

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Би Дунсюэ «Комбинационное рассеяние света в микро-структурированных средах», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика».

Диссертационная работа Би Дунсюэ «Комбинационное рассеяние света в микро-структурированных средах» посвящена исследованию спектров спонтанного и вынужденного комбинационного рассеяния в микро-структурированных средах различных типов. Примерами микро-структурированных сред являются глобулярные фотонные кристаллы типа опаловых матриц и пористые структуры анодного оксида алюминия. В настоящее время большое внимание исследователей привлекают различные микрокомпозиции, построенные в виде гетерогенных твердотельных структур. Наконец, микроструктурирование может быть реализовано также в жидкой фазе в виде взвесей микрочастиц в различных жидкостях. Микро-структурированные среды представляют большой научный и практический интерес как новые оптические материалы. Важной особенностью оптических свойств диэлектрических микро-структурированных сред является возможность пленения и локализации внутри них светового излучения. В связи с этим в микро-структурированных средах имеется возможность реализации аномального возрастания эффективности комбинационного рассеяния (КР) и различного рода нелинейно-оптических эффектов. Таким образом, тема диссертации Би Дунсюэ, связанная с исследованием особенностей спектров КР в микро-структурированных средах, представляется вполне обоснованной и актуальной.

Одним из объектов исследований диссертации Би Дунсюэ являлись мезопористые глобулярные фотонные кристаллы в виде SiO_2 -опаловых матриц, заполненные комбинационно-активными диэлектрическими и сегнетоэлектрическими веществами. Другим важным классом микро-структурированных сред, исследованных в данной диссертации, являлись одномерные фотонные кристаллы в виде фотонно-кристаллических плёнок анодного оксида алюминия с наноканалами. В эти каналы вводились различные диэлектрики и сегнетоэлектрики.

В диссертации Би Дунсюэ были созданы также новые композитные микро-структуры на основе формирования спрессованных смесей микроалмазов близких размеров (в диапазоне 0,1-600мкм) с неорганическими и органическими соединениями. Известно, что в спектре спонтанного КР кристаллов алмаза имеется лишь одна интенсивная резкая линия, которая может служить в качестве репера при анализе спектров КР гетерогенных алмазных микрокомпозитов. На основе создания такого рода гетерогенных алмазных микро-структур в диссертации Би Дунсюэ был предложен новый подход для регистрации спектров КР широкого круга диэлектриков, введённых в алмазный микрокомпозит, включая сложные ароматические соединения и биологически-активные материалы. Наконец, объектами исследований данной диссертации были суспензии твердотельных диэлектрических наночастиц (алмаза и аморфного SiO_2) в воде и этаноле.

В диссертации Би Дунсюэ была развита оригинальная методика для исследования спектров спонтанного и вынужденного КР в созданных микро-структурированных средах. Новизна предлагаемых методов регистрации спектров спонтанного КР состоит в использовании специализированных микрокувет, современных волоконно-оптических схем регистрации сигналов вторичного излучения, в применении многоэлементных приёмников в светосильном миниспектрометре КР для

экспресс регистрации спектров КР, в использовании тёмно-красного возбуждающего излучения, обеспечивающего подавление мешающего люминесцентного фона, а также селективных фотонно-кристаллических фильтров, отражающих возбуждающее излучение и пропускающих стоков сигнал КР. Для исследования процессов вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) была модернизирована установка с использованием в качестве возбуждающего излучения гигантских импульсов рубинового лазера ($\lambda=694,3$ нм), характеризующихся большой энергией (до 1 Дж), наносекундной (~ 10 нс) длительностью импульсов генерации и чрезвычайно малой спектральной шириной линии возбуждающего излучения ($\sim 0,01$ см⁻¹). Высокий уровень техники эксперимента и проведение систематических исследований для решения поставленных в диссертации задач свидетельствуют о большой надёжности и достоверности полученных научных результатов.

Среди основных научных достижений, полученных в диссертации Би Дунсюэ, отметим следующие.

1. В диссертации установлено, что за счёт изменения периода кристаллических решёток глобулярных фотонных кристаллов и фотонно-кристаллических плёнок анодного оксида алюминия, подбора эффективного показателя преломления при изменении концентрации введённого в поры фотонных кристаллов диэлектриков, а также при изменении угла падения возбуждающего излучения на поверхность фотонного кристалла реализуется подстройка частоты возбуждающего излучения под край спектрального положения стоп-зон соответствующих фотонно-кристаллических структур. При этом обеспечивается anomальное возрастание интенсивности КР: до 10^4 раз.
2. В гетерогенных алмазных микрокомпозитах, построенных из микрочастиц алмазов близких размеров (в диапазоне 0,1-100 мкм) и спрессованных

диэлектриков (неорганических и органических комбинационно-активных веществ) наблюдается возрастание интенсивности КР на несколько порядков в связи с усилением интенсивности КР вблизи металлизированной поверхности микроалмазов и в результате локализации возбуждающего излучения и сигнала КР внутри алмазных микрочастиц.

3. Установлено, что в спектрах вторичного излучения микрочастиц алмазов обнаруживаются достаточно интенсивные полосы, соответствующие спектру КР второго порядка и обусловленные проявлением связанных состояний двух фононов. Такой эффект объясняется как следствие фононного конфайнмента внутри микрорезанаторов – алмазных микрочастиц близких размеров.

4. Обнаружено, что при возбуждении микрочастиц НРНТ-алмазов зелёным ($\lambda=532$ нм) излучением непрерывного YAG:Nd³⁺-лазера интенсивность фотолюминесценции на (NV)⁰-центрах существенно возрастает с увеличением интенсивности лазерного излучения до 10⁵ Вт/см². Таким образом, установлены условия для формирования резких пиков бесфононной фотолюминесценции (NV)⁰-центров при комнатной температуре.

5. Впервые обнаружено многочастотное (стокс-антистоксово) ВКР в суспензии микрочастиц (0.2-0.3 мкм) алмазов с небольшой концентрацией (1%) в воде, что обеспечивает возможность создания лазерной гребёнки частот под действием интенсивного лазерного излучения.

6. Впервые обнаружено низкочастотное ВКР в суспензии наночастиц алмазов размером 200-300 нм, а также сферических наночастиц аморфного SiO₂ размером 250 нм. Излучение низкочастотного ВКР характеризуется небольшим спектральным сдвигом (0,5-1,5 см⁻¹), зависящим от размера рассеивающих наночастиц и от скорости распространения в них звуковых волн, Низкочастотное ВКР на сферических наночастицах близких размера характеризуется высокой направленностью вперёд и большим коэффициентом преобразования (до 40 %).

Все полученные в диссертации Би Дунсюэ научные результаты и основные положения, выдвигаемые на защиту, детально обоснованы; их корректность и правомерность подтверждается согласием теории с экспериментом.

Диссертация Би Дунсюэ не лишена недостатков.

1. Описание процедуры приготовления некоторых образцов недостаточно подробно. Например, на стр. 29-30 указано: “Кристаллическая решётка композитного фотонного кристалла формировалась в результате сушки, отжига и ультразвуковой обработки.” При этом параметры соответствующих процессов не приводятся.
2. Непонятно, каким образом наблюдаемый эффект роста интенсивности КР с изменением размеров глобул (рис. 28), объясняется на основе формулы (15), которая описывает положение стоп-зон, и в которую размер глобул не входит. Кроме того, из подписи к рис. 28 не ясно, является ли сплошная кривая на графике результатом расчетов по формуле (15) или проведена для наглядности.
3. В диссертации имеются опечатки и неудачно сформулированные предложения, например на стр. 16: “Плотность фотонных состояний в фотонной запрещённой зоне близка к отражению нулю”.

Высказанные замечания по диссертации Би Дунсюэ не являются принципиальными и не снижают общий высокий уровень представленной диссертационной работы. Оценивая диссертацию Би Дунсюэ в целом, следует отметить, что в данной работе решена важная научная и практическая задача создания и исследования оптических свойств нового типа микро-структурированных сред, обеспечивающих возможность создания высокочувствительных молекулярных сенсоров на основе анализа спектров КР веществ, введенных в пористые микроструктуры. Основные результаты диссертации Би Дунсюэ опубликованы в рецензируемых научных

журналах и апробированы на представительных научных конференциях. Текст автореферата хорошо отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Би Дунсюэ «Комбинационное рассеяние света в микро-структурированных средах» полностью удовлетворяет требованиям, «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., а её автор – Би Дунсюэ заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук Авакянц Лев Павлович,
профессор кафедры общей физики Отделения экспериментальной и теоретической физики Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 19991, Москва, Ленинские горы, д. 1.



Л.П. Авакянц

Телефон: +7(916)377-62-36.

E-mail: avakyants@physics.msu.ru

19 ноября 2020 г.

Подпись Л.П. Авакянца удостоверяю:

Декан физического факультета МГУ

профессор



Н.Н. Сысоев

Список основных научных публикаций профессора кафедры общей физики МГУ им. М.В. Ломоносова, д.ф.-м.н. Авакянца Льва Павловича по теме диссертации Би Дунсюэ «Комбинационное рассеяние света в микро-структурированных средах», представленной к защите на соискание ученой степени физико-математических наук по специальности 01.04.05 - «Оптика».

1. **Avakyants L.P.**, Svyakhovskiy S.E., Aslanyan A.E., Chervyakov A.V. Photoreflectance in monolayer mesoporous silicon structures. *Journal of Russian Laser Research*, 2020, 41(3): 207–214.
2. Асланян А.Э., **Авакянц Л.П.**, Червяков А.В., Туркин А.Н., Мирзаи С.С., Курешов В.А., Сабитов Д.Р., Мармалюк А.А. Исследование напряженности внутренних электрических полей в активной области светодиодных структур на основе InGaN/GaN с разным числом квантовых ям методом спектроскопии электропропускания. *Физика и техника полупроводников*, 2020, т.54, № 4, с. 420–425
3. Асланян А.Э., **Авакянц Л.П.**, Червяков А.В., Туркин А.Н., Курешов В.А., Сабитов Д.Р., Мармалюк А.А. Фотореверсивный ток в светодиодных гетероструктурах на основе InGaN/GaN с разным количеством квантовых ям. *Физика и техника полупроводников*, 2020, т. 54, № 3, с. 292–295.
4. Асланян А.Э., **Авакянц Л.П.**, Боков П.Ю., Червяков А.В. Исследование распределения встроенных электрических полей в светодиодных гетероструктурах с множественными квантовыми ямами GaN/InGaN методом электроотражения. *Физика и техника полупроводников*, 2019, т. 53, № 4, с. 493–499
5. **Авакянц Л.П.**, Боков П.Ю., Казаков И.П., Базалевский М.А., Деев П.М., Червяков А.В. Исследование методом спектроскопии фотоотражения слоев LT-GaAs , выращенных на подложках Si и GaAs . *Физика и техника полупроводников*, 2018, т. 52, № 7, с. 708–711.
6. Svyakhovskiy S.E., Aslanyan A.E., Bokov P.Yu., Chervyakov A.V., **Avakyants L.P.**, Lomonosov M.V. Photoreflectance spectroscopy of nonlinear photonic crystals. *Proceedings - International Conference Laser Optics 2018*, 2018, 8435204, 337.
7. **Авакянц Л.П.**, Боков П.Ю., Червяков А.В. Комбинационное рассеяние света в InP , легированном имплантацией ионов Be^+ . *Физика и техника полупроводников*, 2017, т. 51, № 2, с. 177–181.
8. **Авакянц Л.П.**, Асланян А.Э., Боков П.Ю., Положенцев К.Ю., Червяков А.В. Спектры электроотражения множественных квантовых ям InGaN/GaN , помещенных в неоднородное электрическое поле р-п-перехода. *Физика и техника полупроводников*, 2017, т. 51, № 2, с. 198–201.
9. **Авакянц Л.П.**, Асланян А.Э., Боков П.Ю., Волков В.В., Матешев И.С., Туркин А.Н., Червяков А.В., Юнович А.Э. Люминесцентные и электрические свойства ультрафиолетовых и фиолетовых светодиодов из гетероструктур на основе нитрида галлия. *Ученые Записки Физического Факультета МГУ*, 2016, № 3, с. 163401-1–163401-7.