

ОТЗЫВ

официального оппонента Богачева Юрия Викторовича на диссертацию соискателя Единач Елены Валерьевны на тему «Высокочастотная спектроскопия электронного парамагнитного резонанса примесных спиновых центров в гранатах и карбиде кремния», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

Актуальность выбранной соискателем темы диссертации не вызывает сомнения.

Кристаллы и керамики на основе иттрий-алюминиевых гранатов, легированные переходными и редкоземельными ионами, являются перспективными оптическими и сцинтилляционными материалами, преобразующими излучение высокой энергии в видимый или инфракрасный (ИК) свет, что может найти применение для регистрации ионизирующего излучения в позитронно-эмиссионной (ПЭТ) и компьютерной томографии (КТ), для использования в квантовых компьютерах и системах коммуникаций.

Расширение областей применения карбида кремния (SiC) в высокочастотных и высокотемпературных электронных устройствах неразрывно связано с внедрением в состав их кристаллической структуры электрически активных примесей на основе ионов переходных металлов.

Поэтому идентификация и определение электронной структуры примесных центров переходных и редкоземельных ионов в кристаллах и сцинтилляционных керамиках иттрий-алюминиевых гранатов, включая ионы с большими расщеплениями уровней в нулевом магнитном поле, а также основных электрически активных примесей в карбиде кремния с использованием возможностей высокочастотной ЭПР- и ОДМР-спектроскопии является актуальной задачей.

Научные положения, выдвигаемые соискателем, являются хорошо обоснованными, поскольку основываются на новых экспериментальных результатах, полученных на уникальной научной аппаратуре с использованием самых современных методов магнитного резонанса.

Среди результатов соискателя хотелось бы выделить следующие **новые результаты, имеющие фундаментальное научное значение**.

1. Методом высокочастотного ЭПР в кристаллах иттрий-алюминиевого граната обнаружены и идентифицированы некрамерсовы ионы Tb^{3+} , которые входят в кристалл в виде семейства центров, различающихся расщеплением уровней в нулевом магнитном поле. Существование нескольких типов центров тербия обусловлено как наличием ионов Tb^{3+} в регулярной иттриевой позиции в кристалле, так и образованием структур в виде ионов Tb^{3+} , в ближайшем окружении которых находятся нейтральные дефекты перестановки. Магнитный резонанс ионов Tb^{3+} также был зарегистрирован по изменению фотолюминесценции ионов Ce^{3+} в кристалле YAG, легированном церием и тербием, что явилось прямым доказательством взаимодействия между этими ионами в кристалле.

2. Обнаружено влияние микроволнового поглощения в области разрешенных и запрещенных переходов ионов Mn^{2+} на интенсивность фотолюминесценции в кристалле YAG, легированном марганцем. Регистрация сигналов ОДМР запрещенных переходов показала, что эти сигналы принадлежат изолированным ионам Mn^{2+} .

3. Показано, что при возбуждении циркулярно-поляризованным светом интенсивность фотолюминесценции ионов Mn^{2+} в позициях иттрия в YAG отражает населенности спиновых подуровней основного состояния этих ионов.

4. Методом высокочастотного ЭПР идентифицированы и разделены позиции основных электрически активных парамагнитных примесей (мелких доноров азота, мелких акцепторов бора и глубокой компенсирующей примеси ванадия) в карбиде кремния.

Ряд новых результатов, полученных соискателем, имеет не только научное, но и **практическое значение**.

В работе исследованы новые перспективные оптические и сцинтилляционные материалы для применения в медицинской диагностике методами ПЭТ и КТ, а также для использования в квантовых компьютерах и системах коммуникаций.

Использование методов высокочастотного ЭПР и ОДМР позволило идентифицировать примеси переходных и редкоземельных элементов в кристаллах и сцинтилляционных керамиках на основе иттрий-алюминиевых гранатов, изучить процессы передачи энергии и спиновых состояний между примесными ионами.

Проведенные исследования позволили получить сведения о зарядовых состояниях, кристаллографических положениях, наличии неконтролируемых примесей в кристаллах гранатов и сцинтилляционных керамиках на их основе. Это представляет интерес как для улучшения технологии роста кристаллов, так и для модификации устройств квантовой электроники

Установлено, что идентификация электрически активных примесей, анализ их спиновых состояний в материалах на основе карбида кремния методом высокочастотного ЭПР позволяет использовать данный метод для контроля за полуизолирующими свойствами материала, а также за концентрацией примесей, ответственных за электронную и дырочную проводимость, что актуально при производстве устройств на основе карбида кремния.

Достоверность основных выводов и результатов диссертационной работы подтверждается сопоставлением результатов исследования спектров магнитного резонанса на разных частотах, сравнением с результатами, полученными другими методами исследований, моделированием спектров ЭПР. Представленные в работе результаты опубликованы в ведущих научных журналах, индексируемых в Scopus и WEB of Science, и апробированы на российских и международных конференциях.

Общая оценка диссертационной работы. Данная диссертационная работа выполнена на актуальную тему и на высоком научном уровне. Полученные новые результаты имеют, несомненно, научную и практическую значимость. Выдвигаемые соискателем научные положения и выводы хорошо обоснованы и достоверны.

В качестве **замечаний** по работе можно отметить следующие:

1. В диссертационной работе наряду с большим объемом экспериментального материала представлены результаты моделирования спектров ЭПР исследуемых примесных спиновых центров. В большинстве случаев наблюдается хорошая корреляция результатов моделирования с экспериментом. Однако, в некоторых случаях (например, в разделе 4.2, посвященном исследованию сцинтилляционных керамик на основе гранатов), видно сильное расхождение моделируемого и экспериментального (усредненных по всем ориентациям) спектров ЭПР для ионов Gd^{3+} . Чем вызвано такое несоответствие расчетного и экспериментального спектров ЭПР? Желательно было бы описать особенности и допущения используемых моделей. Если использовалась модель неоднородного

уширения линий ЭПР, то из каких соображений выбиралась ширина спиновых пакетов?

2. В диссертации встречаются предложения, которые понятны только специалистам данного узкого профиля, т.е. имеют «сленговый» характер. Например, словосочетание «передача энергии и спина». Термин «передача спина» в разных разделах физики, в том числе и магнитного резонанса, имеет разное толкование. Аналогичный «сленговый» характер имеют встречающиеся в работе словосочетание «порошковый образец», «порошковый материал», «порошковый спектр» хотя реально в работе такие образцы не исследуются. Поэтому необходимо пояснение подобных терминов.

3. В автореферате и во введении в диссертации в некоторых разделах вызывает вопросы стилистика изложения. Так, например, в разделе «Научная новизна» перемешаны конкретные и обобщенные результаты исследований.

В разделе «Научная и практическая значимость» целесообразно было бы разделить эти два понятия, отдельно выделив научную значимость и отдельно практическую значимость полученных результатов.

Вызывает вопросы утверждение соискателя «Все полученные в работе результаты являются новыми и были направлены на решение практических задач».

Отмеченные недостатки не влияют на общую высокую оценку качества выполненной работы.

Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертационной работы.

Заключение. Представленная диссертационная работа «Высокочастотная спектроскопия электронного парамагнитного резонанса примесных спиновых центров в гранатах и карбиде кремния» полностью соответствует требованиям согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Единач Елена Валерьевна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент,
кандидат физико-математических наук, специальность 01.04.03 – «Радиофизика»,
доцент, зам. заведующего каф. физики по научной работе, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

Богачев Юрий Викторович

17 мая 2021 г.

Контактные данные.

Почтовый адрес: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д.5

Телефон: +7(911) 205-38-22.

Эл. почта: physics@etu.ru