

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Тиходеева Сергея Григорьевича

на диссертацию Ушанова Виталия Игоревича

«Оптические свойства метаматериалов и структур на основе AlGaAs/AsSb»,

представленную к защите на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

В диссертации Ушанова В. И. проведено систематическое исследование взаимодействия света с металло-полупроводниковыми метаматериалами и структурами на основе полупроводниковой матрицы $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$, содержащей массивы металлических нановключений As и AsSb, а также с системами квантовых ям $GaAs_{0.975}P_{0.025}-Al_{0.3}Ga_{0.7}As_{0.975}P_{0.025}$ с металлическими нановключениями AsSbP. Тематика диссертационного исследования представляется **актуальной** для разработки новых быстродействующих устройств опто- и нанoeлектроники. **Значимость** результатов состоит в обнаружении и оптической характеристизации новых способов создания наноплазмонных метаматериалов с короткими временами рекомбинации и совместимых с промышленно применяемыми технологиями роста AlGaAs гетероструктур.

Диссертация изложена на 143 страницах, состоит из введения, пяти глав и заключения. Список цитируемой литературы насчитывает 218 наименований. Во *введении* обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи, научная новизна, практическая значимость диссертации, а также представлены положения, выносимые на защиту.

В *первой главе* проведен обзор литературных данных по теме диссертации. Анализируются оптические свойства объёмных материалов GaAs и AlGaAs, квантовых ям GaAs – AlGaAs, описываются приближение эффективной среды, методы вычисления оптической экстинкции в металло-полупроводниковых композитах, методы формирования нановключений As и AsSb в эпитаксиальных слоях GaAs и также способы их последующей модификации.

Вторая глава посвящена описанию . В главе описаны используемая технология молекулярно-лучевой эпитаксии, используемые образцы, а также результаты исследования их микроструктуры методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской дифракции. Подробно описаны используемые в диссертации экспериментальные методики спектроскопии оптического отражения и пропускания, модуляционной спектроскопии электроотражения света, использованных для исследования взаимодействия света с выращенными наноструктурами. Приведен формализм описания спектральных линий электроотражения, представлен формализм численного моделирования оптических констант полупроводниковой матрицы AlGaAs, используемый при расчете спектров оптического отражения и поглощения в композиционных системах As- и AsSb- $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$. Кратко изложен метод матриц переноса для моделирования спектров оптического отражения периодических слоистых наноструктур AsSb- $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$.

В *третьей главе* приведены результаты исследования оптической экстинкции в области прозрачности системы $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ с неупорядоченными включениями As- и AsSb. Исследование проведено методами спектроскопии оптического отражения. Экспериментально показано, что неупорядоченные включения AsSb приводят к весьма существенным изменениям спектра экстинкции $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$, в отличие от неупорядоченных включений As. Это позволило автору диссертации сделать вывод о близости плазмонного резонанса в нановключениях AsSb к окну прозрачности $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$, идентифицировать широкий пик поглощения и рассеяния света с резонансной энергией 2.26 эВ и полной шириной на половине высоты 1.58 эВ как резонанс Фрелиха (или локализованный резонанс Ми) и подобрать разумные значения плазменной частоты и времени релаксации для модели Друде для описания металлических свойств нановключений AsSb.

Четвертая глава посвящена результатам исследования резонансного оптического отражения матрицы $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ с периодическими нановключениями AsSb. Были исследованы образцы с 12 и 24 слоями металлических нановключений AsSb и периодом 110 нм. Теоретическое моделирование спектров отражения было проведено с помощью метода матриц переноса и с резонансными параметрами металлических нановключений AsSb, полученными в Главе 3. Проведенное в главе 4 исследование показало формирование формированию пика резонансного отражения света, сопро-

возбуждающегося сателлитными осцилляциями в окне прозрачности матрицы $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Исследовано поведение этого резонансного отражения при нормальном падении, а также при наклонном падении в диапазоне углов $7.5 - 85^\circ$, в s- и p-поляризациях. Для теоретического моделирования полученных экспериментально спектров отражения был использован подход Перссона и Либша [176], развитый в 1983 г. для описания оптических свойств двумерных систем неупорядоченных металлических наночастиц. Применение этого подхода позволило авторам определить среднее расстояние между металлическими нановключениями AsSb в плоскости слоев (эффективный период квадратной решетки неупорядоченных металлических наносфер в модели работы [176]), $6.2R$ и $5.5R$ для образцов с 12 и 24 слоями, соответственно, где $R \approx 7.5$ нм – средний радиус металлических сфер AsSb после отжига, определенный микроскопически.

Пятая глава посвящена исследованию оптического электроотражения в периодической системе квантовых ям $\text{GaAs}_{0.975}\text{P}_{0.025}$ - $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}_{0.975}\text{P}_{0.025}$ с металлическими нановключениями AsSbP, δ -легированных Sb и P в нестехиометрическом случае, а также после отжигов при температурах $400 - 750$ °C, вызывающих формирование системы нановключений AsSbP в наноструктуре. Автору удалось получить исчерпывающую информацию об экситонных состояниях в таких квантовых ямах при различных условиях их изготовления и получить существенную информацию о морфологии систем в зависимости от метода их последующей термической обработки. Использование именно модуляционного электроотражения было очень существенным, поскольку позволило максимально выделить экситонный вклад, чувствительный к переменному электрическому полю.

В *заключении* указаны наиболее существенные результаты диссертационного исследования.

Научная новизна диссертации заключается в следующем

1) Убедительно доказано, что образование неупорядоченной системы нановключений AsSb в матрице $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ вызывает экстинкцию света в окне оптической прозрачности матрицы, обусловленную поглощением и рассеянием света плазмонными возбуждениями в AsSb, тогда как система наночастиц As не оказывает существенного влияния на оптические свойства композитной среды (основной результат Главы 3);

2) Показано, что периодическая последовательность слоев металлических наночастиц AsSb в $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ демонстрирует резонансное оптическое отражение вследствие брэгговской дифракции света в многослойной системе (основной результат главы 4);

3) Подробно идентифицированы экситонные состояния в периодической системе квантовых ям $GaAs_{0.975}P_{0.025}-Al_{0.3}Ga_{0.7}As_{0.975}P_{0.025}$ в нестехиометрическом случае, а также после формирования систем нановключений AsSbP. Показано, что δ -легирование изовалентными примесями Sb и P упорядоченной системы квантовых ям $GaAs_{0.975}P_{0.025}-Al_{0.3}Ga_{0.7}As_{0.975}P_{0.025}$ обеспечивает подавление процессов взаимодиффузии в катионной подрешетке GaAs, ответственных за нарушение морфологии эпитаксиальных интерфейсов и деградацию экситонного отклика в системе квантовых ям (основные результаты главы 5).

Отмечу, что мне особенно понравился разработанный автором в Главе 3 подход к теоретическому моделированию оптического отклика периодических слоев металлических нановключений AsSb в матрицу $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$, использующий метод матриц переноса и метод вычисления отклика единичного плоского слоя разупорядоченных металлических наносфер Перссона и Либша [176]. Очень элегантный метод Перссона и Либша, к сожалению, в настоящее время мало используется в бурно развивающейся наноплазмонике, и отрадно видеть его успешное применение в диссертации Ушанова.

Достоверность и обоснованность положений, выносимых на защиту, обеспечивается применением современных методов квантовой теории, а также сравнением результатов с литературными данными.

К **недостаткам** работы можно отнести следующее:

1. В Главе 2 диссертации автором для вычисления спектра коэффициента оптической экстинкции использовалась формула (2.2.1.6). Эта формула справедлива только в пределе слабого поглощения, пренебрежении интерференцией и многократным отражением. Следовало бы проверить выполнение всех этих условий для экспериментов в диссертации. Кроме того, не совсем корректно называть эту формулу законом Бугера-Ламберта-Бера, который просто констатирует экспоненциальное спадание интенсивности потока излучения в поглощающей среде по мере распространения.

2. В формулировке положений 1, 2, выносимых на защиту в тексте диссертации (и в автореферате) используется термин «резонанс Фрелиха». Нигде в тексте диссер-

тации (и автореферата), за исключением списка литературы, этот термин больше не используется. При описании соответствующих положений в Главах 1 и 3 диссертации употребляется термин «плазмонный резонанс» и совершенно справедливо указывается, что вычисления были проведены в рамках теории Ми. Действительно, условие (1.3.2.7) для резонансной частоты локализованного плазмона иногда называют условием Фрелиха, по-видимому, следуя хорошо известной монографии Борена и Хаффмана [85]. Однако первым, насколько мне известно, такое условие получил Ми, поэтому термин «резонанс Ми» для дипольного плазмонного резонанса в малых металлических частицах является, на мой взгляд, более правильным, чем «резонанс Фрелиха».

3. Выше в качестве одного из красивых результатов, полученных в диссертации, отмечалось успешное использование подхода Перссона и Либша [176] для описания оптического отклика системы, состоящей из многих (12 и 24) слоев с металлическими нановключениями AsSb. Напомним, что в оригинальной работе [176] речь шла об оптическом отклике единственного неупорядоченного плоского слоя металлических наносфер. В диссертации при использовании такого подхода для описания многослойной системы взаимодействием металлических сфер между соседними слоями пренебрегалось. То есть, из подхода [176] бралась матрица переноса через единичный слой, которая затем включалась в многослойную систему через матрицы переноса через однородные слои AlGaAs. Однако получившиеся из подгонки такого описания к эксперименту средние расстояния между металлическими наносферами AsSb в плоскости слоя (т.н. эффективный период модельной решетки) оказались порядка 40-46 нм, что только вдвое меньше расстояния между соседними слоями (порядка 110 нм). Мне представляется, что пренебрежение дипольным взаимодействием отдельных металлических наносфер AsSb между слоями требует в таком случае дополнительного обсуждения.

4. Автор почему-то не привел идентификацию всех экситонных линий на рис. 8 в автореферате, хотя в соответствующем месте в диссертации (рис. 5.4.2) она проведена.

5. В формулах для боровского радиуса и экситонного ридберга на с. 12 диссертации следовало бы указать используемые размерности.

Список основных публикаций Тиходеева С.Г.

в рецензируемых научных изданиях по теме диссертации за последние 5 лет.

1. T. Weiss, M. Schäferling, H. Giessen et al. Analytical normalization of resonant states in photonic crystal slabs and periodic arrays of nanoantennas at oblique incidence // *Phys. Rev. B.* – 2017 – Т. 96, С. 045129.
2. M. S. Komlenok, S. G. Tikhodeev, T. Weiss et al. All-carbon diamond/graphite metasurface: Experiment and modeling. // *Appl. Phys. Lett.* – 2018. – Т. 113. – С. 041101.
3. A. S. Brichkin, S. G. Tikhodeev, S. S. Gavrillov. Transient optical parametric oscillations in resonantly pumped multistable cavity polariton condensates. // *Phys. Rev. B* – 2015. – Т. 92. – С. 125155.
4. S. S. Gavrillov, S. I. Novikov, V. D. Kulakovskii et al. Transient spectroscopy of near-condensate modes in the system of exciton polaritons in a semiconductor microcavity. // *JETP Lett.* – 2015. – Т. 101, № 1. – С. 7.
5. Dominik Floess, Thomas Weiss, Sergei Tikhodeev et al. Lorentz Nonreciprocal Model for Hybrid Magnetoplasmonics. // *Phys. Rev. Lett.* – 2016. – Т. 117, - С. 063901.
6. S. V. Lobanov, N. A. Gippius, S. G. Tikhodeev et al. Control of light polarization by voltage in excitonic metasurface devices. // *Appl. Phys. Lett.* – 2017. – Т. 111. – С. 241101.

6. Имеются некоторые опечатки в списке литературы, например, в ссылке [57] неправильно указан год (должно быть 2013), ссылки [89, 186, 187, 200] содержат опечатки в фамилиях авторов. Авторство работы [37] при обсуждении в Главе 1 – перед формулой (1.1.3.4) – почему-то приписано Урбаху (хотя в [37] и обсуждаются хвосты Урбаха, и в списке литературы авторы указаны правильно). Возможно, в этом месте следовало бы сослаться на оригинальную статью Урбаха 1953 г.

Указанные недостатки ни в коей мере не уменьшают ценности диссертации, выполненной на высоком и современном научном уровне. Автореферат диссертации соответствует содержанию работы. Результаты работы опубликованы в 7 научных статьях в рецензируемых журналах, входящих в базу Web of Science, а также доложены на 22 российских и международных конференциях.

Диссертация Ушанова Виталия Игоревича «Оптические свойства метаматериалов и структур на основе AlGaAs/AsSb», представляет собой законченное исследование и полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры общей физики и физики конденсированного состояния Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», доктор физико-математических наук, профессор

образовательного учреждения высшего образования
университет имени М.В. Ломоносова», доктор
сор

Тиходеев Сергей Григорьевич

Адрес: 119991 г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

Телефон: +7(495)-939-11-12

E-mail: tikh@gpi.ru