

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе  
Российской академии наук

# Международная зимняя школа по физике полупроводников

# 2004

## **Научные сообщения молодых ученых**

С.-Петербург – Зеленогорск  
27 февраля – 1 марта 2004 года

*Светлой памяти профессора И. П. Ипатовой,  
внесшей неоценимый вклад  
в организацию и проведение зимних школ ФТИ, посвящается*

## **Организатор**

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе  
Российской академии наук

## **Руководство и организация школы**

*Р. В. Парфеньев, директор школы*

*А. Г. Забродский, зам. директора школы,  
председатель оргкомитета*

*В. И. Перель, председатель программного комитета*

*Е. Л. Ивченко, программный комитет*

**И. П. Ипатова**, программный комитет

*П. С. Копьев, программный комитет*

*О. М. Сресели, программный комитет*

*Р. А. Сурис, программный комитет*

*А. М. Бойко, сессия молодых ученых*

*Л. Ф. Гребеновская, оргкомитет*

*Е. В. Ильина, оргкомитет*

*Т. В. Рогозина, оргкомитет*

*А. Ю. Маслов, издательская работа*

*В. Л. Шубин, техническое обеспечение*

*Т. В. Тиснек, секретарь оргкомитета*

## **Спонсоры**

Российский фонд фундаментальных исследований  
Министерство промышленности, науки и технологий Российской Федерации  
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе  
Российской академии наук

<i>А. А. Грешинов</i>	Двумерный электронный газ в наклонном магнитном поле . . .	4
<i>В. А. Забелин</i>	Исследование распространения излучения в кристаллах светодиодов на базе InGaAlN . . . . .	5
<i>В. А. Зюзин</i>	Проводимость неупорядоченных магнитных мультислойных структур в зависимости от взаимной ориентации намагниченностей . . . . .	7
<i>А. М. Калашикова</i>	Магнитные, оптические и магнитооптические свойства наноструктурных композитов ферромагнитный металл/диэлектрик . . . . .	9
<i>Е. В. Колесникова</i>	Исследование процесса формирования наноразмерных кластеров кремния в диоксиде кремния . . . . .	11
<i>Е. Н. Морозова</i>	Магнитопроводимость трехбарьерных туннельных структур при нулевом смещении . . . . .	12
<i>М. В. Музафарова</i>	Комплексы собственных дефектов в карбиде кремния: исследования методом ЭПР . . . . .	13
<i>А. Н. Русина</i>	Экситонные поверхностные поляритоны в несимметричной трехслойной системе . . . . .	15
<i>М. А. Семина</i>	Энергия связи триона в квантовом диске и в сферической квантовой точке . . . . .	16
<i>Р. В. Соколов</i>	Метод получения и исследование оптических и структурных свойств фуллереновых пленок . . . . .	17
<i>Д. В. Шакура</i>	Аномальное магнитосопротивление $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{0.84}\text{In}_{0.16}\text{Te}$ при низких температурах . . . . .	18

# Двумерный электронный газ в наклонном магнитном поле

А. А. Грешнов

СПбГПУ, Санкт-Петербург

Теоретически изучено влияние наклонного магнитного поля на спектр электронных состояний в квантовой яме. Рассмотрен случай заселения более чем одной подзоны размерного квантования. В этом случае принципиально важным является самосогласованный учет электростатического потенциала, возникающего в квантовой яме из-за неравномерного распределения плотности заряда. Показано, что в наклонном магнитном поле возможно появление необычных участков ветвей зависимости энергии от магнитного поля. Особенностью таких участков является постоянство расстояния между двумя уровнями энергии как функции магнитного поля. Проанализировано влияние наклонного магнитного поля на проводимость двумерного электронного газа. Обнаружено, что в случае заселения более чем одной подзоны размерного квантования характер проводимости может резко меняться при переходе через некоторый критический угол наклона магнитного поля.

Традиционно считается, что учет согласованного электростатического потенциала в двумерном электронном газе не приводит к качественно новым эффектам. Однако в случае заселения более чем одной подзоны размерного квантования такое утверждение несправедливо. В случае поперечного магнитного поля учет согласованного электростатического потенциала приводит к появлению аномальных участков спектра, характеризующихся спаренными уровнями отрицательного наклона [1]. В наклонном магнитном поле вырождение уровней Ландау отрицательного наклона снимается при условии, что им отвечают электронные состояния разной симметрии. При этом появляются области напряженности магнитного поля, в которых расстояние между уровнями остается постоянным. Таким образом, мы имеем уникальную ситуацию, когда изменяя угол наклона магнитного поля можно управлять расстоянием между уровнями энергии в широком диапазоне магнитных полей.

Согласно современным представлениям, квантование проводимости в сильных магнитных полях связано с наличием щели подвижности, разделяющей различные уровни Ландау. Условие возникновения такой щели в рассматриваемом случае выполнено, если расстояние между уровнями энергии превы-

шает ширину «купола» делокализованных состояний  $\Gamma_{\text{ext}}$ . Увеличение угла наклона магнитного поля приводит к росту расстояния между уровнями, поэтому при некотором угле  $\alpha_{\text{кр}}$  расстояние между уровнями Ландау превысит критическое значение  $\Gamma_{\text{ext}}$ . Особенностью такого перехода в случае заселения более чем одной подзоны размерного квантования является резкое появление щели подвижности сразу в широком диапазоне магнитных полей.

Как показывают исследования магнетотранспорта в условиях заселения более чем одной подзоны размерного квантования [2], спаривание уровней Ландау может приводить к подавлению холловского квантования в поперечном магнитном поле. При углах наклона магнитного поля относительно плоскости квантовой ямы  $\alpha > 35^\circ$  в работе [2] наблюдалось восстановление холловского квантования. Такая зависимость от угла наклона магнитного поля связана с ростом величины энергетической щели между уровнями Ландау при увеличении продольной составляющей магнитного поля. В настоящей работе мы предсказываем возможность наблюдения резкого перехода системы из обычного режима проводимости в режим квантового эффекта Холла при критическом угле наклона магнитного поля  $\alpha_{\text{кр}}$ . При этом угол  $\alpha_{\text{кр}}$  определяется из условия появления щели подвижности, т.е. совпадения расстояния между энергетическими уровнями и величины  $\Gamma_{\text{ext}}$ .

Работа поддержана грантами РФФИ (01-07-90299, 01-07-90300, 02-02-17610), INTAS (0175wr), Федеральной программой поддержки ведущих научных школ, Фондом «Династия» и МЦФФМ.

## Литература

- [1] J. Sanchez-Dehesa *et al.*, Phys. Rev. B, **36**, 5070 (1987).
- [2] K. Ensslin *et al.*, Phys. Rev. B, **47**, 1366 (1993).

# Исследование распространения излучения в кристаллах светодиодов на основе InGaAlN

В. А. Забелин

ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

В последние годы был достигнут значительный прогресс в изготовлении полупроводниковых источников излучения в синем спектральном диапазоне.

Светодиоды на базе InGaN/GaN уже получили широкое коммерческое распространение, и актуальным является вопрос улучшения и оптимизации параметров выходящего излучения. Особый интерес вызывает возможность создания источников белого света на основе подобных структур. Одними из основных требований для таких светодиодов является эффективная генерация излучения и вывод его из кристалла с минимальными потерями. Высокие показатели преломления эпитаксиальных нитридных слоев и сапфировой подложки препятствуют выходу света из кристалла вследствие эффекта полного внутреннего отражения. В этом случае эффективность вывода определяется взаимодействием излучения с внутренними и внешними границами раздела в чипе, поглощением света при отражении от металлических контактов и особенностями распространения света, связанными с геометрией кристалла.

В представленной работе описывается трехмерная модель распространения излучения в кристалле светодиода, учитывающая его взаимодействие с различными вариантами внутренних и внешних границ разделов и влияние оптических параметров материалов [1, 2, 3]. Преломление света на гладких внутренних и внешних границах раздела в светодиоде описывается формулами Френеля. Взаимодействие света с тонкопленочными металлическими контактами описывается в рамках волновой оптики и позволяет учесть интерференционные эффекты, влияющие на коэффициенты отражения и пропускания полупрозрачных металлических контактов. Была разработана модель, описывающая диффузное рассеяние света на гранях кристалла, которое позволяет снижать роль эффекта полного внутреннего отражения. Проанализировано влияние степени шероховатости металлического контакта на эффективность рассеяния света и интегральный коэффициент отражения. Изменение геометрической формы кристалла, параметров наносимых металлических контактов, свойств внешних граней чипа способно существенно влиять на эффективность вывода излучения из кристалла и на форму диаграммы направленности выходящего излучения. В рамках представленной работы был проведен детальный анализ влияния различных параметров кристалла светодиода на эффективность вывода излучения. Проанализированы традиционные способы повышения эффективности работы светодиода и их применимость при различных оптических свойствах материалов чипа [4]. Разработаны и предложены несколько новых методов улучшения вывода излучения из кристалла, позволяющие значительно увеличить эффективность работы прибора.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю, С.А. Гуревичу, за поддержку этой работы и Д.А. Закгейму за многочисленные плодотворные дискуссии.

## Литература

- [1] В.А. Забелин, С.А. Гуревич. Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников. Санкт-Петербург, 2002 г.
- [2] В.А. Забелин, С.А. Гуревич. 2-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы». Санкт-Петербург, 2003 г.
- [3] В.А. Забелин, С.А. Гуревич. Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников. Санкт-Петербург, 2003 г.
- [4] V.A. Zabelin, D.A. Zakheim and S.A. Gurevich “Numerical modeling of light propagation in AlGaInN LED chips and methods of their efficiency improvement”. To be published in IEEE J. Selected topic on quantum electronics.

## Проводимость неупорядоченных магнитных многослойных структур в зависимости от взаимной ориентации намагниченностей

В. А. Зюзин

СПбГПУ, Санкт-Петербург

В работе была теоретически исследована проводимость неупорядоченной магнитной мультислойной структуры. Магнитная мультислойная структура — это искусственная структура, в которой чередуются пленки ферромагнитных (Fe, Co) и немагнитных металлов (Cr, Cu, Ru, Ag). Основным интересом исследования таких структур является так называемое гигантское магнетосопротивление — уменьшение электросопротивления структуры в магнитном поле.

Основным механизмом возникновения гигантского магнетосопротивления считается спин-зависимое рассеяние на границе слоев на атомах внедрения от соседнего слоя [1]. Было показано, что магнетосопротивление быстро убывает при увеличении толщины немагнитного металла. Например, максимальное магнетосопротивление для структуры Fe/Cr в случае антиферромагнитного взаимодействия было обнаружено при ширине Fe и Cr в 18 и 9 Å соответственно [2].

Однако в условиях неупорядоченности структуры важным оказывается учет рассеяния на дефектах и примесях кристаллической решетки. И в случае, когда длина свободного пробега электрона проводимости мала по сравнению

с толщиной немагнитного металла, такой фактор рассеяния является определяющим.

Была вычислена поправка к проводимости в зависимости от ориентации намагниченностей ферромагнетиков в случае неупорядоченности структуры. Вычисление проводилось в рамках квантовой теории поправок Альтшулера и Аронова [3].

Рассмотрены предельные случаи большого и малого отношения энергии Таулесса к энергии эффективного ферромагнитного расщепления уровней электронов проводимости. В первом случае проводимость пропорциональна косинусу угла между намагниченностями, во втором случае она пропорциональна квадрату косинуса. Также проанализирована зависимость проводимости от толщины немагнитного металла. Выполнена оценка влияния электрон-магнитного взаимодействия на проводимость.

Впервые рассмотрена проводимость неупорядоченной магнитной мультислойной структуры. Показано, что наличие беспорядка приводит к качественному изменению зависимости проводимости от угла между намагниченностями и от толщины немагнитного металла.

Хочу выразить благодарность своему научному руководителю А. Ю. Зюзину за поставленную передо мной задачу и за обсуждение полученных результатов.

## Литература

- [1] P.M. Levy, S. Zhang, A. Fert, Phys. Rev. Lett. 65, 1643 (1990), Phys. Rev. B 45, 8689 (1992).
- [2] M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich, J. Chazelas, Phys. Rev. Lett. 61, 2472 (1988).
- [3] B.L. Altshuler, A.G. Aronov "Electron-Electron Interaction In Disordered Conductors", Elsevier Science Publishers B.V., 1985.

# **Магнитные, оптические и магнитооптические свойства наноструктурных композитов ферромагнитный металл/диэлектрик**

А. М. Калашникова

ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

В последние годы наноструктурные магнитные композиты привлекают большое внимание благодаря ряду интересных и необычных физических свойств [1]. Подобные гранулированные структуры предоставляют широкие возможности для изучения магнетизма ноль-размерных систем. Среди физических свойств наноструктур особо следует отметить гигантское магнито-сопротивление, высокие потери в СВЧ области спектра, а также большую величину магниторефрактивного эффекта.

В данной работе представлены результаты изучения магнитных, оптических и магнитооптических характеристик группы нанокompозитных материалов на основе диэлектрических матриц  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с внедренными в них наночастицами ферромагнитных сплавов  $\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20}$  и  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{Zr}_{20}$ , отличающихся условиями получения, качественным и количественным составом [2]. Все структуры были получены путем ионно-лучевого распыления. Исследования проводились с использованием линейного магнитооптического полярного эффекта Керра в постоянном магнитном поле до 15 кЭ, а так же метода эллипсометрии. Сочетание этих методов позволило исследовать оптические, магнитооптические и магнитные свойства ферромагнитных сплавов и наноструктур на их основе.

Было обнаружено существенное влияние состава наноструктур, а именно материала диэлектрической матрицы и гранул, на оптические свойства изучаемых материалов. Так, структуры на основе  $\text{SiO}_2$  с наночастицами  $\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20}$  являются прозрачными в спектральном диапазоне выше 4.2 eV, в то время как структуры  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{Zr}_{20}/\text{Al}_2\text{O}_3$  непрозрачны во всем исследованном диапазоне энергий от 0.6 до 5.6 eV. Особенно интересен тот факт, что граница области прозрачности для структур на основе сплава  $\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20}$  является резкой и не может быть описана в приближении теории Друде. Магнитооп-

тическое исследование показало, что величина порога протекания, также как и магнитные свойства наноструктур, а именно величина магнитного момента гранул, суперпарамагнитное поведение и наличие остаточной намагниченности, существенно зависят как от материала гранул, так и от содержания примесей кислорода и азота, определяемого условиями получения наноструктур. Магнитооптическое исследование не только позволило получить информацию о магнитных свойствах наноструктур, но и выявило ряд интересных особенностей в концентрационных зависимостях эффекта Керра. Так, в нанокомпозитах на основе сплава  $\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20}$  наблюдалась резкая немонотонная зависимость эффекта Керра от концентрации в области низких концентраций, что мы объясняем явлением интерференции в тонких пленках нанокompозита. Это предположение подтверждается проведенными расчетами с использованием приближения эффективной среды. В наноструктурах на основе сплава  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{Zr}_{20}$  наблюдалась смена знака эффекта Керра для образцов с высокой концентрацией магнитных частиц. В то же время для образцов того же состава, но полученных в постоянном магнитном поле, смены знака эффекта не наблюдалось. С другой стороны, различия в технологии получения данных нанокompозитов не оказывают такого же существенного влияния на их оптические свойства, как на магнитооптические.

Таким образом, сочетание магнитооптических и оптических методов изучения позволило нам получить новую информацию о широком спектре свойств гранулированных нанокompозитов на основе ферромагнитных сплавов и аморфных диэлектрических матриц.

Автор выражает благодарность научному руководителю Р. В. Писареву и В. В. Павлову.

## Литература

- [1] X. Battle, A. Labarta, J. Phys. D: Appl.Phys. **35**, R15–R42 (2002).
- [2] A.M. Kalashnikova, V.V. Pavlov, R.V. Pisarev *et al.*, Abstracts for International Conference ICFM-2003, 86 (2003).

# **Исследование процесса формирования наноразмерных кластеров кремния в диоксиде кремния**

Е.В. Колесникова

ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

Проведено исследование изменения катодолуминесцентных свойств аморфного диоксида кремния с различным содержанием гидроксильных групп при высокой удельной мощности электронного пучка.

Результаты исследований показали, что под воздействием электронного пучка высокой удельной мощности наблюдаются три стадии в изменении спектров катодолуминесценции: первая — увеличение собственных дефектов структуры, таких как немостиновый кислород и двухкоординированный кремний (рост интенсивности полос излучения на 1.9 и 2.65 эВ). Следующей стадией изменения структуры диоксида кремния является образование наноразмерных кремниевых островков (излучение в зеленой области спектра 2.1–2.3 эВ). В результате длительного воздействия электронного пучка на образец в спектре излучения проявляются полосы, связанные с появлением крупных кремниевых аморфных и кристаллических кластеров с максимумом излучения 1.3 и 1.1 эВ. Повышенное содержание гидроксильной группы в двуокиси кремния замедляет процесс формирования кластеров.

Проведена оценка температуры перегрева микрообъема диоксида кремния под воздействием пучка электронов высокой удельной мощности. Расчет показал, что при токе электронного пучка 100 нА и энергии электронов 5 кэВ максимальная температура перегрева микрообъема диоксида кремния может достигать 1200 °С, что подтверждает возможность формирования кластеров кремния в результате воздействия электронного пучка.

Образование аналогичных дефектов в структуре пленок диоксида кремния наблюдалось при исследовании особенностей катодолуминесценции пленок вблизи границы раздела кремний - термический окисел.

Автор выражает благодарность М.В. Заморянской за общее руководство работой и В.И. Соколова за подготовку образцов и обсуждение результатов. Работа выполнялась на оборудовании лаборатории диагностики материалов и структур твердотельной электроники.

## Литература

- [1] M.V. Zamoryanskaya, V.I. Sokolov, V. Plotnikov, Proc. of the 9th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces, ICFSI-9, Madrid, September 15–19, 2003.
- [2] М.С. Абломова, М.В. Загорьянская, В.И. Соколов, Р.И. Хасанов, Письма в ЖТФ, Т. 29, В. 11, 2003. с. 41–44.
- [3] Л.А. Бакалейников, М.В. Загорьянская, Е.В. Колесникова, В.И. Соколов, Е.Ю. Флегонтова, ФТТ, 2003 (в печати).

# Магнитопроводимость трехбарьерных туннельных структур при нулевом смещении

Е. Н. Морозова

Институт проблем технологии микроэлектроники РАН, Черноголовка, Россия

Исследован вертикальный транспорт в туннельных трехбарьерных гетероструктурах на основе гетеропереходов GaAs/Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As. Измерения проводились в перпендикулярном току магнитном поле до 5 Т в интервале температур 3–45 К. Толщина внешних барьеров симметричных гетероструктур составляла 5 нм, центрального барьера — 35 нм, квантовых ям — 9 нм. По обеим сторонам туннельной структуры размещались сильнолегированные слои GaAs, к которым и подводились омические контакты. В квантовых ямах с помощью дельта-легирования формировались двумерные электронные слои с концентрацией электронов  $2.8 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Туннельная проводимость имела максимум при нулевом напряжении смещения, связанный с междуямным туннельным 2D-2D резонансом в симметричной структуре в равновесных условиях. В работе исследованы температурные,  $\sigma(T)$ , и магнитополевые,  $\sigma(B)$ , зависимости проводимости именно при нулевом смещении (равновесная, или омическая туннельная проводимость).

В отсутствие магнитного поля равновесная проводимость слабо возрастает (на 10%) с увеличением температуры в интервале 3–25 К. В интервале температур 30–45 К равновесная проводимость экспоненциально возрастает почти на два порядка с энергией активации 50 мэВ. Энергия активации коррелирует с расчетной величиной высоты барьера (около 80 мэВ). Заметим, что точный расчет последней величины затруднен, так как состав барьера при концентрациях Al от 10% и ниже сильно зависит от условий роста и способа калибровки ростовой аппаратуры.

С увеличением магнитного поля проводимость туннельной структуры при постоянной температуре уменьшается во всем температурном диапазоне и в поле 5 Т уменьшается на порядок. Однако энергия активации от магнитного поля не зависит. Как и при  $B = 0$  обнаружено два температурных режима в магнитолевой зависимости проводимости, низкотемпературный (3–20 К) и активационный, когда отношение  $\sigma(B)/\sigma(0)$  не зависит от температуры. При низких температурах подавление равновесной проводимости перпендикулярным току магнитным полем хорошо известно и связано с влиянием силы Лоренца на изменение параллельного интерфейсу импульса туннелирующего электрона.

Более интересен высокотемпературный (активационный) режим. Наблюдаемое в этом режиме гигантское положительное магнитосопротивление связано, возможно, с баллистическим транспортом надбарьерных электронов.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ № 04-02-16869 и 02-02-22-004, CNRS-PICS № 1577.

## **Комплексы собственных дефектов в карбиде кремния: исследования методом ЭПР**

М. В. Музафарова

СПбГПУ, Санкт-Петербург

В последние годы значительно возрос интерес к карбиду кремния SiC, что связано с необходимостью создания электронных и оптоэлектронных приборов, работающих при высоких температурах, высоких мощностях и повышенных уровнях радиации. Для целенаправленного изменения свойств SiC и создания приборов на его основе необходимо надежное установление природы собственных и примесных дефектов и их комплексов, а также понимание процессов их создания и разрушения.

Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) является мощным методом для исследований микроструктуры собственных и примесных дефектов в полупроводниках. Использование этого метода позволяет обнаружить парамагнитный дефект в полупроводнике, однозначно установить состав дефекта, его симметрию и окружение. ЭПР дает широкую информацию об электронной структуре дефекта.

Работа посвящена исследованию карбида кремния 6H-SiC, облученного большой дозой реакторных нейтронов. Полуизолирующий образец 6H-SiC вы-

рашен методом Лели и облучен реакторными нейтронами с дозой облучения  $10^{21}$  см<sup>-2</sup>. С целью получения дефектных комплексов кристалл был отожжен при температуре 1500 °С.

Обнаружены несколько новых центров со спинами  $S = 1/2$  и  $S = 1$  и почти аксиальной симметрией вдоль оси кристалла. Сигналы наблюдаются в интервале температур от 300 до 45 К. g-факторы всех центров практически изотропны. Сравнение с результатами предыдущих исследований моновакансий [1, 2], дивакансий [3, 4] и позитронной аннигиляции [5] в карбиде кремния позволило сделать вывод, что наблюдаемые нами центры представляют собой дефектные комплексы.

Особенностью всех обнаруженных центров является сильное хорошо разрешенное сверхтонкое взаимодействие неспаренного электрона с большим количеством (до двенадцати) эквивалентных атомов в решетке SiC. Исследование сверхтонких взаимодействий данных сигналов позволило установить структуру некоторых наблюдавшихся дефектов. Они представляют собой различным образом упорядоченные комплексы собственных дефектов в карбиде кремния.

Выводы: В нейтронно-легированном карбиде кремния SiC, отожженном при 1500 °С, впервые обнаружены дефектные комплексы. Установлена структура некоторых исследованных дефектов. Предложены модели наблюдавшихся центров в виде высокосимметричных комплексов собственных дефектов.

Автор выражает искреннюю благодарность своим руководителям и соавторам И.В. Ильину, П.Г. Баранову, Е.Н. Мохову, С.Г. Конникову за ценные замечания и помощь в работе.

## Литература

- [1] H. Itoh, A. Kawasuso, T. Ohshima, M. Yoshikawa, I. Nashiyama, S. Tanigawa, S. Misawa, H. Okumura, S. Yoshida, Phys. Stat. Sol.(a) **162** 173 (1997).
- [2] H.J. von Bardeleben, J.L. Cantin, L. Henry, M.F. Barthe, Phys. Rev. B **62** 10841 (2000-II).
- [3] V.S. Vainer, V.A. Il'in, Fiz. Tverd. Tela. **23** 3659 (1981).
- [4] N.T. Son, P.N. Nai, E. Janzen, Materials Science Forum Vols.**353-356** 499 (2001).
- [5] A.I. Girka, A.D. Mokrushin, E.N. Mokhov, V.M. Osadchiev, S.V. Svirida, A.V. Shishkin, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **97** 578-590 (1990).

# Экситонные поверхностные поляритоны в несимметричной трехслойной системе

А. Н. Русина

СПбГТУ, Санкт-Петербург

Диэлектрическая проницаемость полупроводника  $\varepsilon(\omega)$  сильно изменяется вблизи частоты экситонного резонанса  $\omega = \omega_0$ . Из соотношения Крамерса–Кронига следует, что когда частота  $\omega < \omega_0$ , то  $\varepsilon(\omega)$  увеличивается, а когда  $\omega > \omega_0$ , то диэлектрическая проницаемость уменьшается и даже может принимать отрицательные значения, если линия поглощения достаточно узка.

Удержание электромагнитного поля в плоском полупроводниковом слое за счет увеличения показателя преломления  $n = \sqrt{\varepsilon(\omega)}$  при  $\omega < \omega_0$  было получено Н.Н. Леденцовым и др. [1]. На основе этого эффекта был создан безволноводный лазер.

В настоящей работе исследована область частот  $\omega > \omega_0$  вблизи экситонного поглощения, где  $\varepsilon(\omega) < 0$ . В типичной для лазера несимметричной трехслойной системе, содержащей средний слой с экситонным резонансом при  $\omega = \omega_0$ , рассмотрено распространение поверхностных поляритонных волн по границам раздела.

Нами установлено, что в рассматриваемой системе существует только два типа решений уравнений Максвелла, каждое из которых в пределе большой толщины среднего слоя локализовано на одной из границ. Такие решения носят название поверхностных поляритонов. Для обоих типов решений нами получено характеристические уравнения.

С помощью этих уравнений мы получили пороги существования поверхностных поляритонов на обеих границах. Нами исследовано, как с изменением толщины среднего слоя изменяются дисперсия волнового вектора поляритонов и области частот, в которых возможны поляритоны. Также в нашей работе рассмотрено влияние ширины линии поглощения на существование поляритонов.

Мы изучили характер деформации электромагнитного поля поляритонов при уменьшении толщины среднего слоя и показали, что влияние близкой второй границы приводит к делокализации поверхностного поляритона и появлению значительной напряженности поля на второй границе.

## Литература

- [1] N.N. Ledentsov, I.L. Krestnikov, M.V. Maximov, S.V. Ivanov, S.L. Sorokin, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, D. Bimberg, C.M. Sotomayor Torres. Appl. Phys. Lett., **69**, 1343 (1996).

# Энергия связи триона в квантовом диске и в сферической квантовой точке

М. А. Семина

СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия

Трионами называют связанные электрон-дырочные комплексы, состоящие либо из двух электронов и дырки ( $X^-$ -трион), либо из двух дырок и одного электрона ( $X^+$ -трион). Интерес к трионам значительно возрос в связи с развитием физики низкоразмерных гетероструктур. Было обнаружено, что в системе, в которой движение носителей заряда ограничено в одном и более направлениях, их энергия связи может значительно увеличиться по сравнению с ее значением в объемном материале [1, 2].

В настоящей работе теоретически исследуется энергия связи трионов в квантовых точках, т.е. полупроводниковых системах, в которых движение электрона и дырки ограничено в трех направлениях. Энергия связи  $X^-$  и  $X^+$ -трионов определяется как разность энергий, необходимых для образования экситона в квантовой точке без носителя заряда и в его присутствии. Эта энергия вычисляется как функция отношения эффективных масс электрона и дырки во втором порядке теории возмущений для сферически симметричной квантовой точки и для квантового диска. Энергия связи триона рассчитана во всем диапазоне отношения масс электрона и дырки. Высота потенциального барьера считается бесконечной.

Обсуждается влияние формы квантовой точки на энергию связи триона. Показано, что энергия связи триона в квантовом диске, сферической квантовой точке и бесконечно глубокой двумерной квантовой яме соотносятся примерно как 4.5:1:1.2. Кроме того, в исследованных системах энергия связи  $X^+$ -триона превосходит энергию связи  $X^-$ -триона.

Найдены границы применимости теории возмущений в исследуемой системе. В пределе очень тяжелых дырок,  $m_h \gg m_e$ , когда теория возмущений не

работает, энергия связи триона в квантовом диске и в сферической квантовой точке была рассчитана в адиабатическом приближении

Результаты данной работы планируется использовать при исследовании трионов, связанных на неоднородностях интерфейса квантовой ямы.

## Литература

- [1] B. Stebe, A. Ainane, Superlatt. and Microstruct. **5**, 545 (1989).
- [2] P.A. Сергеев, P.A. Сурис, ФТТ, **43**, 714 (2001).

# Метод получения и исследование оптических и структурных свойств фуллереновых пленок

Р. В. Соколов

ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

В работе исследовались технологические режимы нанесения фуллерено-основных пленок методом вакуумно-термического напыления из специально приготовленных порошков. Пленки напылялись на вакуумной установке JEOL JEE-4C, обеспечивающей вакуум не хуже  $10^{-6}$  Торр. Конфигурация установки JEOL JEE-4C, а также специально сконструированный в ходе работы подложкодержатель с нагревателем предусматривали возможность нагрева подложки до требуемой температуры и ее контроль с помощью термопары. Фуллереновые пленки  $C_{60}$  выращивались на подложках из оптического кварца, стекла, Si(100), GaAs(100), температура которых поддерживалась около 120 °С.

Пленки фуллеренов  $C_{60}$  выращивались из исходного порошка  $C_{60}$  чистой 99,98% помещенного в ячейку Кнудсена.

Напыление велось при температуре испарителя 350 °С, контролируемой с помощью термопары и регулировавшимся изменением силы тока пропускаемого через испаритель. Испарение фуллеренов происходило через сопла ячейки Кнудсена с последующим осаждением на подложке, находящейся на расстоянии 80 мм над источником. Осаждение велось в течение нескольких десятков минут, после чего заслонка закрывалась, и температура подложки понижалась до 100 °С, и выдерживалась на этом уровне 30 минут, с целью повышения кристалличности пленки.

Морфология поверхности полученных пленок контролировалась с использованием сканирующего электронного микроскопа. Было показано, что при режимах, выбранных для напыления, полученные пленки имели гладкую поверхность с размером шероховатости менее 30 нм. При отклонении от выбранных режимов напыления возникала крупноблочная структура пленки с характерными размерами неровности более 100 нм.

На полученных образцах пленок были проведены структурные исследования, исследованы оптические и катодолюминесцентные свойства при комнатной температуре. Спектры пропускания и фотопроводимости демонстрируют наличие края поглощения в области  $\lambda_T = 525$  нм, а также «оптической» зоны в области  $\lambda_T = 650$  нм. Максимум излучения катодолюминесценции наблюдался при 1.6 эВ.

## Литература

- [1] J. Abrefah, D.R. Olander, M. Blooch, W.J. Siekhaus, Appl. Phys. Lett. 60 (11) 1992
- [2] Т.Л.Макарова, И.Б. Захарова, Т.И. Зубкова, А.Я. Вуль, ФТТ, 1999, т. 41, в. 2
- [3] T. Tada and T. Kanayama, J. Vac. Sci. and Technol. B11 (1993) 2229

## Аномальное магнитосопротивление ( $\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z}$ ) $_{0.84}\text{In}_{0.16}\text{Te}$ при низких температурах

Д. В. Шакура

ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

В полупроводниковой системе  $\text{PbSnTe:In}$  энергетическое положение примесных состояний индия смещается в зависимости от состава матрицы от донорного уровня в  $\text{PbTe:In}$  на фоне зоны проводимости до акцепторного уровня в  $\text{SnTe:In}$ , который находится глубоко в валентной зоне на фоне второй валентной зоны тяжелых дырок. При больших содержаниях индия в  $\text{SnTe}$  примесный уровень размывается в полосу состояний с уширением  $\Gamma \simeq 0.1$  эВ, которая из-за большой плотности состояний пинингует уровень Ферми. Уширение полосы в основном происходит за счет гибридизации примесных состояний с зонными.

При низких температурах в  $\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z}\text{Te:In}$  при увеличении содержания свинца реализуется переход сверхпроводник-диэлектрик, когда примесная по-

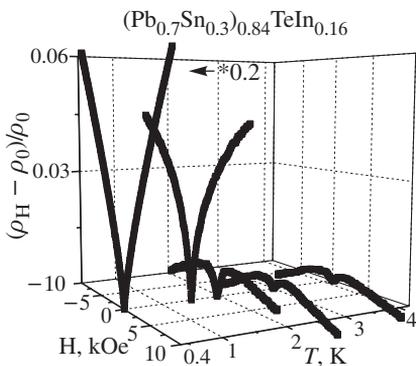


Рис. 1.

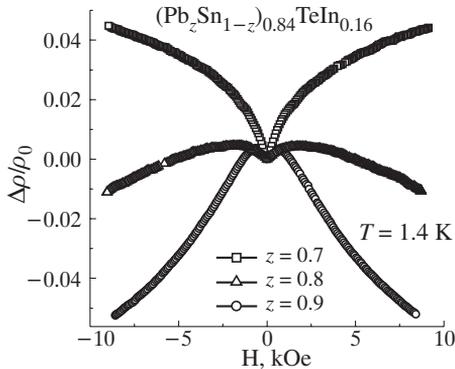


Рис. 2.

лоса In (вместе с уровнем Ферми) выходит из тяжелой валентной зоны, смещается к запрещенной зоне при  $z > 0.7$ . Уменьшение степени гибридизации состояний при таком смещении приводит к сужению примесной полосы, к затрудненному обмену носителей между валентной зоной и примесной полосой из-за возникновения эффективного барьера между различными зарядовыми состояниями центров индия по мере изменения состава матрицы. На диэлектрической стороне перехода, когда примесные состояния находятся около запрещенной зоны, возможны эффекты слабой локализации [1]. Квантовые поправки к проводимости объемных образцов  $\text{PbSnTe:In}$  могут быть обнаружены по двум причинам. Во-первых, из-за большой величины диэлектрической проницаемости ( $\epsilon \simeq 1000$  при  $T = 4.2$  K) рассеяние на куллоновском потенциале пренебрежимо, время неупругого рассеяния растет. Во-вторых, примесные центры индия, как  $U < 0$  центры, формируют короткодействующий потенциал, при рассеянии на котором носителей доля самопересекающихся траекторий возрастает. Действительно, в образцах с  $z > 0.7$  ( $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{0.84}\text{TeIn}_{0.16}$ ) наблюдается аномальное магнитосопротивление, содержащее как положительную (ПМС), так и отрицательную (ОМС) компоненту (см. рис. 1,2), которое можно связать с проявлением эффекта слабой локализации при наличии спин-орбитального взаимодействия зонных носителей [2]. ПМС максимально при низкой температуре и уменьшается для составов  $z = 0.8$ ,  $z = 0.9$ , когда примесная полоса находится около запрещенной зоны.

## Литература

- [1] A. Prinz, G. Brunthaler, Y. Ueta, G. Springholz, G. Bauer, Phys. Rev. B, 59, n. 20 (1999).
- [2] Maekawa S., Fukuyama H., J. Phys. Soc. Jpn. 50, p. 2516 (1981).

---

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ПИЯФ РАН  
188350, Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща  
Зак. 66, тир. 170, уч.-изд. л. 1,25, 20.02.2004 г.