

УТВЕРЖДАЮ

по научной работе

С.В. Микушев

«~~6~~» декабря 2019 г.

Отзыв ведущей организации

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ)

на диссертационную работу **УШАНОВА Виталия Игоревича**
«Оптические свойства метаматериалов и структур на основе AlGaAs/AsSb»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - «Физика полупроводников»

1. Актуальность диссертационной работы

Диссертационная работа Ушанова Виталия Игоревича посвящена оптическому исследованию новых метаматериалов металл-полупроводник и наноструктур на основе AlGaAs/AsSb. Особенностью метаматериалов металл-полупроводник служит наличие металлических наночастиц, в которых возможны плазмонные резонансы в области прозрачности полупроводниковой матрицы. Взаимодействие фотовозбужденных носителей заряда с плазмонами приводит к высоким скоростям их рекомбинации, существенно превышающими скорости релаксации собственных возбуждений в полупроводнике. Следует отметить, что композиционные метаматериалы на основе AlGaAs выращиваются промышленной технологией молекулярно-лучевой эпитаксии. Распределение и размеры металлических нановключений контролируются ростовыми параметрами. Особенности метаматериалов, исследуемых в диссертационной работе, показывают их перспективность для использования в быстродействующей опто- и наноэлектронике, в частности, для создания приемников инфракрасного излучения, оптических переключателей и различных устройств терагерцового диапазона частот. Все это обуславливает **актуальность** работы.

2. Новизна полученных результатов, выводов и рекомендаций

В результате исследований, вошедших в диссертацию, впервые экспериментально обнаружена существенная экстинкция света в области оптической прозрачности полупроводниковой среды AlGaAs, вызванная плазмонным резонансом в неупорядоченной системе нановключений AsSb. Уровень оптического поглощения при этом оказался сопоставим с уровнем собственного поглощения полупроводниковой

матрицы AlGaAs в области края ее фундаментального поглощения, тогда как объемная доля металлических наночастиц не превышала 0.5%.

Впервые экспериментально показано, что пространственное расположение нановключений AsSb в объеме эпитаксиальной пленки AlGaAs приводит к формированию резонансной оптической моды в оптическом отражении вследствие брэгговской дифракции света в системе плазмонных слоев. Значительная амплитуда оптического отражения обусловлена близостью брэгговского и плазмонного резонансов.

Оптическое исследование смещения основной экситонной линии в периодической системе низкотемпературных квантовых ям GaAsP, δ -легированных примесями Sb и P, впервые продемонстрировало подавление усиленной взаимодиффузии Al-Ga при высокотемпературном отжиге и сохранение морфологии эпитаксиальных интерфейсов, а также отсутствие деградации экситонного отклика квантовых ям. При этом экситонная линия была преимущественно однородно уширенной вследствие ультракороткого времени жизни носителей заряда.

3. Значимость полученных автором диссертации результатов

Ценность научных результатов состоит в экспериментальном обнаружении и исследовании резонансного взаимодействия света с новыми метало-полупроводниковыми метаматериалами и структурами на основе AlGaAs/AsSb. Полученные результаты значимы как для фундаментальной науки, так и для потенциальных приборных приложений в высокоскоростной опто- и наноэлектронике. Экспериментально обнаруженное автором резонансное брэгговское отражение света в периодической системе слоев плазмонных наночастиц AsSb в AlGaAs, в частности, может использоваться для создания новых резонансных брэгговских структур, условие двойного резонанса в которых может выполняться в широком диапазоне длин волн благодаря значительной ширине плазмонного резонанса. Экспериментально обнаруженная термическая стабильность низкотемпературных квантовых структур GaAsP может лечь в основу быстродействующих приборов наноэлектроники, благодаря возможности совмещения узких спектральных экситонных линий с ультракороткими временами рекомбинации носителей заряда.

4. Рекомендации для использования результатов и выводов

Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования в научно-исследовательских организациях, ведущих исследования и разработки в области физики полупроводников, полупроводниковых наногетероструктур, наноплазмоники и оптических приборов на их основе. К их числу можно отнести Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Институт физики микроструктур РАН, Институт физики твердого тела РАН, Московский государственный университет, Санкт-Петербургский государственный

университет. Разработанные методики и полученные научные результаты могут быть также использованы в образовательном процессе в таких вузах, как МГУ, СПбГУ, НИУ ИТМО, СПбПУ «Политех Петра Великого», Санкт-Петербургский Академический университет РАН, Новосибирский государственный университет.

5. Недостатки диссертационной работы

По материалам диссертации можно сделать несколько замечаний:

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 [C. 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.

Сделанные замечания не касаются основных результатов и выводов диссертации и не снижают ее высокой оценки.

6. Заключение

Результаты работы Ушанова Виталия Игоревича являются оригинальными и новыми. Они представляют собой глубокое исследование, выполненное на самом современном уровне, вносящее существенный вклад в понимание явлений взаимодействия света с композиционными метало-полупроводниковыми наноструктурами на основе AlGaAs/AsSb. Надежность и достоверность материалов диссертации не вызывают сомнений. Основная их часть своевременно опубликована в российских и

международных высокорейтинговых реферируемых журналах. Кроме того, автор докладывал свои результаты на различных всероссийских и международных научных конференциях.

Результаты, обобщаемые в настоящей диссертации, были получены в 7 оригинальных публикациях автора, в которых личный вклад автора был решающим. Автореферат диссертационной работы соответствует содержанию и достаточно полно ее излагает. Текст диссертационной работы написан грамотно и хорошо оформлен.

Представленная диссертация «Оптические свойства метаматериалов и структур на основе AlGaAs/AsSb» соответствует критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям действующим «Положением о присуждении ученых степеней». Её автор, Ушанов Виталий Игоревич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - «Физика полупроводников».

Диссертационная работа и настоящий отзыв рассмотрены и утверждены на совместном научном семинаре лаборатории «Оптика спина» и кафедры физики твёрдого тела Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» 15.11.2019 г., протокол № 3.

Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург,

Университетская наб., д. 7/9

Тел.: 363-62-58

Эл. почта: science@spbu.ru

Веб-сайт: <http://spbu.ru/>

Заместитель научного руководителя
лаборатории «Оптика спина» СПбГУ,
профессор кафедры физики
твёрдого тела, доктор физ.-мат. наук
Тел.: 428-48-40

Эл. почта: i.ignatiev@spbu.ru

Игнатъев Иван Владимирович

26.11.2019