

«УТВЕРЖДАЮ»

А. Котельникова РАН

С. А. Никитов

чл.-корр

«21» октября 2015

### Отзыв ведущей организации

о диссертации Шакурова Гильмана Султановича «Высокочастотная ЭПР-спектроскопия примесных парамагнитных ионов в диэлектрических и полупроводниковых кристаллах», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

Научные исследования, лежащие в основе диссертационной работы Г.С. Шакурова, представляют собой продолжение и развитие плодотворного направления в спектроскопии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), созданного и успешно действующего в Казанском физико-техническом институте им. Е. К. Завойского КНЦ РАН и шире – в рамках Казанской научной школы. В отличие от общепринятой схемы регистрации и исследования ЭПР в частотных диапазонах, соответствующих используемым магнитным полям, в данном случае выбран метод наблюдения резонансных спектров вблизи нулевого поля, на частотах так называемого начального расщепления энергетических уровней исследуемого объекта. Этот подход позволяет обойтись без сложных и дорогостоящих сверхпроводящих магнитных систем и пройти очень далеко в коротковолновый диапазон, вплоть до длин волн в сотни микрон, что соответствует терагерцовым частотам и тем самым обеспечивает прорыв в новую, почти не освоенную область.

Работа в этом диапазоне требует совершенно новых технических решений и сопряжена со значительными экспериментальными и конструкторскими трудностями, но зато сулит уникальные возможности для ЭПР спектроскопии. Сразу скажем, что диссертант блестяще справился с техническими проблемами. Ему удалось почти вдвое расширить частотный диапазон оригинального спектрометра, сконструированного ранее совместно с проф. В. Ф. Тарасовым, и выполнить на нем обширную программу исследований. Главным результатом этой работы следует считать регистрацию и интерпретацию спектров магнитного резонанса так называемых некрамерсовых

парамагнитных центров, спектр которых характеризуется полным снятием вырождения (т.е. конечным энергетическим расщеплением) в нулевом магнитном поле. Тем самым была заполнена существенная брешь в наших знаниях об энергетической структуре активированных кристаллов, многие из которых представляют большой практический интерес в качестве рабочих материалов для лазеров, радиационных счетчиков, элементов микроэлектроники и спинтроники.

Сказанное подтверждает бесспорную актуальность диссертации Г. С. Шакурова и новизну изложенных в ней результатов. Почти все данные, полученные диссертантом в ходе измерений и последующей теоретической обработки, – а это десятки различных диэлектрических и полупроводниковых кристаллов, легированных различными ионами группы железа и редкоземельными ионами, – позволили впервые определить константы спинового гамильтониана и провести полную идентификацию кристаллографического положения парамагнитного центра и параметров кристаллического поля. В большинстве случаев эта информация получена Г. С. Шакуровым впервые. В ряде экспериментов подтверждены результаты исследований, выполненных ранее другими методами, что также представляется весьма полезным.

Высокая научная квалификация диссертанта не вызывает сомнений. Выдающееся экспериментальное мастерство и убедительная теоретическая интерпретация результатов на основе формализма спинового гамильтониана, в сочетании с привлечением рентгеноструктурных и оптических данных, не оставляют сомнений в достоверности результатов. В качестве наиболее оригинальных и интересных достижений отметим исследование ЭПР в редкоземельных кластерах, образующихся в структуре флюорита (гл. 4), а также анализ эффекта антипересечений (гл. 5).

Подавляющее большинство представленных результатов получено лично Г. С. Шакуровым. Диссертант щепетильно отмечает все случаи, когда привлекались экспериментальные либо теоретические достижения других авторов. Среди таковых наибольший вклад принадлежит В. Ф. Тарасову (первоначальный вариант субмиллиметрового ЭПР спектрометра) и Б. З. Малкину (теория антикроссинга). Все это должным образом оговорено и не может служить препятствием к признанию решающего личного вклада диссертанта.

В диссертации не видно сколько-нибудь существенных недостатков или сомнительных мест, требующих серьезной дискуссии. Среди второстепенных замечаний можно отметить, что в ряде случаев имеющиеся данные не позволили провести окончательную интерпретацию, хотя это можно было сделать с помощью

дополнительных экспериментов. Так, гипотезу о двойниковании кристаллов  $KPb_2Cl_5$  с примесью тербия (гл. 3) можно было бы проверить рентгеноструктурным анализом, а предположение о неконтролируемой примеси двухвалентного железа как источника дополнительного спектра в галлатах (гл. 2) – выращиванием и исследованием кристаллов, легированных железом.

Диссертация в целом написана хорошим языком, изложение выглядит ясным и логичным. Однако некоторую неудовлетворенность вызывает излишне лаконичное, не разъясняющее существа дела замечание о природе узкой инверсной линии в нулевом поле (гл. 2), равно как и упоминание об «антибольцмановском» распределении интенсивностей в сверхтонкой структуре (гл. 3). Затрудняет восприятие и недостаточное число рисунков с полными энергетическими диаграммами исследуемых систем, где были бы четко обозначены исследуемые переходы между синглетами, дублетами и пр.

Оценивая диссертацию Г.С. Шакурова в целом, можно утверждать, что она выполнена на высоком современном научном уровне. Научная значимость диссертации состоит в решении актуальной и важной научной проблемы – получении достоверной информации об энергетической структуре, электронных состояниях, кристаллографических позициях и внутрикристаллических полях парамагнитных ионов, обладающих большими начальными расщеплениями энергетических уровней (в первую очередь – некрамерсовых ионов с целочисленными значениями эффективного электронного спина). Важно, что эта задача решена для широкого класса диэлектрических и полупроводниковых материалов, имеющих большое прикладное значение в квантовой электронике и смежных областях.

Основные результаты работы и положения, выносимые на защиту, соответствуют поставленным целям – разработке методов и реализации высокочастотной спектроскопии ЭПР в применении к диэлектрикам и полупроводникам, активированным парамагнитными центрами с большими расщеплениями уровней энергии в нулевом магнитном поле. Полученные результаты и выводы, касающиеся структуры, симметрии и электронных состояний исследованных парамагнитных ионов (в особенности некрамерсовых), представляют собой решение важной актуальной научной задачи и могут быть использованы в научных и прикладных исследованиях, проводимых в КФТИ им. Е.К. Завойского КНЦ РАН, Казанском (Приволжском) Федеральном университете, Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Физическом Институте им. Лебедева РАН и других

научных и научно-технических организациях, занимающихся высокочастотной спектроскопией, физикой кристаллов, квантовой электроникой и спинтроникой.

Основные положения диссертации опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах, доложены на многочисленных международных конференциях и хорошо известны специалистам. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, представленная работа Г. С. Шакурова полностью удовлетворяет требованиям к докторской диссертации, установленным действующим Положением о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор заслуживает ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

*Сл*

д.ф.-м.н., проф. Ацаркин Вадим Александрович  
126009 Москва, Моховая, 11, стр. 7, ИРЭ РАН  
Тел. +7 495 629 3440

E-mail: [atsarkin@cplire.ru](mailto:atsarkin@cplire.ru)

Зав. лабораторией Института радиотехники и  
электроники им. В.А. Котельникова РАН

« 20 » 10 2015 г.

Отзыв рассмотрен и утвержден на Научно-квалификационном семинаре  
«Квантовая физика конденсированных сред» 20.10.2015 г.

Председатель семинара

д.ф.-м.н., проф.

*В.А. Ацаркин*  
В.А. Ацаркин

Ученый секретарь семинара

к.ф.-м.н.

*Ч. М. Брискина*  
Ч. М. Брискина

Подпись гр. Ч  
удостоверяется

Подпись *Ч. М. Брискина*

