

**НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ПРАВИТЕЛЬСТВО НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ**

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

**МНСК–2016**

**16–20 апреля 2016 г.**

**КВАНТОВАЯ ФИЗИКА**

Новосибирск  
2016

УДК 53  
ББК 22.3+32

Материалы 54-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2016: Квантовая физика / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2016. 85 стр.

ISBN 978-5-4437-0488-3

Конференция проводится при поддержке Сибирского отделения Российской академии наук, Правительства Новосибирской области, инновационных компаний России и мира, Ассоциации выпускников «СОЮЗ НГУ».

**Научный руководитель секции –**

член.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф. Латышев А. В.

**Председатель секции –** д-р физ.-мат. наук, проф. Тайченайчев. А. В.

**Ответственный секретарь секции –** канд. физ.-мат. наук Блошкин А. А

**Экспертный совет секции:**

д-р физ.-мат. наук, проф. Альперович В. Л.  
д-р физ.-мат. наук, проф. Ильичев Л. В.  
д-р физ.-мат. наук, проф. Квон Зе Дон Д. Х.  
д-р физ.-мат. наук, доцент Рябцев И. И.  
д-р физ.-мат. наук, проф. Чаповский П. Л.  
д-р физ.-мат. наук, проф. Эйдельман С. И.  
канд. физ.-мат. наук, доцент Бетеров И. И.  
канд. физ.-мат. наук Бражников Д. В.  
канд. физ.-мат. наук Исламов Д. Р.  
канд. физ.-мат. наук, доцент Петров В. В.

ISBN 978-5-4437-0488-3

© Новосибирский государственный  
университет, 2016

**NOVOSIBIRSK STATE UNIVERSITY  
SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES  
NOVOSIBIRSK OBLAST GOVERNMENT**

**PROCEEDINGS  
OF THE 54th INTERNATIONAL STUDENTS  
SCIENTIFIC CONFERENCE**

**ISSC-2016**

**April, 16–20, 2016**

**QUANTUM PHYSICS**

**Novosibirsk, Russian Federation  
2016**

Proceedings of the 54<sup>th</sup> International Students Scientific Conference.  
Quantum Physics / Novosibirsk State University. Novosibirsk, Russian  
Federation. 2016. 85 pp.

ISBN 978-5-4437-0488-3

The conference is held with the significant support of Siberian Branch of  
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk Oblast Government, innovative  
companies of Russia, NSU Alumni Union.

**Section scientific supervisor –**

Corr. Memb. RAS, Dr. Phys.Math, Prof. Latyshev A. V.

**Section head –** Dr. Phys.-Math., Prof. Taichenachev A. V.

**Responsible secretary –** Cand. Phys.-Math. Bloskin A. A.

**Section scientific committee**

Dr. Phys.-Math., Prof. Ilyichev L. V.

Dr. Phys.-Math., Prof. Chapovsky P. L.

Cand. Phys.-Math., Assoc. Prof. Beterov I. I.

Cand. Phys.-Math., Assoc. Prof. Petrov V. V.

Cand. Phys.-Math. Brazhnikov D. V.

Dr. Phys.-Math. Ryabtsev I. I.

Dr. Phys.-Math., Prof. Kvon Ze Don

Dr. Phys.-Math., Prof. Alperovich V. L.

Cand. Phys.-Math. Islamov D.R.

Dr. Phys.-Math., Prof. Eidelman S. I.

## **The research of structure and allocation of elements at the surface of powder composite material of Aluminium Nickelide**

Kaznacheeva A. M., Toleugozhina S. T., Tusupzhanov A. Ye.,  
Sarsen Amanzholov East Kazakhstan State University, Ust-Kamenogorsk  
Siberian Federal University, Krasnoyarsk  
Multiple Access Centre, Krasnoyarsk Scientific Centre SB RAS

Nowadays improvement of mechanical characteristics and development of new synthesis routes of aluminium nickelide advanced composite material is the subject of numerous researches. Nickel aluminides and their intermetallics are the exotic materials which comply with strict operating requirements. However the scope of use is confined by insufficient ductileness.

It is of interest as heatproof material with relatively high heat resistance characteristics taking into account rather low density. Ductileness and durability of intermetallic aluminium nickelide can be increased by grain refining.

The most advanced methods, performance of which can make possible to solve many issues of high-tech sphere, are the methods of powder metallurgy.

Objective of this project is the research of structure and allocation of elements at the surface of sintered samples of aluminium nickelide powder for sintering technology development.

Samples of sintered composite material of aluminium nickelide were obtained by pressing blends of Ni and Al powders. Obtained samples were explored by methods of optical and scanning electron microscopy and X-ray diffractometry.

The research of structure and allocation of elements at the surface of sintered samples of aluminium nickelide powder with a size of several microns showed fine mutual solubility of Ni and Al during mechanical fusion under pressure.

Globules of aluminium nickelide with a size up to 2 microns were found out, so it gives evidence of mechanical fusion under pressure.

Disperse particles  $Al_2O_3$  distributed along sample were found out.

Cluster model of structure transformation from FCC lattice to BCC lattice by “shift-and-turn” mechanism was proposed.

Scientific advisers – Dr. Phys., Prof. Kveglis L. I.,  
Cand. Phys. Yerbolatuly D. Ye., Cand. Phys. Shabanov A. V.

**Magnetic structure of plastically deformed Fe<sub>86</sub>Mn<sub>12</sub>C alloy**

Makashina K. A., Ospanova Zh. N., Berdyugin A. A., Razumov N. I.,  
Kalimoldin E. E.

Sarsen Amanzholov East Kazakhstan State University, Ust-Kamenogorsk

The aim of the work - to study the crystal and magnetic structure of bulk and thin film state of this alloy, subjected plastic deformation, as well as analyzing the thermoelectric power and features of the magneto resistance in Fe<sub>86</sub>Mn<sub>13</sub>C alloy.

During the work with Fe<sub>86</sub>Mn<sub>13</sub>C alloy samples was found unusual behavior of  $\gamma$ -resonance in the spectrum after the plastic deformation.

This abnormal shape of the spectrum can be explained by the peculiarities of the frustrated magnetic structure of the alloy samples.

These features may be associated with the redistribution of ferromagnetic and antiferromagnetic phases in Fe<sub>86</sub>Mn<sub>13</sub>C alloy samples.

Alloys form Fe-Mn-C are known as antiferromagnetic Invar, they have a complex magnetic order. There were used Mössbauer spectra for studying magnetic order.

As the Fe<sub>86</sub>Mn<sub>13</sub>C alloy sample becomes magnetic after plastic deformation, its spectral structure was supposed to be in the form of a sextet. However, the spectrum had a paramagnetic singlet. It can be concluded that in the absence of the expected spectrum, we can speak of a multivariate distribution of magnetic moments.

The iron atoms occupy two positions equally populated, indicating of low-spin state of iron metal.

One of the positions has no local distortion, while the second is a very distorted - or a shift of the atomic nuclei, or the shift of the electron shells.

The disappearance of spectrum may occur because of spin fluctuations of the hyperfine structure.

The disappearance of the hyperfine structure also can be caused by chemical reactions, due to fluctuations of the magnetic moments, as well as the spin-spin relaxation.

Fe<sub>86</sub>Mn<sub>13</sub>C alloy sample as a result of plastic deformation may have a magnetic structure such as a cluster spin glass or a frustrated magnetic structure in different proportions.

Fe<sub>86</sub>Mn<sub>13</sub>C alloy can has heterogeneous structure after deformation.

Scientific adviser – Dr. Phys. Prof. Kveglis L. I.

## Effect of annealing on exchange bias in $\text{Ni}_x\text{Mn}_{100-x}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ films

Moskalev Mikhail

Ural Federal University, Ekaterinburg

Systems exhibiting exchange bias have been widely used as a basis for magnetoresistive sensors and spin valves. Literature data has suggested a multilayered film with an antiferromagnetic Ni-Mn layer as a very promising system capable of maintaining exchange bias at high temperatures. This feature has been crucial for employing exchange biased samples in a wide temperature range. Unfortunately, as-deposited Ni-Mn films haven't shown the antiferromagnetic order, hence the experiment of searching for optimal obtaining parameters.

A series of Ta/Ni-Mn(20nm)/Fe<sub>20</sub>Ni<sub>80</sub>(40nm)/Ta films obtained by means of magnetron sputtering has been studied. The specimens has undergone the procedure of a one hour-long vacuum annealing at  $T_A = 300\div 500^\circ\text{C}$ . A Kerr-microscope has been used to determine the shift of the hysteresis loop – a parameter characterizing exchange bias.

Fig. 1 shows some results of the experiment. The as-deposited specimens haven't exhibit any exchange bias, unlike the annealed ones.

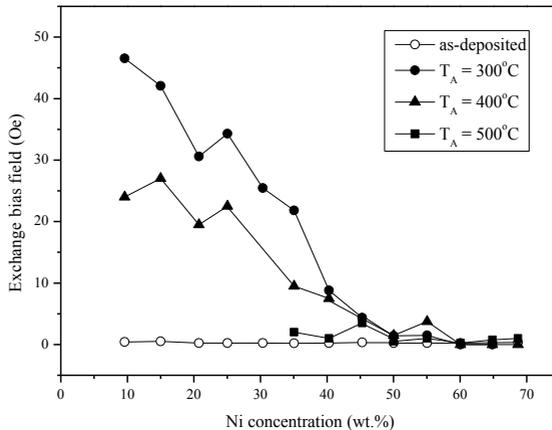


Fig. 1. Dependences of the exchange bias field on the Ni concentration in the Ni-Mn layer.

Taking into account our objective, we have made the conclusion that relatively low Ni concentrations (10÷30%) and annealing at 300°C have proven themselves as the most suitable parameters.

Scientific advisor – Cand. Phys. Math. Lepalovskij Vladimir

## Влияние ультразвукового облучения на Вольт-амперные характеристики инжекционного фотодиода на основе $\text{In-n}^+\text{CdS-nCdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-pZn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te-Mo}$ структуры

Атабоев О. К., Герасименко С.

Физико-технический институт, г. Ташкент, Узбекистан

В данной работе исследуется влияние ультразвукового облучения на темновые вольт-амперные характеристики инжекционного фотодиода на основе  $\text{In-n}^+\text{CdS-nCdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-pZn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te-Mo}$ -гетероструктуры. Для проведения исследования были изготовлены гетероструктуры по технологии, описанной в работе [1]. Ультразвуковое облучение проводилось на частоте 1.2 МГц с мощностью  $P=0.5-1$  Вт/см<sup>2</sup> в течение 15 минут.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ)  $\text{In-n}^+\text{CdS-nCdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-pZn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te-Mo}$ -гетероструктуры измерялись в темноте при комнатной температуре до (а) и после (б) УЗО (Рис. 1).

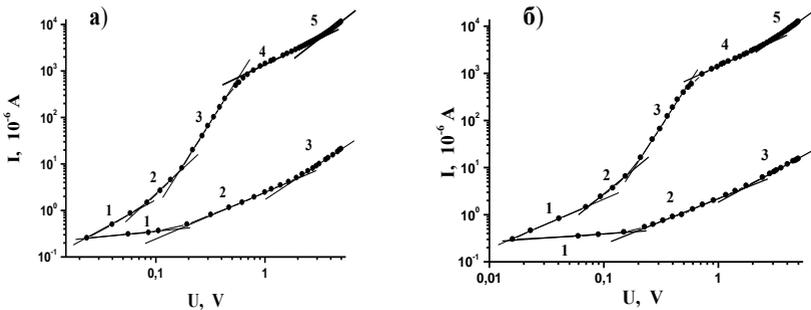


Рис. 1. Темновая ВАХ в двойном логарифмическом масштабе до (а) и после (б) УЗО при  $T=300$  К.

В исследованных структурах темновые ВАХ имеют степенную зависимость  $J \sim V^\alpha$ . Для прямого участка ВАХ до УЗО имеет пять участков:  $\alpha_1=1.3$ ,  $\alpha_2=2.15$ ,  $\alpha_3=3.76$ ,  $\alpha_4=1.1$  и  $\alpha_5=1.85$ . Обратная ВАХ имеет три участка:  $\alpha_1=0.25$ ,  $\alpha_2=1$ , и  $\alpha_3=1.5$ . После УЗО прямой участок ВАХ имеют параметры:  $\alpha_1=1$ ,  $\alpha_2=2$ ,  $\alpha_3=3.7$ ,  $\alpha_4=1$  и  $\alpha_5=1.75$ . Для обратного участка ВАХ:  $\alpha_1=0.18$ ,  $\alpha_2=1$  и  $\alpha_3=1.3$ . Возникновение таких участков связано с многослойностью твердого раствора  $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ .

1. Мирсагатов Ш.А., Лейдерман А.Ю. Атабоев О.К. ФТТ. 2013. т.55. в.8. – с.1524

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

## **Изучение влияния угла наклона стенок канавок структурированной подложки кремния с учетом междоузлий германия на поверхностные деформации**

Атовуллаев Т. А.

Новосибирский государственный университет

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

В мире наблюдается интерес к созданию пространственно-упорядоченных массивов квантовых точек. Эти структуры являются перспективными для разработки термически стабильных лазеров на квантовых точках, МОП-структур с увеличенной подвижностью носителей в канале, матриц фоточувствительных сенсоров и квантового компьютера. Для создания таких структур многообещающей является концепция гетерозпитаксии на структурированной подложке. Структурированными мы называем подложки, на поверхности которых с помощью методов литографии создается регулярный рисунок с канавками или ямками. В ходе гетерозпитаксии можно добиться того, чтобы наноостровки зарождались в ямках и таким образом формировали бы пространственно упорядоченный массив. Известно, что места зарождения наноостроек на структурированных подложках зависят от напряженного состояния поверхности. Поэтому важно обладать знанием о поверхностных деформациях в подложках.

В институте физики полупроводников в лаборатории неравновесных полупроводниковых систем разработана оригинальная технология создания регулярных массивов квантовых точек Ge методом наноимпринт-литографии, совмещенной с ионным облучением. Ионы, внедренные в подложку, могут создавать на поверхности дополнительные деформации. В данной работе с использованием компьютерного моделирования были созданы виртуальные структуры в виде структурированных подложек кремния с системой регулярно расположенных канавок и захороненными под ними кластерами междоузлий германия. Варьируемыми параметрами моделируемых структур были наклон стенок канавок и концентрация междоузлий. Анализ рассчитанных методом молекулярной динамики поверхностных деформаций позволил установить наиболее вероятные места зарождения квантовых точек при гетерозпитаксии германия на структурированных подложках кремния.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент Новиков П. Л.

## Моделирование расчета параметра ближнего порядка для изолированного листа графена с дефектами

Белослудцева А. А.

Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники

Графен обладает рядом удивительных физических свойств, благодаря которым его можно рассматривать как перспективный материал для компонентов электронных устройств нового типа. Идеальный графеновый лист имеет гексагональную кристаллическую решетку. Однако, образцы, получаемые в настоящее время, имеют в своем составе примеси (от 2 до 6 %) и структурные дефекты. Наличие топологических дефектов и легирование графена металлами с образованием различных типов примесных конфигураций (замещающая, пиридиновая, пиррольная и др.) могут приводить к всевозможным изменениям электронных свойств графена вплоть до смены типа проводимости.

В данной работе была создана программа, позволяющая рассчитывать параметр ближнего порядка при заданном типе дефекта структуры графена. При моделировании было использовано следующее выражение для расчета параметра ближнего порядка в  $i$ -ой координационной сфере:

$$a_i = 1 - \frac{N_i^{AB}}{N c_A c_B c_i},$$

где  $N_i^{AB}$  - число пар атомов А и В, находящихся на расстоянии  $r_i$  один от другого,  $N c_i c_A c_B$  - число пар атомов А и В, которые находились бы на этом расстоянии при полностью хаотическом их расположении по узлам решетки ( $N$  - общее число атомов,  $c_i$  - число узлов на  $i$ -й координационной сфере,  $c_A$  и  $c_B$  - концентрация атомов сорта А и В). При моделировании атомы углерода считались сортом А, а различные примесные атомы сортом В.

Проведенные расчеты показали, что параметры ближнего порядка для каждого из типов примесных конфигураций имеют разные значения и могут быть положительными или отрицательными. В зависимости от значения параметра ближнего порядка будет меняться электронный вклад в свойства графена. Таким образом, именно наличие определенных дефектов в структуре графена может быть ответственными за изменения типа проводимости графена от полупроводника до металла и влиять на удельное значение сопротивления исследуемого материала.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Бобенко Н. Г.

## Исследование магнитоиндуцированного перехода сверхпроводник-изолятор в тонких плёнках NbTiN

Бурдастых М. В.

Новосибирский государственный университет

За последние несколько десятилетий наблюдается бурное развитие методов и подходов, обеспечивающих создание наноразмерных систем с принципиально новыми свойствами. Несмотря на это, детальное описание поведения подобных систем в различных температурных диапазонах зачастую недостаточно полно.

Целью данной работы является экспериментальное исследование магнитоиндуцированного перехода сверхпроводник-изолятор в квазидвумерных неупорядоченных плёнках, находящихся в окрестности перехода сверхпроводник-изолятор по беспорядку. Для этого были измерены температурные и магнитополевые зависимости сопротивления в широком температурном диапазоне от 200 мК до 300 К, а также вольт-амперные характеристики.

В качестве основных объектов исследования выступали тонкие плёнки тройного соединения ниобий-титан-азот NbTiN, выращенные методом атомарно-слоевого осаждения. Сопротивление плёнок при комнатной температуре  $R_{sq}$  составляло 2.3 – 2.5 кОм, причём при увеличении  $R_{sq}$  наблюдалось уменьшение критической температуры перехода в сверхпроводящее состояние  $T_c$  от 2 К до 0.2 К.

С увеличением магнитного поля наблюдался рост сопротивления, оно достигало максимального значения и затем уменьшалось, при этом все изотермы с большой точностью пересекались в одной точке. Сопротивление в точке максимума и в точке пересечения изотерм при температуре 0.2 К различалось в несколько раз, что указывает на осуществление перехода сверхпроводник-изолятор. Для подтверждения реализации указанного перехода были построены температурные зависимости сопротивления в активационных координатах. Показано, что поведение сопротивления хорошо описывается активационной зависимостью  $R = R_0 \exp(T_I/T)$ , при этом энергия активации  $k_B T_I$  зависит от магнитного поля немонотонным образом.

В результате анализа вольт-амперных характеристик были определены температуры перехода Березинского-Костерлица-Таулесса  $T_{BKT}$ . Обнаружено уменьшение  $T_{BKT}$  с ростом сопротивления плёнок при комнатной температуре.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Миронов А. Ю.

## **Исследования нелинейных кристаллов методом терагерцовой спектроскопии**

Власов М. Ю.

Институт автоматики и электротехники СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Освоение терагерцового диапазона - одно из быстроразвивающихся направлений в физике, а терагерцовая спектроскопия высокоинформативный метод диагностики, имеющий большие перспективы в исследовании твёрдого тела, конденсированных сред и фазовых переходов 1-ого и 2-ого рода. ТГц излучение используется для изучения нелинейных свойств полупроводников и сегнетоэлектриков, используемых в микроэлектронике, изучения динамики релаксации в углеродных нанотрубках и полупроводниковых квантовых ямах.

Целью работы является изучение фазового перехода сегнетоэлектрик-параэлектрик в кристалле германата свинца ( $Pb_5Ge_3O_{11}$ ). Для проведения исследований осуществлена модификация, настройка и калибровка установки терагерцовой спектроскопии. В результате эксперимента исследованы терагерцовые диэлектрические свойства сегнетоэлектрических кристаллов германата свинца вдоль оптической полярной оси в спектральном диапазоне 0,1 – 1,1 ТГц при различных температурах вблизи точки фазового перехода 174 °С. Показано, что вдали от точки фазового перехода переход имеет тип «смещение», а вблизи точки фазового перехода смешанный тип «смещение» и «порядок-беспорядок». Одним из отличительных свойств данного сегнетоэлектрика является подавление одной из поляризаций терагерцовой волны более чем на два порядка по напряжённости поля в окрестности точки фазового перехода, что позволяет использовать его в качестве дихроичного фильтра или эффективного поляризатора.

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

**Исследование характера поляризации одностенных углеродных нанотрубок с металлической и полупроводниковой типами проводимости**

Галков М. С.

Новосибирский государственный университет

Углеродные нанотрубки представляют из себя цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров, состоящие из одной или нескольких свёрнутых в трубку графеновых плоскостей. Углеродные нанотрубки образуют новый класс углеродных наноматериалов со свойствами, которые значительно отличаются от других форм углерода, таких как графит и алмаз.

Благодаря своим уникальным свойствам (высокая прочность (63 ГПа), капиллярные, оптические, магнитные свойства и т.д.) углеродные нанотрубки могут найти применение в огромном количестве областей: добавки в полимеры; катализаторы; поглощение и экранирование электромагнитных волн; преобразование энергии; аноды в литиевых батареях; хранение водорода; композиты; датчики и пр. В процессе роста углеродных нанотрубок из них  $1/3$  имеет металлические свойства проводимости, а остальные  $2/3$  – полупроводниковые. Существует множество работ, в которых исследуется поляризация углеродных нанотрубок в электрических полях, изменение ориентации трубок под действием постоянных и переменных электрических полей. Однако, на данный момент нет ни одной работы, в которой исследовалась бы поляризация углеродных нанотрубок отдельно с металлической и полупроводниковой типами проводимости. В данной работе были проведены исследования по сепарированию металлических и полупроводниковых одностенных углеродных нанотрубок, а также исследованы поляризации металлических и полупроводниковых углеродных нанотрубок.

Научный руководитель - канд. физ.-мат. наук Володин В. А.

## **Тепловое уширение энергетических уровней и плотность состояний квазиодномерного электронного газа**

Давлатов А. Б., Гулямов А. Г.

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

Квантовые нити - это одномерные системы, где движение электронов резко ограничено в двух направлениях из трех и вдоль оси нити остается свободным. Электронные свойства квантовых нитей определяется законом дисперсии. Знание спектра позволяет вычислить все равновесные свойства системы. Температурная зависимость плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик рассмотрена в работе [1]. Было показано, что за счет теплового уширения дискретный спектр превращается в непрерывный спектр поверхностных состояний. Влияние температуры на термодинамическую плотность электронных состояний в квантовой нити ещё не было исследовано. Целью настоящей работы является изучение влияния температуры на термодинамическую плотность состояний квантовой нити. На основе проведенной работы можно заключить, что температурная зависимость плотности состояний квантовой нити обусловлена термическим уширением дискретных энергетических состояний. Термическое уширение состояний может быть описано температурной зависимостью вероятности заполнения энергетических уровней. При температурах, когда тепловая энергия электронов  $kT$  гораздо меньше расстояний между соседними дискретными уровнями  $\Delta E_{nl}$ , термическое уширение существенно не меняет плотность состояний, и пики на графиках плотности состояний будут резко выделяться. С увеличением температуры за счет термического уширения дискретных уровней пики плотности состояний постепенно размываются. При температурах, когда  $kT$  порядка расстояния между уровнями  $kT \leq \Delta E_{nl}$ , плотность термодинамических состояний полностью сглаживается. Таким образом, термодинамическая плотность состояний электронов в квантовой нити при низких температурах является осциллирующей функцией энергии, при высоких температурах превращается в монотонно растущую функцию энергии.

---

1. Гулямов Г., Шарибаев Н. Ю.. ФТП, 45, 178 (2011).

Научные руководители – д-р физ.-мат. наук, проф. Гулямов Г.,  
д-р физ.-мат. наук Аюханов Р. А.

## Исследование кинетики зарождения двумерных островков при высокотемпературном эпитаксиальном росте Si(111)

Дейнекин Б. И.

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

Проведены исследования процессов зарождения двумерных островков на поверхности кремния (111) в процессе высокотемпературного эпитаксиального роста с применением *in situ* метода сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии. Предварительно на поверхности образцов с применением метода оптической литографии и плазмохимического травления формировались структуры в виде пьедесталов, ограниченных канавками глубиной более 1 мкм, на вершине которого в процессе эпитаксиального роста формировалась система концентрических атомных ступеней, ограничивающих двумерные островки. В процессе эпитаксиального роста верхний островок увеличивался в размерах и при достижении критического диаметра  $D_{crit}$  в центре зарождался новый островок. Измерены зависимости  $D_{crit}$  от частоты зарождения островков  $\nu$  при различных температурах (См. Рис.1). Проведен анализ экспериментальных исследований в рамках классических теорий: массопереноса по поверхности (Бартон, Кабрера, Франк) и зародышеобразования (Венейбл). Получена энергия формирования двумерного зародыша на поверхности кремния (111), равная  $1,1 \pm 0,1$  эВ.

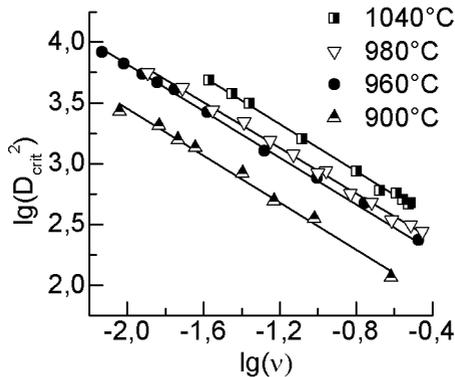


Рис.1. Зависимость логарифма квадрата критического диаметра островка от логарифма частоты зарождения при различных температурах подложки

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

**Фотоиндуцированные изменения спектров оптического поглощения в кристалле титаната висмута, легированном алюминием**

Дю В. Г., Худякова Е. С., Мошкина М. Д., Ким В. И.  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Облучение как чистых, так и легированных кристаллов титаната висмута светом из ближней УФ и видимой области спектра приводит к обратимым изменениям оптического поглощения [1]. В данном сообщении представлены результаты экспериментальных исследований и численной аппроксимации спектров оптического поглощения в диапазоне 470–1000 нм в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$ , подвергнутом последовательной засветке непрерывным лазерным излучением, вначале с длиной волны  $\lambda_i = 532$  нм, а затем с  $\lambda_n = 588, 633, 655, 663, 700, 780, 871$  и  $1064$  нм.

Получено, что хотя в исходном состоянии спектр оптического поглощения  $k(\lambda)$  исследуемого образца  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$  изменялся от эксперимента к эксперименту, экспозиция светом с  $\lambda_i = 532$  нм и дозой  $W_i = 29,6$  Дж/см<sup>2</sup> на входной грани, используемая на первом этапе, каждый раз приводила его к неизменной форме, с максимальными наблюдаемыми значениями  $k(\lambda)$ . Последующая засветка кристалла более длинноволновым лазерным излучением с  $\lambda_{bleach} = 588, 633, 655, 663, 700, 780, 871$  и  $1064$  нм приводит к просветлению кристалла во всем исследованном диапазоне. При этом наибольшее уменьшение оптического поглощения кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$  наблюдалось при засветке его излучением с длиной волны 663 нм.

Полученные спектральные зависимости оптического поглощения удовлетворительно согласуются с моделью примесного поглощения, учитывающей вклад фотовозбуждения электронов с глубоких донорных центров в зону проводимости и внутрицентровых переходов, дополненной моделью взаимодействующего с решеткой дефектного центра с двумя метастабильными состояниями, фотоиндуцированные переходы между которыми описываются с использованием диаграммы конфигурационных координат.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ на 2016 год и НИР по проектной части госзадания №3.878.2014/ИК.

---

1. Фотоиндуцированные явления в силленитах / Малиновский В. К. [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1990. – 160 с.

Научные руководители – д-р физ.-мат. наук, проф. Шандаров С. М.,  
канд. физ.-мат. наук, доцент Кистенева М. Г.

## Кинетика переходной электролюминесценции в органических полупроводниках

Зятиков И. А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Интерес к органическим светоизлучающим диодам (ОСИД) подкрепляется исследованиями электрофизических и оптических свойств полимерных материалов. Основным элементом ОСИД является слой органического вещества, помещенного между электродами [1]. Подвижность носителей заряда (НЗ) в таких материалах является одним из важных факторов ответственным за яркость и быстродействие органических устройств.

Одним из основных экспериментальных методов определения подвижности НЗ является метод переходной электролюминесценции (ПЭЛ). Он позволяет определить подвижность и параметр дисперсии подвижности НЗ на основе анализа формы сигнала интенсивности переходной электролюминесценции [1, 2].

В ходе работы были проведены экспериментальные измерения подвижность НЗ методом ПЭЛ в образцах ОСИД различного состава и разной толщиной органических слоёв. В качестве эмиссионного слоя использовались полимеры трис(8-гидроксихинолилат) алюминия ( $Alq_3$ ) и (поли(2-метокси-5-(2'-этилгексилокси)-1,4-фениленвинилена)) (МЕН-PPV). Определены значения подвижности дырок и электронов в эмиссионном слое, показано, что наличие транспортного слоя существенно не сказывается на характере транспорта НЗ в эмиссионном слое ОСИД, а с ростом напряжённости электрического поля в ОСИД подвижность дырок увеличивается, а электронов уменьшается. Обнаружено увеличение значений подвижности дырок от толщины эмиссионного слоя. Обнаружено значительное различие в кинетике переходной люминесценции для образцов на основе МЕН-PPV и  $Alq_3$ .

---

1. Тамеев А.Р., Никитенко В.Р., Лыпенко Д.А., Ванников А.В. Переходная электролюминесценция и аномальная дисперсия носителей заряда в тонких полимерных пленках // ФТТ. – 2009. – Т. 51. - №9. – С. 1840-1845.

2. Зятиков И.А., Войцеховский А.В., Коханенко А.П., Копылова Т.Н., Тельминов Е.Н., Дегтяренко К.М., Медведев М.Д. Переходная электролюминесценция структур ОСИД с эмиссионным слоем на основе  $Alq_3$  // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. - №8/2. – С. 252-255.

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

## О сильной варизонности ширины запрещенной зоны непрерывного твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

Каршиев А. Б.

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

Варизонные полупроводники - это полупроводники с переменной шириной запрещенной зоны, т.е. с её зависимостью от длины образца  $E_g(x)$ . Структуры на основе таких полупроводников стали предметом изучения ещё в 80-ые годы прошлого века. В первую очередь, это работы, выполненные в ФТИ им А.Ф.Иоффе РАН под руководством Ж.И.Алферова, на основе гетеропереходов GaAs-AlGaAs[1]. Используемый в данной работе метод жидкофазной эпитаксии позволяет получать материалы с переменной концентрацией второго компонента и, соответственно, с переменной шириной запрещенной зоны в широком диапазоне. В частности, этот метод позволил нам получить непрерывный твердый раствор  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , в котором содержание германия меняется от  $x=0$  (т.е. чистый кремний) до  $x=1$  (т.е. чистый германий). Соответственно ширина запрещенной зоны  $E_g(x)$  также будет иметь сильную зависимость от длины образца. Исследована  $E_g(x)$  для полученного твердого раствора измерением фотолуминесценции по сколу образца.

В исследуемых пленках (длина которых 90 мкм) ширина запрещенной зоны меняется очень сильно, начиная с кремния ( $E_g \approx 1,12$  eV) и заканчивая германием ( $E_g \approx 0,74$  eV). Очевидно, что при этом исходная равновесная концентрация может меняться на несколько порядков. Компьютерная обработка полученной кривой показывает, что зависимость  $E_g(x)$  не линейная, она хорошо аппроксимируется закономерностью вида

$$E = E_0 - A e^{R_0 x} \quad (1)$$

где  $E_0 = 1,479$  eV,  $A = 0,377$  eV,  $R_0 = 0,007$ .

Таким образом, в исследуемой варизонной структуре  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) реализуется неоднородное распределение исходных равновесных носителей. Эта неоднородность осуществляется благодаря зависимости ширины запрещенной зоны  $E_g$  от длины образца образца и может привести к термоэлектрическому эффекту.

---

1. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Корольков В.И., Третьяков Д.И., Тучкевич В.М. //ФТП.1967.Т.1.В.10.с.1579-1581.

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

## Структурно-морфологические особенности эпитаксиальных пленок A(III)Sb в матрице AlAs

Колотовкина Д. А.

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

В связи с развитием физики твердотельных низкоразмерных систем возникает необходимость изучения свойств многослойных наноструктур на основе полупроводниковых соединений. Примерами таких систем пониженной размерности являются гетеросистемы AlAs/InSb/AlAs, AlAs/GaSb/AlAs, AlAs/AlSb/AlAs, выращенные на подложке GaAs. Теоретические расчеты предполагают формирование непрямозонной зонной структуры первого рода в этих системах, что делает их удобными для анализа физических процессов, изучение которых в других типах гетероструктур затруднено. Например, появляется возможность исследовать спиновую релаксацию экситонов в квантовых точках. Интерпретация экспериментальных результатов невозможна без знания структурно-морфологических особенностей изучаемых гетеросистем. В настоящее время структурные данные о системах AlAs/InSb/AlAs, AlAs/GaSb/AlAs, AlAs/AlSb/AlAs практически отсутствуют. Поэтому цель данной работы - определить структурно-морфологические особенности эпитаксиальных слоев InSb, GaSb и AlSb в широкозонной матрице AlAs с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Объекты исследования были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Ожидаемая толщина InSb, GaSb и AlSb в матрице составила 1 монослой. Образцы препарировались в виде поперечных срезов по плоскости (110) и планарных фольг в плоскости (001). Исследования проводились на электронных микроскопах Titan 80-300 (FEI), JEOL-4000EX и JEOL 2200FS. Анализ химического состава был проведен методом энергодисперсионной спектроскопии характеристического Рентгеновского излучения (EDX).

По данным ПЭМ во всех случаях в матрице AlAs формируется смачивающий слой с островками, то есть реализуется механизм роста Странского-Крастанова. Экспериментальные значения толщин эпитаксиальных слоев больше ожидаемых на порядок, поэтому предполагается формирование четверного или тройного твердого раствора в матрице вместо бинарного соединения. Проведенный анализ химического состава подтверждает сделанное предположение.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Гутаковский А. К.

## Фотоэмиссия из GaAs(Cs,O) с положительным и отрицательным электронным средством

Коновалов К. В.

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

Фотоэмиссия из кристалла в вакуум определяется, как правило, потенциальным барьером, который необходимо преодолеть «горячим» фотоэлектроном. Снижение высоты потенциального барьера на поверхности  $p$ -GaAs(Cs,O) до состояния с отрицательным эффективным электронным средством (ОЭС), когда уровень вакуума оказывается ниже дна зоны проводимости в объеме полупроводника, позволяет увеличить квантовый выход фотоэмиссии на несколько порядков, до  $Y \sim 0.5$ . В последнее время поверхности полупроводников с относительно небольшим положительным эффективным средством  $\chi^* \sim 0.2-0.4$  эВ также привлекают внимание в связи с возможностью повышения эффективности преобразования солнечной энергии за счет использования "фотонно-усиленной термоэмиссии" (photon-enhanced thermionic emission, PETE) электронов, рожденных светом ниже уровня вакуума и термализованных вверх по энергии благодаря поглощению фононов. Ранее на поверхности Cs/ $p$ -GaAs, в зависимости вероятности выхода электронов в вакуум от величины Cs покрытия, наблюдались максимумы, обусловленные, предположительно, надъямными резонансами при прохождении электронами области поверхностного изгиба зон. Цель данной работы состоит в проверке этого предположения с помощью измерения, методом спектроскопии квантового выхода фотоэмиссии дозовой зависимости вероятности выхода на  $UP^+$  структуре, в которой тонкий ( $d \leq 100$  нм) слой нелегированного  $i$ -GaAs выращен поверх сильнолегированного  $p$ -GaAs. В отличие от однородно-легированного  $p$ -GaAs, в  $UP^+$  структуре поверхностное поле однородно и может быть измерено с высокой точностью как функция Cs покрытия методом спектроскопии фотоотражения, по периоду осцилляций Франца-Келдыша. По величине поля и толщине  $i$ -слоя определяется величина изгиба зон. Знание параметров поверхностной потенциальной ямы позволяет проверить гипотезу о надъямном резонансе. Измерения на  $UP^+$  структуре с  $d = 100$  нм показали, что, как и ожидалось, пик в вероятности выхода отсутствует вследствие малого расстояния между уровнями размерного квантования.

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

## Процессы формирования гладкой поверхности (0001)AlN и GaN квантовых точек низкой плотности в аммиачной МЛЭ

Конфедератова К. А.

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

Самоорганизованные на гладкой поверхности наноструктуры играют важную роль в современных фундаментальных и прикладных исследованиях. Одним из примеров таких структур являются квантовые точки (КТ) – это наноразмерные области, в которых носители заряда ограничены во всех трех направлениях (узкозонный полупроводник в матрице широкозонного). Помимо КТ высокой плотности, которые могут быть использованы в качестве активной среды для полупроводниковых лазеров, светодиодов и фотодетекторов, необходимы и КТ низкой плотности для создания одноэлектронных транзисторов, однофотонных излучателей, работающих в том числе и при комнатной температуре, и других приборах опто- и нано- электроники.

Одним из основных методов создания ансамбля КТ является эпитаксиальный рост с использованием ростовых мод Странского-Крастанова, Фольмера-Вебера и капельной эпитаксии. В данной работе рост GaN КТ на гладкой поверхности (0001)AlN происходил в установке молекулярно лучевой эпитаксии с аммиаком в качестве источника активного азота.

*Цель* работы: формирование гладкой поверхности AlN и самоорганизованных на ней GaN квантовых точек низкой плотности методом аммиачной МЛЭ.

*Получены следующие результаты:*

1. Получена гладкая поверхность (0001)AlN.
2. Изучена кинетика роста GaN эпитаксиальных слоев на поверхности (0001)AlN при различных температурах и потоках.
3. Выбраны ростовые условия формирования GaN КТ низкой плотности (температура подложки 740 С, давление потока  $\text{NH}_3$   $10^{-6}$  Торр). Достигнута плотность ниже  $10^9 \text{ см}^{-2}$ , с высотой КТ 3.5 нм и латеральным размером - 25 – 30 нм.
4. Разработаны условия заравнивания массива точек GaN материалом матрицы AlN.

Морфология полученных образцов исследовалась методами дифракции быстрых электронов на отражении, атомно-силовой микроскопии, микрохимический анализ поверхности проведен сканирующей электронной микроскопией с энергодисперсной рентгеновской спектроскопией.

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

## Вах n-p структуры, изготовленной из полученного пятикратной переплавкой технического кремния на солнечной печи

Маншуров Ш. Т.

Навоийский государственный горный институт, Узбекистан

Ранее было обнаружено, что кремний, полученный пятикратной переплавкой на солнечной печи, обладает спектральной ИК – чувствительностью[1]. Мы изготовили из него n-p-переход с помощью диффузии бора. Была исследована ВАХ полученной n-p-структуры, которая представлена на рис. 1 (кривая 2). На этом же рисунке показана ВАХ  $R_{ом-n-R_{ом}}$ - структуры, изготовленной из пятикратно переплавленного металлургического кремния с простыми омическими контактами (кривая 1).

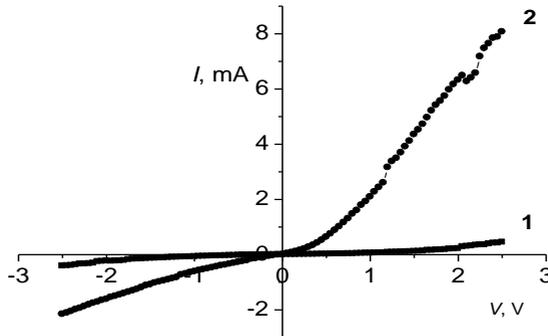


Рис.1. Вольт-амперная характеристика  $R_{ом-n-R_{ом}}$ - структуры (кривая 1), изготовленной из пятикратно переплавленного кремния и n-p-структуры, созданной на его основе диффузией бора (кривая 2) при комнатной температуре.

Видно, что при комнатной температуре эта структура практически не обладает выпрямляющими свойствами, в то время как структура с n-p-переходом при этой же температуре имеет довольно хорошее выпрямление.

---

1. Saidov A.S., Leyderman A.Yu., Manshurov Sh.T., Abakumov A.A. Applied Solar Energy . 2011, №3, p.80-82.

Научные руководители – д-р физ.-мат. наук, проф. Саидов А. С.,  
д-р физ.-мат. наук, проф. Лейдерман А. Ю.

## **ИК поглощение оптическими фононами полупроводниковых нанокристаллов на массивах Au наноантенн**

Милёхин И. А.

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

Наноантенны широко применяются для получения оптического отклика микроскопических количества вещества, могут быть использованы в химических или биологических сенсорах, в тонкопленочных солнечных батареях с высоким КПД и др. Цель данной работы состоит в изучении ИК поглощения оптическими фононами полупроводниковых нанокристаллов (НК), нанесенных на массивы наноантенн Au. Для каждого типа НК на основании известных данных о частотах их оптических фононов с помощью электродинамического моделирования были определены структурные параметры антенн на Si. Структурные параметры массивов наноантенн были выбраны так, чтобы энергия локализованного поверхностного плазмонного резонанса (ЛППР) соответствовала энергии оптических фононов в НК (90-400 см<sup>-1</sup>). Массивы наноантенн Au размером 3x3 мм<sup>2</sup> были сформированы с помощью фокусированного ионного пучка на подложке Si. НК CdSe, CdS и PbS были нанесены на массивы наноантенн по технологии Ленгмюра-Блоджетт (ЛБ). Если НК CdS и PbS наносились по стандартной технологии ЛБ, то коллоидные НК CdSe, распределенные в толуоле, смешивали с раствором бегеновой кислоты. Полученный раствор наносили на поверхность деионизованной воды Ленгмюровской ванны. Коллоидные частицы бегеновой кислоты на поверхности воды формируют монослой, содержащий НК. Сформированные монослои переносили на поверхность подложки, и полученные пленки отжигали в вакууме при температуре 200°C. В результате отжига на поверхности структур с наноантеннами формируются свободностоящие НК. ИК спектры пропускания массивов наноантенн Au проявляют ярко выраженные минимумы, соответствующие поглощению ЛППР. При нанесении монослоя НК на структуры с наноантеннами ИК спектры претерпевают заметные изменения в частотном диапазоне оптических фононов НК. На фоне поглощения ЛППР возникают новые моды поверхностных оптических фононов. При увеличении числа монослоев, интенсивность мод в ИК спектрах возрастает, а частота ЛППР сдвигается в красную область спектра. Если принять во внимание размер области, в которой происходит усиление ИК поглощения, то коэффициент поглощения составляет величину около 30000.

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

## Улучшение параметров светодиодных структур на основе алмазных пленок облучением их потоком высокоэнергетических электронов

Муталов Н. Т., Рахмонов У. Х.

Физико-технический институт, г. Ташкент, Узбекистан

Авторами работы [1] была показана белая электролюминесценция структур, созданных на основе алмазных пленок, полученных CVD-методом. Световые характеристики этих структур оказались низкими, что требует нахождения причин, приводящих к их ухудшению.

Факторами, влияющими на квантовую эффективность СД, являются нарушения и дислокации кристаллической решетки, приводящие к увеличению Оже рекомбинации. Для снижения безизлучательной рекомбинации в образцах СД, созданных на основе алмазных пленок, выращенных CVD-методом, мы применили способ облучения образцов потоком высокоэнергетических (5 МэВ) электронов с последующим термоотжигом (ТО). ТО проводился при температурах 650-700°C, в течение 30-40 мин., так как выше этих температур могут образоваться фазовые изменения в алмазной пленке, также отрицательно сказывающиеся на ее квантовой эффективности.

При температуре 300 К были измерены вольтамперные характеристики (ВАХ) СД структур до и после облучения. Сопоставление результатов измерений ВАХ показали улучшение характеристик СД структур, после облучения их потоком высокоэнергетических электронов дозой  $(1-5) \cdot 10^{17}$  е/см<sup>2</sup>. О чем свидетельствует появление свечения при относительно низких значениях тока электролюминесценции. Например, до облучения и ТО электролюминесценция происходила при напряжениях 6-8 В и значениях тока 40-80 мА, а после облучения этих же образцов дозой  $(1-5) \cdot 10^{17}$  е/см<sup>2</sup> и ТО свечение появлялась уже при напряжениях 8-10 В и значениях тока 5-8 мА.

Работа выполнена в рамках гранта ФА-А3-Ф027

---

1. Салиев Т.М., Кутлимуратов А. «Электрофизические и люминесцентные характеристики n/6H-SiC – p/C(алмаз) гетероструктур, полученных методом химического пароголового осаждения» // Доклады Академии Наук Республики Узбекистан, 2013, №2, -С.17-19.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Салиев Т. М.

## **Светодиодные структуры с белым свечением на основе алмазных пленок, выращенных на кварцевых подложках CVD-методом**

Муталов Н. Т., Салиев Т. М., Назаров Э. Т.

Физико-технический институт, г. Ташкент, Узбекистан

Юнусабадский академический лицей, г. Ташкент, Узбекистан

Оптические свойства кварца обусловили широкое применение его в оптическом приборостроении – из него делают призмы для спектрографов, монохроматоров, пластинки для вращения плоскости поляризации, линзы для ультрафиолетовой (УФ) оптики и т. п.

Нами на кварцевых подложках получены светодиодные (СД) структуры с белым свечением без люминофора. Как известно, в настоящее время белый свет получают покрытием специальным люминофором СД структуру с синим свечением.

Полученные нами СД структуры были созданы на подложках из синтетического кварца толщиной 350-400 мкм методом химического пароголового осаждения (ХПГО – CVD-метод) алмазных пленок толщиной 8-10 мкм. Существование алмазной пленки определялось измерением микротвердости пленки и по спектру Раманского рассеяния. Концентрация носителей тока в пленках составляла  $\sim (6-8) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . После эпитаксии кварцевые пластины с алмазной пленкой разрезались на отдельные кусочки с размерами 3 мм  $\times$  3 мм, и на них со стороны алмазной пленки формировалась М–С(алмаз)–М-структура с барьером Шоттки. Последний создавался путем напыления Pd на поверхность алмазной пленки через маску в вакууме при температуре образцов 250°C.

При температуре 300 К была измерена вольтамперная характеристика (ВАХ) созданной СД структуры. Форма ВАХ имеет симметричный вид, что объясняется тем, что М–С(алмаз)–М-структура состоит из двух встречно включенных диодов Шоттки. При измерениях ВАХ было обнаружено белое свечение, исходящее из области, находящейся под одним из контактов и при этом излучение выводилось через кварцевую подложку. Поскольку такая структура состоит из двух встречно включенных диодов, то к ней можно подавать переменное напряжение. При этом, естественно, будет наблюдаться мерцание излучения с частотой 100 Гц ( $2 \times 50 \text{ Гц}$ ).

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

## **Моделирование гетероэпитаксии германия на структурированных подложках кремния**

Насибулов И. А.

Новосибирский государственный университет

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

В мире наблюдается интерес к созданию пространственно-упорядоченных массивов квантовых точек. Эти структуры являются перспективными для разработки термически стабильных лазеров на квантовых точках, МОП-структур с увеличенной подвижностью носителей в канале, матриц фоточувствительных сенсоров и квантового компьютера. Для создания таких структур многообещающей является концепция гетероэпитаксии на структурированной подложке. Структурированными мы называем подложки, на поверхности которых с помощью методов литографии создается регулярный рисунок с канавками или ямками. В ходе гетероэпитаксии можно добиться того, чтобы наноструктуры зарождались в ямках и таким образом формировали бы пространственно упорядоченный массив. Механизм поверхностной диффузии и зарождения наноструктур на рельефной поверхности недостаточно изучен. Эффективным методом для их исследования является компьютерное моделирование. В данной работе методом Монте-Карло проведена имитация роста наноструктур Ge на подложках Si с ямками пирамидальной и сглаженной конусоидальной форм и канавками. Варьируемыми параметрами моделируемых структур были наклон стенок и глубина канавок и ямок. Анализ полученных результатов позволил выявить закономерности роста наноструктур на структурированных подложках.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент Новиков П. Л.

**Высокотемпературный отжиг легированных и нелегированных гетероструктур InAs/AlAs с квантовыми точками**

Никифоров В. Е.

Новосибирский государственный университет

В структурах с непрямозонными квантовыми точками (КТ) первого рода имеет место длительное время жизни экситона, что делает такие КТ перспективными объектами для исследования процессов релаксации спина экситона в КТ. Время жизни экситона можно ещё увеличить, размывая гетерограницу КТ/матрица. Размывать гетерограницу КТ/матрица можно, вызывая диффузию материалов посредством высокотемпературного послеростового отжига (ВПО). Однако предварительные эксперименты показали, что в р-легированных гетероструктурах с КТ ВПО не размывает гетерограницу и время жизни экситонов после отжига в таких структурах практически не изменяется. Цель работы - выяснить, почему легирование влияет на диффузию материалов в InAs/AlAs структурах с квантовыми точками при высокотемпературном отжиге.

InAs/AlAs гетероструктуры с КТ выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs ориентации (001). Были выращены 3 типа структур – намерено нелегированная, n-типа и p-типа. ВПО, вызывая диффузию материалов, меняет состав и размеры КТ и, соответственно, её энергетическое строение. Таким образом, по относительному смещению полосы фотолюминесценции (ФЛ) КТ можно качественно судить о процессах диффузии. Экспериментальное исследование энергетического строения КТ было проведено методом стационарной низкотемпературной ФЛ и дополнено расчётами зонных диаграмм гетероструктур. Анализировалось смещение полосы ФЛ структур с различным типом легирования в зависимости от температуры отжига. Известно, что процессы диффузии материала определяются образованием вакансий. Обнаружено, что: (i) вакансии образуются не рядом с КТ, а мигрируют из объёма гетероструктуры; (ii) n-легированные области препятствуют миграции вакансий. Это позволяет утверждать, что образование вакансий элементов III группы зависит от положения уровня Ферми и идёт более интенсивно, когда уровень Ферми располагается вблизи потолка валентной зоны.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Шамирзаев Т. С.

## **Инициация фазового перехода в VO<sub>2</sub> при помощи локализованного плазмонного резонанса.**

Пидгайко Д. А.

Новосибирский государственный университет

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

Последние несколько лет наблюдается повышенный интерес к физическим явлениям в диоксиде ванадия (VO<sub>2</sub>). Это связано со способностью данного материала испытывать квантовый фазовый переход "металл-полупроводник", в ходе которого оптические и электрофизические свойства изменяются существенным образом, например, проводимость меняется на 3 – 5 порядков. Особенностью данного процесса является то, что переход между состояниями можно осуществить за времена порядка 100 фс и менее [1]. Применение плазмонных структур, таких как наночастицы благородных металлов, позволяет использовать свет для осуществления сверхбыстрого перехода за счет инжекции горячих электронов [2]. Комбинирование плазмонных структур и VO<sub>2</sub> открывает возможность управления светом в локальной области в широком диапазоне частот – от ультрафиолетовой до терагерцовой.

Целью работы является исследование фазового перехода в VO<sub>2</sub>, инициируемого локализованным плазмонным резонансом в металлических наночастицах. Были спроектированы и изготовлены гибридные структуры на основе диоксида ванадия и наночастиц серебра. Исследованы спектральные характеристики структур по методу, описанному в [2]. Изучен эффект оптического переключения в диоксиде ванадия и определена пороговая интенсивность излучения накачки, вызывающего переход.

---

1. A. Pashkin, I. C. Kubler et al., Ultrafast Insulator-Metal Phase Transition in VO<sub>2</sub> Studied by Multiterahertz Spectroscopy, Phys. Rev. B 83, 195120 (2011)

2. Kannatassen Appavoo, Bin Wang, Nathaniel F. Brady et al., Ultrafast Phase Transition via Catastrophic Phonon Collapse Driven by Plasmonic Hot-Electron Injection, Nano Lett. 2014, 14, 1127–1133

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

## Фотолюминесценция слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , сильно легированных кремнием

Самусов И. А.

Новосибирский государственный университет

До сих пор не решена проблема создания зеленых лазерных диодов. Одним из путей реализации зеленого диода является использование гетероструктур на основе  $\text{A}_3$  нитридов. Обнаружение сине-зеленой полосы люминесценции при оптических переходах через уровни дефектов в слоях сильно легированных донорами  $\text{AlGaN}$  создает предпосылки для разработки эффективных источников света сине-зеленого диапазона спектра.

Были измерены спектры фотолюминесценции (ФЛ) образцов  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  с различным содержанием алюминия и разной степенью легирования. При повышении степени легирования в ФЛ спектрах легированных образцов наблюдается рост интенсивности ФЛ и смещение положения максимума в сторону низких энергий (с 2,3 эВ до 2,13 эВ) (См. Рис. 1а). Т.к. при увеличении степени легирования интенсивность ФЛ излучения возрастает, то эта ФЛ полоса связана с кремнием. Из измерений время разрешенных спектров ФЛ, спектров ФЛ при различных мощностях возбуждения было определено, что кремний в образцах является мелким донором. При уменьшении содержания алюминия в нелегированных образцах наблюдается понижение ФЛ интенсивности и смещение максимума ФЛ интенсивности в сторону низких энергий (с 2,09 эВ до 1,95 эВ) (См. Рис.1б), следовательно при увеличении содержания алюминия запрещенная зона уширяется.

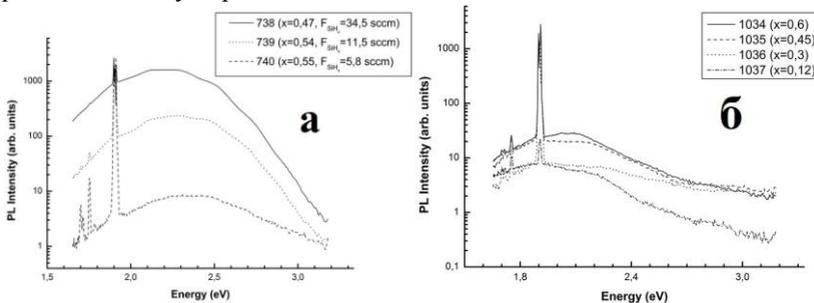


Рис.1 а) Спектры ФЛ легированных образцов с различным содержанием алюминия б) Спектры ФЛ нелегированных образцов с различным содержанием алюминия

Научные руководители – д-р физ.-мат. наук Журавлев К. С.,  
Осинных И. В.

## Наногетероструктуры Ge на Si полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии

Серохвостов В. Ю., Пишагин А. А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

С физикой тонких пленок связаны достижения и перспективы дальнейшего развития микроэлектроники, оптики, приборостроения и других отраслей новой техники. Успехи микроминиатюризации электронной аппаратуры стали возможны благодаря использованию управляемого эпитаксиального выращивания тонких слоев полупроводников, металлов и диэлектриков в вакууме из различных сред.

Несмотря на многочисленные и разносторонние исследования, процессы эпитаксиальной кристаллизации не получили полного объяснения. Обусловлено это, в первую очередь, сложностью проблем связанных с процессами кристаллизации в различных системах и средах. Основной методикой формирования Ge островков на поверхности Si является метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

МЛЭ является развитием до совершенства технологии вакуумного напыления тонких пленок. Ее отличие от классической технологии вакуумного напыления связано с более высоким уровнем контроля технологического процесса.

Разработка технологии управляемого формирования массивов квантовых точек Ge на поверхности Si и многослойных гетероструктур Ge/Si на их основе, на протяжении ряда лет является предметом значительных и постоянно нарастающих усилий. Для применений таких структур требуется как высокая плотность германиевых нанокластеров ( $>10^{11}$  см<sup>-2</sup>), так и высокая однородность форм и размеров кластеров (<10%). Технология формирования гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge и заранее заданными электрофизическими и фотоэлектрическими параметрами не может быть разработан, пока не будут решены обе эти задачи.

Целью нашей работы является оптимизация технологических режимов получения наногетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge.

Были проведены эксперименты по измерению скорости напыления Ge и Si на поверхность Si(100) при разных токах ЭЛИ от 150 мА до 200 мА. Было определено, что на установке молекулярно-лучевой эпитаксии при изменении тока эмиссии от 150 до 200 мА скорость роста Si увеличивается от 0,23 до 0,45 Å/с, а скорость роста Ge увеличивается от 0,03 до 2,2 Å/с.

В настоящее время, проводятся эксперименты по синтезу наногетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge.

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

**Влияние экспоненциально убывающей концентрации  
рекомбинационной примеси на участок вольт-амперной  
характеристики р-і-п-структуры с отрицательным  
дифференциальным сопротивлением**

Стельмах В. Г.

ФТИ НПО «Физика-Солнце» АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан

Процесс диффузионно-дрейфового транспорта носителей заряда в р-і-п-структурах в условиях, когда амбиполярная скорость дрейфа определяется модуляцией заряда глубоких центров прилипания для дырок, описывается уравнением для концентрации неравновесных носителей  $p(x)$ :

$$\frac{d^2 p(x)}{dx^2} - Ja \frac{dp(x)}{dx} - \frac{N_R c_p}{D} p(x) = 0. \quad (1)$$

При совпадающих по направлению диффузионного и дрейфового потоков на вольт-амперной характеристике (ВАХ) появляется участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) вида:

$$U(J) \sim \int_0^d J / p(x) dx \approx \exp\{d / (aJL^2)\}, \quad (2)$$

где в формулах (1) и (2)  $J$  - плотность тока в р-і-п-структуре,  $d$  - длина базы этой структуры,  $D$  - коэффициент амбиполярной диффузии,  $N_R$  и  $c_p$  - концентрация и коэффициент захвата дырок, соответственно, рекомбинационной примесью,  $a=2qD_n N_i$  - параметр, зависящий только от концентрации глубоких примесных центров прилипания  $N_i$  и коэффициента диффузии электронов  $D_n$ ,  $q$  - величина элементарного электрического заряда,  $L^2=D/(N_R \cdot c_p)$  - квадрат диффузионной длины пробега неравновесных носителей (см. [1]). Экспоненциальное убывание  $N_R$  было задано как  $N_R(x)=N_{R0} - \beta \cdot \exp(\lambda \cdot x)$ , где  $N_{R0}$ ,  $\beta$  и  $\lambda$  - положительные константы, связанные условием  $N_R(x)>0$ ; в результате в уравнении (1) появляется член с  $\beta \cdot \exp(\lambda \cdot x)$ . Полученное дифференциальное уравнение затем решали методом последовательных приближений и далее определяли ВАХ. Экспоненциальное убывание  $N_R$  приводит к тому, что ВАХ имеет участок с ОДС вида  $J(U)=-k_1 \cdot U + k_0$ , где  $J(U)>0$ , а коэффициенты  $k_1>0$  и  $k_0$  зависят от параметров  $N_{R0}$ ,  $\beta$  и  $\lambda$ , и эта зависимость отличается от зависимости, даваемой формулой (2).

---

1. Адирович Э. И., Карагеоргий-Алкалаев П. М., Лейдерман А. Ю. Токи двойной инжекции в полупроводниках. М. : Советское Радио, 1978. 320 с.

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

## Образование дефектов в графене в форме вакансий и адатомов в результате падения на него атомов углерода

Стельмах В. Г.

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз,  
г. Ташкент, Узбекистан

Несмотря на значительное количество теоретических и экспериментальных работ, касающихся взаимодействию графена с отдельными атомами, кластерами или молекулами, относительно мало работ, рассматривающих вопросы о влиянии угла падения на процессы распыления и дефектообразования в графене. Для теоретического рассмотрения такого распыления и дефектообразования в качестве распыляющих ионов были выбраны атомы углерода с энергией 100 электрон-вольт (эВ). Следует отметить, что при низкоэнергетическом распылении приближение парных потенциалов неприменимо, поэтому для описания межатомного взаимодействия использовался потенциал Бреннера [1], который хорошо описывает межатомное углеродное взаимодействие.

Компьютерная модель бездефектного графена прямоугольной формы, состоящая из 112 атомов углерода с расстоянием между ближайшими атомами равным 1.42 ангстрема, строилась с наложением периодических условий на граничные атомы вдоль плоскости этой структуры. Угол падения атомов углерода, отмеряемый от нормали к графену вдоль armchair- и zigzag-направлений, изменялся от 0° до 85° с шагом 5°, однако уже при углах больше чем 75° дефектообразование графена, как показало компьютерное моделирование, не наблюдается. Для каждого угла и направления падения 100 раз случайным образом задавалось место падения на бездефектном графене. Затем были проанализированы дефекты в форме вакансий и адатомов углерода в графене и их вероятность образования в зависимости от угла падения.

---

1. Brenner D. W., Shenderova O. A., Harrison J. A., Stuart S. J., Ni B., Sinnott S. B. A second-generation reactive empirical bond order (REBO) potential energy expression for hydrocarbons // *J. Phys: Condens. Matter*. 2002. №14, С. 783–802.

Научный руководитель: д-р физ.-мат. наук Джурахалов А. А.

**Исследование кинетики дефектообразования в сверхъярких светодиодах на основе нитрида галлия при повышенных плотностях рабочего тока**

Томашевич А. А, Ермолаев А. В, Петенев Д. В, Пушкарева Е. С.  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Темпы развития полупроводниковых осветительных устройств на основе гетероструктур нитрида галлия неуклонно растут. Путем увеличения плотности рабочего тока светодиода, многие производители решают проблему соотношения цена/люмен. Однако это приводит к увеличению интенсивности деградации: значительному ухудшению качества и практически всех параметров светодиода, а также уменьшению срока службы светодиодных приборов. Поскольку механизмы деградации до сих пор полностью не изучены, данное направление исследований является актуальным. . .

В данной работе проведены исследования кинетики дефектообразования светодиода при испытаниях на повышенных плотностях рабочего тока. Разработанная для этих целей экспериментальная установка предназначена для оптических исследований поверхности и картин свечения кристалла при большом увеличении. Для получения более качественных изображений использовался микроскоп МБР-1 и фотоаппарат с матрицей высокого разрешения. Для выявления участков поверхности с повышенной дефектностью была использована дополнительная ультрафиолетовая (УФ) подсветка, которая приводит к появлению свечения в местах формирования линейных дефектов в желто-зеленой области спектра, как было показано в работе [1]. Была разработана методика экспериментов. До и после испытаний проводились исследования изображений поверхности кристаллов, полученные с УФ подсветкой и без нее. .

В процессе испытаний при повышенных плотностях тока была выявлена кинетика дефектообразования в светодиодах средней мощности фирмы SEMILEDS. Наблюдалось формирование новых скоплений дефектов на поверхности кристалла, а также изменение их количества и площади с увеличением времени испытаний.

---

1. Ковалев А. Н., Манянин Ф. И., Кудряшов В. Е., Туркин А. Н., Юнович А. Э. Изменения люминесцентных электрических свойств светодиодов из гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN при длительной работе // ФТП. - 1999. - Т.33/ - №2. - С. 224-232.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. Еханин С. Г.

**Влияние процесса дефектообразования на туннельную  
электролюминесценцию в сверхъярких светодиодах на основе  
нитрида галлия**

Томашевич А. А, Ермолаев А. В, Петенев Д. В, Пушкарева Е. С.  
Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники

Светодиодные технологии продолжают развиваться, заменяя традиционные источники освещения. Однако деградационные процессы в кристаллах светодиодов значительно ухудшают их электрические и оптические свойства, а также уменьшают срок их службы. Поэтому изучение механизмов деградации является особо актуальным направлением исследований. Известно, что на характеристики туннельной электролюминесценции (ЭЛ) существенно влияет неоднородность структуры и качество технологии создания кристаллов.

Туннельная ЭЛ наблюдается при малых напряжениях на светодиоде, когда туннельная компонента тока преобладает над инжекционной.

В данной работе проведены исследования влияния процесса дефектообразования на характеристики туннельной ЭЛ в светодиодах средней мощности фирмы SEMILEDS при испытаниях на повышенных плотностях тока. В связи с тем, что интенсивность туннельной ЭЛ очень низка, в экспериментальной установке предусмотрены длительные экспозиции при фотографировании картин свечения.

Картина свечения включает в себя однородную (фоновую) составляющую и неоднородную (точечную) структуру. При увеличении напряжения от 2,1В до 2,3В цвет фонового свечения меняется от красного до голубого, что подтверждает туннельную природу ЭЛ. При этом неоднородное свечение представлено в виде точек разного цвета.

Предполагается, что свечение точек обусловлено, как неоднородностью параметров квантовых ям по площади кристалла, так и распределением дефектов в гетероструктуре.

Результаты экспериментов показывают, что с увеличением времени испытаний в местах свечения зеленых точек на поверхности кристалла появляются темные пятна, обусловленными тепловыми пробоями структуры, на что также указывают результаты работы [1].

---

1. Ковалев А. Н., Манягин Ф. И., Кудряшов В. Е., Туркин А. Н., Юнович А. Э. Изменения люминесцентных электрических свойств светодиодов из гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN при длительной работе // ФТП. - 1999. - Т.33/ - №2. - С. 224-232.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук, проф. Еханин С. Г.

**Сверхпроводящие свойства проволок нитрида титана**

Черкасов Д. А., Миронов А. Ю.

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

В работе исследуется эволюция сверхпроводящих свойств проволок при уменьшении их ширины, то есть при понижении размерности системы. В частности, представлены результаты сравнительного экспериментального исследования низкотемпературных транспортных свойств проволок шириной 100 нм и 50 мкм на основе плёнки нитрида титана толщиной 5 нм, при этом сверхпроводящая длина когерентности образцов составляет  $\xi \approx 10$  нм.

Показано, что уменьшение ширины проволок не влияет на транспортные свойства при гелиевых температурах, и электронный транспорт в этом температурном диапазоне определяется квантовыми вкладами в проводимость от слабой локализации и электрон-электронного взаимодействия.

Установлено, что уменьшение ширины проволок приводит к уширению сверхпроводящего перехода и понижению критической температуры сверхпроводящего перехода  $T_c$ .

Исследовано влияние уменьшения ширины образцов на эволюция топологического перехода БКТ.

Научный руководитель – Постолова С. В.

**Ab initio расчет зонной структуры InAs**

Черосов М. А.

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

Арсенид индия - перспективный материал электронной техники. Высокая подвижность электронов в арсениде индия прямозонная структура позволяют использовать его для изготовления высокоэффективных электронных и оптоэлектронных приборов, в частности быстродействующих транзисторов и интегральных схем, фотоприемных детекторов ИК-диапазона, инжекционных лазеров с длиной волны 3.5 мкм.

InAs кристаллизуется в кубической структуре с пространственной группой симметрии  $\bar{4}3m$ . Параметр решетки  $a$  составляет 6.06 Å. Ионы индия расположены в позициях  $a(0, 0, 0)$ ,  $a(0, 0.5, 0.5)$ ,  $a(0.5, 0, 0.5)$ ,  $a(0.5, 0.5, 0)$ , а ионы арсения –  $a(0.25, 0.25, 0.25)$ ,  $a(0.75, 0.25, 0.75)$ ,  $a(0.75, 0.75, 0.25)$ ,  $a(0.25, 0.75, 0.75)$ .

Вычисления зонной структуры были проведены в программном пакете Abinit, используя метод функционала плотности. Моделирование кристаллической структуры выполнено в программном пакете Avogadro. Расчет выполнен в приближении локальной плотности (LDA) с разложением блоховских функций электронов по базису плоских волн с энергией обрезания равной 550 эВ. Для генерации  $k$ -точек был использован метод Монкхорста-Пака с сеткой размерностью  $8 \times 8 \times 8$ . Была получена картина зонной структуры.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент Шарин Е. П.

## Исследование процессов рекомбинации неосновных носителей заряда в гетероэпитаксиальных структурах CdHgTe/Si (310), выращенных методом МЛЭ.

Шефер Д. А.

Новосибирский государственный университет

Одной из важнейших задач современной инфракрасной техники является увеличение рабочей температуры фотодиодных матриц относительно жидкого азота. Рабочую температуру можно повысить за счет снижения величины темнового тока фотодиодов, с использованием многослойных гетероструктур  $Cd_xHg_{1-x}Te$  (КРТ), легированных мышьяком и индием.

Для расчета и оптимизации характеристик фотодиодов необходимо определить механизмы и параметры рекомбинации неосновных носителей заряда, что осуществлялось с помощью исследования температурных зависимостей времен жизни носителей в гетероструктурах КРТ.

Гетероструктуры КРТ были выращенные методом МЛЭ на подложках Si(310). Фоточувствительные слои с  $x=0,3-0,4$  и толщиной 4-6 мкм легировались в процессе роста атомами In с концентрацией  $(1\div 5)\cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , и мышьяка с концентрацией до  $1\cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . После роста слои подвергались термическим отжигам для перевода атомов мышьяка в акцепторное состояние, а также для заполнения вакансий ртути.

Проведенные измерения и расчеты температурных зависимостей времени жизни с привлечением основных механизмов рекомбинации: излучательной, Оже-рекомбинации, и рекомбинации Шокли-Рида, позволяют сделать оценку параметров ловушек в легированных As структурах после роста и после отжига.

В структурах, легированных As в диапазоне  $(1\div 100) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , после роста наблюдаются низкие значения времени жизни  $(2\div 5)\cdot 10^{-8} \text{ с}$  при комнатной температуре, которые не зависят от концентрации As. После отжига таких структур в режиме активации As время при комнатной температуре увеличивается до  $5\cdot 10^{-7} \text{ с}$ .

Отжиг нелегированных и легированных In структур в насыщенных парах ртути (при температуре около 220<sup>0</sup>С) приводит к увеличению времени жизни до  $5\cdot 10^{-6} \text{ с}$  при 77К, что в несколько раз больше по сравнению с образцами после роста. Это объясняется уменьшением количества рекомбинационных центров, связанных с дефектами упаковки, присутствующими в структурах КРТ/Si после выращивания методом МЛЭ.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Марин Д. В.

## ДАТЧИК CO<sub>2</sub> НА ОСНОВЕ СВЕТО/ФОТОДИОДОВ

Элоян К. С.

Новосибирский государственный университет

В помещениях с большим скоплением людей: офисы, детские дома, больницы и другие общественные места, за небольшой промежуток времени, уровень CO<sub>2</sub> начинает превышать допустимую норму (500-650 ppm). Углекислый газ при больших (более 1000 p.p.m.) концентрациях отрицательно воздействует на умственную работоспособность людей, повышая сонливость, уменьшая инициативность. Для мониторинга CO<sub>2</sub> широко используются датчики измерения концентрации на оптическом методе. Такие датчики помогают экономить энергию потребления воздухоочистительных приборов/систем.

Оптический метод заключается в том, что имея источник излучения и фотоприёмник можно определить концентрацию за счёт способности газа поглощать свет в узком спектральном ИК диапазоне с центром полосы ~ 4,23 мкм. Пропуская излучение от светодиода через объём воздуха, содержащий CO<sub>2</sub>, часть света поглотится и по изменению фотосигнала фотодиода можно определить концентрацию в этом воздухе.

В качестве источника излучения [1] и приёмника можно взять свето/фотодиод на основе p-n перехода AlInSb, так как можно оптимально подобрать нужную ширину запрещённой зоны, чтобы максимум излучения приходился на 4,23 мкм. Нами были получены теоретические спектры излучения и фоточувствительность свето/фотодиодных структур на основе AlInSb с помощью программы по моделированию процессов рекомбинации. В ходе анализа с экспериментальными расчётами был сделан вывод, что исходные данные по коэффициенту поглощения для AlSb являются не точными. С учётом правок относительно коэффициента поглощения, данная структура подходит для основы создания датчика CO<sub>2</sub>.

Работа выполнена в рамках Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН и АО «Тион Умный микроклимат».

---

1. Desmond Gibson and Calum McGregor, A Novel Solid State Non-Dispersive Infrared CO<sub>2</sub> Gas Sensor Compatible with Wireless and Portable Deployment

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

## **Определение плотности энергетических состояний в квантующем магнитном поле для модели Кейна**

Эркабоев У. И.

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

В изучении энергетических спектров электронов в полупроводниках и металлах исключительную роль сыграло применение квантующих магнитных полей. Как показал Ландау в своей классической работе, приложение магнитного поля к системе электронов вызывает глубокую перестройку энергетического спектра электронов, сопровождающуюся появлением при определённых значениях энергии особенностей плотности состояний.

В работе [1] определены плотности энергетических состояний в сильном магнитном поле при температуре жидкого азота. В этих работах экспериментальные результаты сравнивались с моделью Кейна в узкозонных полупроводниках. Там не обсуждались влияния температуры на плотности энергетических состояний в квантующем магнитном поле.

Мы определяем плотности энергетических состояний в единице объема без учёта спина в кейновском законе дисперсии при наличии магнитного поля.

В этой работе разработана новая методика определения плотности энергетических состояний в квантующем магнитном поле с помощью модели Кейна. Для неквадратичного закона дисперсии показано, что плотность состояний в сильном магнитном поле при увеличении температуры совпадает с плотностью состояний в образце без магнитного поля. Показано, что с ростом температуры уровни Ландау за счёт термического уширения смыкаются и  $N_s$  превращаются в плотность состояний в отсутствие магнитного поля.

---

1. Ravich Yu.I., Efimova V. A., Smirnov I.A.. Investigation methods of semiconductors in application to plumbum halcogenids PbTe, PbSe and PbS (Nauka, Moscow, 1968) p.229

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

# ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

УДК 539.126.4

## Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ , $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ на детекторе КМД-3

Грибанов С. С.

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

Данная работа посвящена изучению процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ ,  $\eta \rightarrow \gamma\gamma$  по статистике, набранной на детекторе КМД-3 в 2011 и 2012 гг. в диапазоне энергий от 1.2 до 2.0 ГэВ в системе центра масс.

Вклад процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$  в полное сечение аннигиляции электрон-позитронной пары в адроны при энергии 1.5 ГэВ в центре масс достигает 5%[1]. Сечение  $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$  определяет вклад адронов в поляризацию вакуума, которая необходима для вычисления аномального магнитного момента мюона. Сравнивая экспериментальные измерения и теоретические расчеты для этой величины, можно выполнить проверку Стандартной модели.

В работе получен ряд выводов о динамике аннигиляции электрон-позитронной пары в  $\eta\pi^+\pi^-$ . Распределения по углу и инвариантной массе  $\pi$ -мезонов в эксперименте не противоречат соответствующим распределениям в моделировании процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ , в котором учтено только одно промежуточное состояние  $\eta\rho(770)$ . Следовательно, вклад  $\eta\rho(770)$  в изучаемый процесс является доминирующим. Однако в будущем, при большей статистике, можно будет оценить долю  $\eta X$ , где  $X \neq \rho(770)$ .

Результат измерения борновского сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$  был использован для вычисления бранчинга распада  $\tau^- \rightarrow \eta\pi^-\pi^0\nu^\tau$  [1-3] в гипотезе сохранения векторного тока.

Борновское сечение  $e^+e^- \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$  и бранчинг распада  $\tau^- \rightarrow \eta\pi^-\pi^0\nu^\tau$ , полученные в анализе хорошо согласуются с результатами, полученными на других детекторах [1,4,5].

- 
1. Aulchenko V. M. et al. (SND Collaboration), Phys. Rev. D 91, 052013 (2015)
  2. Olive K. A. et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C 38, 090001 (2014).
  3. Cherepanov V. and Eidelman S., Nucl. Phys. Proc. Suppl. 218, 231 (2011).
  4. Aubert B., et al. (BaBar Collaboration), Phys. Rev. D 77, 092002 (2008).
  5. Akhmetshin R. R. et al. (CMD-3 Collaboration), Phys.Lett.B 489:125-130 (2000).

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

**Изучение распадов  $B^+ \rightarrow p\bar{p}K^+$  на детекторе Belle**

Гудкова К. С.

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Целью данной работы является изучение каскада  $B^+ \rightarrow (c\bar{c})K^+ \rightarrow p\bar{p}K^+$ , где  $(c\bar{c})$  – чармоний, и получение относительных вероятностей распада  $(c\bar{c}) \rightarrow p\bar{p}$  для различных чармониев. Для исследования данной реакции использовались данные, полученные в эксперименте Belle (интегральная светимость  $\sim 710 \text{ фб}^{-1}$ ). Для определения критериев отбора использовалось сигнальное моделирование Монте-Карло с применением процедуры оптимизации. В результате было отобрано 3600 событий; в спектре инвариантных масс  $p\bar{p}$  отчётливо видны пики  $\eta_c(1S)$ ,  $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$  и  $\eta_c(2S)$ . Для данных чармониев были измерены относительные вероятности распада  $(c\bar{c}) \rightarrow p\bar{p}$ . Данные результаты могут быть полезны для проверки теоретических моделей мезонов.

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

## Детектор ионов на основе газовых электронных умножителей для ускорительной атомной масс-спектрометрии

Затримайлов К. В.

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

В ИЯФ СО РАН разработан ускорительный масс-спектрометр, применяющийся для радиоуглеродного датирования археологических и геологических образцов. В основе метода лежит определение концентрации радиоактивных материалов в образце, например, изотопа углерода  $C^{14}$  и изотопа бериллия  $Be^{10}$ . Однако существует проблема отделения этих изотопов от других изотопов того же элемента, а также от изобар, то есть нуклидов других элементов, имеющих одинаковое с ними массовое число. Поэтому была сформулирована задача идентификации ионов, в частности, трёх различных изотопов углерода ( $C^{12}$ ,  $C^{13}$  и  $C^{14}$ ) и изобарных бора и бериллия ( $B^{10}$  и  $Be^{10}$ ).

Для этих целей был создан детектор ионов, представляющий собой камеру, наполненную изобутаном при низком давлении (около 50 Торр). В передней стенке камеры расположено отверстие, через которое будет проходить пучок ионов, а в другом её конце размещён толстый ГЭУ (THGEM) и считывающий электрод (анод). Ионы будут двигаться в приложенном электрическом поле (для подачи напряжения в камеру вделаны 7 высоковольтных токовводов). Для калибровки детектора применялся источник  $\alpha$ -частиц на основе плутония-238.

Данная работа посвящена моделированию прохождения ионов и  $\alpha$ -частиц через изобутан, а также сборке и калибровке детектора. При моделировании были получены пробеги ионов и  $\alpha$ -частиц в газе и зависимости их энерговыделения от пройденного ими расстояния. После сборки детектора была экспериментально измерена форма выходного сигнала при прохождении  $\alpha$ -частиц. Для моделирования использовалась программа SRIM, а последующие расчёты выполнены в программном пакете ROOT.

В работе показано, что в детекторе невозможно разделить отдельные изотопы углерода, но изобары  $B^{10}$  и  $Be^{10}$  могут быть разделены с высокой точностью. Наблюдаемая в эксперименте форма сигнала хорошо совпадает с результатами моделирования.

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

## **Сцинтилляционный счетчик с использованием переизлучателя длины волны**

Кириленко П. С.

Новосибирский государственный университет

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

Одним из способов регистрации широких атмосферных ливней является сцинтилляционный метод. Попадая в сцинтиллятор, частицы ливня испускают свет, который регистрируется фотоумножителем (ФЭУ). Для увеличения вероятности регистрации ливня, счетчик должен иметь большую площадь. Сбор света с большой поверхности, в свою очередь, требует использования ФЭУ с большим фотокатодом. Стоимость таких ФЭУ велика. Целью работы является создание счетчика для гамма-обсерватории TAIGA (Тункинская долина, Иркутская обл.), которые должны соответствовать нескольким критериям - большая площадь сцинтиллятора (1м<sup>2</sup>), низкая стоимость и защищенность от грунтовых вод (предполагается помещать счетчики на 1-2м под землю). В работе представлена конструкция счетчика, в которой для светосбора используются пластины - световоды с переизлучателем (шифтеры). Шифтер представляет из себя узкие полоски органического стекла с добавлением спектросмещающей добавки. Полоски устанавливаются на торцах сцинтиллятора. Сцинтилляционный свет, попадая в шифтер, поглощается и изотропно переизлучается. После чего часть фотонов захватывается в угол полного внутреннего отражения и транспортируются к ФЭУ. Такая система позволяет использовать ФЭУ с фотокатодом малой площади, вследствие чего, малой стоимости. Мною был собран прототип с использованием шифтеров и площадью сцинтиллятора 0.25 м<sup>2</sup>. В ходе работы мною проведена калибровка ФЭУ, измерена амплитуда сигнала и временное разрешение от космических частиц для различных координат попадания в сцинтиллятор, проведен отбор и определение основных параметров шифтеров и ФЭУ. В результате работ определены оптимальные параметры будущего детектора - размеры и толщины сцинтилляционных пластин, шифтеров, тип ФЭУ.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Кравченко Е. А.

## Изучение электрон-позитронной аннигиляции в четыре пиона

Козырев Е. А.

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

Изучение свойств аннигиляции электрон-позитронной пары в адроны при энергии в с.ц.м. меньше 3 ГэВ является важной экспериментальной задачей ввиду непертурбативности КХД в этой области энергий и, как следствие, отсутствия точных теоретических предсказаний. Искомые сечения нужны для расчета вклада адронной поляризации вакуума в бегущую электромагнитную постоянную и аномальный магнитный момент мюона. Сравнение этого момента со значением, измеренным непосредственно, важно для проверки Стандартной Модели. Кроме того, изучаемый в данной работе процесс  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  в приближении сохранения G-четности содержит изовекторные промежуточные состояния, что позволяет произвести сравнение этого процесса со спектральной функцией соответствующего распада, протекающего также через векторный ток. Данное сравнение с прецизионной точностью важно для проверки CVC гипотезы, изучения как изотопических поправок так и электро-магнитного смешивания изовекторного и изоскалярного токов. Другой важной целью изучения рождения четырех псевдоскалярных мезонов является определение параметров возбужденных состояний векторных промежуточных состояний.

Изучение данного процесса важно с точки зрения уточнения его вклада в адронную поляризацию вакуума, что, в частности, необходимо для исследования аномального магнитного момента мюона. А также данный процесс характеризуется богатой промежуточной структурой (омега пи0, a1 пи, a2 пи и др.), детальный анализ которых актуален и не был осуществлен в области энергий до 2 ГэВ в системе центра масс. 2. Данный процесс содержит как нейтральные, так и заряженные пионы, поэтому необходимы исследования эффективности срабатывания, практически, всех систем детектора КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000, что позволит внести вклад в поддержание функциональности и конкурентоспособности детектора.

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

## Измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ с детектором КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000

Коробов А. А.

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

С 2011-го года в Институте ядерной физики СО РАН на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 ведется набор экспериментальных данных. с детекторами КМД-3 и СНД. Коллайдер сканирует энергии в диапазоне от 0.3 до 2 ГэВ, максимальная планируемая светимость -  $2 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Целью экспериментов является измерение сечений и изучение динамики  $e^+e^-$  аннигиляции в адроны при низких энергиях; определение параметров легких векторных мезонов и других промежуточных частиц; поиск экзотических состояний (тетракварки, глоболы и др.). Данные с СНД и КМД-3 имеют большое значение для: 1)увеличения точности предсказания адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона в рамках Стандартной Модели; 2) разработки теоретических моделей КХД при низких энергиях; 3) проверки гипотезы сохранения векторного тока при сопоставлении данных прямых измерений сечения  $e^+e^-$  - аннигиляции с данными из распадов тау-лептонов. Целью данной работы было измерение сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$  в диапазоне от порога до  $\phi$ -мезона.

Для анализа отбирались события с четырьмя или тремя неколлинеарными треками от  $\pi^+$  и  $\pi^-$ . Для трехтрековых событий предполагается, что один из пионов не зарегистрировался. Для определения критериев отбора и эффективности регистрации сигнальных событий был создан Монте-Карло генератор процесса, воспроизводящий его динамику. Основными фоновыми процессами в данном анализе являются:  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ , где  $\pi^0 \rightarrow e^+e^-\gamma$ ;  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$ ;  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-\pi^0$ . Эффективность регистрации была рассчитана из моделирования. При определении сечения также учитывались радиационные поправки.

В данной работе были получены предварительные результаты по сечению  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$  в диапазоне энергий от порога до 1 ГэВ в с. ц. м.

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

## Вычисление полного сечения рассеяния процесса рождения $e^+e^-$ пар в столкновениях тяжёлых ионов с помощью метода дифференциальных уравнений

Мингулов К. Т.

Новосибирский государственный университет

Метод дифференциальных уравнений — один из наиболее мощных и общих подходов к вычислению многопетлевых интегралов.

Недавно в рамках этого метода произошел существенный прогресс. В работе [1] было замечено, что во многих случаях система дифференциальных уравнений при соответствующем выборе базиса может быть сведена к так называемой *эпсилон-форме*:

$$\frac{d \mathbf{J}}{d x} = \varepsilon M(x) \mathbf{J},$$

где  $\varepsilon$  — параметр размерностной регуляризации. Такой вид уравнений делает поиск требуемого разложения по  $\varepsilon$  почти тривиальным. Основной проблемой является поиск базиса  $\mathbf{J}$ , при котором система принимает такой вид. Недавно в работе [2] был предложен полуавтоматический алгоритм для приведения систем дифференциальных уравнений к эпсилон-форме.

Благодаря этим продвижениям оказывается возможным просто решить некоторые задачи, которые раньше казались очень сложными. В частности, в нашей работе мы применяем этот метод к вычислению полного сечения рассеяния процесса  $Z_1 Z_2 \rightarrow Z_1 Z_2 e^+ e^-$  в борновском приближении. Полученный результат точен по относительной скорости ядер и выражается через гармонические полилогарифмы. Этот результат, в частности, позволяет ответить на вопрос о точности знаменитой формулы Дж. Рака [3] для высокоэнергетической асимптотики сечения.

---

1. Henn J. M., Multiloop integrals in dimensional regularization made simple // Phys.Rev.Lett. — 2013. — № 110.

2. Lee R. N., Reducing differential equations for multiloop master integrals // JHEP — 2015. — № 4-108.

3. Racah G., Sulla nascita di coppie per urti di particelle elettrizzate // Il Nuovo Cimento — 1937. — № 14. — С. 93–113.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Ли Р. Н.

**Система черенковских счетчиков АШИФ детектора КЕДР**

Овтин И. В.

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный технический университет

В настоящее время в ИЯФ СО РАН на детекторе КЕДР, работающем на  $e^-e^+$ -коллайдере ВЭПП-4М, проводятся эксперименты по изучению адронных сечений в области энергий в системе центра масс от 3 до 11 ГэВ. Для идентификации частиц используется система аэрогелевых черенковских счетчиков со сбором света с помощью переизлучателя спектра – система АШИФ (Аэрогель, ШИФтер и Фотоумножитель). Наличие в эксперименте системы идентификации, позволяющей разделять  $\pi$ - и  $K$ -мезоны на уровне достоверности больше трех стандартных отклонений в диапазоне импульсов от 0.6 до 1.5 ГэВ/с, позволит уменьшить статистическую и систематическую ошибки при измерении масс  $D$ -мезонов. Так же наличие такой системы дает возможность получить вероятности распадов  $\rho$ -мезонов в пары  $\pi$ -,  $K$ -мезонов и протонов, а так же на  $\gamma$ -квант и два адрона.

Метод АШИФ был предложен в ИЯФ в 1992 г. Радиатором света служит аэрогель диоксида кремния с показателем преломления 1.05. Сбор света и транспортировка его к фотоприемнику осуществляется с помощью переизлучателя спектра (шифтера), сделанного из ПММА с добавкой ВВQ. Это позволяет уменьшить количество ФЭУ в системе, увеличивая размер счетчика. В качестве фотонных детекторов используются ФЭУ на основе микроканальных пластин (ФЭУ МКП), способные работать в магнитном поле до 2 Тл.

С 2013 г. система АШИФ в полном объеме успешно работает в эксперименте. Система содержит 160 счетчиков (1000 литров аэрогеля), расположенных в два слоя. В связи с увеличением числа каналов в два раза были модернизированы и налажены система высоковольтного питания, система контроля шумов ФЭУ МКП и отлажено программное обеспечение для двух слоев. Создана программа реконструкции событий для двух слоев системы АШИФ и проведена калибровка по космическим частицам, в результате которой определены реальные координаты счетчиков. Неэффективность регистрации релятивистских частиц при пороге 0.1 ф.э. для одного слоя  $1\div 2\%$ , для двух слоев  $(1.6 \pm 1.1) \cdot 10^{-4}$ .

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Кравченко Е. А.

## Изучение процесса аннигиляции $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ в канале $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ с детектором КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000

Рабусов А. В.

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

В 2009 года в Институте ядерной физики вступил в строй новый электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2000 с проектной светимостью  $L=10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Диапазон энергий коллайдера в системе центра масс: от 320 МэВ до 2 ГэВ. Для регистрации продуктов аннигиляции  $e^+e^-$  в местах встречи пучков установлены детекторы СНД и КМД-3. За время работы коллайдера на детекторе КМД-3 набрана интегральная светимость  $\approx 60 \text{ пб}^{-1}$ .

Главной задачей данного коллайдера является прецизионное измерение сечений рождения адронов в  $e^+e^-$  аннигиляции в области энергий близких к масштабу  $\Lambda_{\text{QCD}} \approx 300 \text{ МэВ}$ , где невозможно использовать теорию возмущений для расчётов в квантовой хромодинамике. Для описания адронных процессов при таких энергиях используют феноменологические теории (в частности, модель векторной доминантности), в которых большая часть параметров должна извлекаться из эксперимента.

Для анализа процесса  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  в канале  $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  использовались данные в окрестности  $\phi$ -мезона. Отбирались события с двумя треками и тремя и более кластерами в калориметре, не привязанные к трекам. Полярный угол каждого трека ограничивался в диапазоне  $|\theta-\pi/2| < 0,67$ . Для подавления фона от  $K^+K^-$  делается ограничение на коллинеарность треков. Фотоны сортируются по энергии, фотон с максимальной энергией рассматривается как монохроматический фотон в переходе  $\phi \rightarrow \eta\gamma$ . Выполняется кинематическая реконструкция в гипотезе «два пиона, три фотона», требуется выполнение закона сохранения четырёхимпульса. Число событий вычисляется из распределения инвариантной массы трёх пионов. Для определения эффективности регистрации используется Монте-Карло моделирование. Основными фоновыми процессами являются  $\pi^+\pi^-\pi^0$ ,  $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ ,  $K_S K_L$ .

Получены предварительные данные для  $\phi$ -мезона. Созданную процедуру анализа предполагается распространить на всю область энергий коллайдера.

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

## **Измерение радиационной стойкости сцинтилляционных кристаллов йодистого цезия, активированного таллием**

Седов Е. В.

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

Для регистрации гамма квантов в экспериментах физики высоких энергий широко используются сцинтилляционные счетчики на основе кристаллов йодистого цезия. Важной характеристикой сцинтилляторов является их радиационная стойкость — сохранение значения сцинтилляционной эффективности и её однородности по объему сцинтиллятора при воздействии ионизирующего излучения.

В связи с модернизацией эксперимента BELLE возникла необходимость проверки радиационной стойкости сцинтилляционных кристаллов калориметра.

Для проверки радиационной стойкости были отобраны 4 кристалла йодистого цезия, активированного таллием, имеющих форму усеченной пирамиды, и тестовый кристалл цилиндрической формы. Сцинтилляционные кристаллы обернуты слоем пористого тефлона и помещены в контейнер алюминизированного лавсана. Измерительный стенд состоит из светонепроницаемого объема, фотоэлектронного умножителя, радиоактивного изотопа цезия 137, расположение которого может изменяться с помощью шагового двигателя, настольного аналого-цифрового преобразователя, датчика температуры и управляющего компьютера.

Кристалл устанавливается на входное окно ФЭУ, напряжение на котором и положение радиоактивного источника регулируется управляющим компьютером. По положению пика полного поглощения определяется значение относительного световыхода и его неоднородности в кристалле.

Сцинтилляционные кристаллы облучаются на линейном ускорителе. Доза полученной радиации контролируется датчиком дозы. Датчик состоит из сцинтилляционного кристалла, фотодиодов и предусилителя. После облучения, в течении нескольких недель измеряются характеристики сцинтилляционных кристаллов. Благодаря полученным данным можно определить характерные зависимости радиационной стойкости от полученной дозы ионизирующего излучения.

Научные руководители – Матвиенко Д. В., д-р физ.-мат. наук Шварц Б. А.

## Изучение конверсионного распада омега мезона в эта мезон и электрон-позитронную пару в заряженных модах распада эта мезона на детекторе КМД-3

Туснин А. К.

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

Спектр инвариантных масс лептонных пар в конверсионных распадах может дать информацию об электромагнитной структуре нейтральных мезонов. Интерес к изучению конверсионных распадов также вызван экспериментами по изучению свойств кварк-глюонной плазмы, в которых важным источником информации о физических свойствах является количество лептон-антилептонных пар.

Детектор КМД-3 принимал участие в эксперименте на ускорительном комплексе ВЭПП-2000, в течении которого было набрано большое количество данных вблизи массы  $\omega$  мезона ( $L \sim 10 \text{ пкбн}^{-1}$ ), благодаря чему появилась возможность изучить редкие процессы. Целью данной работы является измерение вероятности конверсионного распада  $\omega \rightarrow \eta e^+ e^-$ . Процесс изучается в каналах распада  $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  и  $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$ . Количество искомым событий определяется путём аппроксимации распределений по полному импульсу, энергии, инвариантной массе  $\pi^+ \pi^- \gamma\gamma$  и  $\gamma\gamma$  для первой моды распада  $\eta$ , и инвариантной массе  $\pi^+ \pi^- \gamma$  для второй. В ходе проделанной работы с помощью моделирования

1) Изучены основные свойства распадов  $\eta$  и разработаны критерии отбора;

2) Разработан алгоритм разделения этих событий друг от друга;

3) Разработан алгоритм разделения  $\pi$  мезонов от лептонов.

Разработанные критерии отбора были применены к экспериментальным данным, набранным на энергии в системе центра инерции вблизи массы  $\omega$  резонанса. Полученные результаты позволяют установить верхний предел на вероятность искомого распада. Ведётся анализ фоновых процессов, которыми являются  $\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  с последующим Далиц-распадом  $\pi^0$ , и  $\omega \rightarrow \eta \gamma$  с последующей конверсией фотона на веществе трубы в электрон-позитронную пару. Первый процесс был изучен, и при разработанных критериях отбора его вклад существенен. Данные результаты полезны для последующих экспериментов с набором большей статистики.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Казанин В. Ф.

## Однофотонная аннигиляция позитрона на связанном электроне

Фартушев И. В.

Томский государственный педагогический университет

Хорошо известно, что свободные электрон и позитрон в силу законов сохранения энергии и импульса могут аннигилировать на два и более фотона [1]. Однако, когда одна из частиц находится в связанном состоянии во внешнем поле, то часть импульса передается полю. В этом случае, возможна однофотонная аннигиляция.

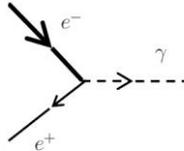


Рис.1 Диаграмма Фейнмана

Диаграмма Фейнмана, описывающая однофотонную аннигиляцию позитрона на связанном электроне, показана на рисунке 1. Здесь тонкая стрелка – свободный позитрон, жирная стрелка – электрон в связанном состоянии, пунктирная – испущенный фотон.

В работе рассмотрена аннигиляция позитрона при столкновении с водородоподобным ионом. Вычислено дифференциальное сечение процесса. Исследована зависимость сечения от заряда ядра и состояния электрона.

Возможность однофотонной аннигиляции электрона и позитрона ранее была рассмотрена, при каналировании позитронов в кристаллах [2].

1. Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П.. Квантовая Электродинамика. М.: Наука, 1989. 704 с.

2. Kalashnikov N. P., Mazur E. A., Olczak A. S.. Annihilation of Relativistic Positrons in Single Crystal with production of One Photon // arxiv.org/pdf/1507.05453.

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

## **Исследование влияния параметров модуляции бихроматического поля накачки квантового стандарта частоты на его стабильность.**

Андрюшков В. А., Попков И. Д. Стещенко Т. С.  
Новосибирский государственный университет

Все более широкое распространение получают миниатюрные атомные стандарты частоты на основе резонанса когерентного пленения населённых состояний (КПН) в парах щелочных металлов. Эффект КПН заключается в том, что при распространении бихроматического лазерного поля сквозь пары щелочного металла атомы среды перестают взаимодействовать с излучением в случае, если разность частот бихроматического поля с высокой точностью равна частоте перехода между подуровнями их основного состояния. Таким образом, резонанс КПН возникает в спектре пропускания оптической среды при модуляции частотной отстройки бихроматического поля. Высокое качество резонанса КПН позволило использовать его в качестве квантового репера в атомных стандартах частоты (АСЧ), магнитометрах и др.

Стабильность АСЧ на основе резонанса КПН зависит от различных параметров системы и в высокой степени от параметров модуляции частотной отстройки бихроматического поля – частоты и амплитуды модуляции.

Цель работы – определить зависимость стабильности АСЧ от частоты и амплитуды модуляции бихроматического поля накачки и найти их оптимальные значения, при которых стабильность разработанного стандарта максимальна.

Измерения проводились на лабораторном образце АСЧ [1] для 3 различных оптических ячеек с парами рубидия-87 внутри. Ячейки отличались геометрической формой и качеством антирелаксационного покрытия, что соответствовало разным ширинам резонанса КПН (500 Гц, 2 кГц и более 10 кГц). Измерения проводились для амплитуд и частот модуляции в диапазоне от 100 Гц до 4 кГц.

В результате была получена зависимость стабильности исследуемого АСЧ от амплитуды и частоты модуляции частотной отстройки бихроматического лазерного поля и показано, что наилучшая стабильность АСЧ для всех ячеек достигается при амплитуде модуляции 2 кГц и частоте модуляции 2 кГц, а также проведен анализ полученных результатов.

---

1. Khripunov S., Radnatarov D., Kobtsev S. // Proc. of SPIE. – 2015. – Vol. 9378. – 93780A.

## Экспериментальное исследование одиночных спазеров

Бенимецкий Ф. А.

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск

Одним из наиболее приоритетных направлений в современной оптике является создание искусственных оптических метаматериалов. Ежегодно появляется несколько тысяч научных работ, посвящённых оптическим метаматериалам, в основе принципа действия которых лежит поверхностный плазмонный резонанс в металлах. Особое место среди новых оптических устройств, основанных на таких метаматериалах занимает спазер (Surface Plasmon Amplifier by Stimulated Emission of Radiation) – генератор когерентных локальных полей оптической частоты с помощью поверхностных плазмонов.

Спазер, как и обычный макроскопический лазер, содержит три принципиальных компонента – усиливающую среду, резонатор и накачку. Роль резонатора в спазере играет наночастица благородного металла, а активной средой являются молекулы красителя, инфильтрованные в оболочку из  $\text{SiO}_2$ . В отличие от лазера, резонатор спазера обеспечивает обратную связь для поверхностных плазмонов, а не оптических мод. Активная среда подбирается таким образом, чтобы частота перехода в основное состояние была близка к плазмонной частоте металлической наночастицы, в таком случае происходит эффективная безызлучательная передача энергии в плазмонную моду. Плазмоны создают высокие локальные поля, которые возбуждают активную среду и стимулируют большую эмиссию в эту плазмонную моду, что и определяет положительную обратную связь. Этот процесс развивается лавинным образом и приводит к когерентной генерации поверхностных плазмонов. Далее эти когерентные плазмоны усиливаются при взаимодействии с активной средой оболочки и, таким образом, появляется когерентное лазерное излучение. Размеры такого нанолазера в несколько раз меньше длины волны излучаемого им света.

Данная работа посвящена исследованию одиночных спазеров с различной геометрией методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и ближнепольной сканирующей оптической микроскопии (БСОМ). Получены изображения пространственного распределения интенсивности излучения спазера методом БСОМ на микроскопе Nanonics MultiView 2000. Полученные результаты соотнесены с теоретическими работами.

Научный руководитель – д-р физ.-мат. наук Плеханов А. И.

## Рассеяние волны на параллельных цилиндрах в борновском приближении

Берёза А. С.

Новосибирский государственный университет

В работе рассматривается задача рассеяния плоской электромагнитной волны на двух параллельных однородных цилиндрах кругового сечения. Общей аналитической теории для такой системы нет, имеются лишь решения для различных частных случаев. К примеру, изучено аналитически рассеяние на одном идеально проводящем цилиндре [1], найдено численное решение для цилиндра эллиптического сечения [2], для двух цилиндров на диэлектрической подложке [3] и массива диэлектрических или проводящих цилиндров [4].

Свободное пространство с основным цилиндром берется за невозмущенную среду, распределение поля в котором известно в аналитических функциях. Строится функция Грина к уравнению Гельмгольца этой системы, второй же цилиндр предстает в качестве возмущителя, от воздействия которого поле записывается в виде борновского ряда. С помощью теоремы Грина получены интегральные уравнения, связывающие внешнее поле и поля внутри цилиндров, которые разрешаются методом последовательных приближений.

В работе построена функция Грина для продольной и поперечной поляризации по отношению к оси цилиндров. Для случая рассеяния р-волны получена первая борновская поправка к рассеянному полю. Первое борновское приближение хорошо согласуется с результатом численного решения.

- 
1. Harrington R. F. Time-harmonic electromagnetic fields // IEEE Press 2001, p. 232.
  2. Зимовец С. В., Гешев П. И. Метод граничных интегральных уравнений для расчета рассеяния света на двумерных наночастицах // Журнал технической физики, том 76, вып. 3, стр. 1-6, 2006.
  3. Belai O. V., Frumin L. L., Perminov S. V., Shapiro D. A. Scattering of evanescent wave by two cylinders near a flat boundary // EPL, том 97, вып. 1, стр. 10007, 2012.
  4. Elsherbeni Z., Kishk A. A. Modeling of cylindrical object by circular dielectric and conducting cylinders // IEEE Transactions on antennas and propagation, том 40, вып. 1, стр. 96-99, 1992

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

## **Оптическая система для захвата атомов рубидия в оптические дипольные ловушки**

Васяткин Н. В.

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

Лазерное охлаждение и захват атомов открыли новые возможности для выполнения квантовых вычислений, прецизионных спектроскопических измерений и создания оптических стандартов частоты. Для захвата нейтральных атомов широко используются оптические дипольные ловушки, в которых атом удерживается нерезонансным лазерным излучением в области максимума интенсивности сфокусированного лазерного пучка.

Атомы в оптических дипольных ловушках перспективны для реализации квантовых компьютеров. Применение полупроводниковых лазеров для создания оптических дипольных ловушек имеет целый ряд преимуществ благодаря компактности полупроводниковых лазеров, низкой потребляемой мощности и малой стоимости.

Для захвата атомов рубидия нами будет использовано лазерное излучение с длиной волны 830 нм и мощностью 100 мВт, сфокусированное в пятно диаметром 5 мкм по уровню  $1/e^2$ , что обеспечит расчетную глубину потенциальной ямы 6,9 мК.

Быстрое включение и выключение оптической дипольной ловушки обеспечивается акустооптическим модулятором. Измеренная дифракционная эффективность составила 75% в первом порядке дифракции.

Для обеспечения высокого качества пространственного распределения лазерного пучка и доставки излучения к вакуумной камере нами используется одномодовое оптическое волокно. Эффективность заведения излучения в оптоволокно составила 50%. Мы измерили профиль пучка на выходе из трехлинзового коллиматора: эллиптичность составила 1,24.

С помощью программы Zemax мы разработали оптическую систему, состоящую из телескопа и асферических линз с числовой апертурой 0,23. Эта система будет применяться для захвата атомов и получения изображения оптической дипольной ловушки методом резонансной флуоресценции.

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

**Взаимодействие световых пучков с высокоэффективными голографическими дифракционными структурами в ФПМ-ЖК при воздействии знакопеременного электрического поля**

Волченко К. В., Кругляков С. А., Семкин А. О.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

В данной работе приведено самосогласованное решение задачи двумерной дифракции Брэгга необыкновенных волн на голографической дифракционной структуре (ГДС), сформированной в фотополимерно-жидкокристаллическом (ФПМ-ЖК) материале, в условиях воздействия на нее знакопеременного электрического поля.

Амплитудные профили прошедшего и дифрагировавшего световых пучков находятся решением системы уравнений связанных волн (УСВ), учитывающих неоднородные изменения амплитудных коэффициентов связи и фазовой расстройки под действием внешнего знакопеременного электрического поля. Ранее решение УСВ было найдено в приближении заданного поля. В условиях высокой эффективности дифракции данный метод применять нельзя. В связи с этим, для решаемой задачи применялся подход, аналогичный приведенному в [1].

Возмущенная область ФПМ-ЖК условно делилась на две области воздействия электрического поля противоположных полярностей, затем для каждой области получались выражения для амплитудных профилей пучков в виде угловых спектров (УС):

$$E_0^e(\theta, E) = T_{00}^e(\Delta, E)E_{p0}^e(\theta) + T_{01}^e(\Delta, E)E_{p1}^e(\theta),$$

$$E_1^e(\theta, E) = T_{10}^e(\Delta, E)E_{p0}^e(\theta) + T_{11}^e(\Delta, E)E_{p1}^e(\theta),$$

где  $E_i^e(\theta, E)$  – УС прошедшего ( $i = 0$ ) и дифрагировавшего ( $i = 1$ ) пучков;  $E_{pj}^e(\theta)$  – УС падающих пучков;  $T_{ij}^e(\Delta, E)$  – парциальные передаточные функции, описывающие Брэгговское взаимодействие пучков на ГДС в ФПМ-ЖК;  $j = 0, 1$  – номер области воздействия электрического поля противоположных полярностей;  $\Delta$  характеризует отклонение от условий дифракции Брэгга;  $E$  – напряженность внешнего электрического поля.

Работа выполнена в рамках базовой части Госзадания Минобрнауки РФ (проект №3642).

---

1. Sharangovich S.N. // Radiophysics and quantum electronics. – 1995. – №38 (9). – P. 610-624.

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, проф. Шарангович С. Н.

## Голографическое формирование управляемых волноводных каналов в композиционных фотополимерно-жидкокристаллических материалах

Викулина И. А., Гусаченко К. О., Дудник Д. И., Семкин А. О.  
Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники

В работе рассмотрена голографическая запись системы волноводных каналов двумя плоскими монохроматическими волнами в образце композиционного фотополимерно-жидкокристаллического материала (ФПМ-ЖК), заключенного между двумя стеклянными пластинами.

Процесс записи описывается системой кинетических уравнений (СКУ), записанных для концентрации мономера и показателя преломления, учитывающие вклад фотополимеризационного и диффузионного механизмов в формирование структуры [1]. Решение СКУ найдено в виде суммы пространственных гармоник [1]:

$$M(\tau, \mathbf{r}) = M_0(\tau) + \sum_{h=1}^H M_h(\tau, \mathbf{r}) \cdot \cos(h\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}),$$

$$n(\tau, \mathbf{r}) = n_0(\tau) + \sum_{h=1}^H n_h(\tau, \mathbf{r}) \cdot \cos(h\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}),$$

где  $M_h(\tau, \mathbf{r})$ ,  $n_h(\tau, \mathbf{r})$  – амплитуды пространственных гармоник мономера и показателя преломления,  $\mathbf{K}$  – вектор решетки.

В случае высокой степени нелинейности процесса записи возможно формирование такого профиля показателя преломления, при котором будет выполняться волноводный режим распространения света в материале. Нелинейность записи достигается за счет изменения соотношения вклада фотополимеризационного и диффузионного механизмов в процесс формирования фотонной структуры.

Записанной системой волноводных каналов можно управлять путем воздействия внешнего электрического поля на отдельные волноводы. Данная возможность реализуется нанесением системы электродов на поверхности стеклянных пластин, как показано на рис. 1а.

Работа выполнена в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки РФ (проект №3.878).

---

1. Миргород В. Г., Довольнов Е.А., Шарангович С. Н.// Доклады ТУСУРа. – 2007. – №2 (16). – С.185-191.

Научный руководитель – канд. физ.–мат. наук, проф. Шарангович С. Н.

## **Волоконный фемтосекундный лазер с увеличенным диаметром моды и высокой энергией в импульсе**

Гонта В. А.

Институт автоматизации и электротехники СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Лазеры ультракоротких импульсов (УКИ) с большой энергией широко используются для создания наноструктур в прозрачных диэлектрических средах, генерации гармоник высоких порядков, генерации терагерцового излучения. Для генерации таких импульсов в последнее время все чаще используются волоконные лазеры. Такие лазеры можно разделить на частично и полностью волоконные. Последние сочетают в себе такие качества как: высокое качество пучка, отсутствие юстировок, компактность и др. При этом ключевыми параметрами являются энергия и длительность генерируемого импульса.

Цель данной работы — проверить возможность масштабирования энергии импульса в полностью волоконном лазере путем одновременного увеличения длины резонатора и диаметра моды, а так же вычислить длительности соответствующих импульсов.

Исследованы зависимости энергии выходного излучения от длины резонатора и диаметра моды. Для изготовления резонатора лазера использовались волокна с диаметром сердцевины 6 и 10 мкм. Длину резонатора меняли путем добавления участка соответствующего волокна.

В ходе работы установлено, что:

1. Энергия УКИ с увеличением диаметра моды выросла до 30 нДж - пропорционально отношению площадей мод (~3).
2. Генерируемые импульсы могут быть сжаты внешним компрессором до длительности 150 фс.
3. Максимальная энергия импульса в лазере с большим диаметром моды также ограничена эффектом вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР).

Таким образом, показано, что масштабирование энергии возможно с увеличением диаметра моды при разных длинах резонатора. Отношение энергий импульсов пропорционально квадрату отношения диаметров мод. При этом импульс остаётся сжимаемым, а увеличение длины резонатора в обеих схемах приводит к образованию импульса ВКР, ограничивающего максимальную энергию УКИ.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Харенко Д. С.

## Фотостабильность растворов некоторых родаминовых красителей

Джамалова А. А.

Самаркандский государственный университет им. А. Навои, Узбекистан

В [1] нами были изучены процессы агрегации молекул в растворах ряда новых синтезированных родаминовых красителей R-160, R-164, R-193, R-195. Для эффективного использования этих красителей при решении различных задач, необходимо иметь сведения о влиянии светового облучения на их спектрально-люминесцентные характеристики. С этой целью растворы изученных красителей в воде и хлороформе облучались нефилтрованным светом ртутно-кварцевой лампы ПРК-2.

Установлено, что под действием светового облучения для водных растворов красителей R-160 и R-193 наблюдается падение интенсивности поглощения и флуоресценции. В этих же условиях для красителей R-164 и R-195 наряду с падением поглощательной и флуоресцентной способности раствора одновременно происходит гипсохромное смещение спектров поглощения и флуоресценции примерно на 15 нм. Аналогичные явления в спектрах поглощения и флуоресценции происходят по мере облучения хлороформовых растворов изученных красителей. Природу процесса обесцвечивания в воде можно объяснить тем, что сначала под действием облучаемого кванта света происходит диссоциация молекул воды по схеме:  $H_2O \xrightarrow{h\nu} H + \dot{O}H$ , и хлороформа по схеме:  $2CHCl_3 + O_2 \rightarrow 2OCCl_2 + 2HCl$ . Далее образовавшийся радикалы взаимодействуют с красителем, и приводят к нарушению его цепи сопряжения, в результате чего происходит обесцвечивание раствора красителя. Следует также отметить, что процесс фотообесцвечивания зависит от структуры молекул красителей, и их акцепторной способности по отношению к радикалам. Для красителей R-164, R-195 по мере облучения часть молекул обесцвечивается по описанному выше механизму. Оставшаяся часть в результате взаимодействия с продуктом фотохимической реакции переходит в биполярную форму. Этим можно объяснить гипсохромное смещение спектров поглощения и флуоресценции.

---

1. Джамалова А.А. Агрегация молекул некоторых родаминовых красителей и её спектроскопическое проявление // Материалы 53-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2015: Квантовая физика. Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2015. с.84.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент Курталиев Э. Н.

## Исследование оптических параметров дугополосной ХеСl/ХеВr-эксилампы барьерного разряда методом скачка давления

Диденко М. В.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Эксилампы барьерного разряда – источники спонтанного ультрафиолетового (УФ) и вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения эксиплексных и эксимерных молекул – нашли заслуженное признание в сфере научных исследований, а также при создании современных технологий.

В данной работе эксилампа рассматривается, как своего рода «тепловая машина», в которой при включении и ходе работы происходит выделение энергии в ходе изохорного процесса. Такой подход позволяет выбирать эффективный режим работы эксиламп, фиксируя лишь временной ход величины давления в эксилампе в самых разных условиях. Данный подход использован для определения баланса энергии в эксилампе барьерного разряда (БР), в которой формируется интенсивное многополосное излучение в тройной смеси Хе-Вr<sub>2</sub>-Сl<sub>2</sub>, также сделано сравнение с однополосными эксилампами на молекулах ХеСl\* и ХеВr\*.

Регистрировали величину динамического скачка давления и энергетическую светимость лампы при включении. Известно, что тепловая мощность  $W$ , рассеиваемая в коаксиальной эксилампе БР пропорциональна  $\Delta p/p$ , где  $\Delta p$  – динамический скачок давления,  $p$  – стартовая величина давления до включения лампы. То есть характеризовать  $W$  можно величиной  $\Delta p/p$ . Эта величина соответствует условиям максимальной эффективности излучения эксилампы.

Смеси сравнивали между собой при одинаковых значениях  $\Delta p/p \sim 0.37$ . Это значение выбрано в силу того, что ему приблизительно соответствуют наибольшие величины средней мощности и эффективности излучения. Результаты проведенных измерений позволяют сделать вывод о том, что данные о временном ходе давления в эксилампе в момент её включения позволяют объективно оценивать условия достижения максимальной эффективности излучения многополосных эксиламп. В частности показано, что в оптимальных условиях эффективность и средняя мощность излучения при переходе от однополосного излучения к многополосному снижаются на несколько процентов, и эффективность излучения ХеВr-эксилампы примерно на 10% ниже, чем у ХеСl-эксилампы.

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

## Исследование динамических фазовых решеток в волоконном лазере с самосканированием частоты

Дробышев Р. В.

Институт автоматики и электротехники СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Волоконные лазеры приобрели большую популярность благодаря таким свойствам как качество выходящего пучка, компактность и надежность. Особое место среди них занимают лазеры с самосканированием частоты. Эти источники генерируют излучение, у которого оптическая частота регулярно изменяется с течением времени без специальных фильтров. Это делает волоконные самосканирующие лазеры удобным инструментом для изучения оптических свойств различных систем, например волоконных брэгговских решеток.

Согласно существующим представлениям эффект самосканирования обусловлен совместным влиянием динамических решеток коэффициента усиления и показателя преломления [1]. Долгоживущие решетки, записанные одними продольными модами лазера в активной среде, влияют на генерацию новых мод лазера, что и приводит к сканированию частоты. При этом стоит отметить, что фазовые решетки оказывают на процесс большее влияние, чем решетки усиления. Однако, несмотря на существенное влияние динамических решеток на эффект самосканирования, экспериментов по их наблюдению не было. Целью данной работы является исследование динамических фазовых решеток в волоконном лазере с самосканированием частоты.

В ходе данной работы был исследован волоконный лазер со сканированием длины волны в области около 1.06 мкм. Для эксперимента был собран интерферометр Маха-Цендера, в одно из плеч которого включена активная среда исследуемого лазера. Интенсивность сигналов, выходящих из интерферометра, фиксировалась с помощью фотодетекторов и осциллографа. Результаты интерференции подтвердили изменение показателя преломления в активной среде в процессе лазерной генерации, что указывает на формирование динамической решетки. Эксперимент также позволил оценить изменение показателя преломления в среде  $\sim 3 \cdot 10^{-8}$ , что соответствует решетке с коэффициентом отражения  $\sim 5\%$ .

---

1. Lobach I.A. et al// Laser Physics Letters, 11(4), 045103 (2014)

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Лобач И. А..

## Формирование точной базы данных параметров спектральных линий сероводорода в диапазоне 600-6500 см<sup>-1</sup>

Егоров О. В.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

В работе представлены результаты разработки методов расчета параметров спектральных линий сероводорода (H<sub>2</sub>S) и формирования на их основе базы данных, открытой для свободного скачивания [1]. Вычисление центров и интенсивностей линий осуществлено посредством эффективного операторного метода с применением эмпирических параметров из опубликованных ранее экспериментальных работ. Дополнительно определены параметры в разложении оператора эффективного дипольного момента полосы  $\nu_2$  (1182 см<sup>-1</sup>).

Проведена верификация результатов авторов работы, а также параметров спектральных линий H<sub>2</sub>S, содержащихся в международной базе данных HITRAN2012 [2]. С этой целью теоретический показатель поглощения H<sub>2</sub>S, полученный методом полинейного (line-by-line) счета, сравнивается с экспериментальными данными из Pacific Northwest National Laboratory [3] в спектральном диапазоне 600-6500 см<sup>-1</sup> с разрешением 0.1 см<sup>-1</sup> и при температуре 298 К. Установлено, что HITRAN2012 не содержит многие колебательно-вращательные линии, расположенные в крыльях полосы  $\nu_2$ , в области полос первой и второй триад резонирующих колебательных состояний H<sub>2</sub>S. Во-вторых, спектральные линии некоторых переходов из HITRAN2012 имеют сдвиги в значениях центров линий. Результаты авторов работы, напротив, наиболее полно описывают наблюдаемые на экспериментальной кривой пики. В работе обсуждаются центры и интенсивности линий H<sub>2</sub>S, отсутствующие в HITRAN2012, но регистрируемые при комнатной температуре и причины разногласий в значениях интегральных интенсивностей полос поглощения данной молекулы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ грант № 15-01-03176 и фондом некоммерческих программ «Династия».

---

1. URL: <http://dept5.rff.tsu.ru/slpdb/slpdb.html>.

2. Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y., et al. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 2013. – V. 130 – P. 4-50.

3. Sharpe S.W., Johnson T.J., Sams R.L., et al. Gas-Phase Databases for Quantitative Infrared Spectroscopy // Applied Spectroscopy. 2004. – V. 58, No.12 – P. 1452-1461.

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

## **Расчет резонатора с керровской линзой для оптоволоконного лазера**

Захаров Я. В.

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Фемтосекундные импульсные волоконные лазеры нашли свое применение во многих сферах деятельности, где необходима большая пиковая мощность коротких импульсов следующих с заданной частотой.

Синхронизация мод с помощью нелинейной ячейки с эффектом керра уже довольно хорошо изучена для твердотельных видов лазеров. Тогда как синхронизация мод с помощью керровской линзы для волоконных лазеров является слабоизученным предметом.

Данная работа посвящена расчету зависимости от мощности коэффициента прохождения через керровскую линзу для одномодового волоконного резонатора

Расчет производился с использованием параксиальной оптики в модели нелинейного уравнения шредингера, с точностью до первого порядка нелинейности.

В работе получены коэффициент прохождения и оптимум фокусировки на нелинейный элемент. Показано что глубина модуляции составляет 15% при мощности равной половине мощности самофокусировки.

Данные результаты на данный момент, используются для оптимизации резонатора в экспериментальной установке.

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

## **Исследование замороженных криопротекторных растворов методом комбинационного рассеяния света**

Карпегина Ю. А.

Институт автоматики и электротриии СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Основной подход к сохранению биоматериалов (клеток, эмбрионов, тканей) на длительное время заключается в их замораживании в криопротекторном растворе по определенному температурному протоколу. В качестве контейнера для замораживания эмбрионов млекопитающих широко используются специальные пластиковые соломины. Несмотря на частое применение пластиковых соломин в задачах криоконсервации, вопрос о том, будет ли распределение криопротектора равномерным вдоль соломины после замораживания, до сих пор оставался невыясненным. С другой стороны, для понимания микроскопических процессов при криоконсервации важно знать концентрацию криопротектора вблизи биоматериала.

Настоящая работа посвящена исследованию распределения глицерина в пластиковой соломинке при воспроизведении протокола замораживания. Это распределение определялось методом комбинационного рассеяния света (КРС). В ходе работы были получены спектры КРС замороженных растворов криопротектора (10% водный раствор глицерина) от различных областей вдоль соломины. По измеренным спектрам определено отношение вкладов глицерина и льда. Также была получена зависимость некристаллической объемной доли вещества в области расположения биоматериала от температуры нуклеации льда. В результате исследования было обнаружено, что в этой области происходит увеличение концентрации глицерина примерно в 5 раз по сравнению со средней в соломинке. Конкретное значение величины области, где происходит это увеличение зависит от температуры нуклеации льда.

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

## Разработка и исследование сверхдлинного волоконного лазера с нелинейным петлевым зеркалом

Кеммер А. В.

Новосибирский государственный университет

Одним из простых методов получения относительно высоких энергий импульсов в лазерах с синхронизацией мод является увеличение длины резонатора лазера до нескольких километров. Однако увеличение длины резонатора при сохранении средней внутррезонаторной мощности излучения из-за роста нелинейных эффектов приводит к нестабильности синхронизации мод и срыву импульсной генерации.

В данной работе представлены результаты исследования импульсного волоконного лазера с нелинейным петлевым зеркалом (НПЗ) для обеспечения режима синхронизации мод и с организацией внутррезонаторного распределения и контроля мощности излучения, с целью подавления нелинейных эффектов в длинном линейном плече резонатора. Схема лазера представлена на рисунке 1. Внутррезонаторное распределение мощности излучения обеспечивается внесением дополнительных потерь перед прохождением длинного отрезка резонатора в 2.5 км в линейной части и предварительным усилением перед возвращением излучения в НПЗ.

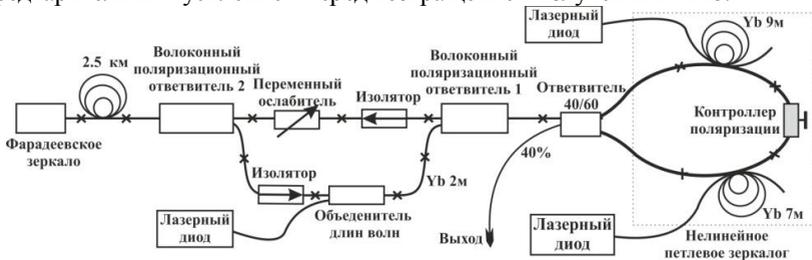


Рис. 1. Схема волоконного лазера с НПЗ.

В разработанном сверхдлинном волоконном лазере удалось получить стабильную синхронизацию мод с высокой средней мощностью излучения (520 мВт) и энергией импульсов порядка 12 мкДж. Измеренная длительность импульсов составила 4.3 нс. Центральная длина волны генерации – 1079 нм, ширина спектра излучения импульсов составила 0.06 нм.

Разработанная схема с использованием предложенного внутррезонаторного распределения и контроля мощности излучения открывает возможности дальнейшего увеличения энергии импульсов волоконных сверхдлинных лазеров с синхронизацией мод, которая в данной работе была ограничена только мощностью излучения накачки и длиной используемого волокна.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Иваненко А. В.

## Рабочие характеристики ИК фотодетекторов и солнечных элементов с квантовыми точками

Кокорина В. В.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

В последние годы исследователи проявляют очень большой интерес к созданию различных оптоэлектронных устройств на основе материала с квантовыми точками германия в кремнии. Такими приборами могут быть фотоприемники инфракрасного диапазона и солнечные элементы.

Целью данной работы являлось моделирование зависимостей величины обнаружительной способности ИК фотодетекторов и коэффициента полезного действия от условий роста, а также определение оптимальных условий синтеза для увеличения этих характеристик.

В работе на основе выражений для обнаружительной способности инфракрасных фотодетекторов [1] и для коэффициента преобразования солнечной энергии солнечным элементом с КТ [2] показывается, что данные характеристики напрямую зависят от поверхностной плотности и разброса КТ по размерам и указывается характер этих зависимостей. Кроме того, при расчете обнаружительной способности фотоприемника было учтено неизбежное наличие темнового тока через прибор, вызванного процессами термоэмиссии и генерационно-рекомбинационными процессами [3].

Рассчитаны предельные характеристики фотоприемников с квантовыми точками Ge на Si (в режиме ограничения фоновым излучением), а также шумовые и сигнальные характеристики подобных фотодетекторов с учетом тепловых процессов генерации. Даны рекомендации по оптимальным условиям синтеза приборных структур.

---

1. Phillips J. Evaluation of the fundamental properties of quantum dot infrared detectors // J. Appl. Phys. – 2002. – V. 91. – № 7. – P. 4590-4594.

2. Войцеховский А. В., Григорьев Д. В., Пчеляков О. П., Никифоров А. И. Эффективность преобразования солнечной энергии солнечным элементом на основе Si с квантовыми точками Ge // Прикладная физика. – 2010. – Т. 6. – № 2. – С. 96-102.

3. Liu G., Zhang J., Wang L. Dark current model and characteristics of quantum dot infrared photodetectors // Infrared Physics and Technology. – 2015. – V. 73. – P. 36-40.

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

**Исследование влияния оптоволокна на поляризацию лазерного излучения и влияния естественных засветок на шумы лавинного фотодиода для воздушной квантовой линии связи**

Коляко А. В.

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

Квантовая криптография является на сегодняшний день наиболее развитой областью квантовой информатики с точки зрения практического применения. Квантовая криптография позволяет реализовать абсолютно секретную передачу данных между двумя легитимными пользователями линии связи посредством одиночных фотонов. Секретность и невозможность незаметного прослушивания посторонним лицом передаваемых данных основана на законах квантовой физики. Одним из первых протоколов квантовой криптографии является протокол BB84, который был обоснован Беннетом и Brassардом в 1984 г. В данном протоколе реализовано распространение ключа – секретной последовательности нулей и единиц с помощью одиночных, поляризованных в двух неортогональных базисах фотонов. Основным возможным применением протокола BB84 является атмосферно-космическая квантовая линия связи, использующая спутниковый отражающий элемент. Для исследования распределения квантового ключа через свободное пространство в Институте физики полупроводников СО РАН создана экспериментальная установка, использующая протокол BB84.

Для передачи одиночных фотонов по воздушной квантовой линии связи предполагается использовать расширители лазерного пучка для уменьшения дифракционных потерь. Излучение лазера передатчика будет передаваться к расширителю пучка (телескопу) по оптоволоконному кабелю длиной порядка одного метра. Излучение, попавшее в объектив приемника (такой же телескоп, как и у передатчика), будет направлено по аналогичному оптоволокну к детекторам одиночных фотонов.

Нами было изучено влияние оптического волокна на поляризацию проходящего излучения. Оценена остаточная эллиптичность излучения при использовании многомодового и одномодового кабелей различной длины. Также проведено экспериментальное исследование влияния естественного дневного освещения на уровень шумов детекторов одиночных фотонов. Дана теоретическая оценка влияния приобретенной эллиптичности излучения и шумов от засветки на количество ошибок при передаче квантового ключа.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Третьяков Д. Б.

## Расчет параметрического усилителя для фемтосекундной лазерной системы

Купцов Г. В.

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

Несмотря на широкое применение высокоинтенсивных лазеров в последние десятилетия, остаются актуальными дальнейшая разработка и модернизация лазерных систем с частотами повторения от одного килогерца. Для увеличения мощности с сохранением коротких импульсов и высокой частоты повторения, применяется метод оптического параметрического усиления chirпованных импульсов (ОРСПА).

В ИЛФ СО РАН разработана тераваттная фемтосекундная лазерная система с частотой повторения импульсов 1 кГц. Система состоит из задающего лазера и двух оптически синхронизованных параллельных каналов: канала лазерного усиления и канала параметрического усиления. В рамках развития канала параметрического усиления, на первом этапе был получен суперконтинуум шириной  $\sim 150$  нм [1], требующий дальнейшего усиления. Как было отмечено выше, в таких системах применяется метод ОРСПА.

На основании литературных данных и результатов моделирования, был выбран нелинейный кристалл ВВО в качестве основного элемента параметрического усилителя в конфигурации векторного синхронизма I типа. Параметры рассчитывались в приближении плоских волн, неистощенной накачки и усиления слабого сигнала.

Были исследованы зависимости ширины фазового синхронизма от угла синхронизма, угла неколлинеарности, температуры и длины кристалла. Определены оптимальные параметры усилителя: длина кристалла – 1.4 см, угол синхронизма –  $23.37^\circ$ , угол неколлинеарности –  $0.6^\circ$ , позволяющие получить 1 ТВт на выходе системы.

---

1. Kuptsov G. V., Petrov V. V., Petrov V. A., Laptev A. V. and Pstryakov E. V. The modeling of supercontinuum generation in photonic-crystal fibre in the spectral broadening unit of high-intensity laser system // Proc.SPIE.–2015.– 9810. – P.98101S-1.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Петров В. В.

## **Кинетика голографического формирования системы управляемых волноводов в ФПМ-ЖК с учетом фотоиндуцированного изменения коэффициента поглощения материала**

Малышева Д. И., Незнанова О. В., Семкин А. О.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Целью данной работы является исследование влияния фотоиндуцированного изменения коэффициента поглощения света композиционным фотополимерно-жидкокристаллическим материалом (ФПМ-ЖК) на кинетику голографического формирования в нем системы управляемых волноводов. .

Процесс формирования системы волноводов описывается кинетическими уравнениями, записанными для концентрации мономера и показателя преломления, учитывающие вклад фотополимеризационного и диффузионного механизмов в формирование структуры [1]. Нелинейность процесса записи определяется соотношением вклада в него фотополимеризационного и диффузионного механизмов.

Поглощение света образцом ФПМ-ЖК приводит к изменению данного соотношения по толщине образца, что в свою очередь приводит к изменению результирующего профиля показателя преломления, что обуславливает изменение условий волноводного распространения световых волн в образце. Фотоиндуцированное изменение коэффициента поглощения приводит к зависимости соотношения механизмов формирования от времени. Таким образом, поглощение света материалом обуславливает сложную пространственно-временную зависимость профиля показателя преломления.

В работе показано, что фотоиндуцированное изменение коэффициента поглощения приводит к практически полному восстановлению профиля показателя преломления до исходного (без учета поглощения), позволяя компенсировать нелинейные искажения его формы по толщине образца.

Стоит отметить, что подобный эффект наблюдается, только если постоянная времени фотоиндуцированного изменения коэффициента поглощения не превышает соответствующую постоянную времени процесса записи структуры.

Работа выполнена в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки РФ (проект №3.878).

---

1. Миргород В. Г., Довольнов Е. А., Шарангович С. Н.// Доклады ТУСУРа. – 2007. – № 2 (16). – С. 185-191.

Научный руководитель – канд. физ.–мат. наук, проф. Шарангович С. Н.

## Импульсно-периодический газоразрядный ХеI-лазер

Мезин А. А.

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

Представлены результаты экспериментальных исследований энергетических и временных характеристик ХеI-лазера с накачкой объемным поперечным электрическим разрядом.

Разрядный промежуток лазера был образован двумя протяженными металлическими электродами, разнесенными на расстояние 21 мм. В экспериментах использовалась высоковольтная система возбуждения, выполненная по типу схемы LC-инвертор с автоматической предыонизацией УФ-излучением искр сбоку. Оптический резонатор образован выходной плоскопараллельной пластиной и внешним плотным Al-зеркалом. Длина оптического резонатора лазера составила 120 см.

В качестве активных газовых лазерных сред использовались газовые смеси буферного газа (Ar, He) и рабочего газа Хе.

Представлены экспериментальные зависимости энергии излучения и полного кпд ХеI-лазера от зарядного напряжения. Получена энергия 30 мДж при зарядном напряжении 23 кВ и давлении газовой смеси Ar:Хе=96.7:3.3% около 4 атм.

Импульсная мощность излучения лазера составила 0.7 МВт. Проведенное исследование показало, что энергия излучения ХеI-лазера может быть увеличена за счет увеличения давления газовой смеси и, соответственно, зарядного напряжения.

Проведена экспериментальная оценка временных характеристик излучения ХеI-лазера. Так, длительность импульса излучения зависела от состава и давления газовой смеси. При использовании Ar в качестве буферного газа длительность импульса излучения лазера в газовой смеси Ar:Хе=96.7:3.3% составила 40 нс. (FWHM) при давлении 3.75 атм., а в газовой смеси He:Хе=98.1:1.9% - 50 нс. (FWHM) при давлении 3.9 атм. Замечено, что при использовании буферного газа He форма импульса излучения ХеI-лазера представлена двумя пиками по 50 нс. (FWHM) отстоящими друг от друга  $\approx$  на 350 нс. Предположительно такая форма импульса излучения объясняется вкладом в образование инверсии населенности рекомбинационных процессов образования Хе\*.

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

## **Повышение эффективности регистрации терагерцовых пикосекундных импульсов поляризационно-оптическим методом**

Меркулова И. Е.

Институт автоматики и электротехники СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Терагерцовая (ТГц) спектроскопия – быстро развивающееся направление, имеющее большие перспективы в биологии, медицине, искусстве, системах безопасности. ТГц излучение может быть использовано для изучения динамики релаксации в наномасштабных физических системах как, например, углеродные нанотрубки, полупроводниковые квантовые ямы и графены. Широко используются импульсные ТГц спектрометры, в которых генерация происходит путем преобразования фемтосекундных оптических импульсов в терагерцовые, длительностью порядка пикосекунд. Наиболее распространенными являются методы генерации в нелинейных средах, полупроводниках и фотопроводящих антеннах. Один из способов их детектирования – поляризационно-оптический метод, используемый в данной работе. Здесь важной частью является кристалл-детектор, в котором из-за эффекта Поккельса происходит изменение поляризации считывающего оптического импульса в ТГц поле. Поэтому актуальной задачей в настоящее время является повышение эффективности детектирования пикосекундных импульсов в поляризационно-оптических системах регистрации.

Целью данной работы является выбор схемы и образца кристалла-детектора теллурида цинка (ZnTe) поляризационно-оптической системы регистрации.

В ходе работы проведено сравнение разных схем системы регистрации. Получены и проанализированы автокорреляционные функции считывающего лазерного импульса после прохождения через кристалл детектор, на основе чего выбрана схема, обеспечивающая наименьшее уширение импульса. Из ряда образцов кристалла ZnTe выбран кристалл, обеспечивающий наибольшую ширину динамического диапазона (~75 дБ).

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

## **Исследование влияния параметров поляризации излучения на эффект двойной структуры резонанса насыщенного поглощения в поле встречных волн**

Новокрещенов А. С.

Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск

Одним из важнейших фундаментальных явлений в области нелинейной лазерной спектроскопии газов является резонанс насыщенного поглощения (РНП) [1]. Как правило, РНП наблюдается в виде одной структуры (провала или пика) в зависимости от параметров поляризации излучения и структуры уровней атомного перехода. Однако, относительно недавно [2] был обнаружен новый эффект, заключающийся в наблюдении двойной структуры РНП: на фоне обычного провала насыщенного поглощения образовывался контрастный более узкий пик. В работе [2] было отмечено, что данный эффект не мог быть вызван ранее известными причинами. Физика эффекта была раскрыта на примере простой двухуровневой модели атома (без учета вырожденности уровней энергии по магнитным подуровням), т.е. без учета поляризации излучения. Вместе с тем, хорошо известно, что параметры поляризации могут оказывать заметное влияние на форму нелинейных резонансов (см., например, [1]).

В настоящей работе устраняется пробел в изучении нового эффекта двойной структуры РНП, а именно, исследуется влияние параметров поляризации световых волн. Как показал аналитический и численный анализ задачи для различных поляризационных конфигураций встречных световых волн, поляризация излучения оказывает сильное влияние как на контраст двойной структуры РНП, так и на саму возможность наблюдения этого эффекта. Были определены оптимальные поляризации полей для наблюдения эффекта двойной структуры. Полученные результаты существенно дополняют знания о новом нелинейном эффекте и могут быть использованы, например, в метрологии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 15-02-08377, 15-32-20330, 14-02-00939).

---

1. Летохов В. С., Чеботаев В. П. Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения. М.: «Наука», 1990.

2. Васильев В. В., Величанский В. Л., Зибров С. А. и др. Двойная структура резонанса насыщенного поглощения на открытом атомном переходе // ЖЭТФ. 2011. Т. 139. №5. С. 883–893.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Бражников Д. В.

## Спектральные методы исследования динамики ионов лазерной плазмы

Панькин Д. О.

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

Плазма, индуцированная мощным лазерным импульсом, обладает схожими характеристиками с космической плазмой. Благодаря этому, эксперименты с лазерной плазмой используются для лабораторного моделирования нестационарных космических процессов, недоступных для прямых измерений, таких как вспышки сверхновых, взаимодействие мощных солнечных вспышек с магнитосферой Земли, генерация ударных волн в межпланетной плазме и т. д. Одним из методов исследования характеристик лазерной плазмы является спектроскопия, которая, в отличие от зондовых измерений, исключает внесение возмущений в исследуемый объект.

Целью данной работы является использование спектральных методов для оценки параметров отдельных компонент лазерной плазмы в процессе разлета.

Лазерная плазма индуцируется  $\text{CO}_2$ -лазером, облучающим в импульсном режиме (длительность импульса  $\sim 100$  нс) полиэтиленовую мишень, находящуюся в вакуумной камере. Отслеживание динамики отдельных ионных компонент плазмы осуществлялось посредством регистрации осциллограмм сигнала ФЭУ, установленного у выходной щели монохроматора, настроенного на соответствующую спектральную линию излучения. На входную щель монохроматора фокусировались изображения различных областей экспериментальной камеры.

В ходе работы были получены спектры излучения ионов плазмы в области лазерной мишени и на расстоянии от нее, из которых были выбраны наиболее характерные линии  $\text{C}^{3+}$  (4647 Å),  $\text{C}^{2+}$  (4267 Å),  $\text{C}^{5+}$  (5290 Å),  $\text{Na}$  (6563 Å) для изучения их динамики. Для данных линий были зарегистрированы осциллограммы интенсивности свечения на разных расстояниях от лазерной мишени, по которым были сделаны выводы о скорости разлета различных компонент и их пространственном распределении в процессе расширения плазменного облака. Также было показано, что при наличии в камере постоянного продольного магнитного поля происходит торможение разлета плазмы в поперечном направлении.

Научный руководитель – Посух В. Г.

## Ab initio расчет дипольного момента для столкновительного перехода $(O_2(a^1\Delta_g))_2 \rightarrow (O_2(X^3\Sigma_g^-))_2$

Першин А. А., Мебель А. М.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени  
С. П. Королева

Радиационные переходы столкновительных комплексов, образованных из двух электронно-возбужденных молекул кислорода  $(O_2(a^1\Delta))_2$ , дают существенный вклад в излучательный баланс атмосферы, кислородсодержащей плазмы и активной среды кислородно-йодного лазера. В данной работе впервые проведен квантово-механический расчет дипольного момента индуцированного столкновениями перехода  $(O_2(a^1\Delta))_2 \rightarrow (O_2(X^3\Sigma))_2$ . Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными.

Из-за внутреннего характера состояния  $O_2(a^1\Delta_g)$ , для расчетов в этой работе использованы многоконфигурационные методы *ab initio*, а именно, метод самосогласованного поля с полным активным пространством (CASSCF), многоконфигурационная теория возмущений второго порядка (CASPT2) и многоконфигурационный метод взаимодействующих конфигураций с учетом одно- и двукратных возбуждений (MRCI). Было использовано полное активное пространство, содержащее 24 электрона, распределенных по 16 орбиталам. В качестве базисного набора волновых функций для атомов кислорода были использованы базисные наборы aug-cc-pVQZ и Sadlej's. Все *ab initio* расчеты были выполнены в программном пакете MOLPRO 2010.

Впервые проведены расчеты констант скоростей столкновительно-индуцированных переходов с использованием поверхностей потенциальной энергии основного и возбужденных состояний димолей кислорода и дипольных моментов переходов, полученных квантово-механическими *ab initio* методами. Лучший результат был получен методом MRCI с использованием базисного набора aug-cc-pVQZ, для которого точность вычисления констант  $k_{634}$  и  $k_{703}$  такова, что отклонения от экспериментальных значений не превышает 40%. Показано, что вибронное взаимодействие существенно увеличивает вероятность перехода на длине волны 703 нм.

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

**Противодействие методу взлома «Time-shift attack» в оптоволоконных квантовых линиях связи**

Плешков А. С.

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

Институт автоматизации и электротехники СО РАН, г. Новосибирск

Основная цель квантовой криптографии состоит в организации абсолютно секретной передачи данных между двумя пользователями посредством одиночных фотонов. Секретность и невозможность незаметного перехвата посторонним лицом передаваемых однофотонных данных основана на фундаментальных законах квантовой механики, в противоположность используемым сейчас методам криптографии, которые основаны на математических закономерностях и, в принципе, поддаются расшифровке.

Несмотря на абсолютную защищенность квантового однофотонного протокола передачи в теории, практические его реализации могут иметь уязвимости. Так в 2006 году была предложена и экспериментально продемонстрирована схема «Time-shift attack», позволяющая незаметно перехватить передаваемое сообщение. Данный метод взлома может быть применен при условии существования временной разницы в эффективности регистрации фотодетекторами одиночных фотонов в силу как индивидуальных особенностей самих детекторов, так и несовершенства управляющей электроники.

Нами был предложен и продемонстрирован способ противодействия методу взлома «Time-shift attack», в котором приемный узел сам выбирает, какой именно детектор одиночных фотонов для конкретного тактового импульса сработает при приеме логической единицы или нуля, что нейтрализует действие «Time-shift attack». Метод продемонстрирован на оптоволоконной квантовой системе связи (двухпроходная автокомпенсационная схема) [1], созданной в Институте физики полупроводников СО РАН и не требует конструктивных изменений оптической и электронной схем.

---

1. Курочкин В. Л., Кривякин Г. К., Зверев А. В., Плешков А. С., Рябцев И. И., «Оптоволоконная квантовая система связи на основе автокомпенсационной оптической схемы», Известия РАН, Серия физическая, 2016, т. 80, № 1, с. 10.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук Третьяков Д. Б.

## **Эффект задержки электромагнитно-индуцированной прозрачности при динамическом возбуждении резонанса когерентного пленения населенностей**

Попков И. Д., Андриюшков В. А., Стещенко Т. С.  
Новосибирский государственный университет

Явление электромагнитно-индуцированной прозрачности (ЭИП) используется в широком спектре приложений. Например, на основе явления когерентного пленения населенностей (КПН), являющегося частным случаем ЭИП, создаются такие приборы, как атомные стандарты частоты, магнитометры и др. В данной работе исследуется эффект, возникающий при быстром (частоты модуляции в десятки и более герц) возбуждении резонанса КПН [1] в т.н. динамическом режиме и представляющий собой задержку возбуждения ЭИП относительно модулирующего сигнала. Фазовой задержкой в данной работе называется величина задержки, выраженная через фазу модулирующего сигнала [2].

Целью работы является исследование зависимости фазовой задержки возбуждения резонанса КПН от частоты модуляции разности оптических частот возбуждающего поля.

В ходе выполнения работы было установлено, что при частотах модуляции менее 1 кГц величина фазовой задержки растет с увеличением частоты по закону, близкому к линейному, а на частотах модуляции более 2 кГц выходит на значение насыщения величиной 2,1 рад. Эксперименты проводились с использованием двух оптических ячеек с парами  $^{87}\text{Rb}$ : внутренняя поверхность одной из них была покрыта антирелаксационным покрытием, вторая же покрытия не содержала. В результате экспериментов было выявлено, что вид зависимости задержки от частоты одинаков для двух этих ячеек, что говорит о том, что эффект задержки обусловлен не релаксационными процессами, а процессами возбуждения.

Таким образом, впервые было установлено, что фазовая задержка возбуждения резонанса КПН относительно частоты модуляции разности оптических частот возбуждающего поля не зависит от типа оптической ячейки и определяется средой. Полученные экспериментальные зависимости качественно совпадают с результатами математического моделирования. .

---

1. Khripunov S., Radnatarov D., Kobtsev S. // Proc. of SPIE. – 2015. – Vol. 9378. – 93780A.

2. Radnatarov D., Khripunov S., Kobtsev S., Taichenachev A., Yudin V., Basalaev M., Popkov I., Andryushkov V. // Proc. of SPIE. – 2016. – Vol. 9763.

Научный руководитель – Хрипунув С. А.

## **Схема возбуждения резонанса когерентного пленения населённости с применением кольца обратной связи.**

Стещенко Т. С., Андрюшков В. А, Попков И. Д.  
Новосибирский государственный университет

Эффект когерентного пленения населенностей (КПН) заключается в том, что трехуровневая квантовая система при взаимодействии с бичастотным оптическим полем переходит в особое темное состояние, при котором атомы среды перестают взаимодействовать с излучением. Этот процесс зависит от частотных отстроек полей и при их сканировании в спектре пропускания возникает узкий пик, так называемый резонанс КПН. Данный резонанс обладает высоким качеством и поэтому широко применяется в различных современных прецизионных датчиках: стандартах частоты, магнитометрах и др. При этом метрологические характеристики устройств на основе резонанса КПН определяются крутизной резонансной кривой (иначе говоря, отношением амплитуды резонанса к его ширине), что существенно зависит от способа возбуждения резонанса. .

Целью настоящей работы является реализация уникальной схемы возбуждения резонанса КПН с применением кольца обратной связи [1] и измерение крутизны резонансной кривой.

Источником излучения накачки являлся одночастотный лазерный диод, генерирующий на длине волны 794.7 нм и мощностью 80 мВт, в спектре которого возбуждались дополнительные частоты за счет фазовой модуляции его излучения электрооптическим модулятором с частотой 3.417 ГГц. После чего мощность излучения контролировалась электрооптическим амплитудным модулятором таким образом, чтобы мощность излучения, рассеянного внутри поглощающей ячейки (и детектируемого фотоприемником №1), оставалась на постоянном уровне при сканировании частотной отстройки полей накачки. Резонанс КПН детектировался фотоприемником №2, который регистрировал мощность лазерного излучения, прошедшего через поглощающую ячейку. Крутизна резонансной кривой составила 0.25 В/кГц, что на порядок больше, чем в схеме без кольца обратной связи.

Таким образом, в данной работе успешно проведена апробация оптической схемы возбуждения резонанса КПН с применением кольца обратной связи и крутизна резонансной кривой составила 0.25 В/кГц.

---

1. Yudin V. I. et al. // Feedback spectroscopy of atomic resonances. // Phys. Rev. A – V. 87- I. 6 – P. 063806 – 2013.

**Оптимизация и управление спектральными характеристиками волоконного иттербиевого лазера с самосканированием частоты**

Ткаченко А. Ю.

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск  
Новосибирский государственный технический университет

Эффект самоиндуцированного периодического сканирования (т.н. самосканирования) частоты генерации в волоконных лазерах был обнаружен несколько лет назад. Самосканирование связано с формированием динамических решеток коэффициента усиления и показателя преломления из-за эффекта выжигания дыр стоячей волной в линейном резонаторе. Одной из ключевых характеристик самосканирующих лазеров является диапазон сканирования. Например, для применения самосканирующего волоконного лазера для опроса большого количества волоконных датчиков на основе волоконных брэгговских решеток требуется как можно большее значение диапазона сканирования. Поэтому ставится задача о поиски схем лазеров с требуемым диапазоном сканирования.

В настоящей работе проведено комплексное исследование влияния характеристик элементов лазера (длина активного световода и потери на выходном зеркале) на спектральную область сканирования. Также исследовано влияние температуры активного световода и температуры лазерного диода на область сканирования. Предложено качественное объяснение полученных результатов.

В результате исследований показано, что режим самосканирования может быть получен практически во всей области усиления иттербия от 1028 до 1080 нм. При этом область самосканирования смещается в коротковолновую область при увеличении поглощенной мощности накачки. Этого можно добиться с помощью уменьшения длины активного волокна, увеличения общих потерь в резонаторе или увеличения эффективности поглощения накачки. Оптимизация характеристик элементов лазера позволила получить диапазон сканирования более 21 нм. Полученные результаты позволяют создавать лазеры с самосканированием с генерацией в требуемой спектральной области.

Научные руководители – канд. физ.-мат. наук Лобач И. А.,  
канд. физ.-мат. наук Гуськов Л. Н.

## Численное моделирование однокубитовых и двухкубитовых операций с холодными атомами

Хамзина Г.Н.

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

Квантовые вычисления являются одной из наиболее актуальных задач в современной физике. Ультрахолодные нейтральные атомы, захваченные в массив оптических дипольных ловушек, могут рассматриваться в качестве логических элементов (кубитов) квантового компьютера.

Мы провели численное моделирование однокубитовых и двухкубитовых квантовых логических операций на примере ультрахолодных атомов рубидия, взаимодействующих с лазерным излучением. В качестве логических состояний кубита выбраны сверхтонкие подуровни основного состояния атомов. Однокубитовые операции могут быть реализованы с использованием резонансного лазерного или микроволнового излучения. Состояние кубита может быть представлено на сфере Блоха. Взаимодействие атомов с резонансным излучением позволяет реализовать поворот вектора на сфере Блоха на определенный угол вокруг заданной оси.

Для двухкубитовых операций используется кратковременное возбуждение атомов в ридберговские состояния, благодаря чему атомы взаимодействуют друг с другом. Может наблюдаться эффект дипольной блокады, когда одновременное возбуждение двух взаимодействующих атомов в ридберговское состояние невозможно [1]. Этот эффект может быть использован для выполнения операции «управляемое НЕ» (CNOT) [2].

В среде Wolfram Mathematica мы провели численное моделирование однокубитовых и двухкубитовых операций путем решения уравнения Шрёдингера для амплитуд вероятностей состояний одного кубита и системы из двух кубитов. Был исследован ключ Адамара. Построены таблицы истинности для двух различных схем двухкубитовой операции CNOT.

---

1. Lukin M.D. et al., Phys. Rev. Lett. V. 87 P. 037901 (2001).

2. Isenhower L. et al. Phys. Rev. Lett. V. 104 P. 010503 (2010).

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

## Фазовая демодуляция при попутном взаимодействии световых волн в кристаллах силленитов

Шмидт А. А., Злобин А. О.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Линейный режим фазовой демодуляции при встречном взаимодействии световых волн, связанный с флексоэлектрическим вкладом в фоторефрактивный отклик, был обнаружен ранее в кристалле титаната висмута среза (100) [1]. В настоящем сообщении представлены результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований эффекта фазовой демодуляции, целью которых было обнаружение флексоэлектрического вклада при попутном взаимодействии в кристаллах силленитов среза (110).

Анализ полученных выражений для сигнала фазовой демодуляции в случае такого попутного взаимодействия для имеющих одинаковую линейную поляризацию стационарной опорной волны с фазово-модулированной сигнальной волной, при ориентации вектора голографической решетки вдоль оси [001], показывает, что линейный отклик на первой гармонике частоты модуляции отличен от нуля только при учете флексоэлектрического вклада в возмущения оптических свойств среды фоторефрактивной голограммой.

Экспериментально эффект исследовался на длине волны 633 нм в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  среза (110) с толщиной  $d = 2,64$  мм. Установка позволяла изменять ориентацию векторов поляризации взаимодействующих волн и задавать значения ее пространственного периода  $\Lambda$  в пределах от 0,6 до 1,2 мкм. Получено, что для  $\Lambda = 0,6$  мкм максимальные значения относительных амплитуд глубины модуляции интенсивности сигнального пучка на первой и второй гармониках составили, соответственно,  $M^{(1)} = 0,006$  и  $M^{(2)} = 0,023$ . Это свидетельствует о существовании заметного флексоэлектрического вклада в фоторефрактивный отклик в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  при исследованном попутном двухпучковом взаимодействии.

---

1. Шандаров С.М., Шамаков С.С., Буримов Н.И., Сюеваева О.С., Каргин Ю.Ф., Петров В.М. Обнаружение вклада обратного флексоэлектрического эффекта в фоторефрактивный отклик в монокристалле титаната висмута // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 95, вып. 12. С. 699-702.

Научные руководители – д-р физ.-мат. наук, проф. Шандаров С. М.,  
канд. техн. наук, доцент Буримов Н. И.

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Berdyugin A. A. ....	6	Карпегина Ю. А. ....	64
Kalimoldin E. E. ....	6	Каршиев А. Б. ....	18
Kaznacheeva A. M. ....	5	Кеммер А. В. ....	65
Makashina K. A. ....	6	Ким В. И. ....	16
Mikhail Moskalev ....	7	Кириленко П. С. ....	43
Ospanova Zh. N. ....	6	Козырев Е. А. ....	44
Razumov N. I. ....	6	Кокорина В. В. ....	66
Toleugozhina S. T. ....	5	Колотовкина Д. А. ....	19
Tusupzhanov A. Ye. ....	5	Коляко А. В. ....	67
Аязов В. Н. ....	74	Коновалов К. В. ....	20
Андрюшков В. А. ....	52, 76, 77	Конфедератова К. А. ....	21
Атабоев О. К. ....	8	Коробов А. А. ....	45
Атовуллаев Т. А. ....	9	Кругляков С. А. ....	56
Белослудцева А. А. ....	10	Купцов Г. В. ....	68
Бенимецкий Ф. А. ....	53	Мальшева Д. И. ....	69
Берёза А. С. ....	54	Маншуров Ш. Т. ....	22
Бурдастых М. В. ....	11	Мебель А. М. ....	74
Васяткин Н. В. ....	55	Мезин А. А. ....	70
Викулина И. А. ....	57	Меркулова И. Е. ....	71
Власов М. Ю. ....	12	Милёхин И. А. ....	23
Волченко К. В. ....	56	Мингулов К. Т. ....	46
Галков М. С. ....	13	Миронов А. Ю. ....	35
Герасименко С. ....	8	Мошкина М. Д. ....	16
Гонта В. А. ....	58	Муталов Н. Т. ....	24, 25
Грибанов С. С. ....	40	Назаров Э. Т. ....	25
Гудкова К. С. ....	41	Насибулов И. А. ....	26
Гулямов А. Г. ....	14	Незнанова О. В. ....	69
Гусаченко К. О. ....	57	Никифоров В. Е. ....	27
Давлатов А. Б. ....	14	Новокрещенов А. С. ....	72
Дейнекин Б. И. ....	15	Овтин И. В. ....	47
Джамалова А. А. ....	59	Панькин Д. О. ....	73
Диденко М. В. ....	60	Першин А. А. ....	74
Дробышев Р. В. ....	61	Петенев Д. В. ....	33, 34
Дудник Д. И. ....	57	Пидгайко Д. А. ....	28
Дю В. Г. ....	16	Пищагин А. А. ....	30
Егоров О. В. ....	62	Плешков А. С. ....	75
Ермолаев А. В. ....	33, 34	Попков И. Д. ....	52, 76, 77
Затримайлов К. В. ....	42	Пушкарева Е. С. ....	33, 34
Захаров Я. В. ....	63	Рабусов А. В. ....	48
Злобин А. О. ....	80	Рахмонов У. Х. ....	24
Зятиков И. А. ....	17	Салиев Т. М. ....	25

Самусов И. А. ....	29	Фартушев И. В. ....	51
Седов Е. В. ....	49	Хамзина Г.Н. ....	79
Семкин А. О. ....	56, 57, 69	Худякова Е. С. ....	16
Серохвостов В. Ю. ....	30	Черкасов Д. А. ....	35
Стельмах В. Г. ....	31, 32	Черосов М. А. ....	36
Стещенко Т. С. ....	52, 76, 77	Шефер Д. А. ....	37
Ткаченко А. Ю. ....	78	Шмидт А. А. ....	80
Томашевич А. А. ....	33, 34	Элоян К. С. ....	38
Туснин А. К. ....	50	Эркабоев У. И. ....	39

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА .....</b>	<b>5</b>
Kaznacheeva A. M., Toleugozhina S. T., Tusupzhanov A. Ye.....	5
Makashina K. A., Ospanova Zh. N., Berdyugin A. A., Razumov N. I., Kalimoldin E. E. ....	6
Moskalev Mikhail .....	7
Атабоев О. К., Герасименко С. ....	8
Атовуллаев Т. А. ....	9
Белослудцева А. А. ....	10
Бурдастых М. В. ....	11
Власов М. Ю. ....	12
Галков М. С. ....	13
Давлатов А. Б., Гулямов А. Г. ....	14
Дейнекин Б. И. ....	15
Дю В. Г., Худякова Е. С., Мошкина М. Д., Ким В. И. ....	16
Зятиков И. А. ....	17
Каршиев А. Б. ....	18
Колотовкина Д. А. ....	19
Коновалов К. В. ....	20
Конфедератова К. А. ....	21
Маншуров Ш. Т. ....	22
Милёхин И. А. ....	23
Муталов Н. Т., Рахмонов У. Х. ....	24
Муталов Н. Т., Салиев Т. М., Назаров Э. Т. ....	25
Насибулов И. А. ....	26
Никифоров В. Е. ....	27
Пидгайко Д. А. ....	28
Самусов И. А. ....	29
Серохвостов В. Ю., Пицагин А. А. ....	30
Стельмах В. Г. ....	31
Стельмах В. Г. ....	32
Томашевич А. А, Ермолаев А. В., Петенев Д. В, Пушкарева Е. С. ....	33
Томашевич А. А, Ермолаев А. В., Петенев Д. В, Пушкарева Е. С. ....	34
Черкасов Д. А., Миронов А. Ю. ....	35
Черосов М. А. ....	36
Шефер Д. А. ....	37
Элюян К. С. ....	38
Эркабоев У. И. ....	39
<b>ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ .....</b>	<b>40</b>
Грибанов С. С. ....	40
Гудкова К. С. ....	41
Затримайлов К. В. ....	42

Кириленко П. С. ....	43
Козырев Е. А. ....	44
Коробов А. А. ....	45
Мингулов К. Т. ....	46
Овтин И. В. ....	47
Рабусов А. В. ....	48
Седов Е. В. ....	49
Туснин А. К. ....	50
Фартушев И. В. ....	51
<b>КВАНТОВАЯ ОПТИКА И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА .....</b>	<b>52</b>
Андрюшков В. А., Попков И. Д., Стещенко Т. С. ....	52
Бенимецкий Ф. А. ....	53
Берёза А. С. ....	54
Васяткин Н. В. ....	55
Волченко К. В., Кругляков С. А., Семкин А. О. ....	56
Викулина И. А., Гусаченко К. О., Дудник Д. И., Семкин А. О. ....	57
Гонта В. А. ....	58
Джамалова А. А. ....	59
Диденко М. В. ....	60
Дробышев Р. В. ....	61
Егоров О. В. ....	62
Захаров Я. В. ....	63
Карпегина Ю. А. ....	64
Кеммер А. В. ....	65
Кокорина В. В. ....	66
Коляко А. В. ....	67
Купцов Г. В. ....	68
Мальшева Д. И., Незнанова О. В., Семкин А. О. ....	69
Мезин А. А. ....	70
Меркулова И. Е. ....	71
Новокрещенов А. С. ....	72
Панькин Д. О. ....	73
Першин А. А., Мебель А. М. ....	74
Плешков А. С. ....	75
Попков И. Д., Андрюшков В. А., Стещенко Т. С. ....	76
Стещенко Т. С., Андрюшков В. А., Попков И. Д. ....	77
Ткаченко А. Ю. ....	78
Хамзина Г. Н. ....	79
Шмидт А. А., Злобин А. О. ....	80
<b>АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ.....</b>	<b>81</b>
<b>ОГЛАВЛЕНИЕ .....</b>	<b>83</b>

МАТЕРИАЛЫ  
54-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ  
СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
МНСК–2016

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

*Материалы конференции публикуются в авторской редакции*

---

Подписано в печать 31.03.2016  
Офсетная печать  
Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60x84/16  
Уч.-изд. л. 4,0. Усл. печ. л. 5,4.  
Тираж 90 экз.

---

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