

18.02.2019

№

01/785

на №

от

Утверждаю

Проректор по научной работе и инновациям  
Национального исследовательского Томского  
политехнического университета, доктор  
технических наук

Степанов И.Б.



“18” 02 2019 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации

о диссертационной работе **Бураченко Александра Геннадьевича «Импульсная катодолюминесценция и излучение Вавилова-Черенкова диэлектриков и полупроводников при возбуждении пучком убегающих электронов»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика.

Диссертационная работа Бураченко А. Г. посвящена исследованию свечения группы широкозонных материалов под действием пучков убегающих электронов с энергией десятки-сотни кэВ. Работа направлена на выявление излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ) в алмазе на фоне катодолюминесценции и исследованию импульсной катодолюминесценция (ИКЛ) различных кристаллов при длительности импульса тока пучка в сотни пикосекунд.

**Актуальность исследования** обусловлена тем, что свечение кристаллов используется как для определения характеристик электронных пучков с помощью сцинтилляционных датчиков и датчиков на основе ИВЧ, так и для определения структуры и состава материалов по спектрам ИКЛ. При регистрации свечения диэлектрических и полупроводниковых материалов, один из видов свечения будет являться паразитным по отношению к другому, в зависимости от того, какой тип приемников излучения применяется. Поэтому важно знать соотношение ИКЛ и ИВЧ в спектре свечения различных материалов при воздействии пучком электронов. Кроме того, возбуждение ИКЛ электронными пучками субнаносекундной длительности позволяет исследовать переходные характеристики излучательной рекомбинации электронно-дырочных

пар в полупроводниках и диэлектриках и, соответственно, получать информацию о процессах передачи энергии возбуждения центрам свечения.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа Бураченко А. Г. состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 130 страниц текста, 46 рисунков, 2 таблицы и список цитированной литературы из 138 наименований.

**В первой главе** представлен обзор литературы о физических процессах, происходящих в разряде, формировании пучков убегающих электронов нано- и субнаносекундной длительности, а также о воздействии пучков электронов на диэлектрики и полупроводники, при котором наблюдается их свечение. Описаны требования к оптическим свойствам вещества и условий возбуждения пучком электронов, которыми определяется возможность возникновения ИКЛ и ИВЧ.

**Вторая глава** посвящена описанию методик измерений и экспериментальных установок, используемых для получения потоков убегающих электронов нано- и субнаносекундной длительности, регистрации ИКЛ и ИВЧ при воздействии таких потоков на материалы.

**В третьей главе** описана методика расчета спектра ИВЧ на примере алмаза. Выбор алмаза для расчета спектра ИВЧ был обусловлен тем, что алмаз, по совокупности оптических свойств, лучше других исследуемых кристаллов, возбуждаемых электронами с энергией до 200 кэВ, подходил для регистрации ИВЧ. Известно, что алмаз начинают использовать в установках типа токамак в качестве радиатора в черенковских детекторах. Предполагается, что черенковские детекторы позволят изучить условия появления потоков убегающих электронов, генерация которых может приводить к негативным последствиям (повреждению стенок рабочей камеры, срыву нагрева плазмы). Поэтому исследованиям свечения алмаза в данной диссертационной работе уделялось особое внимание. Отметим, что значительная часть убегающих электронов, генерируемых в плазме токамаков, имеют энергию десятки-сотни кэВ. Этот же диапазон энергий электронов был реализован в ускорителях, используемых при проведении представленной работы.

В третьей главе также показано, каким образом можно разделить спектры ИКЛ и ИВЧ и оценить вклады ИКЛ и ИВЧ в УФ и видимое излучение различных веществ.

**В четвертой главе** приведено описание результатов исследований спектрально-кинетических характеристик свечения полиметилметакрилата (ПММА). ПММА часто используется в черенковских детекторах, применяемых в медицине, и сцинтилляционных датчиках для регистрации ИВЧ и люминесценции соответственно. Этим был обусловлен интерес к исследованию свечения под действием электронного пучка в данном материале. В работе использовались образцы ПММА различных производителей. Было показано, что в условиях эксперимента интенсивность ИКЛ намного больше интенсивности ИВЧ.

**В пятой главе** представлен анализ результатов исследований спектрально-кинетических характеристик свечения кристаллов с различными

показателями преломления, определено соотношение ИКЛ и ИВЧ в спектре свечения алмазов. При использовании фотоприемника с высоким временным разрешением ( $\sim 80$  пс) удалось установить, что фронт импульса люминесценции природного алмаза, искусственного алмаза, сподумена и кальцита составляет соответственно  $\sim 1$ ,  $\sim 0.5$ ,  $\sim 0.4$  и  $\sim 0.3$  нс при минимальной длительности тока пучка  $\sim 0.1$  нс. На основании полученных для природного и искусственного алмаза результатов была выдвинута гипотеза, объясняющая такую разницу во времени нарастания импульсов люминесценции.

ИВЧ было достоверно зарегистрировано в УФ области спектра между полосой фундаментального поглощения и полосами ИКЛ с помощью ФЭУ и монохроматора. Интенсивное излучение ИКЛ в этой области отсутствует в алмазе (природном и искусственном), ZnS, ZrO<sub>2</sub>, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CsI. Для кристаллов природного и искусственного алмаза в спектрах свечения было определено соотношение ИКЛ и ИВЧ. Доля энергии ИВЧ от энергии люминесценции в диапазоне длин волн 240–750 нм для искусственного и природного алмаза составила не более  $\sim 34\%$  и  $\sim 1\%$  соответственно. Таким образом интенсивность ИВЧ при максимальных энергиях электронов до 200 кэВ в разы меньше интенсивности ИКЛ хотя значительная часть электронов пучка имела энергию выше пороговой для возникновения ИВЧ в алмазе. Также в работе показано, что ИВЧ, из-за его малой интенсивности излучения по сравнению с ИКЛ, не удаётся регистрировать в большинстве из исследуемых образцов

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы, а также даны предложения по дальнейшему развитию исследований.

#### **Научная ценность и практическая значимость.**

1. Показано, что возбуждение ИКЛ субнаносекундными пучками электронов позволяет исследовать переходные характеристики излучательной рекомбинации электронно-дырочных пар в полупроводниках и диэлектриках и соответственно получать количественную информацию о термализации горячих носителей на краях разрешенных зон (проводимости и валентной) в кристаллической решетке. Эта информация будет полезна для проведения расчетов зонной структуры полупроводников и диэлектриков.

2. Предложена гипотеза, объясняющая различие во временах нарастания ИКЛ для природного и искусственного алмаза, которая заключается в следующем: в поликристаллическом алмазе в отличие от монокристаллического из-за наличия  $sp^2$ -гибридизированных углеродных связей на границах кристаллитов создается большая плотность состояний вблизи краев зон. Наличие большей плотности состояний на границах кристаллитов сокращает время термализации горячих носителей, что приводит к сокращению длительности фронта рекомбинационного излучения в видимом диапазоне спектра.

3. Использование численных расчетов спектральной плотности потока ИВЧ и сравнение их с экспериментально измеренными значениями спектральной плотности свечения позволило спектрально разделить ИКЛ и ИВЧ излучения в алмазе.

4. Предложен метод повышения чувствительности пороговых черенковских детекторов полного поглощения. Для повышения чувствительности детекторов необходимо использовать материалы, прозрачные в УФ области спектра, где интенсивность ИВЧ максимальна, и не имеющие полос люминесценции в этой области спектра. Данный метод имеет преимущества перед известным методом определения наличия ИВЧ в таких детекторах, в условиях, когда энергия электронов составляет десятки-сотни кэВ.

**Положения**, выносимые на защиту, находят развернутое и аргументированное подтверждение в тексте диссертационной работы, а также в 26 публикациях, в том числе 14 статей представлены в журналах из списка ВАК (из них 3 статьи в зарубежных научных журналах, входящих в Web of Science; 11 статей в российских научных журналах, переводные версии которых входят в Web of Science) и 1 коллективной монографии. Представленные результаты докладывались на международных конференциях.

**Достоверность** результатов диссертационной работы подтверждается использованием апробированных методик измерения и аттестованного оборудования для измерений, спектрального анализа и амплитудно-временных характеристик излучения исследуемых образцов, контролем повторяемости и анализом погрешностей, а также сопоставлением и удовлетворительным совпадением экспериментальных результатов с результатами численного расчета.

Полученные результаты могут быть использованы при создании черенковских детекторов и сцинтилляционных датчиков, регистрирующих потоки электронов с энергиями десятки-сотни кэВ.

**Недостатки работы и замечания.** По представленной работе имеются следующие замечания:

1. Неудачно построено описание результатов исследований в п. 5.2, одним из основных в работе. Параграф насыщен результатами исследований ИКЛ различных кристаллов, которые подробно изложены на девяти с половиной страницах из четырнадцати. Показано, почему в восьми кристаллах ИВЧ обнаружить сложно или невозможно. На этом фоне доказательство наличия ИВЧ в трех кристаллах, что является важным для диссертации, представлено недостаточно четко. Работа выглядела бы намного лучше, если бы анализ этих результатов был более подробным.

2. В спектре, приведенном на рисунке 5.11 (а), есть выброс на длине волны 330 нм, достоверность которого не была доказана.

3. В подписях к рисункам 4.5–4.9, 5.3–5.6 сказано: «Спектры излучения и пропускания образцов при возбуждении...», однако спектры пропускания в работе были измерены не при возбуждении.

4. На странице 91 правильное было бы вместо выражения «Интенсивность спектров излучения... спадает с уменьшением длины волны...» написать «Спектральная плотность излучения... спадает с уменьшением длины волны...».

5. На странице 102 нумерация спектров, изображенных на рисунке 5.7 не совпадает с нумерацией, которая указана в подписи к этому рисунку.

6. В тексте встречаются опечатки, например, вместо «энергетических» написано «энергетический» (стр. 33, 34), вместо «скоростью» – «скорость» (стр. 42), вместо «может» – «могут» (стр. 76);

Высказанные замечания не снижают общей положительной оценки выполненного диссертационного исследования и не влияют на высокую научную значимость полученных автором основных результатов.

Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание, а опубликованные работы раскрывают основные положения диссертационного исследования.

**Заключение.** Содержание диссертации, научные положения и сформулированные выводы дают основание считать, что цель исследования достигнута, а поставленные в диссертации задачи успешно решены. Диссертация **Бураченко Александра Геннадьевича «Импульсная катодолюминесценция и излучение Вавилова-Черенкова диэлектриков и полупроводников при возбуждении пучком убегающих электронов»** является научно-квалификационной работой, полностью соответствующей требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. п. 9 (ред. от 01 октября 2018 г.), а её автор, **Бураченко Александр Геннадьевич**, заслуживает присуждения ему искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика.

Отзыв обсужден и одобрен на расширенном заседании отделения материаловедения инженерной школы новых производственных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» 31 января 2019г., протокол №14 от 31.01.2019.

Заведующий отделением материаловедения  
инженерной школы новых  
производственных технологий ТПУ,  
доктор технических наук,  
профессор



Клименов Василий Александрович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, 30.  
+7 (3822) 60-63-33, +7 (3822) 60-64-44, tpu@tpu.ru