

На правах рукописи

РОЩАНСКИЙ Александр Владимирович

**Исследование процессов оптической ориентации и деполяризации электронов
при вертикальном транспорте в полупроводниковых гетероструктурах**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2003

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего и профессионального образования «Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет»

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук, профессор
Мамаев Юрий Алексеевич

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Бенеманская Галина Вадимовна
Кандидат физико-математических наук, доцент
Андронов Александр Николаевич

Ведущая организация: Санкт-Петербургский Государственный Педагогический
Университет им. Герцена

Защита состоится "19" ноября 2003 г. в 16 ч.00 мин. на заседании диссертационного совета Д212.229.05 при Санкт-Петербургском Государственном Политехническом Университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, II уч. корп. ауд. 265

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГПУ.

Автореферат разослан "17" октября 2003 г.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета
доктор физико-математических наук,
профессор



Титовец Ю.Ф.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Пучки поляризованных по спину электронов находят широкое применение в различных областях физики [1], например в физике высоких энергий и при исследовании магнетизма поверхностей и тонких пленок. В физике высоких энергий источники поляризованных электронов (ИПЭ) интенсивно используются для исследования зависящей от спина структуры адронов, для изучения параметров слабого взаимодействия и нейтральных токов. Так в SLAC (Stanford Linear accelerator, Stanford, USA) источник поляризованных электронов на основе напряженного GaAs фотокатода используется для измерения лево-правой асимметрии в рассеянии поляризованных электронов на пучке неполяризованных позитронов. Исследуя сечение образования фермион-антифермионных пар $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ при энергиях, близких к порогу образования W бозонов, можно получить информацию об особенностях слабого взаимодействия и пределах применимости Стандартной Модели [2].

Эффективность работы ускорителей возрастает квадратично с увеличением степени поляризации пучка. Поэтому, если оптимизация параметров фотокатодов приведет к увеличению поляризации со стандартного на сегодняшний момент значения около 75% до 90%, то продуктивность их работы может быть почти удвоена. Кроме величины поляризации следует принимать во внимание и другие параметры фотокатодов. Современные катоды должны обеспечивать высокий квантовый выход в точке максимума поляризации, стабильность параметров получаемого пучка, возможность многократной активации катода и большое время жизни. Еще одним важным фактором является сохранение характеристик электронного пучка при обращении направления вектора поляризации электронов.

В большинстве экспериментов с пучками поляризованных электронов основную информацию получают в результате измерения зависящей от спина асимметрии эффектов, т.е. малых разностей сигналов, регистрируемых при изменении направления вектора поляризации (P) возбуждающего электронного пучка. При этом необходимым условием для детектирования этой разницы является наличие пучка электронов большой интенсивности, с высокой поляризацией и стабильностью параметров при инверсии направления поляризации. ИПЭ, использующие фотоэмиссию из полупроводниковых гетероструктур при возбуждении циркулярно поляризованным светом, показали себя как наиболее эффективные для подобных экспериментов. Одним из наиболее перспективных направлений развития таких ИПЭ является использование в качестве фотокатодов структур на основе полупроводниковых сверхрешёток (СР), которые состоят из чередующихся слоев полупроводников с различными постоянными решетки. Такие фотокатоды имеют ряд привлекательных черт. Каждый из слоев, образующих сверхрешетку, может иметь толщину меньше критической, но суммарная толщина сверхрешетки может превышать это значение. Вследствие многослойной структуры сверхрешеток проще реализуется модульное легирование, что существенно для уменьшения потерь во время транспорта к поверхности и решения проблемы ограничения максимального тока, получаемого от катода. Однако, расчёт

таких структур достаточно сложен и, как показывают современные экспериментальные данные, не всегда согласуется с экспериментом. Процессы спинового транспорта и спиновой релаксации в гетероструктурах имеют свои особенности, которые в настоящее время изучены недостаточно хорошо, что затрудняет оптимизацию фотокатодов на основе полупроводниковых сверхрешёток. Поэтому в настоящее время остро встал вопрос решения задачи оптимизации параметров таких катодов, которая позволила бы подавить механизмы спиновой релаксации на различных стадиях фотоэмиссии поляризованных электронов при сохранении неизменными высокой интенсивности и хорошей стабильности источника.

Таким образом, более глубокое исследование процессов спинового транспорта в сверхрешётках имеет важное значение для дальнейшего усовершенствования ИПЭ. Этим и определяется актуальность настоящей работы, посвященной исследованию механизмов спиновой релаксации при вертикальном транспорте электронов в полупроводнике и выходе в вакуум для различных гетероструктур на основе соединений арсенида галлия.

Целью работы является экспериментальное исследование процессов спинового транспорта и спиновой релаксации в полупроводниковых структурах на основе тонких ненапряжённых слоёв GaAs, полупроводниковых сверхрешёток AlInGaAs/AlGaAs и компенсированных по напряжению полупроводниковых сверхрешёток GaAsP/InAlGaAs, а также оптимизация их состава и профиля легирования для получения эмиттеров с высокой степенью поляризации, высоким квантовым выходом и отсутствием эффекта ограничения заряда.

Научная новизна работы.

1. Впервые исследована эмиссия поляризованных электронов из нового типа сбалансированных по напряжению полупроводниковых сверхрешёток $Al_xIn_yGa_{1-x-y}As/GaAs_{1-z}P_z$.
2. Впервые методом поляризованной фотоэмиссии исследовано влияние пониженной симметрии на гетерограницах полупроводниковых сверхрешёток на оптические свойства структуры и спиновый транспорт электронов.
3. Впервые исследована эмиссия поляризованных электронов из нового типа полупроводниковых сверхрешёток $Al_xGa_{1-x}As/Al_yIn_zGa_{1-y-z}As$ с увеличенным разрывом валентной зоны.
4. Впервые произведена количественная оценка потерь поляризации при нахождении электронов в области изгиба зон на границе полупроводник-вакуум и при выходе в вакуум через активационный слой для полупроводниковых гетероструктур с приповерхностным слоем арсенида галлия.

Научная и практическая значимость работы заключается с том, что полученные данные помогают совершенствовать методы проектирования эмиттеров поляризованных электронов. Исследованы новые типы напряженных и компенсированных по напряжению сверхрешёток и показана перспективность их использования в источниках поляризованных электронов с высокой степенью поляризации, хорошей эффективностью и позволяющих преодолеть эффект ограничения заряда при импульсном фотовозбуждении.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. При поляризованной фотоэмиссии из полупроводниковых гетероструктур с приповерхностным слоем арсенида галлия потери поляризации в области приповерхностного изгиба и при выходе в вакуум через активационный слой составляют 6-8% по относительной величине и ограничивают максимально возможную поляризацию электронов, эмитируемых из таких структур на уровне 92-94%.
2. Компенсированные по напряжению полупроводниковые сверхрешётки $Al_xIn_yGa_{1-x-y}As/GaAs_{1-z}P_z$ могут быть использованы в качестве фотокатодов для источников поляризованных электронов и имеют хороший потенциал для дальнейшей оптимизации параметров.
3. Пониженная симметрия интерфейсов на гетерограницах полупроводниковых сверхрешёток не влияет на максимальное значение поляризации в главном поляризационном максимуме, однако оказывает существенное влияние на положение второго максимума и минимума в поляризационном спектре.
4. Использование $Al_yIn_zGa_{1-y-z}As/Al_xGa_{1-x}As$ широкозонных напряженных сверхрешёток с увеличенным расщеплением валентной зоны позволяет реализовать источники поляризованных электронов с высокой поляризацией и отсутствием эффекта ограничения заряда фотоэмиссии.

Апробация результатов работы. Основные результаты данной работы докладывались и обсуждались на Всероссийских и международных конференциях и симпозиумах: 7 международном симпозиуме «New approaches to High-Tech: Nondestructive Testing and computer simulations in Science and Engineering» (Санкт-Петербург, Россия, 2003), международном симпозиуме «Наноструктуры: Физика и Технологии» (Санкт-Петербург, Россия, 2001), международном симпозиуме SPIN 2002 (Бостон, США, 2002), 9 международном симпозиуме «Polarized Sources and Targets» (Блумингтон, США, 2001) и пятой Российской конференции по физике полупроводников (2001).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Она содержит 173 страницы машинописного текста, 82 рисунка и 6 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 100 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы и сформулированы цель, научная новизна и практическая ценность работы. Представлены основные результаты и положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание разделов диссертации.

Первая глава диссертации носит обзорный характер. В ней рассмотрены принципы возникновения оптической ориентации в полупроводниковых кристаллах группы A_3B_5 и создание отрицательного электронного сродства на поверхности катода. Приведены результаты теоретических расчётов скорости деполяризации электронов для различных механизмов спиновой релаксации. Обобщены имеющиеся на настоящий момент экспериментальные данные по эмиссии поляризованных электронов из соединений A_3B_5 , а также тонких напряжённых слоёв и полупроводниковых сверхрешёток. В первом параграфе

диссертации даются основные понятия связанные с поляризацией. Во втором параграфе рассмотрено возникновение оптической ориентации в кристаллах GaAs при облучении его циркулярно-поляризованным светом. В третьем параграфе приведены результаты исследования горячей фотолюминесценции и показано, что поляризация «горячих» электронов, не успевших термализоваться на дно зоны проводимости, может значительно превышать теоретический предел для поляризации в арсениде галлия, составляющий 50%. В четвёртом параграфе подробно рассмотрены различные механизмы спиновой релаксации в соединениях группы A_3B_5 . Приведены результаты теоретических расчётов времени спиновой релаксации для различных механизмов, а также экспериментальные данные по сравнению их эффективности при различных условиях. Пятый параграф посвящён описанию создания состояния с отрицательным электронным сродством на поверхности полупроводникового катода.

В шестом параграфе рассматриваются структуры с напряженными слоями, где за счет рассогласования постоянных решетки между рабочим и буферным слоями в рабочем слое возникает напряжение, что приводит к снятию вырождения верха валентной зоны и делает возможной эмиссию электронов с поляризацией, превышающей 50%. Продемонстрировано, что для создания достаточной величины расщепления валентной зоны необходимо выращивать пленки с высоким напряжением. С другой стороны, практический интерес представляет создание структур характеризующихся не только значительной величиной поляризации, но и хорошим квантовым выходом. Это приводит к необходимости увеличивать толщину рабочего слоя. Два этих требования находятся в противоречии, поскольку при толщине рабочего слоя превосходящей критическую напряжение релаксирует за счет возникновения дефектов в эпитаксиальной пленке. Для пленки GaAs толщина критического слоя при рассогласовании постоянных решеток порядка 1% составляет всего 10-20 нм, в то время как для получения значительного квантового выхода требуется толщина порядка 100 нм. Теоретические исследования [3] показали, что параметры ИПЭ на основе напряженных полупроводниковых пленок близки к максимально достижимым значениям для ИПЭ этого типа. Дальнейший прогресс в развитии ИПЭ может быть достигнут при использовании структур более высокого кристаллического совершенства, таких как полупроводниковые СР. В седьмом параграфе рассмотрена эмиссия поляризованных электронов из СР. В конце главы сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе описывается автоматизированный комплекс для исследования фотоэмиссии поляризованных электронов. Главными особенностями данного комплекса являются: полное компьютерное управление процессом измерения, шлюзовая система для загрузки образцов и криостат, позволяющий изменять температуру образца в процессе измерения. Конструктивно он состоит из двухкамерной вакуумной установки, источника циркулярно поляризованного света, детектора поляризации и блока компьютерного управления.

Первый параграф второй главы посвящен вакуумной установке, которая включает в себя две основные камеры - камеру обработки образцов и камеру детектора поляризации,

шлюзовую систему, а также системы откачки и электронной оптики. В первой камере происходит создание поляризованных фотоэлектронов, включая предварительную обработку образца, во второй камере – измерение величины степени спиновой поляризации электронов.

Во втором параграфе рассмотрена многоступенчатая система откачки, в которую входят: форвакуумный насос со скоростью откачки 1 л/с, цеолитовые сорбционные насосы ЦВА-03-2 со скоростью откачки около 5 л/с, два магниторазрядных насоса НДМ-400 и НДМ-100 а также неиспаряемые геттеры. Она обеспечивает вакуум не хуже $1 \cdot 10^{-10}$ торр.

В третьем параграфе описана оптическая система, которая создает циркулярно поляризованный свет с величиной степени поляризации не менее 98% и обеспечивает обращение направления вектора поляризации с частотой около 31 кГц. Свет ксеноновой лампы ДКСШ-200, сфокусированный конденсором, проходит через сменный оптический фильтр, монохроматор SOLAR ML100, систему формирования циркулярно поляризованного света и попадает на исследуемый образец. Размер светового пятна на поверхности эмиттера составляет порядка 2.5×1 мм. Монохроматор снабжен блоком управления, который связан с компьютером через последовательный порт по интерфейсу RS232. Программно возможно перестраивать длину волны в пределах 360-1200 нм с минимальным шагом 0,03 нм. Для подавления фона и предотвращения прохождения волн второго порядка дифракции использовались восемь светофильтров.

После монохроматора расположена призма Глана-Томпсона, которая вместе с фотоупругим модулятором используется для создания циркулярно поляризованного света. Перед входом в вакуумную камеру расположена диафрагма, которая регулирует интенсивность светового потока на образец. Размер отверстия диафрагмы контролируется компьютером.

В четвёртом параграфе рассмотрена процедура измерения величины степени поляризации пучка эмитируемых электронов. Мы использовали детектор Мотта с рабочим напряжением 30кВ и толстой золотой фольгой $d \approx 100$ нм на подложке из майлара толщиной 3,5 мкм. Детектор был прокалиброван методом задерживающего потенциала. Полученное значение эффективной функции Шермана было проверено сравнением результатов измерения для двух идентичных фотокатодов на нашем детекторе и в Стэнфорде (США) на ускорителе электронов SLAC.

Пятый параграф посвящён системе компьютерного управления и описанию алгоритмов измерения степени поляризации и квантового выхода. Наличие компьютерного управления процессами измерения позволило производить быстрое тестирование создаваемых гетероструктур и получать более полную информацию об их свойствах.

В третьей главе представлены результаты исследования фотоэмиссии поляризованных электронов из фотокатодов на основе арсенида галлия с различной толщиной рабочего слоя. Полученные данные позволяют оценить вклад различных механизмов деполяризации на разных этапах фотоэмиссии. Кроме того, получена количественная оценка максимально достижимого значения степени поляризации пучка фотоэлектронов для полупроводниковых эмиттеров на основе соединений A_3B_5 . Первый параграф посвящён описанию структуры исследуемых катодов и особенностей процедуры подготовки катодов к измерениям.

Исследуемая серия катодов включала в себя четыре структуры на основе тонких ненапряжённых слоёв арсенида галлия различной толщины. Все образцы были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке ФТИ им. Иоффе РАН. Для эффективного подавления эмиссии электронов, обратно рассеянных на границе «подложка-рабочий слой», использовался буферный слой n-типа, легированный кремнием. Для подавления механизма спиновой релаксации Бира-Аронова-Пикуса [4] было применено профильное легирование рабочего слоя, с высоким уровнем легирования последних 10 нм рабочего слоя для получения высокого квантового выхода. Все образцы имели на поверхности защитный слой мышьяка, предназначенный для предохранения поверхности от окисления при контакте ее с воздухом. В процессе термической очистки поверхности этот слой испарялся.

Следует заметить, что введение в структуру буферного слоя n-типа приводит к эффективному уменьшению толщины рабочего слоя на величину, примерно равную половине ширины образовавшегося n-p перехода. Однако в настоящей работе этот эффект не учитывался и полные толщины исследуемых структур принимались равными соответственно 70, 100, 150 и 300 нм.

Во втором параграфе представлены экспериментальные данные, полученные для исследовавшихся образцов при различных температурах – спектральные зависимости поляризации и квантового выхода от длины волны возбуждающего света, а также зависимости поляризации от квантового выхода при контролируемой деградации поверхности катода (т.н. кривые деградации). Третий параграф посвящён анализу полученных данных. На рисунке 1 приведены зависимости максимальной поляризации от толщины образца при различных температурах для всех исследованных образцов. Кроме того, на рисунок добавлены данные из [5], полученные нами ранее для образцов толщиной 500, 1000 и 1500 нм. Заметим, что поляризация достигает максимума при $h\nu = E_g$. В этом случае генерируются электроны на самом дне зоны проводимости и деполяризация в процессе термализации практически отсутствует. Из рисунка 1 видно, что для всех образцов максимальная поляризация при $T = 130\text{K}$ выше, чем при комнатной температуре, что объясняется ростом времени спиновой релаксации с уменьшением температуры, и хорошо согласуется с теорией, описанной в главе 1. В широком диапазоне толщин образцов 300–1000 нм максимальное значение поляризации изменяется слабо. Этот факт говорит о том, что в процессе транспорта к поверхности электронов, термализованных на дно зоны проводимости, спиновая релаксация практически не происходит. При толщине рабочего слоя меньше 300 нм наблюдается рост поляризации. По видимому, он связан с тем, что значительная часть электронов не успевает термализоваться и, следовательно, не испытывает на себе действие механизма спиновой релаксации Дьяконова-Переля.

Заметим, что при экстраполяции полученных кривых к нулевой толщине, то есть в случае, когда термализация и транспорт к поверхности полностью отсутствует, максимальное значение поляризации меньше максимального теоретически достижимого значения 50%, и составляет при комнатной температуре величину порядка 45–46%. Это

говорит о достаточно высоком вкладе в деполаризацию электронов эффектов спиновой релаксации в области приповерхностного изгиба зон и при эмиссии в вакуум.

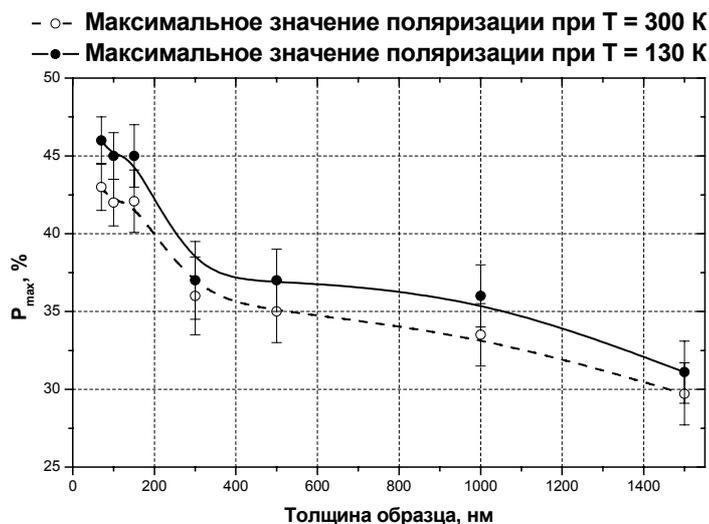


Рис. 1. Зависимости максимального значения степени поляризации эмитированных электронов от толщины образца на основе ненапряжённого GaAs при различных температурах.

Ввиду слабого влияния расщепления валентной зоны на процессы вблизи дна зоны проводимости можно ожидать, что полученные оценки потерь поляризации справедливы и для катодов на основе более сложных структур. Поскольку потери поляризации в области изгиба зон и при выходе в вакуум являются принципиально неустранимыми, полученная оценка позволяет сделать вывод о максимально достижимой поляризации ИПЭ на основе GaAs фотокатодов, которая составляет 92-94%.

В четвёртой главе рассмотрены результаты исследования влияния пониженной симметрии на гетерограницах полупроводниковых СР на оптические свойства структур и спиновый транспорт электронов, а также изложены результаты исследований поляризованной фотоэмиссии из новых структур на основе AlInGaAs/AlGaAs СР с максимальным разрывом валентной зоны. Все образцы были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии в ФТИ им. Иоффе РАН. Показано, что такие структуры позволяют достичь рекордных параметров по отбираемому от катода току и решить проблему ограничения заряда эмиссии, обладая при этом поляризацией, сравнимой с лучшими мировыми результатами.

Первый параграф четвёртой главы посвящён исследованию фотоэмиссии поляризованных электронов из сверхрешёток с различной чётностью числа атомных монослоёв в квантовых ямах и барьерах. В полупроводниковых СР (001) интерфейс между двумя слоями с разным составом имеет пониженную симметрию C_{2v} , поскольку атомы формируют димеры в плоскостях (110) и (1 $\bar{1}$ 0). Пониженная симметрия гетерограниц в сверхрешётке позволяет дополнительное смешивание состояний лёгких и тяжёлых дырок даже при нормальном падении дырок на гетерограницу [6]. Такое смешивание изменяет параметры спектральных зависимостей эффектов, связанных с оптической ориентацией.

Кроме того, смешивание состояний в Γ и X долинах зоны проводимости чувствительно к чётности числа атомных монослоёв [7] и может влиять на электронный транспорт через структуру при диффузии электронов от точки рождения к поверхности. Для исследования влияния пониженной симметрии были разработаны четыре фотокатода на основе $\text{AlInGaAs}/\text{GaAs}$ СР. Проведённые ранее исследования таких структур показали высокую перспективность применения их в качестве источников поляризованных электронов. Одним из основных преимуществ $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{As}/\text{GaAs}$ СР является возможность получить очень маленький разрыв зоны проводимости путем подбора состава четверного соединения [8]. Все образцы серии имели одинаковый состав слоёв – $\text{Al}_{0.2}\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.62}\text{As}/\text{GaAs}$. Параметры образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры катодов на основе $\text{AlInGaAs}/\text{GaAs}$ СР с напряжёнными барьерами.

Образец	5-165	5-166	5-167	5-168
Число атомных слоёв AlInGaAs	14	13	15	16
Число атомных слоёв GaAs	14	15	17	16
Число периодов	12.5	12.5	11.5	11.5
Толщина структуры, нм	104	104	109	109

Основной особенностью данной серии катодов было прецизионно контролируемое число атомных монослоёв в слоях СР. Исследуемые катоды различались только чётностью числа атомных монослоёв в слоях AlInGaAs и GaAs .

На рисунке 2 приведены спектральные зависимости поляризации и квантового выхода, полученные для всех четырёх образцов при температуре 130К. Как видно из рисунка, положение главного максимума поляризации для всех четырёх образцов серии совпадает. Кроме того, значение поляризации в главном максимуме мало чувствительно к смешиванию состояний лёгких и тяжёлых дырок на гетероинтерфейсах. Такое смешивание может быть описано введением дополнительного члена в гамильтониан СР:

$$V_{l,h} = U_{l,h} \cdot \eta \cdot \{J_x \cdot J_y\} \cdot \delta(z - z_l) \quad (1)$$

где z_l – координаты гетерограниц, J_x и J_y – операторы момента импульса и η принимает два значения (+1 и -1) при переходе от одной гетерогранице к другой. Такое взаимодействие приводит к понижению энергии первой минизоны тяжёлых дырок, однако практически не влияет на максимальное значение поляризации в главном максимуме, поскольку смешиваются состояния с разной чётностью.

Гораздо более чувствительно к эффектам на гетерограницах оказалось положение второго поляризационного максимума и минимума. Изменение положения второго максимума в спектре поляризации связано в основном со смешиванием состояний Γ и X долин в зоне проводимости. По аналогии с (1) такое взаимодействие может быть записано в форме:

$$V_{\Gamma,X} = T_{\Gamma,X} \cdot \xi(z_l) \cdot \delta(z - z_l) \quad (2)$$

где $T_{\Gamma,X}$ – константа смешивания. Наиболее важный член этого гамильтониана – фазовый фактор $\xi(z_l)$, который меняет свой знак при переходе от одного монослоя к другому. Как

следствие, смешивание Γ и X состояний зависит от чётности числа атомных монослоёв в слоях СР. В частности, для чётного числа атомных слоёв преобладает смешивание состояний с разной чётностью, и наоборот, для структур с нечётным числом атомных слоёв превалирует смешивание состояний с одинаковой чётностью. На рисунке 2 хорошо виден заметный сдвиг в коротковолновую область спектра для структур с нечётным числом монослоёв.

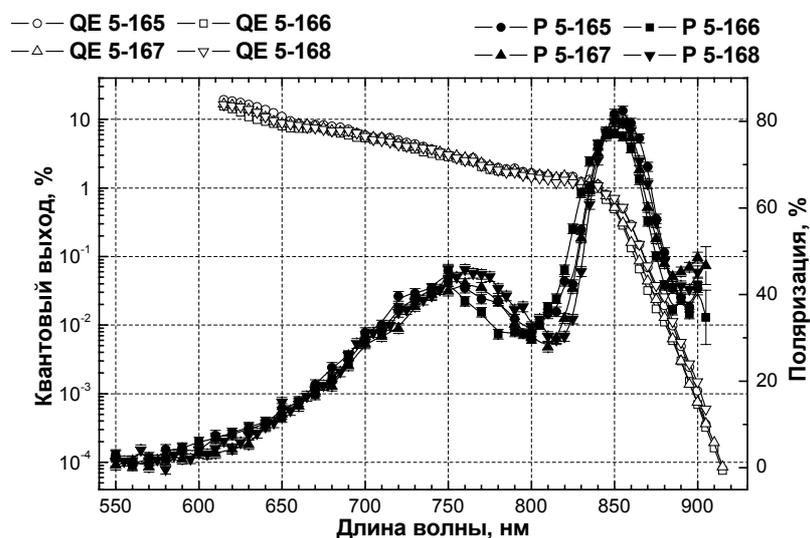


Рис. 2. Спектральные зависимости поляризации и квантового выхода для сверхрешёток с различной чётностью числа атомных монослоёв в слоях с квантовыми ямами и барьерами.

Таким образом можно сделать вывод, что пониженная симметрия интерфейсов на гетерограницах полупроводниковых сверхрешёток не влияет на максимальное значение поляризации в главном поляризационном максимуме, однако оказывает существенное влияние на положение второго максимума и минимума в поляризационном спектре и её следует принимать в расчёт при проектировании фотокатодов для современных ИПЭ.

Второй параграф посвящён исследованию AlInGaAs/AlGaAs сверхрешёток с увеличенным разрывом валентной зоны. Известно, для получения высокой поляризации эмитируемых электронов необходимо обеспечить максимально возможную величину расщепления между минизонами лёгких и тяжёлых дырок. Основываясь на результатах наших предыдущих исследований AlInGaAs/GaAs структур, мы предприняли попытку увеличить расщепление путём добавления алюминия в слои арсенида галлия.

Исследуемая серия катодов состояла из четырёх образцов, различающихся содержанием Al в слоях AlGaAs. Для всех образцов серии были выполнены измерения спектральных зависимостей поляризации и квантового выхода, а также зависимости анизотропии квантового выхода катодов при возбуждении линейно-поляризованным светом. Все измерения были выполнены в лаборатории по исследованию поляризованных фотокатодов Стэнфордского линейного ускорительного центра.

Параметры исследуемых катодов приведены в таблице 2. Для предотвращения нежелательного окисления алюминия на поверхности все катоды имели на поверхности

тонкий высоколегированный слой арсенида галлия. Для уточнения состава для всех образцов был выполнен рентгеноструктурный анализ.

Таблица 2. Параметры катодов на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_z\text{Ga}_{1-y-z}\text{As}$ СР.

Образец	x	y	z
5–337	0.28	0.16	0.20
5–338	0.30	0.20	0.20
5–362	0.36	0.18	0.14
5–363	0.40	0.18	0.18

На рисунке 3 приведены спектральные зависимости поляризации и квантового выхода от длины волны возбуждающего света (а) и зависимости асимметрии величины квантового выхода при облучении катода линейно-поляризованным светом (б) для образца с долей алюминия $x = 0.28$, который показал лучшие в данной серии характеристики.

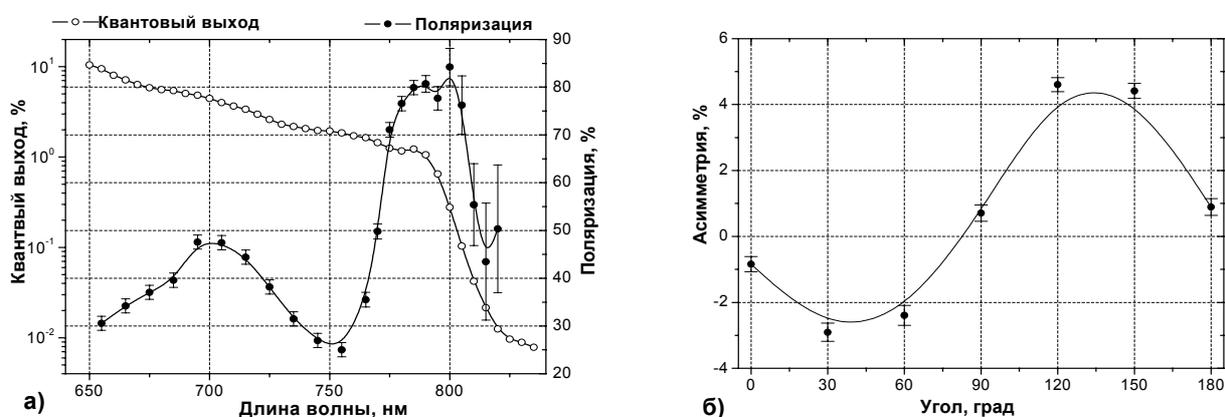


Рис. 3. Экспериментальные данные для образца 5–337: а) – спектральные зависимости поляризации и квантового выхода; б) – Угловая зависимость асимметрии квантового выхода при облучении катода линейно поляризованным светом.

Увеличение доли алюминия в диапазоне $x \in [0.28, 0.4]$ привело к монотонному спаду значения поляризации в главном максимуме от 80% до 57% при практически неизменном квантовом выходе. Учитывая, что расщепление валентной зоны возрастает с увеличением доли алюминия, данный факт означает, что расщепление валентной зоны не является единственным определяющим фактором при получении высокой поляризации. Одним из возможных объяснений уменьшения поляризации при увеличении доли алюминия может служить сильная деполяризация в поверхностном слое GaAs.

Добавление алюминия приводит к росту ширины запрещённой зоны твёрдого раствора AlGaAs. При этом растёт глубина потенциальной ямы в области изгиба зон на границе полупроводник-вакуум в случае катода с тонким поверхностным слоем GaAs. С увеличением глубины потенциальной ямы быстро повышается эффективность механизма спиновой релаксации ДП, что особенно сильно проявляется для «горячих» электронов, родившихся вблизи поверхности и не успевших термализоваться на дно зоны проводимости. Поскольку такие электроны имеют очень высокую поляризацию, которая может достигать

92-93% [9], увеличение эффективности спиновой релаксации даже в очень узком поверхностном слое арсенида галлия может приводить к заметному уменьшению средней поляризации эмитируемого электронного пучка. По-видимому, величина доли алюминия в AlGaAs слоях катодов на основе AlInGaAs/AlGaAs СР, близкая к 0.3, является оптимальной.

В третьем параграфе четвёртой главы представлены результаты исследования эффекта ограничения заряда эмиссии, которые были проведены в лаборатории Стэнфордского линейного ускорительного центра для образца 5–337. Эффект ограничения заряда эмиссии связан с тем, что в процессе фотоэмиссии часть электронов захватывается в области изгиба зон и образуют отрицательный заряд на поверхности. Наличие этого заряда приводит к так называемому «разгибанию» зон и увеличению электронного сродства, соответственно уменьшается и эмиссия электронов.

Чтобы избежать образования на поверхности катода отрицательного заряда, препятствующего дальнейшему росту тока эмиссии, необходимо обеспечить либо высокую вероятность туннелирования электронов через поверхностный барьер в вакуум, либо высокую вероятность проникновения дырок из валентной зоны в область изгиба зон для рекомбинации. Первое условие может быть реализовано созданием большого отрицательного электронного сродства, а второе – уменьшением протяженности области изгиба зон за счет сильного легирования.

Исследования, проведённые в SLAC, показали, что для катодов на основе GaAsP СР эффект ограничения заряда эффективно подавляется при степени легирования поверхностного слоя $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ [10]. Однако для эффективной термической очистки поверхности требуется прогрев катода при температуре порядка 550-570 градусов. При таких температурах профиль легирования быстро размывается и концентрация акцепторов в приповерхностном слое резко уменьшается.

В разработанных нами катодах для борьбы с эффектом ограничения заряда использовался метод, основанный на увеличении величины эффективного ОЭС на поверхности катода. На рисунке 4 приведены кривые зависимости тока, отдаваемого катодом от мощности оптической накачки для образца 5–337. Из рисунка видно, что даже через семь дней после термической очистки и активировки фототок не достигает насыщения. Хотя степень легирования приповерхностного слоя составила величину всего $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, отдаваемый катодом фототок был больше, чем ток GaAsP катодов со степенью легирования $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. При этом образец был гораздо менее чувствителен к процедуре термической очистки.

Таким образом, полученные после оптимизации состава и профиля легирования параметры фотоэмиттеров на основе широкозонных AlInGaAs/AlGaAs сверхрешеток, такие как поляризация в 80–81% при соответствующем квантовом выходе около 1%, асимметрия квантового выхода в пределах 4% и отсутствие эффекта ограничения заряда эмиссии находятся на уровне лучших мировых достижений в этой области. При этом существует возможность для дальнейшей оптимизации таких катодов, в частности путём варьирования содержания алюминия в слоях AlGaAs.

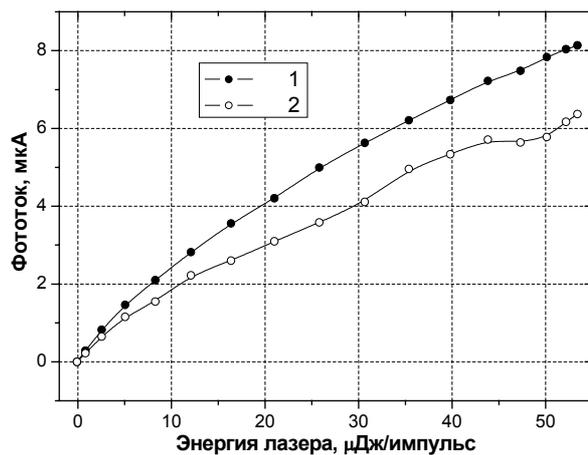


Рис. 4. Зависимость величины эмиссионного заряда от мощности оптической накачки для образца 5-337 при длине волны 792 нм: 1 – измерения выполнены сразу же после активировки, 2 – измерения выполнены через семь дней после активировки.

Пятая глава посвящена исследованию поляризованной фотоэмиссии из сбалансированных по напряжению полупроводниковых СР. В сверхрешётках расщепление подзон лёгких и тяжёлых дырок происходит не только под влиянием внесённого в структуру напряжения, но и за счёт различных энергий связи тяжёлых и лёгких дырок в сверхрешёточных квантовых ямах, что позволяет достичь большего расщепления. Однако, толщина рабочего слоя, необходимая для получения высоких значений квантового выхода, превосходит критическую толщину, при которой напряжение релаксирует с появлением большого количества дефектов. Это накладывает ограничение на число слоёв в сверхрешётке и, соответственно, на квантовый выход всей структуры.

Одним из возможных решений этой проблемы является использование компенсированных сверхрешёток. В таких структурах в каждом периоде СР барьерный слой имеет напряжение, противоположное по знаку слою с квантовой ямой. При этом суммарная величина напряжения для всей структуры относительно буферного слоя близка к нулю при любом числе периодов.

Нами были разработаны и исследованы три серии компенсированных сверхрешёток, по два образца в каждой серии. Все структуры были выращены методом жидкофазной эпитаксии в университете г. Шеффилда (Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Sheffield, Sheffield, UK). Первая серия включала в себя образцы W58 и W67, незначительно отличающиеся составом слоёв. Основной целью при разработке этих структур было проверить на практике идею компенсации по напряжению. Два катода второй серии – QT1669A и QT1669B имели одинаковый состав слоёв и отличались только числом периодов. По сравнению с образцами первой серии, они имели увеличенное содержание индия в слоях InAlGaAs и пониженное содержание фосфора в слоях GaAsP. Состав образцов третьей серии (QT1751A и QT1751B) был оптимизирован путём специальных расчётов, произведённых на основе данных по измерениям двух предыдущих серий.

Первый параграф пятой главы посвящён экспериментальным результатам, полученным

для образцов первой серии. Исследуемые образцы показали хороший квантовый выход (0.6%), однако максимальное значение поляризации составило только 57%. Возможным объяснением невысокой поляризации может быть существенный вклад в фотоэмиссию из поверхностного слоя GaAs. Кроме того, согласно нашим вычислениям, расщепление минизон лёгких и тяжёлых дырок в катодах первой серии составило величину около 40 мэВ, чего могло быть недостаточно для получения высоких значений поляризации.

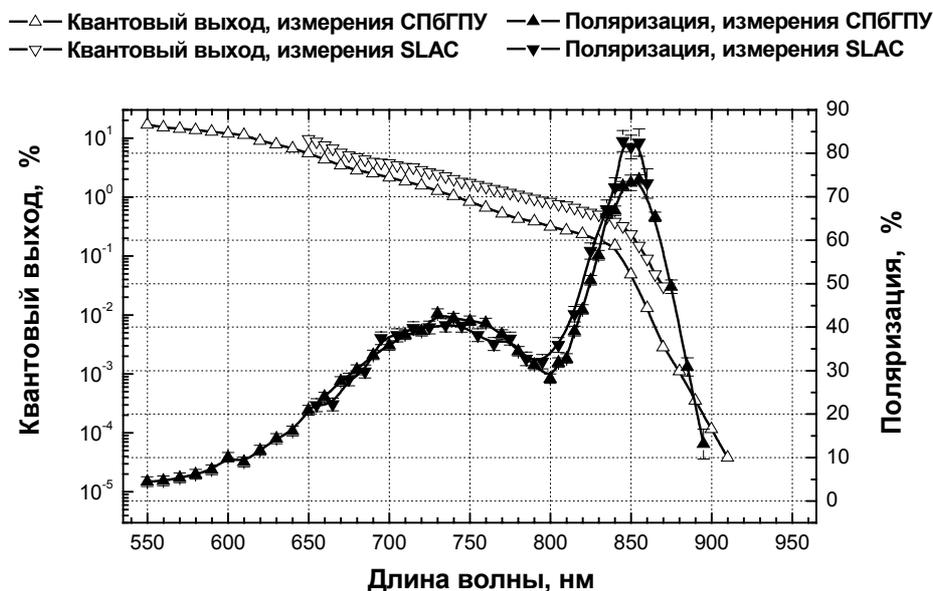


Рис. 5. Спектральные зависимости поляризации и квантового выхода для катода с СР, содержащей 8 периодов, полученные в СПбГПУ и SLAC, $T = 300$ К.

Во втором параграфе представлены результаты, полученные для сверхрешёток второй серии. Их структура была разработана для обеспечения большего расщепления минизон тяжёлых и лёгких дырок, а также минимизации вклада в фотоэмиссию от GaAs слоя. Для этого было увеличено содержание индия в слоях InAlGaAs и уменьшено содержание фосфора в слоях GaAsP, а также уменьшена толщина GaAs слоя. Сверхрешётки двух катодов имели одинаковый состав $\text{In}_{0.16}\text{Al}_{0.14}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}_{0.75}\text{P}_{0.25}$, отличаясь числом периодов – 8 и 12 для первого и второго катодов соответственно.

Согласно измерениям, выполненным в СПбГПУ, максимальная поляризация составила величину 73% для обеих структур, при квантовом выходе 0.1%. Аналогичные измерения, выполненные в лаборатории Стэнфордского линейного ускорительного центра, показали лучшие результаты – максимальное значение поляризации составило 80% при квантовом выходе 0.3%. Возможным объяснением может служить сильная неоднородность параметров катодов, возникшая вследствие роста в вертикальном реакторе, а также лучшие вакуумные условия в установке Стэнфордского ускорительного центра. Полученные экспериментальные данные представлены на рисунке 5.

Третий параграф посвящён экспериментальным данным, полученным для образцов третьей серии, состав которых был оптимизирован путём специальных расчётов на основе данных, полученных при предыдущих измерениях. Для усиления эффекта компенсации

напряжения катоды третьей серии имели повышенное содержание фосфора в GaAsP слоях по сравнению с образцами второй серии. Содержание индия и алюминия в слоях AlInGaAs было выбрано с целью получить желаемые параметры зонной структуры образцов. К сожалению, образцы этой серии дали гораздо худшие результаты, чем предыдущие структуры. Максимальное значение поляризации составило величину порядка 73 процентов при очень невысоком квантовом выходе. Для выяснения причины такого ухудшения характеристик, оба катода также были подвергнуты рентгенографическому анализу, который показал существенное отличие реальных параметров катодов от запланированных. Недостаток фосфора в слоях GaAsP, имевший место в обеих структурах, привёл к уменьшению эффекта компенсации напряжения, что привело к частичной релаксации слоёв, уменьшению напряжённости всей структуры в целом.

Таким образом, хотя вследствие крайне сложного состава технологические возможности на данный момент не позволили воспроизводимо вырастить структуры хорошего качества с заданными параметрами, тем не менее, имеются широкие перспективы по дальнейшей оптимизации параметров таких катодов.

Хорошие характеристики, показанные катодами второй серии указывают на перспективность применения компенсированных по напряжению CP в качестве фотокатодов для ИПЭ.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

1. При поляризованной фотоэмиссии из полупроводниковых гетероструктур с приповерхностным слоем арсенида галлия потери поляризации в области приповерхностного изгиба и при выходе в вакуум через активационный слой составляют 6-8% по относительной величине и ограничивают максимально возможную поляризацию электронов, эмитируемых из таких структур на уровне 92-94%.
2. Компенсированные по напряжению полупроводниковые сверхрешётки $Al_xIn_yGa_{1-x-y}As/GaAs_{1-z}P_z$ могут быть использованы в качестве фотокатодов для источников поляризованных электронов и имеют хороший потенциал для дальнейшей оптимизации параметров.
3. Пониженная симметрия интерфейсов на гетерограницах полупроводниковых сверхрешёток не влияет на максимальное значение поляризации в главном поляризационном максимуме, однако оказывает существенное влияние на положение второго максимума и минимума в поляризационном спектре.
4. Использование $Al_yIn_zGa_{1-y-z}As/Al_xGa_{1-x}As$ широкозонных напряженных сверхрешёток с увеличенным расщеплением валентной зоны позволяет реализовать источники поляризованных электронов с высокой поляризацией и отсутствием эффекта ограничения заряда фотоэмиссии.

Результаты диссертационной работы содержатся в следующих публикациях:

1. Kinetics of highly spin-polarized electron photoemission from InGaAlAs strained layer by energy and spin-resolved measurements / Yu. Mamaev, H.-J.Drouhin, G.Lampel, A. Subashiev, Yu. Yashin and A. Rochansky // Journal of Applied Physics.– 2003.– v. 93.– p. 9620-9632

2. Новые сверхрешетки на основе GaInP для эмиссии спин-поляризованных электронов / Ю.А. Мамаев, А. В. Субашиев, А.Д. Андреев, Ю.П. Яшин, А.В. Рощанский // Тезисы докладов 5 Всероссийской конференции по физике полупроводников.– Нижний Новгород, 2001.– т. 2.– с.117-118
3. Polarized electron photoemission studies of spin relaxation in thin GaAs epitaxial films / Yu. A. Mamaev, A. V. Subashiev, A.V. Rochansky at al. // Proceedings of 9th International Symposium "Nanostructures: physics and technology".– St.-Petersburg, Ioffe institute, 2001.– p. 234-237
4. Polarized emission from strained superlattices / A.D. Andreev, A.V. Subashiev, Yu. A. Mamaev, Yu.P. Yashin, A.V. Rochansky at al. // 9th International Workshop on Polarized Sources and Targets, eds. V.P.Derenchuk and B. Przewoski.– Word Scientific, 2002.– p. 161-163.
5. Strain-compensated Superlattices for Highly-polarized Electron Emission / L.G. Gerchikov, A.N. Ipatov, Yu.A. Mamaev, A.V. Subashiev, A.V. Rochansky Yu.P. Yashin, J.S. Roberts and P.A. Houston // SPIN 2002 proceedings.– AIP, Melville, New York, 2003.– p. 1006-1010.
6. Optical orientation in strained-barrier GaAs-AlInGaAs superlattices with controlled parity of atomic layers / L.G. Gerchikov, A.V. Subashiev, Yu. A. Mamaev, A.V. Rochansky и др. // Proceedings of SPAS.– The St.-Petersburg Academy of Sciences on Strength Problems, 2002.– v. 6.– p. A6-A9
7. Spin-polarized electron transport and emission from strained Superlattices / Yu. A. Mamaev, A. V. Subashiev, A. N. Ambrajei , A.V. Rochansky // Proceedings of SPIE, Ed. A.I.Melker,.– Bellingham USA, 2001.– v.4348.– p. 39-43
8. Spin polarized field assistant emission / Yu. Mamaev, H.-J.Drouhin, G.Lampel, A. Subashiev, Yu. Yashin and A. Rochansky // Proceedings of SPAS.– The St.-Petersburg Academy of Sciences on Strength Problems, 2002.– v6.– p. A17-A20.
9. А.В Рощанский, Д.А. Васильев.– Спиновая релаксация электронов в тонких плёнках GaA // Материалы VI Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах».– Издательство СПбГПУ, 2002.– с. 137-138

Цитируемая литература

- [1] Subashiev A.V., Mamaev Y.A., Yashin Y.P., Clendenin J.E., Phys. Low-Dim. Struct. 1-2, 1999, p.1.
- [2]. Morris L. Swartz, Physics with Polarized Electron Beams, SLAC-PUB-4656, p. 47.
- [3] Oskotskij B.D., Subashiev A.V., Mamaev Y.A., Phys.Low-Dim.Struct., 1997, p.77.
- [4] Бир Г.Л. Аронов А.Г. Пикус Г.Е. ЖЭТФ, 1975, Т. 69, с. 1382.
- [5] Yuri A. Mamaev, Yuri. P. Yashin, Arsen V. Subashiev.– Temperature Dependence of Electron Spin Dynamics // International Workshop “Polarized Electron Sources PES2000”, Nagoya, Japan, 2001, p.
- [6] E.I. Ivchenko, A.Yu. Kaminski, U. Rossler.– Exchange splitting of the exciton levels in type I and type II superlattices // *Phys. Rev. B* .– 1996.– v. 54, 8, p. 5852
- [7] Yu. Fu, M. Willander, E.I. Ivchenko, and A.A.. Kiselev.– Valley mixing in GaAs/AlAs multilayer structures in the effective mass method //, *Phys. Rev. B* 1993.– 47.– 20– p. 13498.
- [8] A.V. Subashiev, Y.A. Mamaev., Y.P. Yashin, A.N. Ambrazhei,. J.E. Clendenin, T. Maruyama, G.A. Mulhollan, A.Y. Egorov, V.M. Ustinov and A.E. Zhukov // Proceedings of the 24rd Int. Conference on the Physics of Semiconductors, Jerusalem, August 1998.– World Scientific, 1999.– IV-D-25.
- [9] Kinetics of highly spin-polarized electron photoemission from an InGaAlAs strained layer by energy and spin-resolved measurements / Yu. Mamaev, H.-J.Drouhin, G.Lampel, A. Subashiev, Yu.Yashin and A.Rochansky // *Journal of Applied Physics*.– 2003.– 93, p. 9620
- [10] A very high charge, high polarization gradient-doped strained GaAs photocathode / T. Maruyama, A. Brachmann, J. E. Clendenin, T. Desikan, E. L. Garwin, R. E. Kirby, D.-A. Luh, J. Turner, and R. Prepost // *Nucl. Instrum. Meth.*.– 2002.– A492, 199-211