

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 34.01.02  
ПРИ ФЕДЕРАЛЬНОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ БЮДЖЕТНОМ  
УЧРЕЖДЕНИИ НАУКИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ  
ИМ. А.Ф. ИОФФЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ФИЗИКО-  
МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

Аттестационное дело № \_\_\_\_\_

Решение диссертационного совета от 23.01.2020 № 2

О присуждении Ушанову Виталию Игоревичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Оптические свойства метаматериалов и структур на основе AlGaAs/AsSb» по специальности 01.04.10 – физика полупроводников принята к защите «24» октября 2019 г., протокол № 1, диссертационным советом 34.01.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26, утвержденным приказом №75 врио директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе Ивановым С.В. от 12.07.2019.

Соискатель Ушанов Виталий Игоревич, 1991 года рождения, с отличием окончил Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251), получив квалификацию магистра в 2014 г. С 2014 по 2018 гг. соискатель проходил обучение в аспирантуре при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. Соискатель занимает должность и.о. м.н.с. в лаборатории физики аморфных полупроводников отделения твердотельной электроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

Научный руководитель – Чалдышев Владимир Викторович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук.

**Официальные оппоненты:**

1. Доктор физико-математических наук Вартамян Тигран Арменакович, главный научный сотрудник центра "Информационные оптические технологии" Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49.

2. Доктор физико-математических наук Тиходеев Сергей Григорьевич, профессор кафедры общей физики и физики конденсированного состояния Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

дали положительные отзывы на диссертацию.

### **Ведущая организация**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, ул. Ульяновская, д.1) в своем заключении, подписанном доктором физико-математических наук Игнатьевым Иваном Владимировичем, заместителем научного руководителя лаборатории «Оптика спина» СПбГУ, профессором кафедры физики твердого тела, утвержденном проректором по научной работе СПбГУ Микушевым Сергеем Владимировичем, дала положительный отзыв и отметила, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и представляет собой завершенное научное исследование, соответствующее профилю совета 34.01.02 (специальность 01.04.10 – физика полупроводников). В отзыве содержатся следующие замечания:

1. Первое положение, выносимое на защиту, содержит экспериментально полученное значение коэффициента экстинкции, а второе - амплитуды и энергетического положения резонанса, однако погрешность полученных величин не приведена.
2. Рассматриваемая в разделе 1.1.1 задача о нахождении диэлектрической функции для прямозонного полупроводника с учетом экситонных состояний аналогична задаче, рассмотренной в работе [С. Tanguy, Phys. Rev. Lett. 75 (22) 4090 (1995)]. Представляется уместным провести сравнение полученного в диссертации выражения для мнимой и действительной частей диэлектрической функции с этими литературными результатами.
3. В разделе 2.2.2.1 дается краткое описание экспериментальной установки, из которого, в частности, неясно, каким образом учитывалась поляризация, вносимая измерительной аппаратурой, прежде всего монохроматором. Было бы желательно привести подробную оптическую схему экспериментальной установки.

4. На рис. 3.1.1, 3.1.2 и далее приводятся экспериментальные спектры отражения в абсолютных величинах, но в работе отсутствует описание метода получения абсолютного значения коэффициента отражения.
5. На рис. 4.1.2(a) приведены зависимости спектров отражения от угла падения р-поляризованного света для периодической системы слоев, в том числе, для случая падения под углом Брюстера. В соответствии с работой [S.V. Poltavtsev et al., Solid State Communications 199, pp.47–51 (2014)] в Брюстеровской геометрии для периодической системы квантовых ям в отражении наблюдается одиночный пик на частоте материального резонанса. К сожалению, рис. 4.1.2(a) не позволяет оценить, наблюдается ли аналогичный эффект в данной работе.

Указано, что сделанные замечания не касаются основных результатов и выводов диссертации и не снижают ее высокой оценки.

Исследования, результаты которых представлены в диссертационной работе, являются актуальными и своевременными. Результаты диссертации апробированы на многочисленных международных и всероссийских научных конференциях, опубликованы в семи статьях в журналах, отвечающих требованиям ВАК. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям Положения Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Ушанов Виталий Игоревич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обуславливается их высокой квалификацией, а также сходством тематик работ, проводимых ведущей организацией и оппонентами, с тематикой диссертационной работы. На все замечания соискателем даны исчерпывающие квалифицированные ответы.

На автореферат поступило 7 отзывов, все они положительные.

1. Отзыв доктора физико-математических наук Еремеева Сергея Владимировича, ведущего научного сотрудника лаборатории физики поверхностных явлений Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики прочности и материаловедения» Сибирского отделения Российской академии наук (634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4). Отзыв положительный, без замечаний.
2. Отзыв доктора физико-математических наук Иванова Вадима Константиновича, профессора кафедры экспериментальной физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29). Отзыв положительный, без замечаний.

3. Отзыв доктора физико-математических наук Пчелякова Олега Петровича, профессора, заведующего отделом роста и структуры полупроводниковых кристаллов и пленок Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова» Сибирского отделения Российской академии наук (630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева 13). Отзыв положительный, без замечаний.
4. Отзыв доктора физико-математических наук Шамирзаева Тимура Сезгировича, ведущего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова» Сибирского отделения Российской академии наук (630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева 13). Отзыв положительный, без замечаний.
5. Отзыв доктора физико-математических наук Шашкина Владимира Ивановича, профессора, главного научного сотрудника Института физики микроструктур Российской академии наук – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт прикладной физики Российской академии наук» (603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105). Отзыв положительный, замечания:
  - а. Формулировки практической значимости могли бы быть более конкретными и четкими.
  - б. В тексте автореферата имеются ошибки. Укажу хронологические: с.2 – неправильно указан год защиты диссертации: должен быть 2020г. вместо 2019г; с.20 – год публикации статьи А5: 2018, а не 2017.
6. Отзыв доктора физико-математических наук Гермогенова Валерия Петровича, профессора, заведующего кафедрой полупроводниковой электроники радиофизического факультета Томского государственного университета (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36). Отзыв положительный, без замечаний.
7. Отзыв доктора физико-математических наук Романова Алексея Евгеньевича, ведущего профессора, декана Факультета Лазерной Фотоники и Оптоэлектроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49). Отзыв положительный, замечания:
  - а. При неоднократном упоминании окна прозрачности использованной полупроводниковой матрицы было бы уместно указать и конкретный диапазон длин волн.
  - б. Укажу также на опечатку в подписи к рисунку 3, где упоминается «модель ДруГе»».

### **Научная значимость.**

Диссертационный совет отмечает, что на **основании выполненных соискателем исследований** решен комплекс задач, которые являются актуальными для физики металло-полупроводниковых композиционных метаматериалов. В частности, в диссертации с помощью различных методик удалось **впервые**:

1. Исследовать плазмонный резонанс в неупорядоченной системе нановключений AsSb в окне оптической прозрачности матрицы  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ . Система наночастиц As, при этом, не оказывала существенного влияния на оптические свойства композитной среды;
2. Экспериментально и при помощи численного моделирования показать, что периодическая последовательность слоев металлических наночастиц AsSb в  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  вызывает резонансное оптическое отражение за счет брэгговской дифракции света в системе плазмонных слоев;
3. Исследовать и проанализировать особенности оптического отклика экситонных состояний в периодической системе квантовых ям  $\text{GaAs}_{0.975}\text{P}_{0.025}\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}_{0.975}\text{P}_{0.025}$  в нестехиометрическом случае, а также после формирования систем нановключений AsSbP;
4. Показать, что  $\delta$ -легирование изовалентными примесями Sb и P упорядоченной системы квантовых ям  $\text{GaAs}_{0.975}\text{P}_{0.025}\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}_{0.975}\text{P}_{0.025}$  обеспечивает подавление процессов взаимодиффузии в катионной подрешетке GaAs, ответственных за нарушение морфологии эпитаксиальных интерфейсов и деградацию экситонного отклика в системе квантовых ям.

**Практическая значимость** состоит в следующем:

Исследуемые металло-полупроводниковые метаматериалы на основе GaAs и AlGaAs представляют большой интерес для приборных приложений, поскольку демонстрируют усиленное взаимодействие света с веществом за счет собственных электронных возбуждений в системе металлических наночастиц. Технология роста таких композитных наноструктур полностью совместима с промышленной технологией молекулярно-лучевой эпитаксии, но дополнительно обеспечивает ультракороткие времена релаксации оптических характеристик, что делает такие метаматериалы перспективными для быстродействующих приборных приложений. Режимы легирования, используемые в процессе низкотемпературного роста, обеспечивают подавление процессов диффузионной деградации оптических свойств при последующих термообработках и позволяют сформировать класс температурно-стабильных наноструктур с квантовыми ямами.

Диссертация является законченным, последовательным и внутренне согласованным научным трудом, имеющим как фундаментальное, так и прикладное значение.

### **Достоверность и надежность результатов.**

Основные положения и выводы диссертации надежно обоснованы. Достоверность полученных результатов обусловлена использованием современных экспериментальных и расчетных методов исследования, воспроизводимостью экспериментальных данных, а также сопоставлением результатов исследований с соответствующими данными из работ других авторов. Результаты работы опубликованы в авторитетных рецензируемых международных журналах.

### **Апробация работы.**

По основным результатам диссертационного исследования были сделаны доклады на 22 всероссийских и международных конференциях: 2012 Materials Research Society Fall Meeting. Symposium CC: Optically Active Nanostructures (Boston, USA, 2012), XI Российская конференция по физике полупроводников (Санкт-Петербург, 2013), Российская молодёжная конференция по физике и астрономии "Физика.СПб" (Санкт-Петербург, 2013), 15-ая всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2013), XLII научно-практическая конференция с международным участием «НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2013), 2013 Materials Research Society Fall Meeting. Symposium L: Photonic and Plasmonic Materials for Enhanced Optoelectronic Performance (Boston, USA, 2013), VIII Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики 2014» (Санкт-Петербург, 2014), Российская молодёжная конференция по физике и астрономии "Физика.СПб" (Санкт-Петербург, 2014), 2014 Materials Research Society Fall Meeting. Symposium L: Optical Metamaterials and Novel Optical Phenomena Based on Nanofabricated Structures (Boston, USA, 2014), Школа-конференция с международным участием "Saint-Petersburg OPEN 2015" (Санкт-Петербург, 2015), XII Российская конференция по физике полупроводников (Звенигород, 2015), XI Международная конференция молодых учёных и специалистов «Оптика 2015» (Санкт-Петербург, 2015), 17-ая Всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2015), XIX Symposium "Nanophysics & Nanoelectronics" (Nizhny Novgorod, Russia, 2015), 2015 Materials Research Society Fall Meeting. Symposium HH: Optical Metamaterials—From New Plasmonic Materials to Metasurface (Boston, USA, 2015), 23rd International symposium "Nanostructures. Physics and Technology" (Saint-Petersburg, Russia, 2015), XX Symposium "Nanophysics & Nanoelectronics", (Nizhny Novgorod, Russia, 2016), 38th Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS) (Saint-Petersburg, Russia, 2017), 25th International Symposium "Nanostructures physics and technology" (Saint-Petersburg, Russia, 2017), XIII Российская конференция по физике полупроводников (Екатеринбург, 2017), X

международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики-2018» (Санкт-Петербург, 2018), International conference “Frontiers of 21st century physics and Ioffe Institute”, (Saint-Petersburg, Russia, 2018), XIV Российская конференция по физике полупроводников (Новосибирск, 2019).

#### **Личный вклад автора.**

Личный вклад автора в работу заключался в участии в постановке целей и задач; проектировании и сборке экспериментальных установок и проведении исследований при помощи спектроскопии оптического отражения и пропускания, фотолюминесценции, модуляционного электроотражения света; анализе, интерпретации и моделировании полученных данных; написании статей и тезисов к конференциям; выступлениях с устными и стендовыми докладами на конференциях.

По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, опубликовано 7 научных работ в журналах, включенных в систему цитирования Web of Science. Среди опубликованных работ по теме диссертации наиболее важными являются следующие (в скобках указан личный вклад автора):

1. Ушанов, В. И. Плазмонный резонанс в новых металло-полупроводниковых метаматериалах AsSb–AlGaAs / В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев, Н. А. Берт, В. Н. Неведомский, Н. Д. Ильинская, Н. М. Лебедева, В. В. Преображенский, М. А. Путятю, Б. Р. Семягин // ФТП. – 2015. – Т. 49. – С. 1635.  
(Экспериментальное исследование, анализ полученных результатов, подготовка статьи)
2. Ушанов, В. И. Брэгговский резонанс в системе плазмонных нановключений AsSb в AlGaAs / В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев, В. В. Преображенский, М. А. Путятю, Б. Р. Семягин // ФТП. – 2016. – Т. 50. – С. 1620.  
(Экспериментальное исследование, анализ полученных результатов, подготовка статьи)
3. Ushanov, V. I. Resonant Optical Reflection from AsSb–AlGaAs Metamaterials and Structures / V. I. Ushanov, V. V. Chaldyshev, V. V. Preobrazhenskiy, M. A. Putyato, B. R. Semyagin // Semiconductors. – 2018. – Vol. 52. – P. 468.  
(Экспериментальное исследование, анализ полученных результатов, подготовка статьи)
4. Bert, N. A. Metallic AsSb nanoinclusions strongly enriched by Sb in AlGaAsSb metamaterial / N. A. Bert, V. V. Chaldyshev, N. A. Cherkashin, V. N. Nevedomskii, V. V. Preobrazhenskii, M. A. Putyato, B. R. Semyagin, V. I. Ushanov, M. A. Yagovkina // J. Appl. Phys. – 2019. – Vol. 125. – P. 145106.  
(Численное моделирование, анализ полученных результатов, подготовка статьи)
5. Bert, N. A. Sb-rich nanoinclusions in an AlGaAsSb metamaterial / N. A. Bert, V. V. Chaldyshev, N. A. Cherkashin, V. N. Nevedomskii, V. V. Preobrazhenskii, M. A.

Putyato, B. R. Semyagin, V. I. Ushanov, M. A. Yagovkina // MRS Advances. – 2019. – Vol. 4. – P. 277.

(Численное моделирование, анализ полученных результатов, подготовка статьи)

На заседании 23 января 2020 г. диссертационный совет принял решение присудить Ушанову В.И. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационного совета в количестве 22 человек, из них 16 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, проголосовали:

За присуждение Ушанову Виталию Игоревичу ученой степени кандидата физико-математических наук

подано голосов – 22.

Против – 0.

Недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного совета,  
Академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор

Сурис Роберт Арнольдович

И. о. ученого секретаря диссертационного совета,  
доктор физ.-мат. наук

Шубина Татьяна Васильевна

23 января 2020 г.