды.

В частном случае изолированной сосредоточенной неоднородности в виде цилиндра высотой  $L$  и радиусом  $a$ ,  $a \ll L$ , это уравнение можно переписать в виде, допускающем простую физическую интерпретацию:

$$u(\omega) = \frac{u_0(\omega) - I(\omega)Z(\omega)}{1 - i\omega C(\omega)Z(\omega)}.$$

Здесь  $u_0(\omega)$  - ЭДС, наведенная падающим излучением на неоднородности,  $u(\omega)$ ,  $I(\omega)$  и  $C(\omega)$  - падение напряжения, ток проводимости и эквивалентная емкость нелинейного элемента. Комплексное входное сопротивление  $Z(\omega)$  учитывает влияние геометрических размеров объекта, причем его реальная часть с точностью до константы совпадает с сопротивлением излучения элементарного вибратора, а мнимая часть соответствует сумме емкостного и индуктивного сопротивлений тонкого провода.

Полученное уравнение решается с помощью итерационного

подхода при совместном использовании частотного и временного

представлений.

---

1. Якубов В.П., Лосев Д.В., Мальцев А.И. Диагностика нелинейностей по возмущениям рассеянного поля // Известия вузов. Радиофизика, 2000, Т. 43, № 7. - С. 645-651.

Научный руководитель - к. ф.-м. н., доцент Д.В. Лосев

## **ИНТЕГРАТОР С ЦИФРОВЫМ ВЫХОДОМ В СТАНДАРТЕ VME.**

П.В. Вагин

Новосибирский Государственный Университет

В Институте ядерной физики разрабатывается набор VME модулей для измерений магнитных полей и их пространственных характеристик. К настоящему времени созданы модули для прецизионного измерения полей с использованием ядерного магнитного резонанса. Заканчиваются испытания VME устройств для проведения измерений с помощью датчиков Холла. Разрабатываемый модуль предназначен для работы с подвижными катушками.

При перемещении катушки в магнитном поле изменяется величина магнитного потока через нее. На выводах катушки появляется ЭДС пропорциональная  $d\Phi/dt$ , где  $\Phi$  – магнитный поток. Если во время перемещения катушки интегрировать с неё сигнал, то полученная величина будет пропорциональна потоку магнитного поля. Перемещая катушки различными способами, можно измерять пространственные характеристики полей.

Устройство выполнено по классической схеме двухтактного интегрирующего АЦП с изменяемым временем интегрирования. Во время первого такта входной сигнал интегрируется в течение времени определяемого интервалом между управляющими сигналами «Старт» и «Стоп». Во время второго такта вход интегратора подключается к опорному источнику, имеющему противоположную полярность, и таймер-счетчик отсчитывает время, за которое заряд на интегрирующей ёмкости придёт к исходному значению. Полученное значение счетчика пропорционально интегралу от входного напряжения.

Время интегрирования варьируется в диапазоне от 0.1 до 5 секунд, разрешающая способность прибора - 16 бит, программно выбирается диапазон входных вольт-секундных площадей:  $\pm 10\text{mV}\cdot\text{s}$ ,  $\pm 20\text{mV}\cdot\text{s}$ ,  $\pm 50\text{mV}\cdot\text{s}$  или  $\pm 100\text{mV}\cdot\text{s}$ .

В докладе рассматриваются структурные решения и схемотехника устройства. Обсуждается влияние различных факторов (поляризация диэлектрика в конденсаторах, шумы и пр.) на точность измерений.

Научный руководитель - с.н.с. ИЯФ СО РАН А.М.Батраков

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ ВОЛН НА СЛАБОШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Е.А. Вершинин

Кемеровский государственный университет

Современные города занимают по площади огромные территории. Системы радиосвязи от телевидения до радиотелефонии играют в нашей жизни огромную роль. Однако городская среда создает для распространения радиоволн условия, существенно отличающиеся от тех, которые обычно наблюдаются на приземных трассах. Крупные строения, размеры которых во много раз превышают длину волны УКВ-излучения, создают обширные теневые зоны, а рассеянные и отраженные волны придают процессу распространения радиоволн многолучевой характер и формируют сложную интерференционную структуру поля.

В данной работе рассматривается численное моделирование задачи рассеяния волн на нескольких поверхностях домов, расположенных под разными углами к направлению падающего поля точечного источника. Поверхности домов рассматриваются в виде идеально проводящих слабошероховатых экранов. Рассматриваемая среда является однородной и изотропной. Поверхности домов считаются в среднем плоскими и

идеально проводящими, а отклонения от плоскости описывается уравнением  $z = \xi(\vec{r})$ , где  $\vec{r} = (x, y)$ , а  $\xi(\vec{r})$  - случайная функция двух переменных (случайное поле возвышений), в среднем равная нулю  $\langle \xi(\vec{r}) \rangle = 0$ . Будем рассматривать дифракцию не векторных электромагнитных волн  $(\vec{E}, \vec{H})$ , скалярного волнового поля  $U(\vec{R})$ , удовлетворяющего уравнению Гельмгольца [1]:

$$(\Delta_{\vec{R}} + k^2)U(\vec{R}) = 0 \quad (1)$$

и граничному условию на поверхности  $z = \xi(\vec{r})$ :

$$U(\vec{R})|_{z=\xi(\vec{r})} = U[\vec{r}, z = \xi(\vec{r})] = 0 \quad (2)$$

Для нахождения скалярного волнового поля в окружающем пространстве будем использовать численные методы решения.

---

1. А.А. Минаков, О.Ф. Тырнов «Статистическая радиофизика». Харьков: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2003

Научный руководитель - д. ф.-м. н., профессор К.Е. Афанасьев

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ НАКАЛА КАТОДА, НАХОДЯЩЕГОСЯ ПОД ПОТЕНЦИАЛОМ 150 кВ

А.А. Гальт

Новосибирский государственный университет

В настоящее время в Институте ядерной физики СО РАН ведется разработка аппарата для электронно-лучевой сварки. Катод электронно-лучевой трубки аппарата находится под потенциалом 150 кВ. Обеспечение питанием цепей накала катода под таким напряжением представляет собой определенную трудность. При меньших

напряжениях такая задача обычно решается с помощью специальных накальных трансформаторов с изоляцией между обмотками на полное напряжение. Приемлемые конструкции подобных накальных трансформаторов на напряжение до 150 кВ автору не известны.

В данной работе предлагается система питания накала катода под потенциалом до 150 кВ. Конструкция состоит из последовательно соединенных трансформаторов с изоляцией между обмотками на напряжение до 40 кВ и имеет следующие преимущества:

1. простота в изготовлении;
2. небольшие габариты;
3. возможность использования для питания устройств, имеющих потенциалы выше 150 кВ.

Результаты проделанной работы:

1. была спроектирована модель системы питания;
2. произведен расчет и оценка основных рабочих параметров;
3. изготовлен опытный образец трансформатора с изоляцией между обмотками на напряжение до 40 кВ;
4. измерены индуктивность намагничивания и индуктивность рассеяния опытного образца трансформатора;
5. построена эквивалентная электрическая схема и проведено моделирование электрических процессов в ней с помощью моделирующей программы NL.

Системы подобного типа могут применяться как для питания накалов аппаратов электронно-лучевой сварки, так и для питания различных устройств, находящихся под высоким потенциалом. В перспективе, она будет использована в рентгеновских аппаратах, разрабатываемых в Институте ядерной физики.

Научный руководитель – канд. тех. наук Ю.Ф. Токарев.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ЭНЕРГИИ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В УСКОРИТЕЛЕ ЭЛВ 12 МОЩНОСТЬЮ 400 кВт.

В.Е. Долгополов  
Новосибирский государственный университет

В настоящее время электронно-лучевые технологии широко используют электронные пучки в процессах: радиационной сшивки полимеров (полиэтилен, полихлорвинил, поливинилхлорид и т. д.), радиационного отвержения полимерных материалов, стимулирования или инициирования химических реакций, очистки дыма, очистки сточных вод, дезинфекции зерна.

В ИЯФ СО РАН разработан и изготовлен ускоритель нового поколения ЭЛВ-12, предназначенный для применения в

природоохранных технологиях. Ускоритель имеет следующие параметры:

Рабочий диапазон энергий ускоренных электронов.....0.6 - 1.0 МэВ

Максимальный ток пучка

.....400 мА

Максимальная мощность выведенного в атмосферу пучка ....400 кВт.

Тип преобразователя частоты

.....транзисторный

В данной работе рассматривались пульсации энергии ускоренных электронов в ускорителе ЭЛВ 12. Различные технологические применения ускорителя накладывают свои требования на максимально допустимую величину пульсаций энергии. Максимальная средняя энергия электронов ограничена величиной пульсаций главным образом по величине электрической прочности элементов ускорителя. Величина пульсаций энергии ускоренных электронов важна для нормальной работы ускорительной трубки и проводки пучка через выпускное устройство. Так при выпуске пучка через фольгу большой уровень пульсаций снижает её эффективную площадь.

В результате проделанной работы разработана схема замещения системы питания ускорителя, позволяющая произвести теоретический расчет транзисторного инвертора. Приведен теоретический



расчет величины пульсаций ускоренных электронов при помощи компьютерного моделирования. Показаны основные результаты проведенных экспериментов по измерению пульсаций при помощи емкостного и линейного датчика. Приведено сравнение экспериментальных данных с теоретическим расчетом.

Научный руководитель – канд. техн. наук, ст. научн. сотр. П.И. Немытов

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОАКСИАЛЬНОЙ ЛИНИИ  
С ВНУТРЕННИМ ПРОВОДНИКОМ СЛОЖНОГО СЕЧЕНИЯ

Е.В. Жалнина  
Томский государственный университет

Усложнение профиля поперечного сечения внутреннего проводника цилиндрической коаксиальной линии – наиболее простой путь достижения требуемого значения ее характеристического импеданса без изменения в целом поперечных размеров линии. С другой стороны, наличие, например, ребер у внутреннего проводника будет приводить к высокой концентрации электрического поля в зазорах между этими ребрами и внешним проводником. Тем самым создаются предпосылки для эффективного управления электромагнитной волной,

распространяющейся в линии, с помощью размещенных в зазорах малогабаритных управляющих элементов.

Теоретическому исследованию такой линии в частных случаях было посвящено несколько работ. При этом использовались метод конформных отображений и метод частичных областей. Решение было получено для коаксиальной линии с внутренним проводником со звездообразным сечением сложной формы. Проведенный нами анализ этих работ обнаружил недочеты, содержащиеся в них. Оказалось, что в одной из работ использовано отображение, не являющееся в действительности конформным в одной из точек отображаемой области. В другой работе автор не учел необходимость удовлетворение граничному условию на одном из участков границы частичной области.

Перед нами стояла задача критически проанализировать результаты перечисленных работ. Кроме того, необходимо было получить решение с использованием конечного интегрального преобразования типа Меллина. При таком подходе задача сводится к решению обобщенного функционального уравнения типа Винера – Хопфа. Это уравнение в свою очередь сведено к быстро сходящейся бесконечной системе линейных алгебраических уравнений, допускающих эффективное решение с помощью ЭВМ методом редукции при произвольных значениях параметров. При определенных значениях параметров возможно

приближенное решение системы методом последовательных приближений.

На основе полученного решения проведены расчеты ряда электродинамических характеристик линии представляющих непосредственный интерес для практики.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент В.П. Беличенко

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ВОДА-ЛЕД В МИКРОПОЛОСКОВОМ НЕРЕГУЛЯРНОМ РЕЗОНАТОРЕ

Д.М. Зинич

Томский государственный университет

Структура льда отличается от структуры жидкой воды большей упорядоченностью, молекулы в меньшей степени подвержены тепловому движению, поэтому статическая диэлектрическая проницаемость льда выше, чем у воды. Отличие структуры проявляется и во взаимодействии с электромагнитным полем, поскольку подвижность молекулярных образований для этих структур существенно различается. Отличие частотных зависимостей диэлектрической проницаемости

жидкой воды и льда проявляются различным расположением областей релаксации: для воды она находится в микроволновой области радиочастот, а для льда на несколько порядков ниже.

Нами проведено наблюдение за изменением электромагнитных параметров: изменения частоты и добротности нерегулярного микрополоскового резонатора в температурном интервале  $+5 - -10^{\circ}\text{C}$ , заполненным деионизованной водой. Исследования производились на автоматизированном радиоспектроскопе, основой которого являются панорамные измерители КСВн и персональный компьютер. Температура устанавливалась испарением жидкого азота и регулировалась нагревательными элементами. Измерение температуры осуществлялась терморезистором посредством измерения его сопротивления измерительным мостом E7-8.

Отмечено, что в области фазового перехода наблюдается резкое изменение частоты резонатора и его добротности, что связано с изменением величин обеих составляющих комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''$ .

Отмечено, что при понижении температуры фазовый переход смещается в область отрицательных температур, то есть наблюдается переохлаждение жидкости. При смене направления изменения температуры от низких к высоким отмечается гистерезис, характерный для фазовых переходов первого рода.

При увеличении роста частоты электромагнитного излучения отмечается рост температуры замерзания воды. Этот эффект может быть связан с образованием зародышей новой фазы, появление которых стимулируется воздействием электромагнитного излучения с диполями воды. Это взаимодействие становится более интенсивным по мере приближения к области диэлектрической релаксации жидкой воды.

Научный руководитель - канд. физ.-мат. наук,  
доцент В.И. Суслиев.

## ОТКРЫТЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ С МНОГОСЛОЙНЫМ ЗАПОЛНЕНИЕМ

Ю.Г. Иванов

Томский государственный университет

Большое количество публикаций посвящено исследованию открытых волноводов для применения их в качестве линий передачи. Однако существует возможность использования открытых волноводов в качестве измерительных элементов электрофизических характеристик материалов и сред. Получение информации о технологических параметрах и их изменениях в ходе технологических процессов представляет собой первоочередную задачу при создании систем контроля и управления данными процессами. Преимущества таких

измерительных устройств на основе многослойных волноводов по сравнению с уже существующими приборами заключаются в их без инерционности, простоте, компактности.

В работе проведено компьютерное моделирование электродинамических волновых процессов в открытых волноведущих системах с многослойной заполняющей средой.

Дисперсионное уравнение для расчета постоянной распространения и структуры поля в волноводе формируется из условий непрерывности касательных составляющих электрического и магнитного полей на границах слоев и условия излучения на внешней границе волновода.

Для отделения корней дисперсионного уравнения используется принцип аргумента, а для определения постоянной распространения - метод координатного спуска. Разработан алгоритм и составлена программа на языке Фортран, реализующая метод расчета дисперсионных характеристик для собственных типов волн открытого цилиндрического волновода с произвольным количеством слоев. Программа позволяет исследовать влияние количества слоев их геометрических и материальных параметров на структуру поля, отслеживать типы волн в волноводе.

Показано, что изменение геометрических и материальных характеристик слоев открытого волновода может приводить к перераспределению энергии электромагнитного поля внутри волноведущей структуры. Таким образом, варьируя

соотношения радиусов слоев, а также их диэлектрические и магнитные проницаемости, можно добиться преимущественной концентрации электромагнитного поля в исследуемом слое, что позволяет провести оптимизацию структуры для ее практического применения в качестве измерительного элемента электрофизических характеристик материалов.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук А.А. Жуков

## ТОМОГРАФИЯ НЕОДНОРОДНОГО СЛОЯ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ

Д.Н. Кирин

Томский государственный университет

В настоящее время томографические подходы используются очень широко. В качестве измеряемого и восстанавливаемого параметров могут выступать самые разнообразные величины. Обычно уравнение, связывающее эти параметры, имеет вид интегральной проекции.

Часто решаемую задачу стараются упростить, считая, что свойства среды изменяется только в одном направлении. Будем исследовать неоднородный слой конечной толщины в рамках приближения геометрической оптики. Пусть на верхнюю границу падает плоская монохроматическая волна, а сигнал регистрируется на нижней границе

слоя. Для удобства в качестве восстанавливаемого параметра рассматривается показатель преломления среды, возрастающий с глубиной. Решение прямой задачи представляет собой интегральную проекцию в зависимости от угла падения волны (или от прицельного параметра) и от показателя преломления среды:

$$L(p) = \int_{n(0)}^{n(h)} \frac{n^2}{\sqrt{n^2 - p^2}} \cdot dn/dh \cdot dn.$$

Траектория луча внутри слоя определяется законом Снеллиуса.

Для решения обратной задачи производится нелинейная замена переменных, при которой данное интегральное уравнение приводится к интегральному уравнению типа свертки, что позволяет использовать эффективные алгоритмы быстрого преобразования Фурье. В результате получена зависимость показателя преломления от глубины в неявной форме. Анализ полученного решения показал сильную некорректность поставленной задачи, которая компенсируется с помощью предложенных приемов регуляризации.

Научный руководитель - к. ф.-м.н., доцент Д.В. Лосев



# ПРОТОТИП СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ НА ПУЧКАХ СИ.

М.В. Колмаков

Новосибирский государственный университет.

На канале 0 экспериментальной станции синхротронного излучения (СИ) накопителя ВЭПП-3 в Институте ядерной физики СО РАН проводятся исследования быстропротекающих процессов, таких, как распространение ударных и детонационных волн во взрывчатых веществах (ВВ), образование фракции ультрадисперсных алмазов при взрыве углеродосодержащих ВВ с отрицательным кислородным балансом и др. В этих экспериментах регистрируется прошедший сквозь образец прямой пучок СИ (метод теневой рентгенографии) либо излучение, рассеянное на малые углы. Для регистрации СИ используются многоканальные датчики разных типов и, соответственно, с сильно различающимися параметрами выходных сигналов - длительностью импульса тока и его величиной.

Действующая в настоящее время система регистрации, состоящая из отдельных блоков

фильтров-формирователей и аналого-цифровых преобразователей (АЦП), не позволяет наращивания большого числа каналов и, кроме того, имеет определенные эксплуатационно-технические недостатки. Сейчас разрабатывается прототип системы, содержащей блок синхронизации и КАМАК-модуль 12-канального АЦП, совмещенного с фильтрами-формирователями. Система обеспечит эффективную обработку сигналов всех типов используемых датчиков – АЦ-преобразование данных, их временное хранение в памяти и передачу в ЭВМ. В случае успешного применения прототипа предполагается создать систему на 50 каналов, связанную с ЭВМ по какому-либо быстрому стандартному интерфейсу.

Научный руководитель – к. ф.-м. н., с. н. с. ИЯФ  
СО РАН М.Г.Федотов

МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ БЛОК УПРАВЛЕНИЯ  
МОДУЛЯТОРОМ УСКОРИТЕЛЯ ИЛУ-10

А.С. Кононов  
Новосибирский государственный университет.

Ускоритель ИЛУ-10 работает в импульсном режиме с частотой до 20Гц и длительностью импульса порядка 500мкс.

В последнее время потребовалось значительно улучшить энергетический разброс в пучке электронов. Для достижения этой цели «пушку» ускорителя следует «отпирать» только тогда, когда ускоряющее напряжение достигнет номинального значения, и «запирать» когда ускоряющее напряжение еще не начало уменьшаться. Таким образом, напряжение на катоде модулятора должно состоять из нескольких фаз:

- в паузе между импульсами на катод надо подавать запирающее напряжение около 3000V.

- во время импульса (450-650мкс) на катоде надо поддерживать напряжение 500-1500V, обеспечивающее постоянный ток катода (ускорителя).

- время включения/выключения должно составлять не более 10-15мкс.

Для решения этих задач был разработан модулятор, который включает в себя высоковольтный источник питания, формирователь высоковольтных импульсов, состоящий из пяти

последовательно включенных полевых транзисторов, и блок управления.

По сложившейся традиции управление ускорителем (и в том числе пушкой) осуществляется как «вручную» так и от компьютера (в данном случае по RS-232).

В блоке управления применен микроконтроллер ADuC812. Он удобен тем, что включает в себя все необходимые для решения данной задачи компоненты: два ЦАПа, восьмиканальный АЦП, порт RS-232. Важной особенностью микроконтроллера является то, что данная микросхема содержит ОЗУ и ПЗУ, т.е. для построения относительно небольших систем не требуется дополнительного оборудования. Режим работы модулятора (ток и длительность импульса) задается от компьютера по RS-232 или «вручную». Для «ручного» управления модулятором служит клавиатура из четырех кнопок и ЖК дисплей. Программа, записанная в ПЗУ микроконтроллера, обеспечивает пользователю простой и понятный интерфейс.

Научный руководитель – канд. техн. наук В.В. Репков

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ

Е.Ю. Коровин

Томский государственный университет

Спектры магнитной и диэлектрической проницаемостей радиоматериалов в микроволновой области электромагнитного излучения позволяют получить уникальные сведения о фундаментальных характеристиках - строении и составе, определяют область их применения и необходимы для разработки оптимальных устройств на их основе.

В настоящее время не разработаны теоретические модели для расчета электромагнитных характеристик для высокочастотного диапазона при изменении температуры или других внешних воздействий. По этой причине экспериментальное исследование по-прежнему остается актуальным.

В данной работе рассматривается измерительный комплекс, перекрывающий диапазон частот от 2 до 12 ГГц. Широкополосность измерений достигается применением набора многомодовых объемных резонаторов, скорость и качество обработки результатов достигается применением персонального компьютера (ПК). Алгоритм измерения следующий: прошедший через измерительную ячейку СВЧ - сигнал от свип-генератора поступает на индикатор Я2Р-67, откуда с разъема "Самописец" посредством

16-разрядного АЦП, установленного на шину СОМ порта, производится запись в память ПК. Запись производится по двум каналам: по одному – напряжение, пропорциональное частоте развертки, по другому – напряжение, отражающее величину прошедшей мощности. Качание частоты производилось с периодом 40 с, что позволило записывать до 1000 точек резонансной линии.

В используемом АЦП на входах установлена оптоэлектронная развязка для согласования с выходом панорамного измерителя. АЦП тестировался с помощью эталонного источника постоянного тока путем изменяя напряжение через 1 мВ в пределах от -1.2 В до 1.2 В.

Для расчета электромагнитных характеристик исследуемых материалов разработан блок программ. На данном измерительно-вычислительном комплексе проведено исследование магнитных спектров наноразмерных механически активированных в планетарной мельнице (ускорение 10g) порошков гексаферритов системы  $\text{Co}_{2-x}\text{Zn}_x\text{W}$ . Показано, что частота естественного ферромагнитного резонанса смещается в зависимости от времени механической обработки. Это смещение связано с изменением величины магнитной кристаллографической анизотропии, вызванной изменением структуры поверхности.

Научный руководитель - канд. физ.-мат. наук В.И. Суслев.

# 12-ТИ РАЗРЯДНЫЙ ДВУХКАНАЛЬНЫЙ АЦП С ЧАСТОТОЙ ВЫБОРКИ ОТ 0 ДО 50 МГц В СТАНДАРТЕ КАМАК

М.С. Кочергин

Новосибирский государственный университет

В большинстве физических экспериментов существенную информацию о происходящих процессах несет форма сигналов с датчиков. В том случае, когда речь идёт об однократных процессах, наблюдение таких сигналов, регистрация их формы и последующая обработка – весьма трудоёмкий процесс. Развитие систем автоматизации физического эксперимента инициировало разработку аппаратуры для решения подобных задач цифровыми методами. В ИЯФе СОРАН уже разработан и успешно функционирует достаточно большой спектр подобных приборов. Разработанные приборы отличаются друг от друга полосой частот обрабатываемых сигналов, скоростью преобразования, сложностью изготовления и настройки.

В связи с возрастающими требованиями к точности измерений и моральном устаревании элементной базы уже разработанных устройств появляется необходимость в разработке новой аппаратуры. Последние достижения микросхемотехники и современная элементная база

позволяют найти достаточно компактные и простые схемотехнические решения с хорошими техническими характеристиками.

В настоящее время изготовлен и настраивается двухканальный регистратор АЦП502 в стандарте САМАС, осуществляющий аналогово-цифровое преобразование в полосе частот обрабатываемых сигналов от 0...50МГц, с 12-ти разрядной точностью. В модуле предусмотрена возможность выбора диапазона входных напряжений от  $\pm 0.25\text{В}$  до  $\pm 8\text{В}$ , а также разработан режим внешнего запуска и возможность подключить внешнюю частоту таймирования в диапазоне 1Гц÷50 МГц. В разработанном устройстве используется ADC12L063 фирмы National Semiconductor. Данный преобразователь основан на конвейерной архитектуре (задержка 6 рабочих циклов) с цифровой коррекцией ошибки. Интерфейс и блок управления АЦП построены на базе ПЛМ EPМ3128АТС144-5 фирмы ALTERA.

Научный руководитель – научн. сотр. В.Я. Сазанский



# ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ФЛУКТУАЦИЙ СИГНАЛОВ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ЛЕСА

Н.А. Моисеенко  
Томский государственный университет

В настоящее время отмечается большой интерес к использованию радиоволн для оценки биологического и экологического состояния лесных покровов планеты. Настоящая работа является продолжением теоретических и экспериментальных работ, начатых в этом направлении. В работе приводятся последние экспериментальные результаты, полученные методом сверхширокополосного радарного зондирования «эталонной сцены» лиственныйного полога. Основным предметом исследования являются спектры флуктуаций амплитуды радарного отклика. Приводится сопоставление особенностей рассеяния вертикально и горизонтально поляризованного импульсного излучения при наклонном зондировании однородного участка леса.

Зондирование проводилось с использованием импульсов без заполнения с длительностью 150 пс, что соответствует протяженности импульсного объема в 4.5 см. Такое разрешение вполне достаточно для выделения радиолокационных вкладов всех основных видов неоднородностей. Частота следования импульсов задавалась 5 кГц.

Применена бистатистическая локационная схема с двумя рядом расположенными параболическими антеннами, имеющими диаметр 1.6 м. Локационная система располагалась на высоте 21.5 м. Передающая и приемная антенны ориентировались вниз на лесной полог под углом места порядка  $25^\circ$ . Средняя высота деревьев равнялась 16 м. Данная схема полностью имитирует аэрокосмическую схему зондирования.

Полученная картина распределения амплитуды радарного сигнала была подвергнута спектральному анализу. Оказалось, что в среднем спектр хорошо описывается степенной зависимостью. При этом имеют место два характерных участка. Первый из них относится к мелкомасштабным, а второй - к крупномасштабным неоднородностям. Спектральный индекс для первого участка в два раза больше, чем для второго. Обнаруженная зависимость имеет место для обоих видов поляризации, а также для деполяризованного излучения. Весовой вклад крупномасштабных неоднородностей больше для вертикально поляризованного излучения.

Использование теории однократного рассеяния с учетом вертикальной и горизонтальной анизотропией лесного полога позволяет объяснить обнаруженные закономерности. В докладе приводятся результаты соответствующих теоретических расчетов.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф.  
В.П. Якубов

ГРОВОУЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНА В ЛААА ПЕРЕДАЧА  
ПРА РАЗРЯДЕ МОЛНАА МЕЖДУ ДВУМА ОБЛАКАМА

М.Н. Орлова  
Якутский государственный университет

При разряде молнии вблизи линии передач (например, кабель связи, ЛЭП, продуктопровод и др.) в проводниках линии возникают кратковременные перенапряжения или индуцированные, или вызванные прямым попаданием молнии в линию. На высоких широтах индуцированные перенапряжения в линиях возникают и при больших ионосферных возмущениях. В условиях многолетней мерзлоты проблемы грозозащиты приобретают особую актуальность. В криолитозоне РС(Я) грозовая активность начинается в конце мая – в начале июня, когда мерзлота практически не оттаяла, и линии передач оказываются как бы «подвешенными» над толстым слоем диэлектрика. Опыт эксплуатации линий связи показывает, что практически ежегодно в конце мая - в начале июня примерно в 200 км от г. Якутска в результате грозовой деятельности выходит из строя магистральная кабельная линия связи. В высоковольтных ЛЭП каждое лето наблюдаются многочисленные грозовые отключения, например, в начале июня 2003 г. в результате прямого попадания молнии в промежуточную опору №745 произошло ее возгорание и повреждение с последующим автоматическим отключением линии электропередачи Л-102 "Мирный - Ленск". Выработка мер по защите от грозовых перенапряжений требует комплекса мероприятий технического характера. Для этого необходимо знать величины таких перенапряжений, возникающих при прямом попадании молнии в линию и индуцированных. Их оценки можно получать методом математического моделирования.

В данной работе проведены численные расчеты, индуцированных грозовых перенапряжений в линии передачи в условиях многолетней мерзлоты при разряде молнии между двумя облаками над линией. Распространение электромагнитных волн вдоль линии описывается системой телеграфных уравнений. Расчеты проведены в рамках модели, не учитывающей зависимость тока молнии от времени. При этом решается задача Коши для системы телеграфных уравнений, начальные значения тока равны нулю, начальные значения напряжения равны потенциалам четырех точечных зарядов, два из которых моделируют грозовые облака. Получены значения максимальных силы тока и напряжения в линии при различной геометрии расположения облаков.

Работа поддержана грантом РФФИ-Арктика № 03-01-96060.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. Ю.М. Григорьев

# МОДЕРНИЗАЦИЯ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ.

Р.В. Пилипенко

Новосибирский государственный университет

На физических установках в институте ядерной физики СО РАН (ИЯФ) для управления шаговыми двигателями от ЭВМ используется блок УШД2, выполненный в стандарте КАМАК. Этот блок был разработан в 80-е годы. Сегодня его элементная база считается устаревшей, а большое число (68) корпусов микросхем на плате вызывает издержки при эксплуатации блока. Поэтому возникла потребность в модернизации УШД2.

Заменой устаревших логических элементов УШД2 послужила программируемая логическая матрица EPF10K10 семейства FLEX10 фирмы Altera. При помощи пакета MAX+PLUS II, на языке описания логических устройств AHDL была написана программа, моделирующая логическое ядро интерполятора и интерфейса КАМАК блока УШД2.

Выходной драйвер спроектирован на низкоомных МОП ключах к двухфазному шаговому двигателю. Стабилизация тока в обмотках двигателя – широтно-импульсная.

Научный руководитель – н.с. Ш.Р. Сингатулин.

ВЛИЯНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ НА  
СИНХРОНИЗАЦИЮ  
АВТОКОЛЕБАНИЙ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ  
ЭЛЕКТРОННО-  
ВОЛНОВОЙ СИСТЕМЕ  
ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ  
ВСТРЕЧНЫХ ВОЛН

П.В. Попов

Саратовский государственный университет

Проблема синхронизации автоколебаний в различных системах представляется весьма важной и актуальной, о чем свидетельствует большое число публикаций по данной тематике. Большинство исследований явления синхронизации автоколебаний посвящено изучению систем с малым числом степеней свободы (см., например, [1]). Меньше подобных работ посвящено анализу синхронизации в распределенных автоколебательных средах. Среди последних особый интерес вызывают электронно-волновые системы со встречной волной, которые

являются эталонными моделями распределенных автоколебательных систем. В работах [2,3] изучены некоторые особенности классической и хаотической синхронизации в распределенных автоколебательных системах «электронный поток – встречная (обратная) электромагнитная волна». Простейшей моделью подобной среды является модель взаимодействующих встречных волн с кубичной фазовой нелинейностью [4].

В представленном докладе рассматривается влияние флуктуаций на синхронизацию регулярных колебаний в активной распределенной среде взаимодействующих встречных волн с кубичной нелинейностью. В качестве модели рассматривается активная среда с распределенным источником белого шума. Исследуется влияние флуктуаций на автономные режимы колебаний в активной среде, а также неавтономная динамика активной среды при воздействии на нее внешнего гармонического сигнала, который вводится на одной из границ системы.

Изучено влияние интенсивности шума на ширину полосы синхронизации и динамику системы в асинхронном режиме. Показано, что с ростом интенсивности шума имеет место уменьшение ширины полосы синхронизации. Рассмотрены физические процессы в распределенной активной среде в присутствии флуктуаций при воздействии на систему внешнего гармонического сигнала.

1. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003.

2. Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Изв. вузов. Радиоп физика. 2002. Т. XLV. No.9. СС.773-792.

3. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Радиотехника и электроника. 2003. Т.48. No.1. СС.116-124.

4. Трубецков Д.И., Четвериков А.П. 1994. Т. 2, № 5. С.3.

Научный руководитель – к-т физ.-мат. наук,  
доцент А. Е. Храмов

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ЦЕПИ

ОБРАТНОЙ СВЯЗИ КОЛЛАЙДЕРА

С СИЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ.

К.И. Попов

Новосибирский государственный университет

Данная работа является одним из этапов разработки системы поперечной обратной связи для коллайдера ВЭПП-4 (ИЯФ, Новосибирск).

Система поперечной обратной связи (ПОС) ВЭПП-4 разрабатывается с целью подавления неустойчивости поперечных связанных мод (НПСМ), которая в настоящее время является главным фактором, ограничивающим пороговый ток

этого коллайдера. Теоретически показано, что совместное применение отрицательного хроматизма и резистивной обратной связи может многократно увеличить порог НПСМ.

Для практической реализации системы ПОС необходимо было выяснить алгоритмы, по которым должно строиться взаимодействие между системой обратной связи и пучком. В частности, нужно было выяснить, каким должен быть удар по пучку на каждом обороте при заранее заданных глубине и фазе обратной связи, в зависимости от начальной фазы пучка и его отклонения от положения равновесия.

В данной работе эта задача была решена в простейшем случае однородной орбиты и в более сложном случае коллайдера с сильной фокусировкой, каким и является ВЭПП-4. Было показано, что для того чтобы обратная связь была резистивной, необходимо на каждом обороте ударять по пучку с силой, пропорциональной величине  $\left( \beta \frac{p_x}{p_0} + \alpha x \right)$ , где  $\alpha$ ,

$\beta$  – соответственно  $\alpha$  и  $\beta$  – функции в месте удара,  $p_x$  – поперечный импульс центра масс пучка в момент удара,  $p_0$  – полный импульс,  $x$  – отклонение центра масс пучка от положения равновесия в момент удара. Напротив, для того чтобы ПОС была реактивной, необходимо ударять по пучку с силой, пропорциональной  $x$ .



Научный руководитель – д.ф.-м.н., проф. М.М. Карлинер

КООПЕРАТИВНАЯ ДИНАМИКА СИСТЕМ  
С КОНКУРЕНТНОЙ СВЯЗЬЮ

П.А. Щербаков  
Саратовский государственный университет

В прикладных задачах из различных областей знания часто возникает ситуация, когда два или более осцилляторов взаимодействуют, конкурируя за источник энергии (динамика парных нефронов [1], колебания концентрации сосуществующих в одном объеме популяций микроорганизмов [2] и т.д.). В подобных ситуациях важно понимать, какие особенности динамики порождены характером связи, а какие – спецификой самих автоколебательных систем.

Наша работа посвящена изучению характерных эффектов, к которым приводит конкурентная связь осцилляторов, на примере по возможности более простой и наглядной модели. В качестве такой базовой модели выбрана двумерная автоколебательная система с N-типом нелинейности. В радиофизическом эксперименте такую систему несложно моделировать автогенератором на туннельном диоде.

При связи таких осцилляторов по питанию наблюдается эффект конкуренции за ток питания

источника. Такая связь в общем случае наблюдается синхронный режим с разбегом фазы  $2\pi/n$ , где  $n$  – количество связанных осцилляторов.

При введении расстройки двух осцилляторов по частотам, обнаружен переход к хаотическому режиму необычной топологии, что связано с активацией области медленных движений фазового пространства исследуемой динамической системы. Мы показываем связь этого хаотического режима с т.н. “canard”-колебаниями вблизи линии бифуркации Андронова-Хопфа [3].

Наконец, для последовательно связанных по питанию систем, наблюдается эффект локальной генерации, когда автоколебания возникают в группе осцилляторов, тогда как остальные осцилляторы цепи не возбуждаются.

1. D.E. Postnov, O.V. Sosnovtseva, E. Mosekilde, and N.-H. Holstein-Rathlou “Cooperative Phase Dynamics of Coupled Nephrons.” *Int. J. Mod. Phys. B*, v.15, 3079-3098 (2001)
2. E. Mosekilde “Topics in Nonlinear Dynamics. Application to Physics, Biology and Economic Systems” World Scientific 1996
3. Д.Э. Постнов, А.В. Шишкин, Д.В. Сецинский, “Стохастическая динамика возбудимой системы в области подпороговых колебаний.” *Известия вузов ПНД* 2003

Научный руководитель - д.ф.-м.н. профессор Д.Э. Постнов