

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертации *Магомадова Рукмана Масудовича* «Фотозлектрические, кинетические явления и эффекты памяти в сегнетоэлектриках, пьезоэлектриках и сегнетоэластиках» представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Проблема взаимодействия электромагнитного поля с твердым телом уже весьма продолжительное время вызывает, как сугубо практический, так и академический интерес специалистов в области физики конденсированного состояния.

Прикладной аспект проблемы обусловлен интенсивным развитием современных технологий и использованием новых физических эффектов для создания различных устройств, и прежде всего, оптоэлектронных приборов.

С точки зрения фундаментальной науки, безусловно, представляется важным проанализировать и обобщить закономерности взаимодействия полей различной природы, и в частности, электромагнитного излучения оптического диапазона с различными классами кристаллических тел.

Надо заметить, что к настоящему времени уже известен большой ряд трудов, посвященных решению данной проблемы. Однако вопросы, касающиеся всего комплекса эффектов, вызванных влиянием различных полей на состояние электронной подсистемы, электрон-фононное взаимодействие, кооперативные процессы и другие явления в нецентросимметричных кристаллах полупроводников и диэлектриков до сих пор в полной мере не выяснены. Поэтому диссертация *Магомадова Р. М.*, целью которой стало исследование совокупности новых явлений, возникающих при внешнем воздействии на среды без центра симметрии и сегнетоэластики, и выяснение природы их формирования, представляется, несомненно, **актуальной** в области физики конденсированного состояния.

В соответствии с поставленной целью диссертантом для исследований был использован широкий круг объектов и экспериментальных методов исследования.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 316 наименований. Диссертация изложена на 289 страницах машинописного текста, включая 97 рисунков и 2 таблицы.

Работа **хорошо апробирована**. Ее основные результаты были представлены на многочисленных российских и международных конференциях и семинарах и опубликованы в 47 научных работах, включая 15 изданий, рекомендованные ВАК РФ.

Автореферат диссертации соответствует содержанию и структуре диссертации и адекватно отражает полученные в работе результаты.

Во введении соискателем обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель, определены объекты исследования, отмечены новизна и практическая ценность полученных результатов. Изложены основные научные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о публикациях, апробации работы, структуре и объеме диссертации.

Первая глава содержит литературный обзор по теме диссертации. Обсуждаются способы описания, теория и экспериментальные данные, относящиеся к аномальному фотовольтаическому, магнитофотовольтаическому и фоторефрактивным эффектам. Внимание акцентируется на роли симметрии кристалла в их проявлении.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных методов исследования. Подробно описаны методики для изучения аномального фотовольтаического и фоторефрактивного эффектов, фотолуминесценции и рэлеевского рассеяния в кристаллах, электрон - фотонного и электрон - фононного взаимодействий. Дано описание установок для изучения влияния магнитных и механических полей на физические свойства кристаллов.

В **главе 3** анализируются закономерности проявления аномального фотовольтаического и фоторефрактивного эффектов в различных классах кристаллов. Определены компоненты фотовольтаического тензора k_{ijn} для сегнетоэлектрика $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$. Впервые обнаружены и исследованы поперечные компоненты фотогальванического тока J_x и J_y в сегнетоэлектрике $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$. Показано, в частности, что особенности аномального фотовольтаического эффекта в сегнетоэлектриках определяются симметрией фотовольтаического тензора k_{ijn} . Одной из таких особенностей является наличие составляющей фотогальванического тока в направлении спонтанной поляризации, не зависящей от направления поляризации света, т.е. возможность наблюдения аномального фотовольтаического эффекта в неполяризованном свете.

На примере тетрабромцинка рубидия установлено, что в отличие от канонических, в слабых сегнетоэлектриках асимметрия электронных процессов определяется кристаллическими полями, действующим на атомы основного вещества или примеси, а не полем, обусловленным спонтанной поляризацией.

Представлены данные о влиянии поляризации света на продольный фоторефрактивный эффект в сегнетоэлектрике $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ и показано, что под действием поля создаваемого X или Y компонентой фотогальванического тока, кристалл $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ из одноосного превращается в двуосный.

Обнаружен эффект фоторефракции в сегнетоэлектрике Rb_2ZnBr_4 , сегнетоэластике – сегнетоэлектрике $\beta\text{-Sb}_5\text{O}_7\text{I}$, пьезоэлектрике ZnS и в природных кристаллах кварца. Анализ полученных результатов показал, что эффект фоторефракции в этих кристаллах обусловлен полями, возникшими из-за аномального фотовольтаического эффекта.

В *четвертой главе* изложены результаты изучения влияния длительности освещения на интенсивность фотолюминесценции и фотоиндуцированного рассеяния света в монокристаллах ZnS . Рассмотрено взаимодействие неравновесных носителей заряда с фотонами и фононами в монокристалле ниобата лития.

Проведенные исследования привели автора к заключению о том, что фотоиндуцированное рассеяние в кристаллах ZnS обусловлено возникновением микродеформаций при освещении кристалла, вследствие изменения заряда вакансий цинка и серы, ионизации атомов основного вещества, атомов кислорода и возможно атомов неконтролируемых примесей. Повышение интенсивности фотолюминесценции с увеличением длительности экспозиции кристаллов ZnS связано с ростом концентрации рекомбинационных уровней, создаваемых микродеформациями в запрещенной зоне кристалла.

Особенности взаимодействия фотонов с неравновесными носителями, а именно то обстоятельство, что одночастичное рассеяние света возможно в том случае, когда энергия подвижных носителей сопоставима, или превышает энергию фотонов, позволило оценить энергию данных носителей.

Результаты исследований интенсивности рэлеевского рассеяния света в кристалле ZnS , освещенного линейно-поляризованным излучением $He-Cd$ лазера показали, что энергия фотоиндуцированных носителей заряда, ответственных за фотогальванический эффект, не зависит от температуры в достаточно широком температурном интервале.

На примере монокристалла $LiNbO_3: Fe$ установлен эффект увлечения фононов неравновесными носителями заряда. Показано, что их энергия не зависит от температуры кристалла вдали от фазового перехода из нецентросимметричной фазы в центросимметричную.

Пятая глава посвящена анализу влияния различных механизмов рассеяния на подвижность неравновесных носителей заряда в кристаллах. В результате исследования автор приходит к выводу о том, что характер температурной зависимости подвижности неравновесных электронов может существенно меняться в зависимости от механизма рассеяния носителей. В некоторых случаях подвижность неравновесных носителей заряда практически не зависит от температуры в широком интервале ее значений.

В *главе шесть* содержатся результаты изучения влияния магнитного и упругого полей на физические свойства ряда ферроиков. Автором был обнаружен и исследован эффект магнитострикции в титанате бария. Обнаружено заметное влияние магнитного поля на коэффициент теплового расширения, диэлектрическую проницаемость и температуру сегнетоэлектрического фазового перехода. Сделано предположение о том, что, наибольший вклад в эффект магнитострикции дают парамагнитные атомы Ti .

Здесь же представлены данные о фотоэлектрических свойствах α и β -модификаций Sb_5O_7I , включая фоторефрактивный эффект в сегнетоэластике

α - $\text{Sb}_5\text{O}_7\text{I}$. Показано, что освещение кристалла в собственной области поглощения приводит к изменению спонтанной деформации, обусловленной фотодеформацией, т.е. с влиянием неравновесных носителей заряда на спонтанную деформацию. На примере монокристалла α - $\text{Sb}_5\text{O}_7\text{I}$ установлено, что одноосные механические напряжения влияют на температуру фазового перехода, коэффициент упругости и ширину запрещенной зоны сегнетоэластиков.

На основании большого объема проведенных экспериментальных исследований и их анализа автором получен ряд важных, принципиально **новых результатов**, наиболее значимыми из которых на наш взгляд являются следующие:

1. Преобладающими в механизме обуславливающим фоторефрактивный эффект в твердых телах без центра симметрии, являются поля, возникшие в результате проявления в них аномального фотовольтаического эффекта.
2. В нецентросимметричных конденсированных средах, обладающих пьезоэлектрическим эффектом, возникающие при фотоионизации атомов ионы создают микродеформации, обуславливающие фотоиндуцированное рассеяние света.
3. Микродеформации, которые возникают при освещении пьезоэлектрических кристаллов ZnS , создают глубокие уровни в запрещенной зоне, приводящие к смещению спектра фотолюминесценции в коротковолновую сторону и к росту интенсивности фотолюминесценции, вследствие роста скорости генерации и рекомбинации носителей заряда.
4. Влияние магнитного поля на температуру сегнетоэлектрического фазового перехода, теплоемкость и диэлектрическую проницаемость сегнетоэлектрика BaTiO_3 являются следствием магнитострикции кристалла.
5. Двухлучепреломление собственного сегнетоэластика α - $\text{Sb}_5\text{O}_7\text{I}$ определяется спонтанной деформацией, как параметром.

Отметим, что полученные в работе результаты представляются достоверными, а выводы и основные положения, выносимые на защиту - обоснованными, что, в частности обеспечивается использованием апробированных экспериментальных методик, воспроизводимостью полученных результатов и их соответствием основным законам кристаллофизики и физики твердого тела, а также известным литературным данным.

Диссертация Магомадова Р. М. имеет важное практическое значение. Установленные в ней закономерности протекания фотоэлектрических процессов в ряде сегнетоэлектриков, сегнетоэластиков и пьезоэлектриков могут быть востребованы при разработке различных устройств электронной техники.

Полученные в ходе работы над диссертацией новые экспериментальные данные о влиянии электромагнитных и упругих полей на оптические и электрофизические свойства нецентросимметричных кристаллов, а также пред-

ложенные в диссертации механизмы, объясняющие это влияние, развивают представления о физике ацентричных кристаллов.

Результаты работы Магомадова Р. М. могут быть востребованы в научно-исследовательских центрах, занимающихся проблемами ферроиков, лабораториях, нацеленных на разработку оптоэлектронных приборов и микропозиционеров. Например, ИК РАН им. А.В. Шубникова (г. Москва), ФТИ им. Иоффе РАН (г. С.-Петербург), Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (университет), НИИФ ЮФУ, Уральский государственный университет, НПО "Микрон" (г. Зеленоград), Воронежский государственный университет, концерн "Риф", г. Воронеж и др.

Отдельные результаты могут быть включены в учебные курсы по дисциплинам: «Физика сегнетоэлектрических явлений», «Оптоэлектроника», «Дополнительные главы физики сегнетоэлектрических явлений» для студентов, обучающихся по направлениям «Радиофизика» и «Техническая физика».

Вместе с тем, диссертация не лишена *недостатков*, некоторые из которых отмечены ниже.

1. В методической части диссертации (глава 1) при описании установки для изучения влияния магнитного поля на физические свойства кристаллов автор не рассматривает погрешности измерения температуры, связанные с влиянием магнитного поля на датчик температуры – медь - константановую термопару.

2. В главе 3 обсуждаются вольт-амперные характеристики тетрабромцинка рублидия. При этом вклады ионного тока и тока, обусловленного медленными процессами поляризации игнорируются автором.

3. В главе 5 автором теоретически получены температурные зависимости подвижности электронов с энергией существенно превышающей равновесную тепловую энергию. Было бы целесообразно сравнить эти зависимости с экспериментальными результатами.

4. Автором установлено, что интенсивность фотоиндуцированного рассеяния света в монокристалле ZnS (стр. 159 - 160) существенно зависит от времени экспонирования и выходит на насыщение приблизительно в течение часа. Причины столь медленного процесса, к сожалению не обсуждаются.

5. Пункт 17 подраздела «*Научная новизна работы*» гласит о том, что «... одноосные механические напряжения влияют на температуру фазового перехода, коэффициент упругости и ширину запрещенной зоны сегнетоэластиков» (стр. 11), что представляется априорно очевидным.

6. Имеются замечания к тексту диссертации. Так, например: работа называется "*Фотоэлектрические, кинетические явления и эффекты памяти в сегнетоэлектриках, пьезоэлектриках и сегнетоэластиках*",

а вместе с тем «*эффекты памяти*», как таковые в диссертации не обсуждаются;

автор часто использует словосочетание «неравновесные нетермализованные носители...», что представляется некорректным, поскольку «нетермализованные» носители уже по определению являются неравновесными; встречаются грамматические ошибки.

Сделанные замечания не уменьшают ценность работы и не влияют на ее основные выводы и защищаемые положения. Диссертация Магомадова Р. М. "*Фотоэлектрические, кинетические явления и эффекты памяти в сегнетоэлектриках, пьезоэлектриках и сегнетоэластиках*" является научно-квалификационной работой, в которой на основе выполненных автором исследований получены новые положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение физики сегнетоэлектриков. Диссертация по актуальности, новизне, масштабу проведенных в ней исследований и по совокупности полученных результатов отвечает критериям п. 7 и другим требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 20 июня 2011 года за № 475) ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Магомадов Рукман Масудович, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Профессор кафедры физики твердого тела ВГТУ

д.ф.-м.н.



Воротков Л.Н.