

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПРАВИТЕЛЬСТВО НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ
КОМИССИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДЕЛАМ ЮНЕСКО
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**МАТЕРИАЛЫ
51-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНОЙ СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

«Студент и научно-технический прогресс»

12–18 апреля 2013 г.

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

**Новосибирск
2013**

УДК 53
ББК 22.3

Материалы 51-й Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Квантовая физика / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2013. 82 с.

ISBN 978-5-4437-0156-1

Конференция проводится при поддержке Президиума Сибирского отделения Российской Академии наук, Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-01-06812), Правительства Новосибирской области, Комиссии РФ по делам ЮНЕСКО, Технопарка Новосибирского Академгородка.

Научный руководитель секции –
чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф. А. В. Латышев
Председатель секции – д-р физ.-мат. наук, проф. А. В. Тайченачев
Ответственные секретари секции – канд. физ.-мат. наук А. А. Блошкин,
В. С. Воробьев, Е. О. Шемякина.

Экспертный совет секции:

чл.-корр. А. В. Латышев, канд. физ.-мат. наук А. А. Блошкин,
д-р физ.-мат. наук В. Л. Альперович, канд. физ.-мат. С. С. Косолюбов,
Д. И. Роголо, С. В. Ситников, канд. физ.-мат. наук Е. Е. Родякина,
канд. физ.-мат. наук О. Е. Терещенко, канд. физ.-мат. наук А. В. Ненашев,
Л. И. Федина, канд. физ.-мат. наук И. И. Бетеров,
канд. физ.-мат. наук А. В. Каламейцев, канд. физ.-мат. наук В. В. Петров,
д-р физ.-мат. наук И. И. Рябцев, д-р физ.-мат. наук П. Л. Чаповский,
д-р физ.-мат. наук А. В. Тайченачев, д-р физ.-мат. наук Б. А. Шварц,
д-р физ.-мат. наук В. Ф. Дмитриев, канд. физ.-мат. наук А. В. Резниченко,
канд. физ.-мат. наук В. Е. Блинов, канд. физ.-мат. наук Е. А. Кравченко,
канд. физ.-мат. наук Ф. В. Игнатов.

ISBN 978-5-4437-0156-1

© Новосибирский государственный
университет, 2013

**RUSSIAN FEDERAL MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE
SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
NOVOSIBIRSK REGION GOVERNMENT
COMMISSION OF THE RUSSIAN FEDERATION FOR UNESCO
NOVOSIBIRSK NATIONAL RESEARCH STATE UNIVERSITY**

**PROCEEDINGS
OF THE 51st INTERNATIONAL STUDENTS
SCIENTIFIC CONFERENCE**

«STUDENTS AND PROGRESS IN SCIENCE AND TECHNOLOGY»

April, 12–18, 2013

QUANTUM PHYSICS

**Novosibirsk, Russian Federation
2013**

Proceedings of the 50th International Students Scientific Conference «*Students and Progress in Science and Technology*». Quantum physics/ Novosibirsk State University. Novosibirsk, Russian Federation. 2013. 83 pp.

ISBN 978-5-4437-0156-1

The conference is held with the significant support of Presidium of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Russian Foundation for Basic Research (project № 13-01-06812), Novosibirsk Region Government, Commission of the Russian Federation for UNESCO, Technopark of Novosibirsk Akademgorodok.

Section scientific supervisor –
Corr. Member RAS, Dr. Phys. Math, Prof. A. V. Latyshev
Section head – Dr. Phys. Math, Prof. A. V. Taichenachev
Responsible secretary – V. S. Vorobyev, E. O. Shemyakina,
Cand. Phys. Math. A. A. Bloshkin

Section scientific committee:

Corr. Member RAS A. V. Latyshev, Cand. Phys. Math. A. A. Bloshkin
Dr. Phys. Math V. L. Alperovich, Cand. Phys. Math. S. S. Kosolobov,
D. I. Rogilo, S. V. Sitnikov, Cand. Phys. Math. E. E. Rodyakina,
Cand. Phys. Math. O. E. Tereschenko, Cand. Phys. Math. A. V. Nenashev,
L. I. Fedina, Cand. Phys. Math. I. I. Beterov,
Cand. Phys. Math. A. V. Kalameytsev, Cand. Phys. Math. V. V. Petrov,
Dr. Phys. Math I. I. Ryabtsev, Dr. Phys. Math P. L. Chapovskiy,
Dr. Phys. Math A. V. Taychenachev, Dr. Phys. Math B. A. Shvarts,
Dr. Phys. Math V. F. Dmitriev, Cand. Phys. Math. A. V. Reznichenko,
Cand. Phys. Math. V. E. Blinov, Cand. Phys. Math. E. A. Kravchenko,
Cand. Phys. Math. F. V. Ignatov.

ISBN 978-5-4437-0156-1

© Novosibirsk State University, 2013

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

УДК 539.1.074.9

СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ И ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХФАЗНОГО КРИОГЕННОГО ЛАВИННОГО ДЕТЕКТОРА В АРГОНЕ

А. И. Гончаренко

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирский государственный университет

Известно, что обычная материя составляет менее 5% общего энергетического содержания Вселенной, тогда как природа остальных 95% остается неизвестной. Так же было установлено, что частицы этой неизвестной материи могут иметь природу WIMP (Weakly Interacted Massive Particles), такую же, как, например, у нейтрино.

Для исследования подобных частиц требуется создать детектор, который был бы способен работать в одноэлектронном режиме счета для того, чтобы регистрировать взаимодействие таких частиц с веществом. Идея подобного детектора была придумана в ИЯФ им. Г.И. Будкера в 2002 году.

Он должен работать при криогенной температуре с благородным газом внутри сосуда и с лавинным электронным усилением, выполняемым непосредственно в детектируемой среде, которая может быть в жидком, газообразном или двухфазном состояниях. Подобные детекторы называются CRAD (Cryogenic Avalanche Detectors). Электронное лавинное усиление обеспечивается газовыми электронными умножителями.

Одной из важных составляющих таких детекторов является система температурного контроля, поскольку колебания температуры могут нарушить чистоту эксперимента и привести к экспериментальным ошибкам.

В качестве первого этапа работы был освоен прибор Temperature controller336 и были измерены температуры известных объектов и систем. Во втором этапе работ были стабилизированы по температуре простейшие системы, например, емкость с жидким азотом. В третьем этапе были измерены характеристики CRADна основе аргона в двухфазном состоянии и создана система температурной стабилизации этого детектора.

Научные руководители: – д-р физ.-мат. наук А. Ф. Бузулуцков.

ИЗМЕРЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СВЕТИМОСТИ С ДЕТЕКТОРОМ СНД НА КОЛЛАЙДЕРЕ ВЭПП-2000

К. А. Гревцов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск

Светимость – важный параметр, характеризующий интенсивность столкновений частиц двух встречных пучков в коллайдере. Прецизионное измерение светимости является ключевым фактором большинства экспериментов, в которых измеряются сечения электрон-позитронной аннигиляции в адроны.

Для измерения светимости используются процессы квантовой электродинамики (КЭД) – $e^+e^- \rightarrow e^+e^-i\gamma\gamma$, которые имеют с одной стороны большие сечения, а с другой – события этих процессов имеют простую топологию в детекторе и могут быть выделены практически без фона из потока экспериментальных данных.

Светимость измерялась с помощью процессов $e^+e^- \rightarrow e^+e^-i\gamma\gamma$, как

$$L = N / (\sigma * \epsilon * \delta),$$

здесь N – число отобранных событий нормировочного процесса, σ , ϵ – эффективность регистрации в примененных условиях отбора, определенная по моделированию методом Монте-Карло, δ – поправка к эффективности регистрации, учитывающая неточности в моделировании, которые определялись с помощью экспериментальных данных.

Была измерена интегральная светимость с детектором СНД по процессам $e^+e^- \rightarrow e^+e^-i\gamma\gamma$ и $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$. Отношение результатов измерений согласуется с точностью 2%.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук М. Н. Ачасов.

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$
В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ 1-2 ГэВ**

О. А. Коваленко

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Новосибирский государственный университет

Процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ является одним из основных адронных каналов e^+e^- аннигиляции в области энергии до 2 ГэВ. Сечение этого процесса дает заметный вклад в адронную поляризацию вакуума, величину которой необходимо знать для прецизионного определения аномального магнитного момента мюона и позволяет провести проверку Стандартной модели. Большой интерес для теоретических моделей рождения легких адронов представляет изучение динамики трехпионного конечного состояния.

Экспериментальные данные были получены на детекторе КМД-3, расположенном на коллайдере ВЭПП-2000. В работе анализировались данные 2011-2012 годов, с интегральной светимостью 38 1/пбн.

В области ϕ -мезонного резонанса для дальнейшего анализа отбирались события с двумя неколлинеарными треками, импульсы которых попадали в кинематически разрешенную область на диаграмме P1-P2. Для подавления фона от процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$ накладывались условия на энергию, выделенную в калориметре. Для проверки отборов сечение в области резонанса аппроксимировалось функцией Брейта-Вигнера с учетом интерференции между ϕ и ω -мезонами. Полученные значения ширины и массы резонанса, а также сечения в пике согласуются с предыдущими измерениями. При энергии эксперимента выше ϕ -мезона предыдущие ограничения не позволяют отделить фон от событий эффекта, поэтому отбор также включал в себя кинематическую реконструкцию π^0 по двум фотонам, которые наилучшим образом подходили по закону сохранения энергии и импульса. Эффективность регистрации была рассчитана из моделирования. Радиационные поправки посчитаны с использованием данных, полученных на детекторе BaBar.

В данной работе были получены предварительные результаты по сечению $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ в диапазоне энергий 1-2 ГэВ в системе центра масс. Результаты согласуются с предыдущими измерениями на детекторах BaBar и SND и расходятся с результатами, полученными на детекторе DM-2.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Б. А. Шварц.

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ ДЕТЕКТОРОМ КМД-3

Е. А. Козырев

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирский государственный университет

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН проводятся эксперименты на e^+e^- коллайдере ВЭПП-2000 с максимальной энергией 2 ГэВ в системе центра масс. Изучение e^+e^- аннигиляции в адроны – главная задача детекторов. Криогенный Магнитный Детектор-3 (КМД-3) предоставляет уникальную возможность изучить процесс аннигиляции в пару K^+K^- , что и является тематикой данной работы. Её первичной целью является получение сечения с точностью лучше, чем достигнутая в более ранних экспериментах. Также проводимый анализ процесса с простой кинематикой позволит изучить особенности поведения заряженных каонов в детекторе КМД-3.

Самые точные измерения данного процесса относятся к работам детекторов КМД-2 и СНД на установки ВЭПП-2М в диапазоне энергий от порога реакции до 1.4 ГэВ в системе центра масс. Достигнутая КМД-2 систематическая ошибка составляет 2.2 % в области энергий фи-мезона [1]. СНД позволил измерить искомое сечение в диапазоне энергий 1.04-1.38 ГэВ со статической ошибкой 4.4 % и систематической ошибкой 5.2 % [2]. В области выше 1.4 ГэВ высокоточных измерений не проводилось. Лишь с точностью хуже 10 % сечение было измерено детектором DM2.

Проводимый анализ интересен с нескольких точек зрения. Во-первых, измеренное сечение помогает определить параметры легких векторных мезонов, а также относительную фазу между амплитудами отдельных мезонов. Во-вторых, искомое сечение нужно для расчета вклада адронной поляризации вакуума в бегущую электромагнитную постоянную и аномального магнитного момента мюона. Сравнение этого момента со значением, измеренным непосредственно, важно для проверки Стандартной Модели. Кроме того, изовекторная часть полученного фактора каона совместно с экспериментальными данными о распаде $\tau \rightarrow K^0 \nu_\tau$ может быть использована для проверки сохранения векторного тока.

[1] R.R. Akhmetshin et al., Phys.Lett.B669:217-222,2008

[2] M.N.Achasov et al., Phys.Rev.D76:072012,2007

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Е. П. Солодов.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФОТОПЕНТОДА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА ДЕТЕКТОРА БЕЛЛЕ 2

М. В. Козюлин

Институт ядерной физики СО РАН
Новосибирский государственный университет

На японском детекторе Belle ускорительного комплекса КЕКВ, являющегося В-фабрикой и специализирующемся на исследовании CP-нарушения, планируется апгрейд. Институт Ядерной Физики имени Г. И. Будкера участвует в коллаборации Belle и ответственен за электромагнитный калориметр. В частности, в электромагнитном калориметре, предназначенном для измерения энергии образующихся в детекторе частиц, ожидается замена существующих PIN-фотодиодов улучшенными фотопентодами Hamamatsu. Это связано с тем, что в торцевых участках калориметра планируется заменить CsI(Tl) на чистый CsI, что улучшает временное разрешение, но уменьшает световыход счетчика. Для компенсации этого уменьшения световыхода и нужны фотопентоды.

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) – электровакуумный прибор, в котором поток электронов, излучаемый фотокатодом под действием оптического излучения, усиливается в умножительной системе, состоящей из набора динодов, в результате вторичной электронной эмиссии. Фотопентод представляет собой специальный тип фотоэлектронных умножителей, имеющих три динода. Их преимущество в сравнении с PIN-диодами состоит в том, что они имеют больший коэффициент усиления сигнала.

Данная работа посвящена исследованию свойств фотопентода. Целью работы является тестирование долговременной стабильности фотопентода. Это первоочередная задача, так как на улучшенном детекторе Belle 2 ожидается фоновая засветка 1кРад/год, и необходимо, чтобы все элементы работали стабильно и без повреждений 5 лет, так как после начала эксперимента возможности заменить их не будет.

В работе исследовано, как меняется коэффициент усиления фотопентода в зависимости от интеграла заряда, прошедшего через него. Приведены данные по деградации коэффициента усиления во времени.

В работе исследовано, как меняется коэффициент усиления фотопентода в зависимости от интеграла заряда, прошедшего через него. Приведены данные по деградации коэффициента усиления во времени.

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

МОНТЕ-КАРЛО ГЕНЕРАТОР МНОЖЕСТВЕННОГО РОЖДЕНИЯ АДРОНОВ ДЛЯ ВЭПП-2000

А. А. Коробов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирский государственный университет

В настоящее время в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СОРАН ведутся эксперименты на установке со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2000. Использование методики «круглых» пучков позволило увеличить светимость коллайдера в 10—100 раз по сравнению с предыдущей установкой ВЭПП-2М и, кроме того, расширить диапазон энергий до 2 ГэВ в системе центра масс.

Универсальный детектор КМД-3, использующийся в эксперименте, обладает как высокой эффективностью регистрации многочастичных событий, так и высоким энергетическим и угловым разрешением для фотонов и заряженных частиц.

Одной из приоритетных задач КМД-3 является измерение полного и эксклюзивных сечений электрон-позитронной аннигиляции в адроны. Целью данной работы является написание Монте-Карло генератора множественного рождения адронов при суммарной энергии в системе центра масс до 2 ГэВ. Данный генератор можно использовать для выделения фона для всех изучаемых процессов.

В результате работы этого генератора были получены события. Каждое событие включает в себя информацию о том, какой процесс произошел и 4-импульсы каждой конечной частицы.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. С. И. Эйдельман.

ОСОБЕННОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЕДИНИЧНОГО ЛЕПТОНА ПРИ ПОИСКЕ ЧАСТИЦ ТЁМНОЙ МАТЕРИИ НА ILC/CLIC – ИСТОЧНИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАСС ЭТИХ ЧАСТИЦ. НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

П. А. Крачков

Институт математики СО РАН, Институт ядерной физики СО РАН
Новосибирский государственный университет

Во многих моделях темная материя состоит из частиц, похожих на частицы из стандартной модели. Стабильность этих частиц обеспечивается сохранением нового дискретного квантового числа, называемого ниже D -четностью. Все известные ныне частицы D -четны, тогда частицы темной материи D -нечетны. Мы рассматриваем модели, в которых помимо нейтральной D -частицы D с массой M_D существует еще и частицы D^\pm с массой $M_\pm > M_D$, быть может, еще одна нейтральная D -нечетная частица D^A с массой $M_A > M_D$. В этих моделях D взаимодействуют с известными ныне частицами через W и Z - бозоны, фотон и бозон Хиггса. На LHC трудно ожидать хорошей точности такого измерения. ILC/CLIC дает эту возможность для широкого класса моделей. Рассмотрено рождение таких частиц на линейном коллайдере ILC/ CLIC $e^+e^- \rightarrow DD$ Частицы D^\pm распадаются на D и W^\pm , иногда на D , W^\pm и Z . Наблюдению подлежат продукты распада W и Z – пары струй $q\bar{q}$ или дилептоны $\ell\nu$. Сечение этого процесса составляет значительную часть полного сечения e^+e^- аннигиляции на ILC, так что этот процесс может надежно наблюдаться и исследоваться здесь. В лептонной моде наблюдаемым является лишь заряженный лептон, и метод кинематических границ прямо не проходит. Недавно выяснилось, что энергетическое распределение лептона $\ell = \mu, e, \nu$ в каскаде  помимо верхней границы распределения содержит хорошо выделяемые особые точки (изломы или максимумы, наряду с верхней границей спектра), измерение положений которых позволит определить массы M_\pm и M_D без использования специфической модели рождения. Мы вычисляем соответствующие распределения и демонстрируем, что эти особые точки достаточно четко выделяются на соответствующих кривых.

В продолжение вычислений прошлого года выполнены вычисления в некоторых специализированных моделях темной материи. Исследован эффект излучения в начальном состоянии (ISR).

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. И. Ф. Гинзбург.

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow 2\pi^+2\pi^-$

А. С. Купич

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН

Новосибирский государственный университет

Существенное отличие измеренной величины аномального магнитного момента мюона от той, что предсказана теорией является одним из немногих отклонений от Стандартной Модели и может косвенно подтвердить существование новой физики. В отличие от большинства экспериментов в физике высоких энергий в данном случае теоретическое значение измеряемой величины входит с ошибкой примерно того же порядка, что и ошибка из эксперимента. Данная проблема возникла из-за вклада сильно взаимодействующих частиц в поляризацию вакуума. Так как постоянная сильного взаимодействия при низких энергия велика, теория возмущений становится неприменимой, и получить из теории интересующий нас вклад невозможно. Но можно получить из эксперимента.

В связи с этим одной из основных задач СНД является расчет адронного вклада в поляризацию вакуума путем измерения всех сечений процессов аннигиляции электрона и позитрона в адроны при энергии в системе центра инерции < 2 ГэВ.

Данная работа посвящена точному измерению сечения $e^+e^- \rightarrow 2\pi^+2\pi^-$. Интерес к этому процессу вызван тем, что в диапазоне энергий 1-2 ГэВ доминируют процессы $e^+e^- \rightarrow 4\pi$ и соответственно их сечения вносят больший вклад в поляризацию вакуума.

Вследствие того, что в СНД нет магнитного поля, невозможно непосредственно из эксперимента определить заряды и импульсы частиц. Кроме того, определить с хорошей точностью полную энергию заряженных π мезонов по энерговыделению в калориметре так же не представляется возможным. Но зная углы вылета всех 4-х частиц и энергию в С. Ц. И. можно, используя закон сохранения 4-х импульса, вычислить импульс каждой частицы. Ошибки вычисленных импульсов во многом зависят от углового разрешения ДК. И потому, в данной работе целесообразно использовать реконструкцию с общей точкой вылета, которая обеспечивает наилучшее угловое разрешение, особенно в событиях большим количеством заряженных треков.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук А. Г. Харламов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ГАЗОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ

Т. В. Мальцев

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирский государственный университет

Детекторы элементарных частиц на основе газовых электронных умножителей широко применяются в экспериментах в области физики высоких энергий.

Газовый электронный умножитель (ГЭУ) относится к классу микроструктурных газовых детекторов, работающих в лавинном режиме. В ГЭУ используется новый принцип газового усиления в микроотверстиях, позволяющий создавать эффективно работающие каскады ГЭУ, причём наиболее распространёнными оказались трёхкаскадные системы.

По многообразию физических явлений, лежащих в основе работы и обнаруженных в исследованиях, ГЭУ превосходят предшествующие газовые детекторы, поэтому представляется важным дальнейшее изучение подобных детекторов.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию, а также теоретическому моделированию детектора на основе трёхкаскадных ГЭУ. В процессе работы были измерены основные характеристики детектора, а именно, токовые утечки, герметичность, калибровочные константы усилителей, зависимость коэффициента газового усиления от напряжения на ГЭУ, корреляции между различными компонентами считывающей структуры – прямыми и наклонными полосками; регистрировались сигналы от изотопов Sr-90, Fe-55, выполняющие функции бета и гамма источников, и были записаны амплитудные спектры. Также было проведено моделирование прохождения узкого пучка электронов с импульсом 1 ГэВ через исследуемый детектор, построено распределение энерговыделений в дрейфовом промежутке в рабочем газе с объёмной долей аргона 75% и диоксида углерода-25%.

В работе показано, что полученные значения коэффициента газового усиления близки к значениям, полученным для аналогичных детекторов в других работах, электрический заряд делится между прямыми и наклонными полосками практически поровну, моделирование правдоподобно описывает исследуемую систему.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Л. И. Шехтман.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЮОННОЙ СИСТЕМЫ ДЕТЕКТОРА СНД

В. П. Олейников

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирский государственный университет

Измерение эффективности – актуальная задача, т.к. при изучении многих процессов требуется срабатывание или несрабатывание мюонной системы, но эти условия не имеют 100% эффективности, в связи с чем появляется систематическая ошибка.

В данной работе измерена эффективность мюонной системы для мюонов процесса $e+e- \rightarrow \mu+\mu-$ и космических мюонов во время работы ускорителя.

Главная проблема, с которой пришлось столкнуться – разделение частиц с высокой точностью, поскольку примесь другого сорта изменит эффективность.

Основные фоновые процессы для $e+e- \rightarrow \mu+\mu-$ – это $e+e- \rightarrow \pi+\pi-$ и космические мюоны. Космические мюоны удается отделить от пионов и мюонов путем наложения условия отбора на расстояние от пучка до трека. Мюоны процесса $e+e- \rightarrow \mu+\mu-$ выделяются путем отбора по энерговыделению в калориметре. Пионы могут испытать ядерное взаимодействие и будут иметь большее энерговыделение, нежели мюон, испытавший ионизационные потери.

В результате μ/π разделения удалось снизить максимальную примесь пионов до 22%. Однако, этот вклад оказывается существенным и приводит к снижению эффективности в μ/π смеси. Т.к. дальнейшее разделение по калориметру малопродуктивно, применена реконструкция. Представим вероятность срабатывания в виде $p_{\text{exp}} = p_{\mu} * c_{\mu} + p_{\pi} * c_{\pi}$, где p_i – вероятность срабатывания, а c_i – примесь i -го типа частиц. Величины p_{π} и c_{π} берутся из моделирования, а затем находится величина p_{μ} .

Итого, эффективность мюонной системы для мюонов процесса $e+e- \rightarrow \mu+\mu-$ и космических мюонов оказывается выше 96% (для пары частиц) при работе ускорителя на энергиях $1017.4 \text{ MeV} < \sqrt{s} < 2000 \text{ MeV}$.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Д. А. Штоль.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА CsI КАЛОРИМЕТРА ДЕТЕКТОРА КМД-3 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

Г. П. Разуваев

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирский государственный университет

С 2010 года в институте ядерной физики им. Г. И. Будкера проводятся эксперименты с детектором КМД-3 на накопители со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2000 в области энергии до 2 ГэВ, [1], [2].

Одной из основных систем детектора является электромагнитный цилиндрический калориметр, служащий для измерения энергий и координат гамма-квантов, вылетающих под большими углами к оси пучков. Цилиндрический калориметр детектора КМД-3 состоит из двух подсистем: калориметра на основе жидкого ксенона и калориметр на основе сцинтилляционных кристаллов CsI(Tl) и CsI(Na), [3].

Величина энерговыделения в кристалле CsI калориметра определяется соотношением: $E_{\text{dep}} = k * (A - p)$, где A — оцифрованная величина сигнала со счётчика, p — пьедестал АЦП, k — коэффициент перевода амплитуды сигнала в энергетические единицы (калибровочный коэффициент).

В данной работе описан алгоритм энергетической калибровки калориметра с помощью космических частиц по данным экспериментальных заходов, позволяющая непрерывно мониторировать работоспособность калориметра и проводить калибровки калориметра без необходимости остановки набора экспериментальных данных. Ошибка определения калибровочных коэффициентов составляет менее 3%. В работе также представлен предварительный анализ процессов $e+e- \rightarrow e\eta$ gamma, $e+e- \rightarrow p\bar{0}$ gamma с использованием полученных данным методом коэффициентов.

1. I. A. Кооп, «Vepp-2000 project», eConf C **010430** (2001) T08 [physics/0106013].

2. B. I. Khazin, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), **181-182**, 376 (2008).

3. D. Epifanov (CMD-3 Collaboration), J. Phys. Conf. Ser. **293**, 012009, (2011).

Научный руководитель – В. Е. Шебалин.

ИЗМЕРЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ПИОНОВ МЮОННОЙ СИСТЕМОЙ ДЕТЕКТОРА СНД

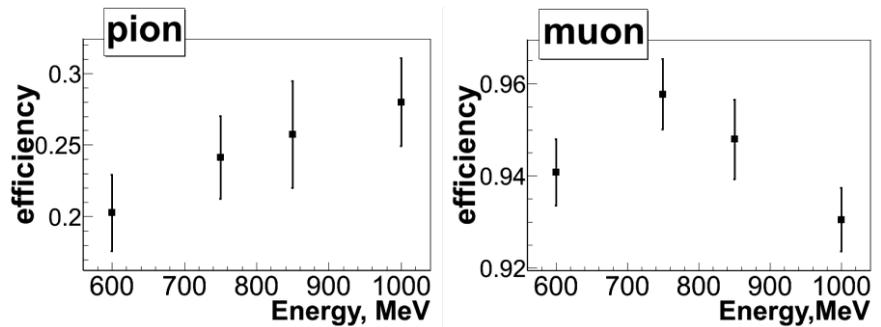
Е. В. Рогозина

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирский государственный университет

Мюонная система детектора состоит из пропорциональных трубок (14 баррельных и 2 торцевых модуля) и пластиковых сцинтилляционных счетчиков и предназначена для исключения событий, вызванных космическими частицами и для регистрации частиц (мюонов), вылетающих за пределы детектора. В данной работе измеряется эффективность регистрации пионов в мюонной системе.

По показаниям калориметра сложно разделить мюонные ($e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$) и пионные ($e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$) события, но пионные события, где один из пионов испытал ядерное взаимодействие, можно отобрать по большому энерговыделению в одном из слоев и малому в последующих слоях. Эффективность определяется по второму, не испытавшему ядерного взаимодействия пиону этих процессов.

Вероятностей регистрации мюонной системой 0, 1 или 2 частиц в мюонных и пионных событиях и полученных эффективностей регистрации пионов достаточно, чтобы определить долю мюонных процессов в смеси и эффективность регистрации мюонов. На графиках приведены эффективности регистрации мюонов и пионов.



Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Д. А. Штоль.

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЧАСТИЦЫ, ДВИЖУЩЕЙСЯ В ОДНОМЕРНОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЕ

И. В. Фартушев

Томский государственный педагогический университет

В представленном докладе рассмотрены поляризационные характеристики излучения частицы, движущейся в одномерной потенциальной яме.

С этой целью в рамках квантовой механики рассмотрена задача об одномерном движении частицы в прямоугольной бесконечно глубокой потенциальной яме.

Назовем движение в яме поперечным, а свободное движение продольным (по аналогии с описанием движения каналирования частиц). Волновая функция будет представлять собой произведение функции описывающей поперечное движение и волновой функции свободного движения (двумерной плоской волны). Поперечное движение квантовано: т. е. частица обладает дискретными уровнями «поперечной» энергии.

Как известно, переход частицы с одного дискретного уровня на другой, сопровождается испусканием фотона.

В работе вычислены матричные элементы перехода с испусканием фотона и найдена вероятность излучения частицы.

Для исследования поляризационных характеристик излучения получена вероятность излучения с фиксированным вектором поляризации испущенного фотона.

На основе полученных формул исследована зависимость вероятности излучения (для фиксированного вектора поляризации фотона) от угла вылета фотона θ (угол φ фиксирован и равен $\varphi = 4^0$).

Угловое распределение испущенных фотонов сильно различается в случае, когда вероятность усреднена по поляризации фотона и для фиксированных поляризаций.

Рассмотренная задача представляет собой упрощенную модель излучения при плоскостном каналировании заряженных частиц в кристалле.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Ю. П. Кунашенко.

ИЗМЕРЕНИЕ ЛЕПТОННОЙ ШИРИНЫ J/ψ -МЕЗОНА

Т. А. Харламова

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск

В ИЯФ СО РАН на e^+e^- -коллайдере ВЭПП-4М с универсальным магнитным детектором КЕДР проведено несколько сканирований J/ψ -резонанса с интегральной светимостью около 1.8 обратных пикобарн. Целью настоящей работы являлось измерение произведения электронной ширины J/ψ -резонанса на вероятность его распада в адроны: $\Gamma_{ee} \cdot \text{Br}(J/\psi \rightarrow \text{адроны})$. Это измерение позволяет более точно определить парциальную электронную и полную ширины J/ψ -резонанса.

Прецизионное измерение ширин J/ψ -резонанса является актуальной задачей физики высоких энергий, поскольку даёт возможность более достоверно понять процессы сильного взаимодействия тяжёлых кварков, стимулирует дальнейшее развитие теоретических моделей, предсказывающих спектр состояний чармония.

Для прямого определения величины $\Gamma_{ee} \cdot \text{Br}(J/\psi \rightarrow X)$ на встречных e^+e^- -пучках требуется измерение зависимости сечения исследуемого процесса от энергии сталкивающихся частиц. На коллайдере ВЭПП-4М энергия пучков измеряется с точностью, превосходящей 10^{-5} с помощью метода резонансной деполяризации. Знание с высокой точностью энергии позволяет в значительной степени уменьшить ряд систематических неопределённостей, связанных с восстановлением формы исследуемого резонанса.

Эффективность регистрации событий определяется путём моделирования процесса рождения адронов, которое реализовано в рамках пакета программ JetSet. Систематическая неопределённость эффективности оценивается методом вариации параметров моделирования при тонкой подстройке распределений отдельных, значимых для отбора адронных событий, наблюдаемых величин. Измерение светимости осуществляется по событиям процесса e^+e^- -рассеяния на большие углы.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук К. Ю. Тодышев.

ДОЗИМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ПОМОЩЬЮ ДОЗИМЕТРА ФРИККЕ

А. Л. Хуснулина

Томский политехнический университет

Успешное проведение любого радиационно-химического исследования зависит в первую очередь от правильного определения поглощенной дозы. Дозиметрия – это количественный аспект радиационной химии, и каждый эксперимент начинается с измерения поглощённой дозы.

В радиационной химии для измерения поглощенной дозы широко используется дозиметр Фрикке – 10^{-3} М водный раствор $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ насыщенный воздухом в 0,4 М H_2SO_4 . При действии ионизирующего излучения на этот раствор двухвалентное железо окисляется до трехвалентного. Верхний предел измерения дозы с помощью ферросульфатного дозиметра ограничивается израсходованием кислорода, присутствующего в растворе и соответствует 500 Гр (для раствора, насыщенного воздухом). Дозиметр Фрикке был использован в данной работе для дозиметрии импульсного высокоэнергетического электронного пучка, сгенерированного ускорителем «Астра – М» со следующими параметрами: ускоряющее напряжение – 450 кВ, энергия в пучке за импульс – 1,2 Дж, длительность импульса на полувысоте – 75 нс.

Определение двухвалентного и трехвалентного железа проводилось по стандартным методикам, которые основываются на колориметрии.

Поглощённая доза была вычислена по формуле (1).

$$D = \frac{cN \cdot 100}{G}, \quad (1)$$

где D – поглощённая доза, эВ/л; $G(\text{Fe}^{3+})$ – радиационно-химический выход, ион/100 эВ; c – концентрация вещества, М; N – число Авогадро.

В проведенном эксперименте радиационно-химический выход составил порядка 9 ± 2 ион/100 эВ. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что ферросульфатная дозиметрическая система может быть использована при дозиметрии импульсного электронного пучка при соблюдении нескольких условий: локальная поглощённая доза в объёме раствора не должна превышать 400-500 Гр за импульс; значение радиационно-химического выхода $G(\text{Fe}^{3+})$ должно контролироваться, так как его значение меняется в зависимости от мощности поглощённой дозы.

Научный руководитель – Д. Ю. Колоколов.

КВАНТОВАЯ ОПТИКА И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 535.33

ДИОДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ АТОМОВ РУБИДИЯ В РИДБЕРГОВСКИЕ СОСТОЯНИЯ

Д. А. Анохин

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Новосибирский государственный технический университет

В настоящее время диодные лазеры стали эффективным инструментом в спектроскопии с высоким разрешением в различных применениях. Доступные длины волн полупроводниковых лазеров позволяют осуществлять многофотонное возбуждение переходов лестничного типа в атомной спектроскопии. В данной работе представлена реализация трехступенчатой схемы $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2} \rightarrow 6S_{1/2} \rightarrow nP$ для прямого возбуждения в ридберговские состояния холодных атомов рубидия.

Атомы ^{85}Rb охлаждались в магнито-оптической ловушке. После загрузки атомов в ловушку, охлаждающее лазерное излучение выключалось. Атомы в холодном облаке возбуждались с импульсом 1-5 мс пучком диодного лазера на 780 нм, пересекающийся с лазерным пучком на 1368 нм и другим лазерным пучком, настраиваемый вблизи 743 нм. Диодный лазер на 780 нм был привязан для перехода $5S_{1/2}(F=3) \rightarrow 5P_{3/2}(F=4)$, в качестве эталона использовалась ячейка с парами рубидия. Вторая ступень – РОС лазер (1368 нм) был привязан каскадом резонансного поглощения $5S_{1/2}(F=3) \rightarrow 5P_{3/2}(F=4) \rightarrow 6S_{1/2}(F=3)$. В отличие от предыдущих работ, где использовался титан-сапфировый лазер, применили полупроводниковый лазер на 743 нм для возбуждения ридберговских состояний $6S_{1/2} \rightarrow nP$. В этом заключается основная особенность эксперимента. Лазер на 743 нм применяется в схеме с внешним резонатором, за счет чего осуществляется перестройка 15 нм и уменьшается ширина линии до порядка 1 МГц. Продемонстрирована возможность настройки лазера для переходов атомов рубидия в ридберговские состояния.

Атомы, возбужденные в ридберговские состояния лазерными импульсами, регистрировались, используя метод селективной полевой ионизации. Параметры лазера дают возможность перестройки частоты по спектрам возбуждения атомов рубидия для переходов со значениями $n=25-60$. Эта экспериментальная схема позволила нам реализовать относительно дешевую, но стабильную лазерную систему для экспериментов с ридберговскими атомами.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук В. М. Энтин.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ ТОНКИХ ЛИСТОВ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ЛАЗЕРОМ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 10,6 МКМ И 1,07 МКМ

А. А. Гольшев

Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН

Новосибирский государственный технический университет

Лазерная резка листовых материалов из нержавеющей стали с инертным газом широко распространена во многих областях промышленности. С применением в промышленности высокотехнологичных процессов резки металлов, растет потребность в мощных лазерах, способных разрезать металлические листы толщиной до 30 мм. В последнее время для процесса металлообработки используются СО₂-лазеры, волоконные, дисковые, диодные и другие лазеры.

Использование лазеров для резки материалов обеспечивает автоматизацию процесса, при высокой производительности и точности, экономит энергию и материалы, позволяет реализовать принципиально новые технологические решения и использовать труднообрабатываемые материалы.

Лазерная резка характеризуется высокой скоростью обработки, при этом интерес представляет получение качественного реза. Показателями качества реза являются величина грата (застывших капель расплава на нижней кромке реза), шероховатость поверхности реза, ширина зоны термического влияния. Несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных исследований, в настоящее время отсутствует полная и взаимосвязанная физическая картина образования реза. Это, прежде всего, связано с многообразием и сложным взаимодействием протекающих при лазерной резке физических процессов.

В данной работе была проведена серия экспериментов по лазерной резке с инертным газом (азот) используя СО₂ и иттербиевый лазер с длиной волны 10,6 мкм и 1 мкм соответственно. В итоге получены зависимости ширины реза и шероховатость поверхности реза от скорости раскрытия металла для толщин 3 и 5 мм. Так же был найден коэффициент поглощения излучения при лазерной резке нержавеющей стали для обоих типов лазеров. Технологический режим процесса резки для нахождения коэффициента поглощения излучения определялся по критерию минимальная шероховатость поверхности реза.

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

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА МОЛЕКУЛЫ H_2S

О. В. Егоров

Томский государственный университет

В настоящее время актуальным является изучение спектров газа сульфида водорода (H_2S), данные по которым необходимы для его регистрации и оценки концентрации в газовых объемах техногенного, природного и космического происхождения. Фундаментальное свойство молекулы H_2S , относящейся к классу асимметричных волчков, связано с нестандартным распределением значения интенсивности линий между основными, комбинационными и обертовыми полосами. При котором первые из перечисленных могут быть слабее остальных – высоковозбужденных. Предложенный ранее авторами работы [1], на основе метода эффективных операторов, набор параметров функции дипольного момента H_2S не позволяет восстановить экспериментальные значения интегральных интенсивностей с достаточной для их идентификации точностью.

В данной работе решена обратная спектроскопическая задача по колебательному спектру H_2S и получен новый набор параметров функции дипольного момента данной молекулы до второго порядка включительно. При этом установлено, что значения колебательных моментов переходов основных полос (ν_1 , ν_2 , ν_3), определенные из формулы для интегральных интенсивностей, выведенной из известного выражения для интенсивности колебательно-вращательной линии, отличаются от таковых, полученных по традиционной методике. В итоге на основе экспериментальных данных по интенсивностям основных, первых обертоновых и горячих полос, параметров потенциальной функции и параметров эффективного колебательного гамильтониана, с учетом резонансов Ферми и Дарлингга-Деннисона, определены параметры функции дипольного момента H_2S , близкие по своим значениям к результатам *abinitio* расчетов работы [2].

1. Сулакшина О.Н., Борков Ю.Г., Тютюрев Вл.Г. // Оптика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 14. – № 9. – С. 824 – 832.

2. Cours T., Rosmus P., Tyuterev Vl. G. // J. Chem. Phys. – 2002. – V. 117. – N. 11. – P. 5192 – 5208.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, профессор
О. К. Войцеховская.

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ДВУХУРОВНЕВЫХ АТОМОВ В КЛАССИЧЕСКОМ И КВАНТОВОМ РЕЖИМАХ

Р. Я. Ильенков

Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск

Создание лазеров открыло перед учеными широчайшие возможности по управлению как внутренним, так и внешним состоянием атомов с помощью световых полей. Благодаря столь точному и мощному инструменту такие области фундаментальной и прикладной науки, как спектроскопия сверхвысокого разрешения, квантовая информатика и нанолитография получили сильный толчок в развитии.

Однако, задача теоретического описания взаимодействия атомов со световым полем с учетом внутренней структуры уровней и когерентностей между ними, поляризации излучения, и влияния эффекта отдачи остается сложной и важной. Стандартные подходы к данной задаче имеют свои ограничения и недостатки, например, квазиклассический метод, предполагает как малость параметра отдачи по сравнению со скоростью спонтанного распада, так и малость импульса одного фотона светового поля по сравнению с шириной импульсного распределения атомов.

Нами был развит квантовый метод [1] полностью учитывающий эффект отдачи и позволяющий получать стационарные импульсные и пространственные распределения атомов. Этот метод использовался для исследования поведения атомов при различных параметрах отдачи, интенсивности светового поля и отстройки. Было проведено сравнение с более ранними работами [2,3] и получено качественное согласование. В квантовом режиме наблюдаются узкие структуры, интерпретируемые нами как проявление когерентного пленения населенностей.

1. О. Н. Прудников, Р. Я. Ильенков, А. В. Тайченачев, А. М. Тумайкин, В.И. Юдин, Стационарное состояние ансамбля атомов малой плотности в монохроматическом поле с учетом эффектов отдачи, ЖЭТФ, 2011, том 139, вып. 6, стр. 1074-1080

1. 2.Sung Mi Yoo and Juha Javanainen, Wigner-function approach to laser cooling in the recoil limit JOSA B, Vol. 8, Issue 6, pp. 1341-1347 (1991)

2. Doery M.R, Vredenberg E.J, Bergeman T. Quantum dynamics and cooling of atoms in one-dimensional standing-wave laser fields: Anomalous effects in Doppler cooling. Phys Rev A. 1995 Jun; 51(6):4881-4899.

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

СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В АКТИВНЫХ СРЕДАХ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАНОСТРУКТУРАМИ

А. Ю. Искандаров

Томский государственный университет

Задача повышения эффективности лазерной генерации была и остается актуальной задачей лазерной физики. Такое внимание обусловлено зафиксированным фактом понижения энергетического порога суперлюминесценции при использовании активных сред с наночастицами за счет существования локальных полей. Разумно предположить, что использование агломерированных наночастиц приведет к еще большему понижению порогов суперлюминесценции.

Целью работы было показать, что использование агломератов наночастиц приводит к понижению порога суперлюминесценции именно за счет существования локальных полей. Чтобы исключить рассеяние и эффект плазмонного резонанса, была использована кювета толщиной в 100 мкм. В эксперименте сфокусированное лазерное излучение Nd:YAG-лазера (длина волны 532 нм, длительность импульса 6 нс, частота повторения импульсов 1 Гц, диаметр лазерного пучка 2 мм) направлялось перпендикулярно вверх и попадало на горизонтально расположенную кювету с раствором лазерного красителя R6G с концентрацией 10^{-3} моль/л и наночастицами. Такое расположение кюветы позволяло избежать возможного неравномерного по высоте осаждения наночастиц. Оптический сигнал регистрировался спектрометром Avaspec. Были построены зависимости интенсивности свечения от интенсивности накачки и определены пороговые значения накачки. Из полученной зависимости видно, что внедрение в лазерный краситель R6G любых из представленных наночастиц (Ag, Ni, Al) приводит к существенному уменьшению порога суперлюминесценции и повышению интенсивности свечения при фиксированных накачках. В наших экспериментах были устранены условия реализации сильного рассеяния, а также отсутствовали эффекты плазмонных резонансов. Можно считать, что более высокое значение интенсивности суперлюминесценции в растворах с агломератами наночастиц Ag по сравнению с интенсивностью свечения в растворах с одиночными наночастицами Ag при одинаковых интенсивностях накачки обеспечивается более высокими интенсивностями локальных оптических полей вблизи поверхности агломерированных наночастиц.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕННЫХ ИОНОВ Tl ОТ ФОРМЫ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ РАЗРЯДНОЙ ТРУБКИ В Tl-He и Tl-Ne ЛАЗЕРАХ

А. А. Карташева, А. В. Рязанов
Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

Геометрия сечения разряда влияет на пространственное распределение электронов, следовательно, возбужденных ионов Tl в разряде Tl-He и Tl-Ne лазеров. Таким образом, форма поперечного сечения напрямую влияет на параметры лазерной генерации. В ходе данной работы была построена модель, позволяющая рассчитывать зависимости концентрации электронов от пространственной координаты в газоразрядных лазерах с различными конфигурациями разрядного промежутка.

В стационарном разряде при средних давлениях имеет место диффузионный режим ПС, когда длина свободного пробега иона меньше радиуса ПС и нейтрализация заряженных частиц происходит в основном за счет их амбиполярной диффузии на стенку трубки с последующей рекомбинацией на ней. Для проведения расчетов предполагалось, что в положительном столбе ионного лазера в радиальном направлении основное влияние на пространственное распределение электронов $N(V)$ оказывает диффузионный дрейф электронов к стенкам трубки. При решении таких уравнений с помощью явной разностной схемы основными проблемами являются устойчивость решения и правильный выбор шага по времени. Для устранения данной проблемы при составлении алгоритма нами были использованы неявные разностные схемы, которые абсолютно устойчивы, хотя алгоритм решения получаемого сеточного уравнения становится более сложным. Составленные алгоритмы позволяют решать уравнения диффузии для газоразрядных трубок с сечением произвольной формы, что бывает невозможно сделать аналитически.

В результате моделирования были получены зависимости концентрации электронов от координат в плоскости сечения трубки. Были исследованы трубки с сечениями круглой, квадратной, треугольной, эллиптической формой и сечениями сложной формы.

Полученные результаты позволяют методами численного интегрирования рассчитать накачку лазерных уровней в таких трубках, которая, предположительно, будет повышаться при уходе от круглой геометрии.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. И. Г. Иванов.

ОХЛАЖДАЮЩИЙ ЛАЗЕР ДЛЯ СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ НА ОДИНОЧНОМ ИОНЕ УЬ

С. Н. Кузнецов

Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Стандарты частоты на базе одиночных ионов, локализованных в радиочастотных ловушках Пауля, в настоящее время демонстрируют наилучшие характеристики стабильности частоты за большие времена наблюдения.

К достоинствам данных стандартов частоты можно отнести простую реализацию локализации иона в ловушке в режиме Лэмба-Дике и длительное время удержания иона в ловушке без перезагрузки. Так, например, один и тот же ион Yb^+ удерживался в ловушке в течение многих месяцев. Вследствие этого ион $171Yb^+$ является оптимальным кандидатом для создания оптического стандарта частоты с возможностью бортового базирования. Это обусловлено как техническими аспектами – например, возможностью использования компактных диодных лазеров в схемах охлаждения иона и детектирования часового перехода наряду с применением волоконных линий доставки лазерного излучения.

В нашей лаборатории идет разработка стандарта частоты космического базирования на основе ультрахолодных ионов иттербия с относительной нестабильностью частоты $10^{-16} - 10^{-17}$ и фемтосекундного синтезатора частот для переноса стабильности и точности частоты из оптического диапазона в радиодиапазон, для дальнейшего использования данного стандарта частоты в навигационных системах ГЛОНАСС. Несомненным преимуществом стандарта на Yb^+ является относительно простая оптическая схема, в которой используются диодные лазеры.

В качестве охлаждающего лазера была разработана система. В данной системе для реализации охлаждающего перехода $^2S_{1/2} (F = 1) \rightarrow ^2P_{1/2} (F = 0)$ используется диодный лазер на длине волны в 739 нм с удвоением частот в нелинейном кристалле $BiVO_4$. Так же удвоенный сигнал модулируется на частоте 14,75 ГГц для перекачки сверхтонкой структуры основного уровня $^2S_{1/2} (F = 0) \rightarrow ^2P_{1/2} (F = 1)$, так как эта структура не возбуждается охлаждающим лазером.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук С. В. Чепуров.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОТРОПНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

А. Д. Кырмыгенов
Томский политехнический университет

В работе представлена численная модель для исследования оптических характеристик атмосферных образований, состоящих из частиц объемных форм. При этом используется решение Ми для отдельной частицы, включающее в себя возможность определения оптических характеристик частиц с размерами много меньше длины волны, соизмеримыми с длиной волны и значительно превосходящими ее [1]. На основе этой модели разработан программный пакет на языке программирования С++ с организацией интерфейса ввода данных и вывода числовых результатов, сопровождающихся представлением графиков. Объектами изучения являются: коэффициенты рассеяния, ослабления, поглощения и альbedo однократного рассеяния. Для расчета указанных величин используются следующие входные параметры: характеристики функции распределения частиц по размерам (существует возможность выбора: гамма-распределение, нормальный, равномерный и показательный законы распределения), комплексный показатель преломления (реальная и мнимая части), длина волны падающего излучения, концентрация и эффективный радиус частиц. В работе иллюстрируются расчетные значения коэффициента ослабления, коэффициента поглощения, коэффициента обратного рассеяния и альbedo однократного рассеяния при различных микрофизических параметрах среды для длин волн из оптического диапазона. Данный комплекс программ может быть использован для определения оптических характеристик полидисперсной среды, состоящей из хаотически ориентированных частиц с различными оптическими и микрофизическими параметрами. Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 12-05-00169а и государственного задания «Наука».

1. Mishchenko MI, Travis LD, and Lacis AA, eds. Scattering, absorption, and emission of light by small particles. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 2002

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук О. В. Шефер.

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСОВ
НАСЫЩЕННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В ПАРАХ ЙОДА**

Д. Б. Лазебный

Институт лазерной физики СО РАН
Новосибирский государственный университет

Нелинейные резонансы насыщенного поглощения в молекулярном йоде широко используются для стабилизации частоты лазеров видимого диапазона длин волн. Достоинства молекулярного йода для целей создания системы реперных линий, служащих эталонами длин волн и частот в видимом диапазоне, проявились в том, что из восьми лазеров, рекомендованных международным комитетом по мерам и весам в качестве эталонов длины, шесть используют в качестве реперов частоты резонансы насыщенного поглощения в молекулярном йоде.

К настоящему времени накоплено огромное количество экспериментальных результатов (см., например, диссертацию [1]) позволяющих проводить численные расчеты и их сравнение с экспериментальными данными.

Одной из важных проблем, возникающих при практическом применении резонансов насыщенного поглощения в стандартах частоты на основе паров йода, является полевой сдвиг реперных частот. Это вопрос требует тщательного экспериментального и теоретического исследования для полной метрологической характеристики стандарта частоты.

В данной работе проводится моделирование резонансов насыщенного поглощения тремя различными методами: модель констант релаксации, теория возмущения по полю и метод интегрирования по траекториям атомов. Было обнаружено удовлетворительное качественное согласие различных методов между собой и с доступными экспериментальными данными.

1. М. Н. Скворцов, Прецизионная спектроскопия молекулярного йода, дисс. д.ф.-м.н., Новосибирск, 1996.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ КАК ДИСПЕРГИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

А. М. Мухамадеева

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева

Плоская дифракционная решетка представляет собой пластинку, на которую нанесен ряд параллельных равноотстоящих штрихов. Различают отражательные и пропускающие или прозрачные дифракционные решетки. По способу изготовления различают нарезные и голограммные дифракционные решетки. Голограммная дифракционная решетка (ГДР) представляет собой зарегистрированную на светочувствительном материале интерференционную картину, образованную двумя когерентными пучками света. Пучки когерентных лучей формируют, разделяя светоделительными зеркалами излучение лазера с длиной волны излучения. Для получения отражательной решетки на её поверхность наносят слой металла. Форма штрихов и расстояние между ними определяются положением источников излучения относительно заготовки и длиной волны излучения.

В спектральном приборе благодаря наличию диспергирующего устройства ось симметрии отсутствует. Изображаемый объект представляет собой, как правило, узкую щель, и назначение оптической системы состоит в пространственном разделении изображений щели, созданных лучами различных длин волн. Ход лучей в спектральном приборе следующий: пучок лучей из входной щели спектрального прибора, установленной в фокальной плоскости коллиматорного объектива, падает на коллиматорный объектив, далее параллельный пучок лучей попадает на диспергирующий элемент, далее параллельный пучок от каждой точки щели превращается в веер монохроматических параллельных пучков разных длин волн. Камерный объектив фокусирует на некоторой поверхности монохроматические изображения входной щели, совокупность которых образует спектр.

Данная работа посвящена исследованию плоской голографической решетки. Целью работы было определение длины волны, интенсивности, толщин спектральных линий, применением фотодиодной линейки.

В ходе работы подтвердилось, что ГДР сделана в соответствии ТЗ и соответствует всем параметрам.

Научный руководитель – доцент Н. А. Петрановский.

**ПОЛЯРИЗАЦИЯ СТИМУЛИРОВАННОГО ФОТОННОГО ЭХА НА
ПЕРЕХОДЕ 0-1 ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ИМПУЛЬСАМИ С
ЛИНЕЙНЫМИ И КРУГОВЫМИ ПОЛЯРИЗАЦИЯМИ**

И. У. Надинов

Институт физики полупроводников имени А. В. Ржанова СО РАН
Новосибирский государственный университет

На переходе атомов иттербия 0-1 исследованы поляризация сигнала стимулированного фотонного эха при возбуждении импульсами с линейными и круговыми поляризациями. Эксперименты проводились в вакуумной нагревной кювете при температуре 840 К (давление насыщенных паров Yb составляло ~20 мТорр). Изучены случаи, когда все три возбуждающих импульса имели линейные поляризации (либо совпадающие друг с другом, либо, когда один из трёх импульсов имел вектор поляризации, ортогональный двум другим), а также случаи, когда все три возбуждающих импульса были поляризованы по кругу (либо одинаково, либо, когда один из трёх импульсов имел встречную циркулярную поляризацию по отношению к двум другим). Исследовано влияние тяжёлого буферного газа Хе на поляризационные свойства эха в области давлений Хе от 0 до 2 Торр – показано, что в случае линейных поляризаций, когда первый импульс поляризован ортогонально второму и третьему, наблюдается эффект столкновительного фотонного эха, в то время как для круговых поляризаций столкновительное эхо отсутствует. Данные сопоставляются с теорией [1].

[1] V.A. Reshetov, E.N. Popov, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 45(2012) 225502

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Е. Б. Хворостов.

ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ЦЕЛЮ ПОЛУЧЕНИЯ КИНЖАЛЬНОГО ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ МЕТАЛЛОВ

А. С. Новокрещенов

Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
Новосибирский государственный университет

Лазерная сварка листовых материалов, выполняемая на автоматизированных лазерных технологических комплексах (АЛТК), широко распространена в машиностроении и приборостроении. Важнейшей характеристикой данного процесса является качество шва, которое определяется в первую очередь кинжалностью проплавления, то есть отношением глубины шва к его ширине. Увеличение этого параметра позволит сваривать более толстые листы металлов с наименьшими энергетическими затратами.

Несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных исследований, до начала данной работы отсутствовала полная и взаимосвязанная картина физических процессов, определяющих качество шва. В особенности это относится к области сварки толстых стальных листов. Существующие теоретические модели сварки толстых стальных листов недостаточно развиты. Данные модели не позволяют обосновать взаимосвязь оптимальных параметров сварки, законы их изменения с толщиной свариваемых листов или же содержат значительные упрощения и имеют оценочный характер.

Кинжалность проплавления зависит от многих факторов, таких как мощность излучения, скорость проплавления, используемый материал, однако одним из определяющих факторов является оптическая система лазера, формирующая падающий на поверхность металла пучок излучения.

В данной работе проведены исследования зависимости кинжалности шва от оптической системы CO_2 лазера. Оптимизирована оптическая система CO_2 -лазера и определены оптимальные условия сварки по критерию максимальной кинжалности проплавления. Получены результаты для низкоуглеродистой стали при различных мощностях излучения в диапазоне 1-3 кВт и для разных скоростей проплавления в диапазоне 1,5-3 м/с .

Научный руководитель – канд. техн. наук А. Г. Маликов.

**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР СВЕТА В ОБЛАСТИ 2.4 – 3.9
МКМ НА ОСНОВЕ FUN-OUT PPLN С НАКАЧКОЙ КОМПАКТНЫМ
ND:YLF ЛАЗЕРОМ**

А. С. Осокин, Н. Ю. Духовникова, А. А. Бойко
Институт лазерной физики СО РАН
Новосибирский государственный университет
ООО «Специальные технологии»
Новосибирский государственный технический университет

В настоящее время одним из актуальных направлений научных исследований является анализ газового состава воздуха, в том числе регистрация концентрации летучих соединений не только в атмосфере, но и в выдыхаемом человеком воздухе. Определение концентрации соединений, линии поглощения которых лежат в среднем ИК диапазоне, имеет значение, как для безопасности персонала на промышленных предприятиях, так и для медицинских целей: определение концентрации т.н. биомаркеров в выдохе человека.

Разработан газоанализатор на основе оптикоакустического детектора с применением в качестве источника излучения параметрического генератора света (ПГС). Резонатор ПГС имеет форму монолитного куба, что позволяет исключить влияние вибраций на стабильность резонатора. В качестве нелинейного оптического элемента используются два кристалла fun-outPPLN. Излучение накачки: Nd:YLF лазер с импульсным излучением энергией до 550 мкДж, длительностью импульса $\tau = 5-10$ нс, частота следования импульсов 100 – 5000 Гц. Перестройка ПГС происходит в диапазоне 2.4 – 3.9 мкм, при перемещении кристаллов относительно лазерного луча, с помощью шагового высокоточного двигателя. Блок ПГС содержит управляемый термостат, обеспечивающий высокую термостабильность кристаллов PPLN.

Разработанный ПГС обеспечивает экспресс сканирование в данном диапазоне за время порядка 3 – 5 минут. Выходная энергетика ПГС при накачке 100 – 200 мкДж составила 2 – 6 мкДж. Проведены исследования спектральной характеристики полученного ПГС.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. Д. Б. Колкер.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ГЕНЕРАЦИИ АКТИВНОЙ СРЕДЫ ЭКСИМЕРНОГО ЛАЗЕРА ГЛАЗНОЙ ХИРУРГИИ

А. С. Петухов

Вологодский государственный технический университет

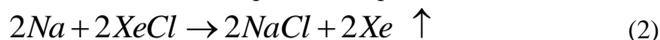
Суть предложения заключается в модернизации устройства эксимерного лазера следующим образом: внести генератор HCl, способный путем химической реакции получить последний из компонентов, не нанося вред; генератор паров H₂SO₄; геттер, выполненный из щелочного металла и систему прокачки отработавшей смеси вместо обычного баллона с уже готовым HCl.

Генератор HCl представляет собой барабан, работающий по трем циклам, лопасти, отделяющие отсеки, отверстие, насосы для удаления полезных продуктов реакции, трубки-разъема для подачи и обогащения HCl, трубки-разъема для подачи Xe и HCl после реакции с геттером; отсек для установки геттера.

1 цикл заключается в рабочем ходе генератора – получение HCl:



2 цикл заключается в реакции отработанной смеси с геттером из Na:



3 цикл заключается в удалении через отверстие 1 нерастворимого Na₂SO₄.

Рабочий ход – пары H₂SO₄, подаваемые в нижний отсек, реагируют с находящимся в нем NaCl, получая на выходе газообразный HCl. Далее барабан проворачивается по часовой стрелке, вынося через отверстие нерастворимый Na₂SO₄. Затем верхний отсек заполняется NaCl, образовавшимся на геттере благодаря реакции газовой смеси с последним. Цикл замыкается, т.е. барабан не движется до тех пор, пока в верхнем отсеке не наберется достаточное кол-во NaCl. В таком случае барабан проворачивается, отсек с NaCl оказывается внизу, где происходит реакция с парами H₂SO₄ и обогащение активной среды HCl'ом. В результате, подав на вход пары H₂SO₄, заполнив камеру NaCl, на выходе мы получаем благородный газ Xe и газообразный HCl.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. М. Ф. Умаров.

УШИРЕНИЕ СПЕКТРА ГЕНЕРАЦИИ ВОЛОКОННОГО ИТТЕРБИЕВОГО ЛАЗЕРА

М. О. Политко

Институт автоматики и электрометрии СО РАН
Новосибирский государственный университет

На данный момент существует множество различных приложений иттербиевого волоконного лазера (например, спектроскопия) из-за высокого качества пучка, возможности получения больших мощностей, компактности и малой ширины спектра генерации.

В работе [1] были определены механизмы формирования и уширения спектра генерации с ростом мощности иттербиевого волоконного лазера. Авторами было показано, что форма спектра довольно хорошо аппроксимируется функцией гиперболического секанса. При исследовании уширения рассматривались две теоретических модели, описывающих следующие явления: фазовая самомодуляция лазерного излучения и выжигание пространственных дыр в продольном распределении насыщенного усиления. За счет первого эффекта ширина спектра линейно растет с увеличением мощности и зависит при этом только от параметров волокна и резонатора. Второй же не зависит от выходной мощности лазера, и возможно рассмотреть его влияние на формирование спектра вблизи порога генерации.

В данной работе изучается спектр генерации линейно поляризованного излучения иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1063.85 нм. Для активной среды и выходной решетки используется волокно с сохранением поляризации, при этом выходная решетка имеет два пика отражения, соответствующих ортогональным поляризациям. Излучение лазера линейно поляризовано, так как только один из пиков совпадает с максимумом отражения плотной решетки. Ширина спектра используемого лазера получилась менее 5 ГГц, что почти в 2 раза меньше ширины спектра лазера в приведенной работе [1]. Полученные результаты сравниваются с теоретическими моделями формы спектра и его уширения, представленными в [1]. Дополнительно в нашей работе проводилось исследование радиочастотных спектров.

1. S. I. Kablukov, E. A. Zlobina, E. V. Podivilovand, S. A. Babin, Output spectrum of Yb-doped fiber lasers // Opt. Lett. **37**, 2508-2510 (2012).

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук С. И. Каблуков.

ИЗМЕРЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ЧАСТИ СХЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО СПЕКТРОМЕТРА

К. Д. Потешкина

Институт автоматики и электрометрии СО РАН
Новосибирский государственный технический университет

В настоящее время активно создаются спектрометры терагерцового (ТГц) частотного диапазона, основанные на различных принципах генерации и регистрации ТГц излучения. Они находят широкое применение в различных областях науки, техники, медицины и др.

В ИАиЭ СО РАН на базе фемтосекундного (фс) титан-сапфирового лазера был разработан спектрометр, генерация ТГц импульсов в котором осуществляется за счёт эффекта оптического выпрямления в квадратично-нелинейных средах, а детектирование – в электрооптической среде (ZnTe, полимерная полингованная плёнка, далее – ЭО) за счёт эффекта Поккельса согласно методу электрооптического стробирования. Для его калибровки важно сопоставить напряженность ТГц поля с сигналом на выходе спектрометра, что является достаточно сложной задачей.

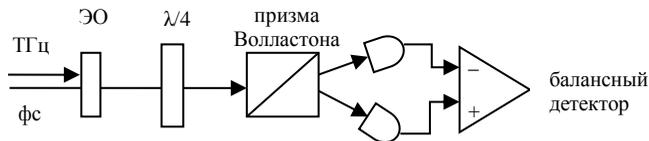


Рис. 1. Схема регистрации ТГц излучения

В условиях, когда могут использоваться различные ЭО среды, удобно на первом этапе выделить в схеме регистрации спектрометра (рис. 1) поляризационную часть. В ней анализируется поляризация исходно линейно поляризованного пробного фс пучка, прошедшего через ЭО среду, в которой она становится слабо эллиптической пропорционально воздействию электрическому полю ТГц импульса. Фактически поляризационная часть схемы измеряет набег разности фаз обыкновенной и необыкновенной волн пробного пучка в ЭО среде. Чувствительность к этой величине и является предметом исследования в данной работе.

Для создания пучка с заданной разностью фаз Γ использовались электрооптический модулятор на кристалле ВВО с четвертьволновым напряжением $2,8 \pm 0,1$ кВ и внешний источник постоянного напряжения.

В результате было получено, что при мощности пробного пучка 40 ± 5 мВт чувствительность при синхронном детектировании равна $1,67 \pm 0,13$ мВ/мкрад. При этом пороговая чувствительность равна 6 ± 2 мкрад.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук С. Л. Микерин.

ОБОБЩЕННЫЙ МЕТОД РАМСИ В ПРЕЦИЗИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ АТОМОВ И ИОНОВ

К. С. Табатчикова

Институт лазерной физики СО РАН

Новосибирский государственный технический университет

Новосибирский государственный университет

Методы точных измерений времени и частоты имеют большое значение для мировой науки, техники и экономики. Оптические стандарты частоты на одиночных ионах в радиочастотной ловушке и стандарты на ансамбле нейтральных атомов в оптической решетке весьма перспективны, поскольку позволяют исключить влияние эффекта Доплера и эффекта отдачи [1]. При создании таких стандартов чаще всего используются сильно запрещенные переходы, для возбуждения которых необходимо прикладывать сильное пробное поле, что приводит к значительному полевому сдвигу частоты сигнала.

В работе [2] был предложен новый метод рамсеевской спектроскопии, позволяющий подавлять сдвиг вершины центрального резонанса из-за полевого сдвига уровней атома. В данной работе рассматривался идеализированный случай: предполагалось, что излучение лазера строго монохроматично, спонтанная релаксация уровней отсутствует.

Цель настоящей работы – анализ схемы, предложенной в работе [2], с учетом конечной ширины спектральной линии лазерного излучения и спонтанной релаксации уровней атомов, а также уточнение оптимальных условий возбуждения, обеспечивающих подавление полевого сдвига. Анализ данной схемы выполнялся путем численного решения системы квантовых кинетических уравнений.

Теоретический анализ рассматриваемой схемы показал, что при расчете оптимальных условий возбуждения необходимо учитывать спонтанную релаксацию уровней и конечную ширину линии лазера. В противном случае эффективность подавления полевого сдвига существенно снижается.

Данная работа выполнена в рамках совместных программ исследований ИЛФ СО РАН и РТВ (Германия).

1. Ф. Риле, Стандарты частоты. Принципы и приложения / Пер. с англ. – М.: Физматлит, 2009.

2. V. I. Yudin, A. V. Taichenachev et al., Phys. Rev. A, **82**, 011804, 2010.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ НА КАЧЕСТВО РЕЗА ПРИ ЛАЗЕРНО-КИСЛОРОДНОЙ РЕЗКЕ МЕТАЛЛОВ

А. М. Тикан

Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
Новосибирский государственный университет

В настоящее время лазерная резка металлов занимает ключевую позицию на рынке металлообработки, благодаря высокой производительности станков и хорошему качеству реза, который характеризуется шероховатостью поверхности, шириной реза, зоной термического влияния, наличием грата.

В данной отрасли конкурируют лазеры различной мощности и с различными длинами волн. Лидерами на данный момент являются CO_2 , волоконный и дисковый лазеры. CO_2 -лазер используется для этих целей уже достаточно давно, а дисковый и волоконный лазеры получили столь же масштабное распространение лишь в последние годы. В связи с этим актуальной задачей на сегодняшний день, является изучение зависимости качества обработки металлов от типа используемого лазера.

В научной литературе данная тема широко исследуется и обсуждается, но опубликованные на данный момент результаты не дают полного представления о механизмах, влияющих на процесс образования профиля поверхности. Это связано с тем, что шероховатость поверхности зависит от большого количества величин. Комплексность задачи, несомненно, усложняет понимание природы образования поверхности при лазерно-кислородной резке. Авторы работ сходятся во мнении, что при использовании волоконного лазера, длина волны которого меньше чем у CO_2 , значительно возрастает шероховатость поверхности.

В данной работе проведены исследования зависимости шероховатости поверхности при резке CO_2 и иттербиевым волоконным лазерами с длинами волн 10,6 и 1,07 мкм. Параметром, определяющим шероховатость поверхности, был выбран R_z – амплитудный параметр, рассчитываемый как среднее арифметическое между пятью максимумами и пятью минимумами на заданном отрезке поверхности. Оптимизация технологического процесса производилась по принципу минимизации шероховатости поверхности путем варьирования скорости резки. Получены результаты для низкоуглеродистой стали толщиной 3, 5, 10 мм.

Научный руководитель – канд. техн. наук А. Г. Маликов.

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИНТЕЗИРОВАННОГО ГОЛОГРАММНОГО ИМИТАТОРА (СГИ) СФЕРИЧЕСКИХ АБЕРРАЦИЙ 3-ГО И 5-ГО ПОРЯДКОВ

Е. Ю. Храмова

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева

Синтезированные голограммные линзы (СГЛ) – это новый класс оптических элементов, действие которых основано на дифракции. Они расширяют возможности при создании оптических систем, формирующих изображения в видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, контроле асферических поверхностей, коррекции монохроматических и хроматических aberrаций, обработке оптической информации. Синтезированные ГОЭ предназначены для детального изучения aberrационных характеристик оптических элементов и центрированных систем на различных этапах их проектирования и изготовления.

СГИ сферических aberrаций 3-го и 5-го порядка – голограммный элемент из второй модификации комплекта голограммных оптических элементов (ГОЭ). Он предназначен для работы при длине волны равной $\lambda_1 = 660$ нм. ($f' = 230$).

Так как исследуемый СГИ предназначен для работы при красной длине волны ($\lambda_1 = 660$ нм), то расширение возможностей использования голограммного элемента состояла в исследовании возможности работы СГИ и при других длинах волн, а именно при зеленой ($\lambda_2 = 532$ нм) и фиолетовой ($\lambda_3 = 403$ нм) длинах волн. Для этого была рассчитана и собрана установка, на которой проводилось исследование разрешающей способности СГИ для 3-х длин волн ($\lambda_1 = 660$ нм, $\lambda_2 = 532$ нм и $\lambda_3 = 403$ нм). На этой же установке проводилось измерение фокусных расстояний СГИ для этих же длин волн, которые были нужны для теоретического расчета кружка рассеяния.

Исследование разрешающей способности показало, что СГИ сферических aberrаций 3-го и 5-го порядков может работать не только при красной длине волны ($\lambda_1 = 660$ нм), но и при зеленой ($\lambda_2 = 532$ нм) и фиолетовой ($\lambda_3 = 403$ нм) длинах волн.

Научный руководитель – доцент Н. А. Петрановский.

РАДИОЧАСТОТНАЯ ЛОВУШКА ДЛЯ ЗАХВАТА И УДЕРЖАНИЯ ОДИНОЧНОГО ИОНА ИТТЕРБИЯ В ОПТИЧЕСКОМ СТАНДАРТЕ ЧАСТОТЫ

С. А. Щербанев

Институт лазерной физики СО РАН
Новосибирский государственный университет

Одной из важнейших проблем квантовой электроники является разработка и создание оптических стандартов частоты. Эти стандарты широко применяются во многих областях, как фундаментальной науки, так и в прикладной физике, включая масс-спектроскопию, квантовые вычисления, а так же служат основой в таких областях как метрология, навигация, связь, космические исследования.

С развитием атомных стандартов частоты такие понятия как частота и интервал времени стали физическими величинами, которые можно измерить с высокой точностью. Одним из наиболее перспективных направлений исследования стандартов частоты являются стандарты на основе узких оптических переходов с использованием лазерного охлаждения одиночных ионов в радиочастотных ионных ловушках. За последние десятилетия была достаточно хорошо разработана техника по захвату (локализации) одиночных ионов в радиочастотной ловушке, при этом кинетическая энергия иона понижалась при помощи лазерного охлаждения.

В докладе представлены результаты по разработке радиочастотной ионной ловушки для исследования оптического стандарта частоты на основе одиночного иона иттербия-171. Наиболее удобным способом удержания ионов является использование переменного электрического поля для формирования притягивающего цилиндрического симметричного квадрупольного потенциала.

Одно из основных преимуществ использования иона иттербия-171 в качестве объекта исследования стандарта частоты является то, что все необходимые длины волн для переходов в системе уровней иона могут быть созданы диодными лазерами напрямую, либо используя удвоение частоты. Для лазерного охлаждения и обнаружения ионов используется система из трех лазеров с длинами волн 369,5 нм, 935,2 нм и 638,6 нм. Для спектроскопии часового перехода используется лазер на длине волны 435,5 нм, что соответствует квадрупольному переходу $^2S_{1/2} \rightarrow ^2D_{3/2}$.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук С. В. Чепуров.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ РЕЛАКСАЦИИ ФОТОПРОВОДИМОСТИ ГЕТЕРОСТРУКТУР p-Si-n-(Si₂)_{1-x}(GaN)_x

З. К. Аллаярова

Физико-технический институт НПО “Физика-Солнце“ АН РУз,
г. Ташкент, Узбекистан

Методом жидкофазной эпитаксии из оловянного раствора-расплава были выращены твердые растворы замещения (Si₂)_{1-x}(GaN)_x электронного типа проводимости на монокристаллических pSi подложках.

Были исследованы время релаксации полученных гетероструктур p-Si-n-(Si₂)_{1-x}(GaN)_x.

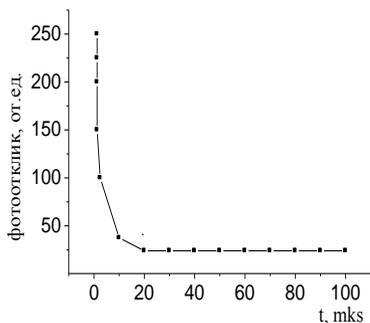


Рис. Времени релаксация для гетероструктур p-Si-n-(Si₂)_{1-x}(GaN)_x

Время релаксации неравновесных носителей тока (τ) в твердом растворе (Si₂)_{1-x}(GaN)_x оценивалось по релаксации фотопроводимости неравновесных носителей тока при малом уровне возбуждения. Возбуждение неравновесных носителей осуществлялось световой импульсом с длиной волны λ = 0,5 мкм в собственной области поглощения.

Релаксационная кривая описывается экспоненциальной зависимостью

$$\Delta n = \Delta n_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1)$$

где Δn₀ – концентрация неравновесных носителей при фотовозбуждении образца, Δn – концентрация неравновесных носителей через время t после снятия возбуждения, τ – постоянное время релаксации. Постоянные времена релаксации вычислялись из наклона экспоненциального участка зависимости: $\ln(\Delta n) = \ln(\Delta n_0) - \frac{1}{\tau} \cdot t$. На рисунке представлены

релаксационные кривые фотопроводимости для pSi-n(Si₂)_{1-x}(GaN)_x (0 ≤ x ≤ 0.01) структур.

Время релаксации неравновесных носителей для структур составляло t ≈ 24 мкс.

Научные руководители – д-р физ.-мат. наук, проф. А. С. Саидов, канд. физ.-мат. наук Ш. Н. Усмонов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОРЕЛАКСАЦИИ pSi-n(Si₂)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y СТРУКТУР

К. А. Амонов

Физико-технический институт НПО “Физика-Солнце“ АН РУз,
г. Ташкент, Узбекистан

В данной работе приводятся экспериментальные результаты исследования фоторелаксации твердых растворов (Si₂)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y, выращенные методом жидкофазной эпитаксии из оловянного раствора-расплава принудительным охлаждением в температурном интервале 950-750°С в водородной среде. Подложками служили монокристаллические пластины Si с удельным сопротивлением 10 Ом·см, акцепторного типа проводимости. Выращенные пленки имели *n*-тип проводимости с удельным сопротивлением ~ 5,6 Ом·см и толщину 15 мкм. Возбуждение осуществлялось лазерным излучением с длиной волны 0,5 мкм в собственной области поглощения. Релаксационная кривая описывается экспоненциальной зависимостью $\Delta n = \Delta n_0 \cdot \exp(-t/\tau)$. Поскольку, напряжение (*V*), возникающее при фотовозбуждении *p-n* структуры прямо пропорционально концентрации фотовозбужденных неравновесных носителей, следовательно, времени релаксации можно оценить из наклона экспоненциального участка зависимости фотонапряжения (*V*) по времени:

$$\ln(V) = \ln(V_0) - \frac{1}{\tau} \cdot t$$

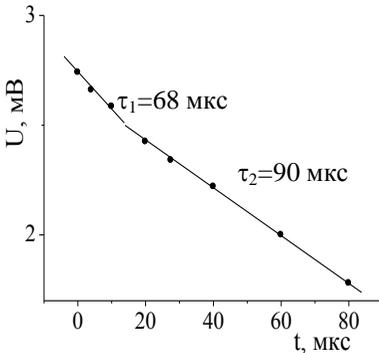


Рис.1. Кривые фоторелаксации структур pSi-n(Si₂)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y

пропорционально концентрации фотовозбужденных неравновесных носителей, следовательно, времени релаксации можно оценить из наклона экспоненциального участка зависимости фотонапряжения (*V*) по времени:

На рис.1. представлена релаксационная кривая фотопроводимости для pSi-n(Si₂)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y структур в полулогарифмическом масштабе. Из рис.1. видно, что релаксационная кривая структуры имеет два экспоненциальных участка с

постоянными временами релаксации $\tau_1 \approx 68$ мкс и $\tau_2 \approx 90$ мкс, что свидетельствует о существовании в слое (Si₂)_{1-x-y}(Ge₂)_x(ZnSe)_y в основном, двух типов эффективно работающих центров рекомбинации. В таких случаях эффективное время релаксации ($\tau_{эф}$) неравновесных носителей структур составляет $\tau_{эф} \approx 38,7$ мкс.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУННЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ЧЕРЕЗ КИРАЛЬНЫЙ МЕТАМАТЕРИАЛ

И. В. Анкудинов

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Новосибирский государственный университет

Электромагнитные метаматериалы – это искусственные среды, которые формируются из резонаторов, размеры которых меньше длины волны. Они предназначены для беспрецедентного управления излучением и могут обладать свойствами, не встречающимися в природе. Не смотря на то, что метаматериалы относятся к лучшим достижениям последних десяти лет, они еще не достаточно изучены и только начинают внедряться в практику.

Другим явлением, привлекающим в последние годы внимание исследователей, является туннелирование электромагнитных волн через различные типы барьеров. Интерес к туннелированию вызван как высокой чувствительностью процессов к параметрам системы, так и отсутствием ответов на ряд важных вопросов. К таким вопросам следует отнести и вопрос о туннелировании через киральный (зеркально-изомерный) метаматериал.

Цель данной работы – исследование туннелирования электромагнитного излучения через двумерный киральный метаматериал, образованный массивом резонаторов с резонансными частотами в пределах 130-144 ГГц.

В работе сформирована киральная структура и экспериментально реализована схема туннелирования электромагнитных волн. Усовершенствована аналитическая модель анизотропной зеркально-изомерной среды. Выполнены измерения на квазиоптической линии. Полученные из эксперимента поляризационные характеристики прошедшего через киральный метаматериал излучения сравниваются с результатами, предсказанными разработанной моделью. Теоретические расчеты и результаты компьютерного моделирования согласуются с экспериментом.

Научные руководители – В. А. Сейфи, д-р физ.-мат. наук, проф.
В. Я. Принц.

SCHOTTKY BARRIER DETECTORS ON BASE OF CdTe- FILMS FOR α -AND X-RAY SPECTROMETRY

A. S. Achilov

Physico-Technical Institute of the Academy of Sciences of Uzbekistan,
Tashkent

Cadmium telluride (CdTe) is widely used for registration of different radiations. Large atomic number of CdTe and its gap width provide higher efficiency of detection by A^2B^6 -detectors without cooling compared to Si- and Ge-detectors. In recent years single crystal CdTe- and $Cd_{1-x}Zn_xTe$ -detectors with Schottky barriers have been created intensively. Significant advantages of these detectors are low dark reverse currents ($\sim 10^{-7}$)A, high energy resolution R and high working temperatures ($T \geq 300K$). It is well known that single crystals of A^2B^6 -compounds used for producing radiation detectors have some disadvantages too. The main disadvantage of these single crystals is presence large numbers of different defects that worsen detectors characteristics. Besides such detectors of single crystals A^2B^6 have high cost. The aim of this work is development and creation of new type Schottky barrier CdTe-detectors that have less numbers of defects low cost and better characteristics. The detector disadvantages were significantly eliminated when we used large-block polycrystalline CdTe-films as base detector material. In such films their grains occupy the entire film thickness. The advantage these CdTe-films is that they have properties of the A^2B^6 -single crystals in direction (vertical) of their growth and properties of polycrystals in horizontal direction. Crystallites of our CdTe-films are orthogonal to plane of Mo-substrate on which they are formed. The grain boundaries serve as sinks for defects of various types, thereby leading to an increasing of lifetime of charge carriers in the crystallites. We used such CdTe-films (~ 10 Ohm.cm) for manufacturing α - and X-ray-detectors. The detectors had next parameters: their thicknesses “d” were $50 \div 480 \mu m$ and enter windows had square $(5 \times 5) mm^2$. Detector dark reverse currents were $\sim 6 \cdot 10^{-8} - 3 \cdot 10^{-7} A$ and noise (E_n) $\leq 15 keV$ in working range of bias $V_b \approx (1.5 \div 100)V$ at $T = 293K$. We have been too investigated mechanisms of transition of the current carriers across the detectors. It is found that their dark currents have constant values in the range $V_b \approx (1.5 \div 100)V$, because drift and diffusion currents move towards each other. The Schottky barrier CdTe – detectors registered α -particles with energy $E_\alpha = 5.482 MeV$ and X-ray from Am^{241} source very well at $T = 297 K$. Their energy resolutions were $R_\alpha = 22 \div 29 keV$ $U R_x = 3.5 \div 4 keV$. These detector characteristics are improved at more low temperatures $T < 273K$.

Chiefs – Prof., Dr. Sh. A. Mirsagatov, Dr. B. N. Zaveryukin.

МАГНЕТОСОПРОТИВЛЕНИЕ ДВУМЕРНОГО МАССИВА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК С РАЗНОЙ СТЕПЕНЬЮ ЛОКАЛИЗАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

В. В. Вальковский

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
г. Новосибирск

В данной работе исследовалось магнетосопротивление (МС) двумерного массива квантовых точек (КТ) Ge в Si в широкой области изменения проводимости структур, когда транспортный режим меняется от прыжкового до диффузионного. Образцы выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии, степень локализации изменялась при вариации заполнения квантовых точек дырками, плотности точек и при отжиге системы в диапазоне температур $480 \div 625^\circ\text{C}$. МС измерялось в магнитных полях 0-10 Тл при температуре 4.2-1.3К.

Показано, что независимо от режима проводимости, в слабых магнитных полях наблюдается отрицательное МС, которое переходит в положительное с ростом поля. Целью работы является установление физических процессов, определяющих наблюдаемое универсальное поведение МС двумерных массивов КТ с различной степенью локализации носителей заряда. Поскольку массив КТ является модельной системой, в которой проявляются все особенности двумерного транспорта, выявление механизма МС представляет интерес с точки зрения понимания физических причин МС в двумерных системах в целом.

Для объяснения полученных результатов предложена модель, в рамках которой из-за неоднородности распределения островков Ge в плоскости роста, образуются кластеры близко расположенных квантовых точек, соединенных в перколяционную сеть. Предполагается, что проводимость массива КТ представляется как комбинация диффузионной проводимости внутри кластеров и прыжковой проводимости между кластерами. Сильное магнитное поле сжимает волновые функции носителей заряда, уменьшая проводимость между кластерами и приводя к положительному МС. Слабые магнитные поля подавляют квантовую интерференцию внутри кластеров, в результате наблюдается отрицательное МС.

Рассматривая совокупность данных эффектов в рамках модели эффективной среды, были извлечены параметры, позволяющие адекватно описать переходную область от диэлектрического к квази-металлическому режиму.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Н. П. Степина.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛОКАЛЬНОГО ТРАНСПОРТА В СИСТЕМЕ ДИРАКОВСКИХ ФЕРМИОНОВ НА ОСНОВЕ HgTe

И. А. Верхушин

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Новосибирский государственный университет

Квантовые ямы (КЯ) на основе CdHgTe/HgTe/CdHgTe обладают уникальным энергетическим спектром, обусловленным бесщелевой природой HgTe. Энергетический спектр принципиальным образом зависит от толщины КЯ. Расчёты показывают, что при определённой критической толщине происходит переход от зонной структуры с обычным спектром к инвертированному, при котором зона проводимости и валентная меняются местами. При критической толщине КЯ зона проводимости и валентная зона смыкаются, а в непосредственной близости от нее в КЯ реализуется не параболический, а линейный (конусообразный) закон дисперсии как для электронов, так и для дырок, что соответствует спектру безмассовых Дираковских фермионов.

Данная работа посвящена экспериментальному изучению эффектов индуцированного магнитным полем нелокального транспорта в КЯ HgTe с критической толщиной $d = 6.6$ нм. Нелокальными называются эффекты, при которых проводимость системы нельзя более описать локальным тензором проводимости. Другими словами это можно описать как нарушение закона Ома на микроскопическом уровне. Режим абсолютно нелокального транспорта можно наблюдать в известном квантовом эффекте Холла, в режиме которого весь ток через образец определяется током через краевые каналы, а объем образца становится непроводящим за счет локализации носителей.

Однако в исследуемой системе вблизи дираковской точки (т.е. точки энергетического спектра, соответствующей переходу от дырок к электронам) наблюдались нелокальные эффекты в магнитных полях, значительно меньших, чем квантующие. Согласно теоретическим предсказаниям, этот эффект возникает благодаря спиновому эффекту Холла, суть которого состоит в пространственном разделении спин-поляризованных электронов и дырок и возникающем благодаря этому падению напряжения. Целью данной работы является экспериментальная проверка этих предсказаний, а также изучение перехода от спинового эффекта Холла, образующегося в слабых полях, к квантовому, образующемуся в сильных полях и имеющего другую природу.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Д. А. Козлов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НОСИТЕЛЕЙ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

П. В. Винокуров

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова,
г. Якутск

В настоящее время гетероструктуры с квантовыми ямами используются для создания электронных приборов. Метод нестационарной спектроскопии глубоких уровней применяется для исследования дискретных уровней в квантовой яме [1].

В данной работе проведено исследование термической эмиссии носителей в гетероструктурах Si/SiGe/Si с квантовой ямой с помощью метода зарядовой спектроскопии глубоких уровней (Q-DLTS). Были исследованы три структуры Si/SiGe/Si с разным содержанием Ge (7%, 10%, 15%). Измерения проводились в температурном интервале от 80 до 300 К.

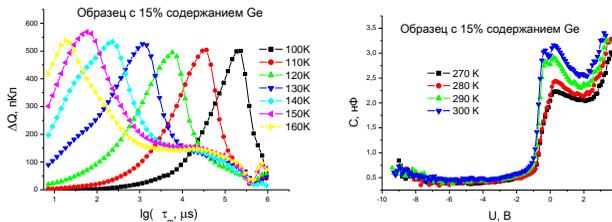


Рис.1. Спектры Q-DLTS (слева) и вольт-фарадные характеристики (справа) структуры с 15% содержанием Ge.

Из анализа вольт-фарадных характеристик были выбраны напряжения для измерения спектров Q-DLTS (рис.1, справа). Проведены теоретические расчеты дискретных уровней в квантовых ямах с различными глубинами, соответствующими содержанию Ge (7%, 10%, 15%). Из спектров Q-DLTS (рис.1, слева) были построены аррениусовские зависимости, с помощью которых рассчитаны энергии активации уровней. На основе сопоставления теоретически рассчитанных дискретных уровней в квантовых ямах и экспериментально определенных энергий активаций была построена модель квантовых ям.

1. O. Chretien, R. Apetz, L. Vescan, A. Souifi, H. Luthetal. J. Appl. Phys. 78, 5439 (1995).

ФОРМИРОВАНИЕ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА $\text{HfO}_2/\text{GaAs}(001)$ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ СЛОЕМ Si

В. А. Голяшов^{1,2}, А. В. Бакулин³

¹Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН

²Новосибирский государственный университет

³Томский государственный университет

Граница раздела арсенид галлия – диэлектрик представляет научный и практический интерес в связи с возможностью создания на её основе оптоэлектронных и спинтронных устройств. Высокая подвижность электронов в арсениде галлия ($\sim 8500 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$) и совместимость его с германием также позволяют рассматривать GaAs как альтернативу кремнию. Основной проблемой при создании устройств на основе GaAs является отсутствие диэлектриков, граница раздела с которыми имела бы низкую плотность поверхностных состояний (ПС). Так, в отличие от хорошо изученной и практически идеальной границы раздела SiO_2/Si плотностью ПС $D_{\text{it}} < 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{эВ}^{-1}$, интерфейс GaAs/собственный оксид вследствие наличия переходного слоя сложного состава (As_2O_3 , As_2O_5 , Ga_2O_3) имеет $D_{\text{it}} > 10^{15} \text{ см}^{-2}\text{эВ}^{-1}$. Одним из способов уменьшения плотности ПС является пассивация поверхности GaAs тонким (5-6 монослоев) псевдоморфным слоем кремния с последующим нанесением диэлектрика, обеспечивающим низкую плотность ПС с Si. Данная работа посвящена изучению химического состава и электрофизических свойств границы раздела $\text{HfO}_2/\text{Si}/\text{GaAs}(001)$.

Структуры 10нм $\text{HfO}_2/6\text{ML Si}/\text{n-GaAs}(001)$ были получены электронно-лучевым распылением Hf в среде NO_2 на поверхность эпитаксиальных структур 6ML Si/GaAs(001). Показано, что в зависимости от условий напыления пленки HfO_2 возможно формирование как резкой границы раздела HfO_2/Si , так и границы раздела $\text{HfO}_2/\text{SiO}_x/\text{Si}$. В МДП-структурах Au/ $\text{HfO}_2/6\text{ML Si}/\text{n-GaAs}(001)$ после прогрева при температуре 300-400 °С плотность поверхностных состояний достигла значений $D_{\text{it}} \sim 6 \cdot 10^{11} \text{ эВ}^{-1}\text{см}^{-2}$ в случае резкой границы раздела HfO_2/Si и $D_{\text{it}} \sim 3 \cdot 10^{12} \text{ эВ}^{-1}\text{см}^{-2}$ при наличии переходного слоя SiO_x . Токи утечки составляли $\sim 1 \cdot 10^{-7} \text{ А/см}^2$ при напряжении 1В.

Проведены расчеты электронной структуры поверхности Si/GaAs из первых принципов. Показано, что рост тонких псевдоморфных пленок Si не искажает структуру интерфейсных слоев GaAs и не влияет на структуру поверхностных состояний.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент О. Е. Терещенко.

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМНОВОГО ТОКА И ФОТОПРОВОДИМОСТИ В КРИСТАЛЛЕ $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Fe}$

А. Н. Гребенчуков

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Оптические и фотоэлектрические свойства кристаллов со структурой силленита определяются дефектными центрами, уровни которых расположены в запрещенной зоне [1]. Изменение температуры приводит к перераспределению электронов между дефектными центрами, что является причиной изменений, как оптического поглощения, так и темнового тока и фотоиндуцированной проводимости в этих кристаллах.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований температурных зависимостей темнового тока и фотопроводимости в легированном железом кристалле титаната висмута ($\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Fe}$) в диапазоне 290-425 Кв условиях приложенного внешнего постоянного электрического поля $U_{\text{кп}}=1$ кВ. В экспериментах исследовался монокристаллический образец $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Fe}$, имеющий размеры $d=6$ мм и $l=4,5$ мм вдоль кристаллографических направлений [001] и [100], соответственно. Температура образца изменялась со скоростью ~ 2 К/мин.

Получено, что величина темнового тока в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Fe}$ увеличивается с ростом температуры в диапазоне 290 – 425 К, причем этот процесс характеризуется энергией активации $\sim 0,61$ эВ. При освещении кристалла ИК-излучением наблюдался фототок, который также рос с температурой во всем исследованном диапазоне. Характерно, что при температурах от 290 до 320 К этот фототок незначительно превышал значение темнового тока. Однако в диапазоне температур 320 – 425 К значение фототока, индуцированного ИК-излучением было меньше, чем величина темнового тока, наблюдавшаяся в отсутствие ИК-засветки. При $T=425$ К значение фототока составило величину $\sim 1,2 \cdot 10^{-5}$ А, в то время как темновой ток при этой температуре был получен как $I_d=3,4 \cdot 10^{-5}$ А.

Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки РФ на 2012 г. (проект № 7.2647.2011) и при поддержке РФФИ (грант № 12-02-90038-Бел_а).

1. Малиновский В. К., Гудаев О. А., Гусев В. А., Деменко С. И. Фотоиндуцированные явления в силленитах. Новосибирск: Наука, 1990.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент М. Г. Кистенева.

ОСОБЕННОСТИ РАССЕЯНИЯ ДВУМЕРНЫХ ДИРАКОВСКИХ ФЕРМИОНОВ В HgTe КВАНТОВЫХ ЯМАХ

А. А. Добрецова

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Новосибирский государственный университет

В последние годы в физике низкоразмерных электронных систем появился новый интересный объект – квантовые ямы (КЯ) на основе бесщелевого полупроводника HgTe. В данной работе проводились исследования электронных систем, реализованных в HgTe КЯ двух толщин: 6,6 нм (в этом случае ширина запрещенной зоны равна нулю, а спектр двумерных носителей заряда представляет собой спектр безмассовых, однодолинных двумерных дираковских фермионов (ДДФ)) и 20 нм, в которой спектр электронов является параболическим.

Различие спектров обычных двумерных электронов (ДЭ) и ДДФ должно приводить к качественно разным процессам рассеяния и, соответственно, разному поведению подвижности в зависимости от концентрации электронов. Для ДДФ, как и для ДЭ, при малых концентрациях основным механизмом рассеяния является рассеяние на примесях, приводящее к росту подвижности с увеличением концентрации. При дальнейшем росте концентрации, начиная с некоторых, должен возникать новый механизм рассеяния, связанный с флуктуациями эффективной массы ДДФ из-за флуктуаций толщины ямы. Это приводит к прекращению роста подвижности, а затем к ее уменьшению с ростом концентрации. Однако к такому же поведению подвижности может привести и рассеяние на шероховатостях. Основной целью данной работы является установление механизма немонотонного поведения подвижности ДДФ: вызван он флуктуациями эффективной массы или рассеянием на шероховатостях. Для этого в работе проведено сравнительное исследование подвижности ДДФ (в ямах толщиной 6.6 нм) и электронов с параболическим законом дисперсии (в ямах толщиной 20 нм). Его основные результаты можно сформулировать следующим образом:

1. В квантовых ямах на основе HgTe существует рассеяние на шероховатостях.

2. Показано, что вклад этого рассеяния может оказаться достаточно сильным, чтобы привести к немонотонной зависимости подвижности ДДФ и, таким образом, вопрос о существовании их рассеяния на флуктуациях эффективной массы остается открытым.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук З. Д. Квон.

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛЕНОК $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$ КАК МАТЕРИАЛА СПИНТРОНИКИ

А. К. Дроздова, О. С. Букина
Восточно-Казахстанский государственный университет
им. С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

В настоящее время бурно развивающаяся наука спинтроника требует новых материалов, обладающих необходимыми параметрами, технологичностью получения и низким показателем экономических затрат. Поскольку сплав $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$ обладает набором уникальных электрических и магнитных свойств и является дешёвым материалом, необходимость изучения этого сплава в массивном и пленочном состоянии как материала для спинтроники очевидна.

Цель работы заключается в разработке методов получения ферромагнитных полупроводниковых структур для устройств электроники и информатики, работающих на новых функциональных принципах, а также в исследовании условий формирования квантовых точек в тонкопленочных образцах сплава $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$.

Сплав $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$, известный также как сталь Гадфильда (110Г13Л), представляет собой антиферромагнитный инвар. При ударной нагрузке в образцах появляется локальная намагничённость. Для выяснения причины такого поведения сплава исследовали структуру и магнитные свойства массивных образцов стали 110Г13Л, подвергнутых ударному нагружению, и тонкопленочных образцов, подвергнутых криомеханической обработке.

Поскольку поиск новых материалов для спинтроники предполагает создание тонкопленочных образцов, то дальнейшая наша задача – исследовать структуру и свойства тонких пленок сплава $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$. Для изучения магнитных свойств пленок использовался метод крутящих моментов на магнитометре и индукционный метод построения петель гистерезиса с помощью феррометра. В пленках $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$, подвергнутых криомеханической обработке, были обнаружены аномальные эффекты в спектре оптического поглощения. Это может служить доказательством того, что пластическая деформация сопровождается квантовыми эффектами.

Экспериментальные исследования, проведенные в данной работе, позволяют обосновать возможности создания квантовых точек в пленках $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$ в результате их криомеханической обработки.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. Л. И. Квеглис.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ КРТ В ПЛАЗМЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА МЕТОДОМ РФЭС IN-SITU

Е. Р. Закиров

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Новосибирский государственный технический университет

Благодаря таким физическим свойствам, как высокая подвижность носителей заряда, прямозонность и возможность изменения ширины запрещенной зоны, соединение кадмий-ртуть-теллур (КРТ) широко применяется для изготовления фотоприемных устройств ИК диапазона.

Наряду с проблемой получения высококачественного материала КРТ при изготовлении ИК-фотоприемников одной из проблем является необходимость пассивации поверхности материала. Важной особенностью является неприменимость высокотемпературных методов в технологии обработки КРТ.

Перспективным методом пассивации поверхности КРТ может быть формирование тонких собственных окисных слоев в плазме тлеющего разряда. Метод относительно прост в реализации, не требует использования дорогостоящего оборудования и может быть совместим с современными вакуумными технологиями формирования микро- и наноструктур. Поскольку технологический процесс может быть реализован при комнатной температуре, в вакуумной камере, с использованием газов-окислителей высокой степени очистки, он обладает преимуществом над методами термического и анодного окисления, так как позволяет исключить побочные эффекты, связанные с термическим разрушением стехиометрии поверхности полупроводника и загрязнением оксида компонентами электролита.

Данная работа посвящена исследованию химического состава растущего на поверхности КРТ оксидного слоя с целью дальнейшего применения окисления в плазме тлеющего разряда для пассивации поверхности рабочих структур.

Исследования проводились методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) в едином вакуумном цикле с окислением в плазме.

В результате работы получена кинетика окисления КРТ в кислородной плазме тлеющего разряда. Изучен химический состав окисных пленок на разных этапах окисления. Отмечается монотонное уменьшение относительной доли ртути и увеличение доли кадмия в пленке с ростом оксида.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук В. Г. Кеслер.

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА InSb-ДИЭЛЕКТРИК

Е. С. Ивашко

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Новосибирский государственный университет

В настоящее время повышаются требования к эксплуатационным параметрам фотоприёмных устройств на основе InSb, что требует совершенствования технологии их изготовления, в том числе, улучшения свойств диэлектрических слоёв и их границы раздела с полупроводником. Известно, что плотность поверхностных состояний МДП структур зависит от условий осаждения диэлектрика. Главную роль играют давление при осаждении диэлектрика и вводимая мощность, потому что от этого зависит бомбардировка поверхности, чем она сильнее, тем больше дефектов поверхности полупроводника, и как следствие – высокая плотность поверхностных состояний. Для получения низкой плотности поверхностных состояний, важно подобрать условия осаждения, при которых количество дефектов поверхности полупроводника минимально. Для этих целей необходимо произвести осаждение диэлектрика при различных давлениях и вводимых мощностях и исследовать качество границы раздела, а так же стабильность электрофизических характеристик со временем и температурой.

Цель работы – получение границы раздела полупроводник – диэлектрик с низкой плотностью поверхностных состояний, поиск условий осаждения слоёв диэлектрика с минимальным нарушением границы раздела диэлектрик – полупроводник, изучение стабильности электрофизических характеристик границы раздела со временем и температурой.

Использовались образцы InSb (111) В. Измерения проводились методом C-V, G/w, были изучены оптические свойства, определена толщина слоя диэлектрика методом эллипсометрии.

Установлено, что осаждение Si_3N_4 при $p = 0,4$ Торр, $W = 0,15$ Вт/см² даёт границу раздела низкого качества (нестабильность границы раздела), а наилучшими параметрами для осаждения диэлектрика являются $p = 0,6$ Торр, $W = 0,15$ Вт/см² (низкая плотность поверхностных состояний $N_{ss} = 3 \cdot 10^{10}$ Эв⁻¹·см⁻², величина встроеного заряда $Q = 3,8 \cdot 10^{-10}$ Кл).

Научные руководители – канд. хим. наук, доцент С. Ф. Девятова, канд. физ.-мат. наук, доцент О. Е. Терещенко.

СТУПЕНЧАТАЯ ФОТОПРОВОДИМОСТЬ Ge(Sn)/Si СТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ

Е. В. Илюшина

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Новосибирский государственный университет

Самоорганизующиеся квантовые точки (КТ) формируются за счёт напряжений в кристаллической структуре, обусловленных разницей в параметрах решётки Ge и Si. Такие объекты обладают уникальными свойствами за счёт квантования движения носителей заряда по всем пространственным направлениям. Структуры Ge/Si и GeSn/Si_c КТ могут найти практическое применение в различных электронных и оптоэлектронных устройствах. Важным является то, что эти структуры совместимы с кремниевой технологией.

Фундаментальные свойства напряжённых Ge(Sn)/Si структур исследовались методами электронной и атомно-силовой микроскопии, фотолюминесценции, рамановской и емкостной спектроскопии. Однако, транспортные характеристики, механизмы фотопроводимости (ФП) при межзонном возбуждении этих объектов в настоящее время изучены недостаточно хорошо.

Данная работа посвящена исследованию механизмов ступенчатой ФП структур Ge(Sn)/Si с КТ, возникающей при сканировании интенсивности межзонной подсветки. Измерения проводились при низких температурах 4,2–25 К, в диапазоне тянущих напряжений 2–60 В, плотность излучения на поверхности образца не превышала 3 мВт/см².

Исследовались структуры с различным содержанием Sn при различных условиях роста структуры. Изменялись температура роста слоя Ge(Sn) и температура роста сар-слоя Si.

Анализ ступенчатой зависимости ФП Ge(Sn)/Si структур с КТ основывается на перколяционной теории. Исследуемые объекты относятся к структурам II типа, когда неравновесные носители заряда разделяются: дырки находятся в области КТ, а электроны под влиянием кулоновского взаимодействия локализуются по обе стороны от слоя КТ. Наблюдаемые одно- и двухступенчатые зависимости ФП мы связываем с достижением электронами уровня протекания, соответственно, под слоем КТ и по обоим каналам проводимости: под слоем КТ и в сар-слое Si. Установлено влияние качества роста сар-слоя Si на наблюдаемые особенности фотопроводимости.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук О. А. Шегай.

ДИФфуЗИОННЫЙ ИНЖЕКЦИОННЫЙ РЕЖИМ В СТРУКТУРАХ С p-n- ПЕРЕХОДОМ, ИЗГОТОВЛЕННЫЙ НА ОСНОВЕ ВАРИЗОННЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ

А. Б. Каршиев

Физико-технический институт НПО “Физика-Солнце“ АН РУз,
г. Ташкент, Узбекистан

Рассматривается инжекция в p-n- структуре в условиях чисто диффузионного режима и линейной зависимости концентрации рекомбинационных центров от длины базы в виде $N_R = N_{R0}(1 + \beta x)$. Основное уравнение задачи в этом случае имеет вид:

$$D_p \frac{d^2 p}{dx^2} - U = 0,$$

причем скорость рекомбинации неравновесных носителей $U = N_{R0}(1 + \beta x)C_{эфф}p$, где $C_{эфф} = \frac{C_n C_p}{C_n + C_p}$ эффективное сечение

захвата(свободных электронов и дырок). Решением этого уравнения показано, что концентрация неосновных инжектированных носителей

будет в этом случае убывать по закону: $p \approx p(0)e^{-\frac{\sqrt{\beta}}{L_{p0}}x^{3/2}}$, где $p(0)$ - концентрация дырок на границе p-n- перехода с базой, $L_{p0} = \sqrt{D_p \tau_0}$ - диффузионная длина неравновесных дырок при $N_R = N_{R0} = const$. Таким образом, показано, что распределение концентрации отличается от

обычного $\left(p = p(0)e^{-\frac{x}{L_{p0}}} \right)$ – спад концентрации инжектированных

носителей происходит быстрее. Соответственно, ток через идеальный переход примет вид:

$$J = J_s \exp(aVp - n/kT),$$

причем $J_s = (3/2)(qD_p \sqrt{\beta} p_n / L_{p0})$.

Научный руководители – д-р физ.-мат. наук, проф. А. Ю. Лейдерман, д-р физ.-мат. наук Р. А. Аюханов.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ГАЛОГЕНИДОВ СЕРЕБРА

Е. А. Киселева

Кемеровский государственный университет

В настоящей работе методом локализованных атомных орбиталей в градиентном приближении теории функционала плотности (ТФП) программным кодом CRYSTAL09 [1] вычислены термодинамические потенциалы, энтропия, теплоемкость и исследована их зависимость от температуры в интервале 298,15÷736 К. В качестве базиса применялась блоховская сумма локализованных *s*-, *sp*-, *d*- атомных орбиталей (АО) гауссова типа. В ТФП – вычислениях использовались градиентное приближение к обмену и корреляции PBE. Базисные наборы функций для расчетов взяты следующие: для серебра использовался базис – $(3sp)^8(1sp)^1(1sp)^0(3d)^{10}(1d)^0$, для хлора – $(3sp)^7(1sp)^0$, брома – $(3sp)^8(1sp)^0$. Цифра в скобке обозначает число локализованных атомных орбиталей гауссова типа, используемых для разложения *s*-, *sp*- и *d*-оболочек с числами заполнения, заданными верхним индексом.

Энтропия *S* увеличивается с температурой. Рассчитанная стандартная молярная энтропия S^0 равна для AgCl при $T=298,15 \text{ K}$ $S^0=99,25$ (96,3); при $T=500 \text{ K}$ $S^0=124,82$ (127,82); $T=700 \text{ K}$ $S^0=141,55$ (149,25) Дж·моль⁻¹·К⁻¹, Максимальное отклонение от справочных данных [2] (в скобках) не превышает 5%. Ошибка связана с тем, что в молекулярных расчетах, помимо колебательного вклада, учитывался еще трансляционный и вращательный, и они играют определяющую роль. Теплоёмкость плавно возрастает с ростом температуры до определенного значения. Рассчитанные значения молярной теплоемкости C_p^0 в ряду галогенидов возрастают: 49,21 (50,8); 49,65 (108,8) и 49,76 Дж·моль⁻¹·К⁻¹.

Возрастание энтальпии $H_{298}^0 - H_0^0$ равно 12,36 кДж·моль⁻¹ при $T=500 \text{ K}$; 25,13 кДж·моль⁻¹ при $T=700 \text{ K}$.

Таким образом: первопринципными методами теории функционала плотности рассчитаны термодинамические функции и определены их зависимости от температуры, которые находятся в удовлетворительном согласии с экспериментом.

1. Интернет- ресурс http://crystal.unito.it/Basis_Sets/ptable.html

2. L. Rycerz, M. Thermodynamic Properties of AgCl and AgBr Chem. Eng. 2008, 53, 1116–1119

Научный руководитель – д-р физ.-мат.наук, проф. Ю. Н. Журавлев.

ВЛИЯНИЕ СТЕПАНИ КОМПЕНСАЦИИ НА ПОДВИЖНОСТЬ ТЯЖЕЛЫХ ДЫРОК В МЛЭ CdHgTe P-ТИПА

С. С. Кобылкин

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Новосибирский государственный университет

В настоящее время лидирующее место среди материалов для изготовления инфракрасных фотоприемников занимают твердые растворы CdHgTe (кадмий-ртуть-теллур, КРТ). Это обусловлено физическими свойствами КРТ: высокой подвижностью электронов, низкой диэлектрической постоянной, возможностью изменения ширины запрещенной зоны в широких пределах и высокой квантовой эффективностью в диапазоне перекрываемых длин волн.

Одним из методов роста полупроводниковых структур на основе КРТ является молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ). Важной задачей является создание образцов с заданными воспроизводимыми концентрациями электронов и дырок, а также стабильность концентрации во времени, сохранение высокой подвижности. Для ее решения необходимо знание примесной структуры образца.

Одним из параметров, определяющих электрофизические свойства образца является соотношение между концентрацией донорных и акцепторных примесей и дефектов, которое характеризуется величиной степени компенсации – K . В образцах в n -типа, выращенных методом МЛЭ в ИФП СО РАН, K близка к единице. Степень компенсации получаемых в институте образцов КРТ p -типарнее не измерялась.

В данной работе исследуется влияние степени компенсации в образцах p -типа на подвижность тяжелых дырок. K изменялась путем добавления различного количества донорных примесей In в процессе роста. Были проведены магнитотранспортные измерения при температурах 25К-77К в результате которых определены параметры электронов, легких и тяжелых дырок. Полученные данные использовались для построения зависимостей подвижностей носителей заряда от температуры.

Сравнение измеренных температурных зависимостей подвижностей с теоретическими подтвердило основной механизм рассеяния — рассеяние на заряженных центрах.

Полученные данные позволили определить степень компенсации в нелегированных In образцах МЛЭ КРТ.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Д. Ю. Протасов.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ И КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДОРОДА В ПЛЕНКАХ АМОРФНОГО КРЕМНИЯ

Д. И. Кошелев

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Новосибирский государственный университет

Пленки аморфного гидрогенизированного кремния применяются в устройствах широкоформатной микроэлектроники, таких как активные матрицы ТПТ и солнечные элементы. Пленки, полученные плазмохимическим осаждением, содержат до 50% водорода. Водород влияет на свойства пленок и их деградацию. Поэтому развитие экспрессных и неразрушающих методов контроля концентрации водорода в тонких пленках остается актуальной задачей.

В данной работе содержание водорода определялось по двум методикам: инфракрасная (ИК)-спектроскопия и спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС). Использовалось оборудование НОК «Наносистемы и современные материалы» НГУ. Исследовались пленки, полученные с применением методов плазмохимического осаждения при температурах от 100 до 380 °С.

По положению пиков поглощения на колебаниях Si-H связей можно определить состояние водорода в пленках. Концентрация Si-H связей определялась по интенсивности поглощения в ИК-диапазоне, с применением специально разработанной компьютерной программы. Однако, нетугоплавкие недорогие подложки непрозрачны в ИК, поэтому необходимо использовать спектроскопию КРС. Несмотря на то, что состояние водорода в пленках кремния исследуется с применением спектроскопии КРС давно, количественный анализ концентрации водорода по соотношению интенсивностей пиков КРС на Si-H и Si-Si связях практически не проводился.

В работе, из сравнительного анализа данных ИК-спектроскопии и КРС, были впервые экспериментально установлены соотношения интегральных интенсивностей пиков КРС на Si-H и Si-H₂ связях к интенсивности КРС на Si-Si связях. Зная данные соотношения, можно количественно определить концентрацию водорода, причем отдельно в Si-H и Si-H₂ состояниях. Предложенный количественный метод определения концентрации водорода из анализа спектров КРС является экспрессным, неразрушающим и может использоваться для “*insitu*” контроля.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент В. А. Володин.

СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ГРАФЕНЕ И ОДНОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ В ПРИСУТСТВИИ АКСИАЛЬНО- СИММЕТРИЧНОГО ПРИМЕСНОГО ПОТЕНЦИАЛА И ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Д. С. Мисерев

Новосибирский государственный университет

Бесщелевой спектр графена является причиной существования электронных состояний, которые невозможно локализовать в произвольном потенциале. В данной работе рассматриваются потенциалы, зависящие только от одной координаты, скажем x , когда существует интеграл движения K (y -компонента импульса для плоского графена, угловой момент для углеродной нанотрубки). Состояния с нулевым значением K являются безотражательными [1]. Эти состояния определяют, с учетом малости фазового объема, кондактанс- n перехода в плоском графене. В отличие от плоского графена, безотражательные состояния в углеродных нанотрубках из-за квантования углового момента K имеют конечный фазовый объем. Отсутствие локализации электронов в углеродной нанотрубке кардинально отличает её от квантовой проволоки.

Вначале рассмотрены состояния в чистой нанотрубке в присутствии переменного электрического поля, направленного вдоль оси нанотрубки. Показано, что состояние с нулевым моментом не поглощает фотоны. Для состояний с ненулевым моментом вероятность перехода имеет циклический характер и мультирезонансную структуру, отражающую вероятность многофотонного поглощения. В данной работе рассмотрен вклад основного (однофотонного) резонанса. Показано, что частота оптических переходов нелинейным образом зависит от амплитуды электрического поля. В частности, существуют критические значения поля, при которых однофотонный переход подавлен.

В присутствии статического потенциала происходит подавление вероятности оптических переходов. Фактор подавления посчитан для случая прямоугольной ямы. Показано, что спектр поглощения приобретает дискретную компоненту, связанную с локализацией электронов в потенциале. В качестве другого примера в борновском приближении рассмотрено влияние потенциала примеси, внедренной внутрь нанотрубки, на оптические переходы в непрерывном спектре.

[1] Д. С. Мисерев, М. В. Энтин, ЖЭТФ, **142**, 784-796 (2012).

УЧЕТ ПОТЕРЬ В ПРОЦЕССЕ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В МЕТАМАТЕРИАЛЕ

Е. С. Мухаметкаримов

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы

Метаматериал – это нанокompозит, получаемый путем внедрения металлических стержней разной геометрической формы в диэлектрические матрицы. Основным свойством такого материала является отрицательность показателя преломления в некотором частотном диапазоне.

Данная работа посвящена теоретическому анализу процесса генерации второй гармоники в диссипативной среде с отрицательным показателем преломления, у которой фундаментальная тройка \mathbf{E} , \mathbf{H} и \mathbf{k} является левоориентированной. Как следствие, в подобных средах волновой вектор \mathbf{k} и вектор Пойнтинга \mathbf{S} не совпадают по направлению. Предполагается, что показатель преломления отрицателен на «фундаментальной» частоте ω и положителен на частоте волны второй гармоники 2ω . При этом для выполнения фазового синхронизма необходимо, чтобы «фундаментальная» волна и вторая гармоника распространялись в противоположных направлениях.

Анализ показывает, что существуют два режима генерации второй гармоники: монотонный и периодический, появление которых зависит от значения фазовой расстройки. Найдены критические значения фазовой расстройки, разделяющих два режима генерации и исследованы их зависимости от коэффициентов потерь на фундаментальной волне и волне второй гармоник. Установлено, что рост коэффициентов потерь приводит к росту значения критической расстройки, а потери на фундаментальной волне сильнее влияют на критическое значение фазовой расстройки, чем потери на волне второй гармоники. Также исследовано поведение разности фаз при распространении волн. Показано, что при идеальном фазовом синхронизме разность фаз остается постоянной и равняется $-\pi/2$. В случае же наличия фазовой расстройки разность фаз начинает монотонно падать и, при превышении фазовой расстройкой критического значения, начинает периодически изменяться, претерпевая скачок в точке $-\pi/2$. Наличие потерь приводит к сглаживанию резких скачков фазы.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук А. Е. Давлетов.

**КИНЕТИКА ТРАНСФОРМАЦИИ МИКРОКАНАВОК
НА АТОМНО-ГЛАДКОЙ ПОВЕРХНОСТИ Si(111)**

А. С. Петров

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
Новосибирский государственный университет

Анализ кинетики релаксации искусственно созданных объектов на поверхности кристалла при термическом отжиге, гомо- и гетероэпитаксиальном росте позволяет определить кинетические и энергетические параметры, характеризующие поверхностные атомные процессы. Однако экспериментальные исследования процессов релаксации наноразмерных объектов на вицинальной поверхности кристалла затруднены в связи с необходимостью учёта взаимодействия с атомными ступенями, дислокациями и другими дефектами поверхности. В данной работе предложена методика изучения релаксации 3D-нанобъектов (лунок) на атомно-гладкой поверхности кремния, не содержащей атомных ступеней, при термическом отжиге подложки в условиях сверхвысокого вакуума.

Методом травления низкоэнергетичными ионами аргона созданы атомно-гладкие террасы шириной более 100 мкм на поверхности Si(111). Разработан метод формирования 3D-объектов (лунок) на атомно-гладкой поверхности методом фокусированного ионного пучка галлия. Проведён анализ релаксации формы 3D-лунок разных глубин при различных параметрах отжига. Установлено влияние электромиграционного переноса адатомов на кинетику релаксации созданных 3D-лунок на поверхности кремния при резистивном нагреве образца электрическим током в сверхвысоком вакууме. Предложена модель, описывающая релаксацию лунок на атомно-гладкой поверхности при термическом отжиге.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН
А. В. Латышев.

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК Si/Ge-
ФОТОДЕТЕКТОРА СО ВСТРОЕННЫМИ КВАНТОВЫМИ
ТОЧКАМИ Ge В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ «SENTAURUS WORKBENCH»**

А. А. Пищагин, В. Г. Сатдаров, И. А. Зятиков
Томский государственный университет

На сегодняшний день одним из важнейших направлений развития систем обработки и передачи информации является разработка волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). В настоящее время считается, что актуальным для применения в ВОЛС диапазоном длин волн излучения является ближняя инфракрасная область 1.31.55 мкм.

Для уменьшения стоимости подобных систем необходимо, чтобы все компоненты были сформированы на кремниевой подложке. Однако Si прозрачен для длин волн более 1.1 мкм. Хорошей чувствительностью в области ~1.5 мкм обладают германиевые фотодетекторы. В связи с этим возникает проблема создания Si/Ge фотодетекторов, фоточувствительных при комнатной температуре в диапазоне длин волн 1.31.55 мкм.

В работах [1,2] было показано, что наиболее перспективным направлением является разработка Si/Ge фотодетекторов с квантовыми точками Ge. Гетероструктуры с квантовыми точками имеют большую квантовую эффективность и меньшие темновые токи по сравнению с фотодетекторами со сплошными слоями Ge. Для дальнейшего улучшения характеристик таких структур необходимо уменьшение размеров квантовых точек до 10 нм и одновременное увеличение плотности массива. Кроме того, для повышения квантовой эффективности была предложена схема фотодетектора с латеральным волноводом.

В пакете программ технологического моделирования «Sentaurus Workbench» было проведено моделирование p-i-n фотодиода со встроенными слоями островков Ge. Были рассчитаны параметры полученной структуры: ВАХ, темновые токи, квантовая эффективность, спектральная характеристика фоточувствительности.

[1] Якимов А. И., Двуреченский А. В., Кириенко В. В. и др. Волоконные Ge/Si-фотодиоды со встроенными слоями КТ Ge для волоконно-оптических линий связи//ФТП. – 2004. – Т.38. – №10. С.1265-1269.

[2] Якимов А. И., Двуреченский А.В., Никифоров А. И. и др. Фотодиоды Ge/Si со встроенными слоями КТ Ge для ближней ИК-области//ФТП. – 2003. – Т.37. – №11. С.1383-1388.

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛА ЭЛЕКТРОННОГО СПИНОВОГО ЭХА СПИН-КОРРЕЛИРОВАННЫХ РАДИКАЛЬНЫХ ПАР

А. А. Попов

Новосибирский государственный университет
Институт химической кинетики и горения СО РАН

В работе рассматривается один из способов численного моделирования сигнала электронного спинового эха (ЭСЭ) радикальной пары. Такие пары, в частности, образуются в результате воздействия света на систему фуллерен-полимер. Подобные системы представляют интерес для создателей органических фотовольтаических ячеек (солнечных батарей).

Метод ЭСЭ, дополненный численным моделированием экспериментального сигнала, позволяет изучать процессы переноса заряда и спиновую динамику. Для расчета сигнала ЭСЭ численно решается квантовое уравнение Лиувилля

$$i \frac{\partial \rho}{\partial t} = [H, \rho]$$

с начальным условием $\rho(0) = |S\rangle\langle S|$, соответствующим чистому синглетному состоянию $|S\rangle$ спиновой системы. Гамильтониан H спиновой системы можно записать следующим образом:

$$H = \omega_1 S_{1z} + \omega_2 S_{2z} + J(S_1 \cdot S_2) + D \left(S_z^2 - \frac{S^2}{3} \right) (3 \cos^2 \theta - 1).$$

Здесь S_1, S_2 – операторы спина двух электронов, $S = S_1 + S_2$ – суммарный спин системы. Параметры J и D характеризуют величины обменного и дипольного взаимодействия электронов соответственно, θ – угол между осью z системы координат, совпадающей с направлением внешнего магнитного поля, и пространственным вектором, соединяющим спины (в приближении точечных диполей), ω_1 и ω_2 – энергию зеемановского взаимодействия с магнитным полем спектрометра.

При моделировании обнаружен новый сигнал ЭСЭ при стандартном проведении эксперимента – последовательности из двух импульсов, влияющих на спиновую систему.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Л. В. Кулик.

ВЛИЯНИЕ ГАММАОБЛУЧЕНИЯ НА СПЕКТРАЛЬНУЮ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ pSi-n(ZnSe)_{1-x-y}(Si₂)_x(GaP)_y (0≤x≤0.03, 0≤y≤0.09) СТРУКТУР

У. Х. Рахмонов.

Физико-технический институт НПО «Физика–Солнце» АН РУз,
г. Ташкент, Узбекистан

В работе представлены результаты исследования влияния гамма-облучения на спектральную фоточувствительность pSi-n(ZnSe)_{1-x-y}(Si₂)_x(GaP)_y (0≤x≤0.03, 0≤y≤0.09) структур.

При исследовании к структуре методом вакуумного напыления создавались омические контакты из серебра. Структуры облучались гамма-лучами изотопа ⁶⁰Co с энергией ~1,25 МэВ и мощностью 0,9 рад/с.

На рисунке представлены зависимости фоточувствительности структур от энергии, падающих на нее, фотонов. Освещение осуществлялось со стороны эпитаксиального n(ZnSe)_{1-x-y}(Si₂)_x(GaP)_y- слоя. На рис. кривая 1 соответствует необлученной, 2, 3 и 4 – облученной гамма-лучами с дозой 10³, 10⁴ и 10⁵ рад структуре, соответственно. Из рис.

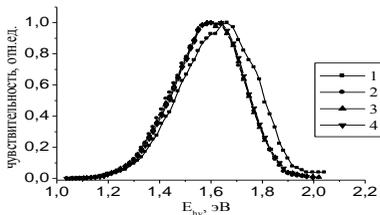


Рис. Спектральные зависимости фоточувствительности pSi-n(ZnSe)_{1-x-y}(Si₂)_x(GaP)_y (0≤x≤0.03, 0≤y≤0.09) структур – до (1) и после γ-облучения дозой 10³ (2), 10⁴ (3) и 10⁵ (4) рад, соответственно.

видно, что после облучения фоточувствительность структур сдвигается в длинноволновую область. Причем, до облучения максимум фотоотклика наблюдается при энергиях фотонов E_{ph}≈1,66 эВ, а после облучения с дозой 10³, 10⁴ и 10⁵ рад – E_{ph}≈1,58 эВ. Резкий спад чувствительности структуры в коротковолновой области, по-видимому, обусловлен глубиной залегания разделяющего барьера p-n перехода, которая определяется толщиной эпитаксиального слоя твердого раствора n(ZnSe)_{1-x-y}(Si₂)_x(GaP)_y и составляет в нашем случае ~ 30 мкм. Сдвиг чувствительности структуры после радиационного облучения, возможно, обусловлен возникновением радиационных дефектов, приводящие к уменьшению времени жизни неравновесных носителей заряда.

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

МЕЖПРИМЕСНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТОМОВ СЕРЫ С ЭЛЕМЕНТАМИ II ГРУППЫ В КРЕМНИИ

Т. У. Тошбоев, У. А. Усманов

Самаркандский государственный университет им. А. Навои, Узбекистан

Межпримесное взаимодействие атомов серы с элементами II группы в кремнии с образованием электронейтральных химических молекул, с уточнением их структуры, зарядового состояния, стабильности, а также влияния на деградационные свойства материала изучали на образцах монокристаллического кремния, выращенного по методу Чохральского, марки КДБ с концентрацией бора $N=5 \cdot 10^{15} \text{см}^{-3}$, исходной концентрации кислорода $N=5 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$ и содержанием углерода $N=3,5 \cdot 10^{16} \text{см}^{-3}$. На основе анализа электрических и рекомбинационных параметров образцов, легированных как одновременно, так и последовательно быстродиффундирующие примеси (БДП) и атомами серы, однозначно установлено, что при температурах, равных $T_{\text{эфф}}$, практически весь примесные атомы образуют электронейтральные химические молекулы. Так после отжига при $T_{\text{эфф}}$, соответствующих температурам образования химических молекул БДП с атомами серы, электрические параметры образцов приобретают свои первоначальные значения, а время жизни неосновных носителей тока не только восстанавливается, но и заметно возрастает. Интересные результаты получены после повторного термоотжига образцов кремния, в которых образовались молекулы атомов серы и БДП. Так независимо от времени отжига, при температурах, меньших $T_{\text{эфф}}$, генерация термодоноров в образцах, дополнительно легированных серой полностью отсутствуют, т.е. электрофизические параметры этих образцов сохраняют свои первоначальные значения без существенных изменений вплоть до $T_{\text{эфф}}$. В таблице приведены температуры наиболее эффективного взаимодействия серы с БДП и максимальные температуры, до которых при термоотжиге остаются неизменными исходные параметры образцов монокристаллического кремния.

Элемент	Тип	Материал	$T_{\text{эфф}}, ^\circ\text{C}$	Область стабильности, $^\circ\text{C}$
Cd	A	Si<B,S,Cd>	715 – 725	< 730
Zn	A	Si<B,S,Zn>	1075 – 1085	< 1090
Co	A	Si<B,S,Co>	770 – 780	< 800

Резюмируя полученные экспериментальные результаты, можем отметить, что для повышения стабильности параметров кремния необходимо предварительное легирование его серой до ее предельной растворимости с последующим термоотжигам при эффективных температурах комплексообразования, до полного насыщения объема кремния электронейтральными химически связанными с БДП молекулами серы.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент Т. У. Тошбоев.

ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРОННОГО СРОДСТВА И КВАНТОВОГО ВЫХОДА ФОТОЭМИССИИ ПРИ АДСОРБЦИИ ЦЕЗИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ GaAs(001)

М. Л. Савченко

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Новосибирский государственный университет

Поверхность GaAs(001) с адсорбированными слоями цезия представляет научный интерес, как модельная система металл-полупроводник, и имеет практическое значение, как основа полупроводниковых фотокатодов. Несмотря на многолетние исследования системы Cs/GaAs, вопрос о влиянии состава и структуры исходной чистой поверхности GaAs(001) на эволюцию электронного сродства (которое определяет квантовый выход фотоэмиссии) при адсорбции цезия, изучен недостаточно. В данной работе методом спектроскопии квантового выхода фотоэмиссии исследована эволюция электронного сродства при адсорбции цезия на поверхность GaAs(001) с различным соотношением галлия и мышьяка. Эксперименты проводились в сверхвысоковакуумной установке, на сильнолегированных слоях p^+ -GaAs.

Для детального измерения эволюции электронного сродства по спектральному порогу фотоэмиссии производилось измерение спектров при непрерывном нанесении цезия. В результате получался двумерный массив величин сигнала как функция энергии фотонов и времени. Интерполяцией полученного массива данных получались спектры квантового выхода, которые соответствуют любому заданному моменту времени и, следовательно, заданному цезиевому покрытию [1].

Установлено, что величина сродства уменьшается при малых покрытиях цезия, проходит через минимум около половины монослоя и затем увеличивается. На Ga-обогащенной поверхности величина сродства в минимуме на 120 мэВ больше, чем на As-обогащенной поверхности. Этот результат противоречит предположению, что более упорядоченная адсорбция цезия на Ga-обогащенную поверхность [2] должна приводить к более сильному снижению электронного сродства. Обсуждаются возможные причины этого противоречия.

-
1. A. G. Zhuravlev et al. J. Phys.: Condens. Matter 22, 185801(5pp), 2010.
 2. O. E. Tereshchenko et al., Phys. Rev. B 71, 155315 (2005).

Научные руководители – д-р физ.-мат. наук, проф. В. Л. Альперович,
канд. физ.-мат. наук А. Г. Журавлев.

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ С БЕЛЫМ СВЕЧЕНИЕМ НА БАЗЕ АЛМАЗНЫХ ПЛЕНОК, ВЫРАЩЕННЫХ CVD-МЕТОДОМ НА РАЗЛИЧНЫХ ПОДЛОЖКАХ

Т. М. Салиев, Н. Т. Муталов
Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз,
г. Ташкент, Узбекистан

Эпитаксиальные пленки алмаза, полученные на различных подложках, являются наиболее интересными объектами для науки и техники. Потому что они обладают уникальными полупроводниковыми свойствами и являются весьма перспективным материалом для производства различных полупроводниковых приборов. Их можно применить в оптоэлектронике, в осветительных системах белого света и в других отраслях, способных работать в экстремальных условиях. К тому же эпитаксиальные пленки алмаза, полученные на различных подложках намного дешевле и доступнее, чем его объемные кристаллы.

В последнее время во всем мире бурно развивается производство светодиодных осветительных систем, в которых в основном, используются светодиоды с белым свечением. Светодиоды с белым свечением, в основном, изготавливаются с применением гетероструктур с двумя или тремя $p-n$ -переходами, либо на основе гетероструктур, получаемых на базе дорогого нитрида галлия и его твердых растворов с применением белого люминофора. Однако, технология изготовления белых светодиодов с двумя или тремя $p-n$ -переходами, а также с люминофором очень трудоемкая и дорогая.

Следовательно, насущной проблемой производства белых светодиодов остается получение белого свечения на базе одной структуры без люминофора. В этом смысле создание светодиодных структур на базе эпитаксиальных алмазных пленок является важным и наиболее интересным направлением науки и техники.

В этом направлении нами был проведен ряд экспериментов и показана возможность получения светодиодных структур с белым свечением на основе алмазных пленок, выращенных CVD-методом на различных подложках.

Работа выполнена в рамках гранта ГНТП (А-3-ФА-0-20256) АН РУз.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. И. Г. Атабаев.

РОСТ И ИССЛЕДОВАНИЕ CdS СЛОЕВ НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

И. Б. Сапаев

Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз,
г. Ташкент, Узбекистан

В данной работе приводятся результаты исследований $n^+CdS-nCdS-nSi$ гетероструктуры. Такие гетероструктуры были созданы путем напыления порошков CdS в квазизамкнутой системе в вакууме 10^{-5} торг на поверхность пластинки кремния n-типа с $\rho \approx 15 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и толщиной 300-400 $\mu\text{м}$. Приведенные исследования при помощи микроскопа МИИ-4 показывают, что пленки CdS состоят из столбчатых кристаллитов (зерен), размер которых составляет $\approx 3-5 \mu\text{м}$ и они полностью охватывают всю толщину пленки $\approx 2 \mu\text{м}$. Сильно легированный n^+CdS слой с толщиной в порядке 50 \AA формировался путем вакуумного напыления атомов индия (In) на поверхность пленки CdS.

Спектральное распределение фототока такой структуры показывает, что между CdS и Si создается эффективный гетеропереход и оно состоит из двух частей, которое спектральный диапазон простирается от $\lambda \approx 500 \text{ nm}$ до $\lambda \approx 1250 \text{ nm}$ (рис.1).

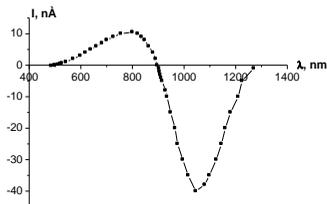


Рис.1. Спектральное распределение фототока $n^+CdS - nCdS - nSi$ гетероструктуры.

В первой и второй частей спектрального распределения фототок имеет разные полярности, что и обусловлено с обратным включением барьеров, созданные между $n^+CdS - nCdS$ и $nCdS - nSi$.

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

ЖИДКОФАЗНАЯ ЭПИТАКСИЯ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{GaP})_x$ НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

Д. В. Сапаров

Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз,
г. Ташкент, Узбекистан

Для получения качественных, но недорогих полупроводниковых приборов необходимо разработать технологии выращивания эпитаксиальных пленок дорогих полупроводниковых соединений A^3B^5 , в частности GaAs и GaP на дешевые Si-подложки. Из-за большого различия коэффициентов термического расширения, а также параметров решеток подложки и выращиваемой эпитаксиальной пленки, такое гетероэпитаксиальное выращивание пленок сопряжено большими техническими трудностями. При выращивании эпитаксиальных пленок GaP непосредственно на Si-подложки, в пленке образуются множество дефектов, которые делают эти пленки негодными для технического применения. Для устранения этого недостатка, мы решили использовать буферный слой, расположенный между Si-подложкой и пленкой GaP. Буферный слой состоит из твердого раствора замещения $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{GaP})_x$ ($0 \leq x \leq 1$), у которого состав плавно изменяется от чистого Si до GaP по мере

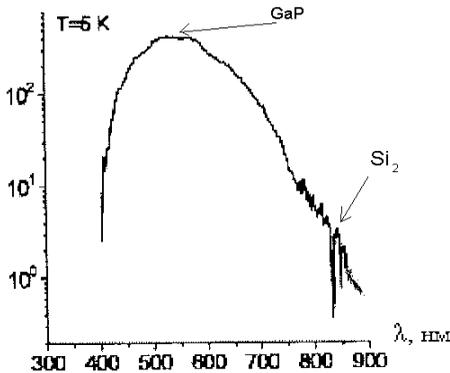


Рис. 1. Фотолуминесценция pSi-n(Si_2)_{1-x}(GaP)_x гетероструктуры, измеренная при 5К.

наращивание пленки. Основываясь на результатах анализа литературных и предварительно полученных экспериментальных данных, можно сказать, что Si₂ и GaP образуют непрерывный твердый раствор замещения. На рис.1 приведена спектр фотолуминесценции гетероструктуры pSi-n(Si_2)_{1-x}(GaP)_x. Как видно из рисунка молекулы кремния в GaP дают уровень в длинноволновой области спектра, соответствующий энергии 1,47эВ.

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

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ ГЕРМАНИЯ

В. Г. Сатдаров, Е. А. Калинин, К. А. Лозовой
Томский государственный университет

В настоящее время основными объектами исследований оптоэлектроники становятся сложные гетероструктуры с квантовыми ямами, нитями, точками. Особое внимание уделяется системе материалов Ge/Si с квантовыми точками (КТ) Ge, являющимися перспективными для создания фотопреобразователей. Повышение эффективности устройств на основе наногетероструктур Si с КТ Ge возможно благодаря эффектам пространственного квантования [1, 2]. Методы вольт-амперных характеристик (ВАХ), вольт-фарадных характеристик (ВФХ), адмиттансной спектроскопии, нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS), обладают большими потенциальными возможностями для характеристики полупроводниковых квантоворазмерных структур [2, 3].

В работе [2] исследовались ВФХ и DLTS-спектры структур Si/Ge с КТ Ge. Из ВФХ, измеренных при 77 К и при комнатной температуре, определены концентрационные профили носителей заряда в структурах, максимумы которых соответствуют ожидаемому положению слоев КТ. Концентрационные профили позволяют также определить заряд, накопленный в КТ. Из DLTS-спектров определены энергии активации уровней в КТ. Найденные значения лежат в пределах 250-280 мэВ.

В данной работе показана возможность исследования электрофизических параметров структур Si/Ge с КТ Ge – ВАХ, ВФХ, частотных и температурных зависимостей емкости и проводимости – на автоматизированной установке спектроскопии адмиттанса в широких пределах температур (10-475 К), приложенных внешних смещений (± 40 В) и частот тестового сигнала (20-2000 Гц). Определяются параметры наноструктур, такие как концентрация носителей заряда, ширина области объемного заряда, параметры локальных энергетических уровней и уровней квантования.

-
1. Шкляев А. А., Ичикава М. // УФН178 (2008) 139-169
 2. Feklisova O. V. et al. // Physica B 404 (2009) 4705-4707
 3. Зубков В. И. // Приложение к журналу «Вестник РГРТУ». –2009.– № 4

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

ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕНСОРОВ H_2S НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК SnO_2 С ДОБАВКАМИ Ni И Au

Н. В. Сергейченко, Г. Р. Золоторева
Томский государственный университет

Сероводород является одним из токсичных газов, который присутствует в выбросах целого ряда предприятий добывающих и перерабатывающих отраслей. Предельно допустимая концентрация (ПДК) H_2S в воздухе рабочей зоны составляет 7 ppm. Поэтому необходима разработка миниатюрных быстродействующих сигнализаторов для селективного детектирования сероводорода в воздухе.

Для решения этой задачи наиболее перспективно использование металлооксидных полупроводников, в частности, тонких пленок диоксида олова с различными катализаторами. В настоящей работе исследованы характеристики тонких пленок SnO_2 с добавками никеля и золота в объеме и на поверхности в зависимости от рабочей температуры и концентрации сероводорода. Плёнки получали магнетронным распылением на постоянном токе в кислородно-аргонной плазме мишени, которая представляет собой сплав олова с сурьмой в количестве 0.5 ат. %. с закрепленными на ее поверхности кусочками золота и никеля. В качестве подложки использовали пластины сапфира толщиной ≈ 150 мкм. На каждой пластине формировали до 300 шт. чувствительных элементов площадью 1.5×1.5 мм. Готовые пластины разрезали на отдельные элементы и затем сенсоры собирали в стандартные корпуса типа ТО-8. За отклик принимали отношение G_1/G_0 , где G_1 и G_0 – проводимость сенсоров в смеси H_2S +воздух и в чистом воздухе, соответственно.

На основе измерения температурной зависимости отклика выбрана оптимальная рабочая температура сенсоров, которая составляет $330^\circ C$. Концентрационные зависимости отклика исследовали в диапазоне от 1 до 100 ppm сероводорода. Показано, что наблюдается рост отклика во всем исследованном интервале концентраций H_2S , то есть обеспечивается возможность детектирования газа в заданном диапазоне. Особое внимание было уделено изучению стабильности параметров сенсоров в процессе эксплуатации. Установлено, после испытаний в течение 70 суток сенсоры отличаются высокими значениями отклика $G_1/G_0=10-12$ на 4 ppm H_2S , время отклика не превышает 30 с.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Н. К. Максимова.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУННЕЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ В ЩЕЛЕВОМ И ПСЕВДОЩЕЛЕВОМ СОСТОЯНИИ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Г. И. Таранцев

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
г. Новосибирск

Некоторые квантовые явления, такие как слабая локализация и сверхпроводимость, проявляется в глобальных характеристиках системы. Особо актуальны вопросы об их взаимном влиянии. Наиболее остро это существование проявляется в двумерных системах, поскольку двухмерность является критической для обоих эффектов: в одномерных системах невозможно полноценное сверхпроводящее состояние, а в трехмерных системах отсутствует слабая локализация. Именно по этой причине наблюдается огромный экспериментальный и теоретический интерес к двумерным сверхпроводящим системам, а одним из самых актуальных вопросов в физике квазидвумерных сверхпроводников по сей день остаётся объяснение обнаруженного ещё в 1998 году сильного уменьшения плотности состояний в высокотемпературных сверхпроводниках при температурах выше критической, названное псевдощелью [1].

В недавней работе [2] было обнаружено это же явление в низкотемпературных сверхпроводниках и показано, что оно обусловлено квантовым вкладом сверхпроводящих флуктуаций в туннельную проводимость. Однако до сих пор не был проведён детальный анализ полученных туннельных спектров с учётом всех квантовых вкладов в туннельную проводимость.

В данной работе проведено детальное изучение эволюции плотности состояний в тонких сверхпроводящих плёнках при изменении их толщины и по мере приближения к переходу сверхпроводник-изолятор, а также изучена роль слабой локализации в формировании псевдощелевого состояния.

1. Ch. Renner, B. Revaz, J.-Y. Genoud, K. Kadowaki, O. Fischer, Pseudigap Precursor of the Superconducting Gap in Under- and Overdoped Bi₂Sr₂CaCu₂O₈, Physical Review Letters, 80 (1998)

2. B. Sacépé, C. Chapelier, T. Baturina., V. Vinokur, M.R. Baklanov, M. Sanquer, Nature Communications 1, 140 (2010)

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент Т. И. Батурина.

ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ МОДЕЛИ НА ВИД ДИАГРАММ ОСНОВНЫХ СОСТОЯНИЙ ПРИ УЧЕТЕ МНОГОЧАСТИЧНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МОДЕЛЬНОМ РЕШЕТОЧНОМ ГАЗЕ

М. М. Халяпкин

Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, г. Абакан

В связи с разработкой технологий получения новых материалов с особыми функциональными свойствами много внимания уделяется наноматериалам. Выполнен ряд физических исследований, прежде всего экспериментальных, однако ситуация далека от понимания закономерностей образования и поведения этих материалов.

Следует отметить, что накоплен большой опыт при исследовании политипных структур, которые представляют собой структуры с наномасштабами. Политипы могут выступать как объекты исследования влияния характера границ на особенности фазовых переходов в политипных структурах, что дает возможность понять закономерности образования и поведения структуры наномасштаба и выяснить общие особенности поведения наноструктур.

В данной работе в рамках одномерной модели решеточного газа было исследовано влияние размеров модели на вид диаграммы основных состояний (диаграммы стабильности фаз в пространстве энергетических параметров при температуре абсолютного нуля) с учетом многочастичного взаимодействия.

Увеличение размеров модели приводит к появлению новых стабильных структур. Независимо от числа узлов N стабилизируется устойчивая структура $15R_{1cc}$ двойниковыми модификациями. При размерах модели $N = 15, 16$ узлов данный политип, с увеличением рассматриваемого взаимодействия, стабилизируется в смеси со структурами $2H, 5H, 9R$ и $36R_{x7}$. Для $N = 13, 15$ узлов становится стабильной область смеси структур $(4H+6H_1)$ и $(4H+6H_2)$. Данное взаимодействие благоприятно для стабилизации структуры $12T_{x9}$ при $N=16$.

В результате исследования было выявлено, что размер модели влияет на образование стабильных структур и может играть существенную роль в стабилизации политипных структур, в том числе экспериментально наблюдаемых. Ряд предсказанных политипных наноструктур сопоставимы с политипными формами, наблюдающимися в кластерах карбида кремния типа $Si_xC_yH_z$ и в монокристалле $6H-SiC$.

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

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И ВАХ p-i-n- СТРУКТУР В УСЛОВИЯХ ИНГИБИРОВАНИЯ СКОРОСТИ РЕКОМБИНАЦИИ

М. М. Хашаев

Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз,
г. Ташкент, Узбекистан

Рассматривается диффузионный режим двойной инжекции в условиях, когда рекомбинация неравновесных носителей происходит через рекомбинационный комплекс типа мелкий донор + вакансия. Показано, что при определенном уровне возбуждения возможно насыщение скорости рекомбинации и ее последующее ингибирование, обусловленное уменьшением числа эффективно работающих рекомбинационных центров за счет возникновения новых дефект – примесных комплексов типа рекомбинационный центр + вакансия. В результате распределение концентрации неравновесных носителей принимает вид:

$$p = \frac{N_R}{\alpha} - C_1 \cos(\sqrt{\omega}x) - C_2 \sin(\sqrt{\omega}x),$$

где C_1 и C_2 – постоянные определяемые граничными концентрациями на p-n- и n-n⁺-переходах, $\omega = \frac{\alpha \cdot c_{n1}c_{p2}}{c_{12}}$ – частота распределения

концентрации неравновесных носителей, α - безразмерный коэффициент, описывающий возможность изменения концентрации эффективно работающих рекомбинационных центров $N_{R_{eff}}$, c_{n1} , c_{p2} , – коэффициенты захвата электронов и дырок на уровне рекомбинационного комплекса, c_{12} - коэффициент внутрикомплексного обмена свободными носителями. Коэффициенты C_1 и C_2 , определяемые граничными условиями могут быть либо прямо пропорциональны току I или (при идеальных контактах), либо пропорциональны \sqrt{I} (при неидеальных контактах). В результате падение напряжения на базе имеет вид:

$$V \approx \frac{I \cdot \alpha \cdot d}{q \cdot \mu_p (b + 1) N_R} \left(1 + \frac{\alpha}{N_R} \frac{c_1}{\sqrt{\omega}} \sin(\sqrt{\omega}d) \right),$$

т.е. появляется периодическая добавка. В рассматриваемой модели частота распределения концентрации неравновесных носителей ω может легко меняться с изменением температуры и тока.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ BiTeI и BiTeCl

И. К. Храповицкий

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Новосибирский государственный университет

Интерес к изучению полупроводниковых соединений BiTeI и BiTeCl связан с наличием спин-расщепленных поверхностных и объёмных состояний в зоне проводимости этих материалов, обусловленных эффектом Рашбы. Данные полупроводники имеют слоистую структуру без центра инверсии, состоящую из последовательности трех плотноупакованных слоев атомов Bi, Te и I (Cl), разделенных между собой относительно слабыми силами Ван-дер-Ваальса. Внутри слоя атомы имеют ковалентно-ионную связь. Благодаря этому, в этих материалах можно ожидать двумерную проводимость вдоль слоёв кристалла. Так же данные полупроводники перспективны для наблюдения спиновых эффектов в транспорте заряда. В настоящий момент электрофизические свойства данных соединений плохо изучены.

Целью работы является изучение транспортных свойств и механизмов рассеяния носителей заряда в полупроводниковых соединениях BiTeI и BiTeCl .

В работе изучены температурные зависимости подвижности, проводимости и концентрации носителей заряда в диапазоне 4.2–300 К для образцов BiTeI , $\text{BiTeI}+2\%\text{Mn}$ и BiTeCl . Данные кристаллы имели n-тип проводимости со значениями констант Холла $R_H \approx -2 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{Кл}$. Концентрация электронов в кристаллах не изменялась во всем исследуемом диапазоне температур и составляла $n \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что указывает на вырожденность данных полупроводниковых соединений. Показано, что подвижность электронов в BiTeCl слабо меняется в температурном интервале 4.2К–40 К и равна $\mu = 1750 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, тогда как в диапазоне 80–300 К пропорциональна T^{-x} , где $x \leq 1$, что может быть обусловлено рассеянием 2D электронов на колебаниях решетки.

Научные руководители – канд. физ.-мат. наук, доцент О. Е. Терещенко, канд. физ.-мат. наук, доцент О. А. Шегай.

ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ СИЛЕНИТОВ ПРИ ЗАСВЕТКЕ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 1064 НМ

Е. С. Худякова¹, Т. А. Корниенко²

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

²Белорусский государственный университет, г. Минск

Ранее в [1] было получено, что воздействие импульсного лазерного излучения с длиной волны 1053 нм на кристаллы силиката висмута ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, BSO) при комнатной температуре приводит к уменьшению его оптического поглощения в спектральном диапазоне 490-900 нм. Эти изменения в поглощении сохранялись в течение нескольких недель.

В настоящем сообщении представлены результаты экспериментальных исследований и численной аппроксимации спектров оптического поглощения в диапазоне 400–1100 нм в нелегированном кристалле BSO толщиной 2,64 мм, подвергнутом засветке лазерными импульсами с длиной волны 1064 нм и длительностью ~10 нс. При частоте следования $F=1$ кГц средняя интенсивность излучения засветки составляла ~110 мВт/см², а при $F=10$ кГц она достигала значения ~364 мВт/см²; её продолжительность варьировалась в диапазоне от 15 до 45 минут.

Получено, что для исследованных образцов кристаллов BSO просветление уверенно наблюдается при частоте следования засвечивающих импульсов $F=10$ кГц и дозе ~870 кДж/см². Данные фотоиндуцированные изменения сохранялись в темновых условиях в течение более чем 10 дней. Быстрая релаксация оптического поглощения облученного образца BSO к исходному состоянию происходила в течение всего 5 минут, при его засветке видимым излучением с длиной волны 660 нм и со средней интенсивностью 1,6 мВт/см². Характерно, что мы не обнаружили значительных изменений в спектре оптического поглощения кристалла BSO после облучения его лазерными импульсами с частотой следования 1 кГц для дозы, достигающей значения ~855 кДж/см².

Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки РФ на 2012 г. (проект № 7.2647.2011) и при поддержке РФФИ и БРФФИ (грант № 12-02-90038-Бел_а).

1. M.G. Kisteneva, A.S. Akrestina, S.M. Shandarov, et al. // Journal of Holography and Speckle. – 2009. – V. 5, № 3. – P. 280 – 285.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент М. Г. Кистенева.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ

В. В. Цыренов

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
Новосибирский государственный университет

Исследование возможности применения спиновой степени свободы для квантовых вычислений и для создания приборов нового поколения является актуальной задачей современной физики. Основными требованиями для создания подобных устройств являются: длительное время хранения информации, а также возможность управления спином с помощью света, электрического поля или тока. Полупроводниковые структуры с квантовыми точками (КТ) являются наиболее перспективными для этих целей, поскольку локализация электрона в данной системе происходит в кремнии, где времена спиновой релаксации наиболее длительны, а асимметрия локализирующего потенциала обеспечивает появление дополнительных возможностей для управления спинами электронов. Цель данной работы заключается в исследовании методом ЭПР локализации электронов в многослойных структурах с различными расстояниями между слоями КТ. Методом ЭПР исследованы структуры с двойными слоями КТ с шириной прослоек кремния $d=2$ нм, $d=3$ нм, $d=4$ нм. Структура с $d=2$ нм оказалась оптимальной для локализации электронов долин Δ^{100} и $\Delta^{\bar{1}00}$ вблизи ребер оснований Ge/Si КТ. Обнаружен соответствующий сигнал ЭПР с аксиально-симметричным g -фактором ($g_{\parallel}=1.9984$, $g_{\perp}=1.9989$). В структуре с $d=3$ нм ЭПР сигнал состоит из двух близко расположенных перекрывающихся ЭПР-линий с $g=2.0004$ и $g=1.9994$. Первый сигнал мы относим к электронам, локализованным вблизи внешней границы двойного слоя КТ, второй сигнал дают электроны, локализованные внутри двойного слоя вблизи вершин КТ. В структуре с $d=4$ нм ЭПР сигнал от слоев с КТ представляет собой одиночную линию с практически изотропным g -фактором $g=1.9992$. Данный сигнал мы связываем с электронами, локализованными в кремнии внутри двойного слоя КТ. На структуре с $d=2$ нм было обнаружено изменение ширины ЭПР линии при подсветке с $\Delta H=1.6$ Гс до $\Delta H=2.1$ Гс. Данное уширение ЭПР линии мы связываем с электрон-дырочным обменным взаимодействием. Оценки величины обменного взаимодействия на основе экспериментального уширения дают значение $J=0,1 \mu\text{eV}$.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук А. Ф. Зиновьева.

ФАЗОВЫЕ ДИАГРАММЫ ОДНОМЕРНОГО ИЗИНГОВСКОГО МАГНЕТИКА

Е. В. Шабунина, М. Е. Шабунин

Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова, г. Абакан

Построение фазовых диаграмм является универсальным методом позволяющим определить, сколько и какие конкретно фазы образуют систему при данных значениях параметров состояния. В магнитных системах интерес представляют диаграммы, на осях которых откладываются энергетические параметры.

В отличие от диаграмм основных состояний (диаграмм стабильности фаз при температуре абсолютного нуля), фазовые диаграммы одномерных магнитных изинговских систем в осях энергетических параметров изучены слабо.

Исследованы диаграммы в осях значений энергии взаимодействия во второй координационной сфере J_2 $[-5;5]$ и напряженности внешнего магнитного поля H $[-5;5]$ (параметры J_2 и H в безразмерных единицах), при этом поле увеличиваем от -5 . Образец с определенной обменной энергией вначале испытывает переход из антиферромагнитной фазы в ферромагнитную, затем в каждой точке диаграммы отображается результат процесса перехода системы в состояние с новым параметром поля, а за начальную конфигурацию берется предыдущая точка диаграммы для данного J_2 .

При переходе к фазовым диаграммам наблюдалось смещение границ областей и появление новых фаз по сравнению с диаграммами основных состояний. Например, для всех размеров систем при низкой температуре происходил рост одной из смежных ферромагнитной фазы за счет фазы с противоположным результирующим моментом. Этот эффект можно объяснить запаздыванием в перестройке магнитной структуры при увеличении внешнего магнитного поля, ведь начальными при $H=0$ являются конфигурации, когда все спины направлены вниз, что является метастабильным состоянием при положительной напряженности внешнего магнитного поля. Для выхода из метастабильного состояния значительного процента конфигураций необходимо либо увеличение температуры системы, либо сильное магнитное поле. В результате, при низких температурах наблюдается значительное запаздывание при переходе из ферромагнитной фазы с результирующим магнитным моментом, направленным вниз, в фазу со спинами, направленными вверх.

Научный руководитель – д-р физ.-мат., проф. В. Н. Удодов.

ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕЛЛУРОГАЛОИДОВ ВИСМУТА BiTeCl И BiTeI

А. Р. Шахмаметова

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Новосибирский государственный университет

Теллуругалоидные соединения BiTeCl и BiTeI – малоизученные полупроводниковые соединения, к которым в последнее время возрос интерес в связи с обнаружением в них эффекта Рашбы – эффекта снятия вырождения по спину. Эффект Рашбы лежит в основе идеи создания одного из перспективных приборов спинтроники – спинового полевого транзистора, и поэтому интересен как с экспериментальной, так и с теоретической точки зрения.

Структура этих соединений имеет слоистую природу, причем межслоевая связь типа Ван-дер-Ваальса значительно слабее ионных связей внутри слоя. Ввиду этого, предполагается, что систему можно рассматривать как 2D-электронный газ с выраженным эффектом расщепления Рашбы в объеме.

Главной задачей этой работы является изучение оптических свойств BiTeCl и BiTeI . В ходе работы применялись методы спектральной эллипсометрии, ИК-спектроскопии и комбинационного рассеяния света.

Методом спектроскопической эллипсометрии в диапазоне 250-900 нм были измерены и сопоставлены с теоретическими расчетами дисперсионные зависимости коэффициентов поглощения и преломления. В ультрафиолетовой (УФ) области на фоне относительно постоянного коэффициента поглощения наблюдается заметный спад коэффициента преломления n , в связи с чем можно предположить увеличение вероятности оптических переходов в УФ области по сравнению с ИК. Методом ИК-спектроскопии получены спектры отражения BiTeCl и BiTeI . Метод комбинационного рассеяния света позволил проанализировать характер колебаний кристаллической решетки этих соединений. В частности, были выявлены поперечные моды колебаний $A_{1(\text{TO})}$ и $E_{(\text{TO})}$ для BiTeCl , продольная $A_{1(\text{LO})}$ и поперечная $E_{(\text{TO})}$ моды колебаний – для BiTeI .

В настоящее время проводится эксперимент по исследованию соединений BiTeCl и BiTeI методом электроотражения с целью изучения их зонной структуры.

Научные руководители – канд. физ.-мат. наук О. Е. Терещенко, канд. физ.-мат. наук И. Б. Чистохин.

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА InAs/ОКСИД, ПРИГОТОВЛЕННОЙ В ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ

А. Ю. Широков

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Новосибирский государственный университет

Граница раздела диэлектрик/АЗВ5 используется для создания большого количества полупроводниковых приборов. В частности, структуры металл – диэлектрик – полупроводник на арсениде индия применяются в качестве фотоприемных элементов среднего инфракрасного диапазона ($\lambda \sim 3\text{мкм}$). Собственные оксиды полупроводников АЗВ5, получаемые термическим или плазменным окислением, имеют сложный, часто нестехиометрический состав и характеризуются большой величиной встроенного заряда, высокой плотностью поверхностных состояний (N_{ss}) и гистерезисом вольт-фарадных характеристик. В связи с этим, актуальной задачей является разработка контролируемого сухого окисления поверхности полупроводникового соединения InAs(111)A.

Целью данной работы является разработка способа анодного сухого окисления InAs в плазме таунсендовского и тлеющего разрядов для формирования тонких ($< 5\text{нм}$) анодных слоев (ТАС), а также изучение влияния фтора на физико-химические свойства этих слоев и электрофизические параметры границы раздела ТАС/InAs. Толщина и оптические свойства пленок контролировалась методами сканирующей и спектроскопической эллисометрии. Электрофизические параметры Au/ТАС(3-20нм)/InAs(111)АМДП-структур изучались методами ВАХ и проводимости на переменном сигнале. Для изучения условий горения разряда были проведены измерения кривой Пашена для смеси газа (20% – O_2 , 80% – Ar), в которой проводилось окисление.

В работе исследована скорость роста собственного оксида InAsот условий горения разряда и времени экспозиции. Показано, что до 30 нм толщина оксида является линейной функцией прошедшего через границу раздела разряда. Изучено влияние CF_4 в газовой смеси на скорость роста и плотность поверхностных состояний. Показано, что добавление фтора к газовой смеси позволяет получить $N_{ss} \leq 6 \cdot 10^{10} \text{см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$.

Научные руководители – канд. физ.-мат. наук О. Е. Терещенко,
канд. хим. наук Н. А. Валишева.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ.....	5
А. И. Гончаренко.....	5
К. А. Гревцов.....	6
О. А. Коваленко.....	7
Е. А. Козырев.....	8
М. В. Козюлин.....	9
А. А. Коробов.....	10
П. А. Крачков.....	11
А. С. Купич.....	12
Т. В. Мальцев.....	13
В. П. Олейников.....	14
Г. П. Разуваев.....	15
Е. В. Рогозина.....	16
И. В. Фартушев.....	17
Т. А. Харламова.....	18
А. Л. Хуснулина.....	19
КВАНТОВАЯ ОПТИКА И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА	20
Д. А. Анохин.....	20
А. А. Гольшев.....	21
О. В. Егоров.....	22
Р. Я. Ильенков.....	23
А. Ю. Искандаров.....	24
А. А. Каргашева, А. В.Рязанов.....	25
С. Н. Кузнецов.....	26
А. Д. Кырмагенов.....	27
Д. Б. Лазебный.....	28
А. М. Мухамадеева.....	29
И. У. Надинов.....	30
А. С. Новокрещенов.....	31
А. С. Осокин, Н. Ю. Духовникова, А. А. Бойко.....	32
А. С. Петухов.....	33
М. О. Политко.....	34
К. Д. Потешкина.....	35
К. С. Табатчикова.....	36
А. М. Тикан.....	37
Е. Ю. Храмова.....	38
С. А. Щербанев.....	39
ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА	40
З. К. Аллаярова.....	40

К. А. Амонов.....	41
И. В. Анкудинов.....	42
A. S. Achilov.....	43
В. В. Вальковский.....	44
И. А. Верхушин.....	45
П. В. Винокуров.....	46
В. А. Голяшов, А. В. Бакулин.....	47
А. Н. Гребенчуков.....	48
А. А. Добрецова.....	49
А. К. Дроздова, О. С. Букина.....	50
Е. Р. Закиров.....	51
Е. С. Ивашко.....	52
Е. В. Илюшина.....	53
А. Б. Каршиев.....	54
Е. А. Киселева.....	55
С. С. Кобылкин.....	56
Д. И. Кошелев.....	57
Д. С. Мисерев.....	58
Е. С. Мухаметкаримов.....	59
А. С. Петров.....	60
А. А. Пищагин, В. Г. Сатдаров, И. А. Зятиков.....	61
А. А. Попов.....	62
У. Х. Рахмонов.....	63
Т. У. Тошбоев, У. А. Усманов.....	64
М. Л. Савченко.....	65
Т. М. Салиев, Н. Т. Муталов.....	66
И. Б. Сапаев.....	67
Д. В. Сапаров.....	68
В. Г. Сатдаров, Е. А. Калинин, К. А. Лозовой.....	69
Н. В. Сергейченко, Г. Р. Золоторева.....	70
Г. И. Таранцев.....	71
М. М. Халыпкин.....	72
М. М. Хашаев.....	73
И. К. Храповицкий.....	74
Е. С. Худякова, Т. А. Корниенко.....	75
В. В. Цыренов.....	76
Е. В. Шабунина, М. Е. Шабунин.....	77
А. Р. Шахмаметова.....	78
А. Ю. Широков.....	79

МАТЕРИАЛЫ
51-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ
СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

«Студент и научно-технический прогресс»

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Материалы конференции публикуются в авторской редакции

Подписано в печать 03.04.2013 г.

Офсетная печать

Заказ № _____

Формат 60x84/16

Уч.-изд. л. 5,2. Усл. печ. л. 4,9.

Тираж 125 экз.

Редакционно-издательский центр НГУ
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2