

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
КИЕВСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. ТАРАСА ШЕВЧЕНКО

на правах рукописи

ВОЛЧАНСКИЙ ОЛЕГ ВЛАДИМИРОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОАКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

01.04.07. - физика твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

КИЕВ-1992



00820001 (B)

Работа выпол

им.

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
профессор
КУЧЕРОВ ИВАН ЯКОВЛЕВИЧ;
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
БУЛАХ ГРИГОРИЙ ИВАНОВИЧ.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
ФЕДОРЧЕНКО АДЛЬФ МИХАЙЛОВИЧ;
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
БЕЛЯЕВ АНАТОЛИЙ ДМИТРИЕВИЧ.

Ведущая организация: Институт физики АН Украины.

Защита состоится "22" марта 1993 г. в 14³⁰ час. на
заседании специализированного совета Д 068.18.15 при Киевском
университете им. Тараса Шевченко (252127, Киев-127, прот.
Академика Глушкова, 6, КУ, физический факультет, ауд.500).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Киевского
университета.

Автореферат разослан "9" февраля 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета,
доктор физ.-мат. наук, проф.

Охрименко Б. А.

ЛННБ ім. В. Стефаника
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы

Фотоакустика - относительно молодая область физики, находящаяся в настоящий момент в состоянии быстрого развития. Перспективность фотоакустических методов обусловлена возможностями их применения как для исследования оптических, тепловых и механических свойств различных материалов, так и для неразрушающей объемной дефектоскопии оптически непрозрачных объектов.

В полупроводниках процесс генерации фотоакустического (ФА) сигнала происходит с образованием электронных возбуждений, имеющих конечное время жизни и распространяющихся на конечные расстояния перед рекомбинацией. В связи с этим ФА сигнал приобретает информацию о параметрах, характеризующих процесс переноса: времени жизни возбуждений, их диффузионной длине, эффективной скорости поверхностной рекомбинации, пространственном распределении легирующих примесей и т.д. Помимо дополнительной временной и пространственной дисперсии тепловых источников в образце, наличие фотовозбуждений приводит к появлению и нетепловых механизмов генерации ФА сигнала, обусловленных взаимодействием электронно-дырочной плазмы с решеткой полупроводника.

Несмотря на появившееся за последнее время значительное число теоретических и экспериментальных работ, посвященных как проблемам исследования свойств полупроводников методом ФА спектроскопии, так и исследованию возможностей ФА дефектоскопии изделий полупроводниковой электроники, осталось еще не исследованным большой ряд вопросов в этой области. Так, не получили достаточно полной экспериментальной проверки имеющиеся теории фотоакустического эффекта в полупроводниках и полупроводниковых структурах. С другой стороны, некоторые экспериментально наблюдаемые эффекты не имеют еще достаточно убедительного теоретического объяснения. Так, не выясненной до конца остается природа сообщавшегося ранее факта [1-4] существенного влияния немодулированной подсветки на ФА сигнал в некоторых полупроводниках. Хотя сам эффект послужил основой для

появления новой разновидности ФА спектроскопии (спектроскопии вторичных ФА спектров) [2-4], предлагавшиеся его объяснения не нашли дальнейшего экспериментального подтверждения.

Практически не исследованы вопросы, связанные с особенностями генерации фотоакустического сигнала непосредственно в образцах, обладающих пьезоэлектрическими свойствами: в этих материалах помимо термоупругого должен существовать дополнительный механизм возбуждения фотоакустического сигнала за счет переменных пьезоэлектрических полей.

Представляет интерес дальнейшее исследование вопроса формирования фотоакустического сигнала в полупроводниковых структурах, возможностей повышения контраста получаемых топограмм, поиск более эффективных методов регистрации сигналов, несущих информацию в ФА микроскопии, в том числе основанных на термоэлектрическом эффекте.

Целью данной работы ставилось экспериментальное и теоретическое исследование генерации фотоакустического сигнала в полупроводниках и полупроводниковых структурах, ее особенностей при наличии у полупроводника пьезо- и пьезоэлектрических свойств, исследование возможности визуализации областей эпитаксиального наращивания в кремниевых пластинах.

Научная новизна

1. Впервые показано, что влияние немодулированной подсетки на фотоакустический эффект в пьезополупроводниках обусловлено, в основном, наличием нетермоупругого механизма оптической генерации акустического сигнала, связанного с пьезоэлектрическим преобразованием переменной фотоЭДС.
2. Впервые теоретически и экспериментально показано, что в пьезоэлектрических материалах модулированное излучение может генерировать звук значительной интенсивности, имеющий нетермоупругую природу и обусловленный переменными пьезоэлектрическими полями.
3. Впервые экспериментально исследован механизм генерации фотоакустического сигнала в р-п переходе, связанный с разогревом области перехода током неравновесных носителей.
4. Впервые теоретически и экспериментально исследован

термоволновой эффект в полупроводниковой структуре с p-n переходом при термоэлектрической регистрации сигнала.

Практическая ценность

1. Экспериментально выделены нетермоупругие компоненты фотоакустического сигнала в пиро- и пьезоэлектрических материалах, учет которых повышает достоверность результатов при фотоакустических исследованиях названных материалов. Механизмы возникновения этих компонентов могут быть положены в основу методов оптической генерации упругих волн.
2. Предложен новый метод измерения величины пироэлектрического коэффициента материалов, основанный на использовании фотоакустического эффекта и не требующий нанесения металлических контактов на исследуемый образец.
3. Продемонстрирована возможность повышения контраста фотоакустических изображений полупроводниковых структур с p-n переходами за счет тока неравновесных носителей заряда через область перехода.
4. Показано, что термоэлектрический метод регистрации тепловых волн более чувствителен к неоднородностям электронных характеристик полупроводниковых структур, чем пьезоэлектрический.
5. Продемонстрированы возможность визуализации участков эпитаксиального наращивания в кремниевых пластинах методом фотоакустической микроскопии и повышение информативности получаемых результатов при совмещенной регистрации фотоакустического и фотоэлектрического сигналов.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. В пьезополупроводниках наряду с фотоакустическим сигналом термоупругой природы может генерироваться интенсивный акустический сигнал за счет пьезоэлектрического преобразования переменной фотоЗДС. Этим вторым компонентом фотоакустического сигнала можно эффективно управлять постоянной по интенсивности подсветкой и внешним электрическим полем.
2. В пироэлектрических материалах может генерироваться фотоакустический сигнал за счет преобразования пироэлектрических полей через механизм обратной

пьезоэффекта. Величина этого сигнала может быть сравнима с фотоакустическим сигналом термоупругой природы.

3. Впервые экспериментально выделен источник генерации фотоакустического сигнала в р-г. переходе, связанный с нагревом области перехода током неравновесных носителей. Показано, что удельным вкладом токового компонента фотоакустического сигнала можно эффективно управлять путем приложения к р-п переходу постоянного электрического напряжения.

4. Впервые теоретически и экспериментально исследован термоволновой эффект в р-п переходе при термоэлектрической регистрации. Показано, что сигнал переменной термоЭДС более чувствителен к неоднородностям электрических характеристик полупроводниковой структуры, чем термоупругий.

5. Предложен и реализован способ совмещенной фотоакустической и фотоэлектрической микроскопии полупроводниковых структур. Продемонстрирована более высокая информативность фотоакустической микроскопии.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения и пяти глав. В конце работы сформулированы основные результаты и выводы, приведен список публикаций по теме диссертации, а также список цитированной литературы.

В первой главе приведен обзор литературы по вопросам генерации и детектирования фотоакустического сигнала в твердых телах. Отражено современное состояние исследований фотоакустического эффекта в полупроводниках и полупроводниковых структурах.

Вторая глава диссертации содержит описание методики проведения экспериментальных исследований и обработки получаемых результатов. Использовались пьезоэлектрический и газомикрофонный методы регистрации ФА сигнала с последующим синхронным детектированием. Важным вопросом методики эксперимента являлось обеспечение надежной экранировки пьезодатчика от фотоэлектрических и пироэлектрических полей исследуемого образца. Кроме того использовались методики

измерения переменных фотоЭДС, пироЭДС, фототока и фотолюминесценции образцов.

Третья глава диссертации посвящена исследованию особенностей генерации фотоакустического сигнала в пьезополупроводниках и выявлению механизма воздействия немодулированной подложки на фотоакустический эффект в полупроводниках. Исследовались объемные образцы монокристаллических полупроводников CdS, ZnSe, GaAs, InSb, ZnS (кубическая модификация), Si. ФА сигнал возбуждался лучом гелий-неонового лазера ($\lambda=633$ нм, диаметр $\approx 2,4$ мм) интенсивностью 0-25 мВт, модулированным механическим прерывателем в диапазоне частот 120-2800 Гц. ДП образца осуществлялась постоянным неразложенным светом галогенной лампы через световод либо светом гелий-неонового лазера. Исследовались зависимости амплитуды и фазы ФА сигнала от интенсивности и частоты модуляции лазерного излучения при различных интенсивностях ГП. Для образцов CdS, ZnSe, GaAs было обнаружено влияние ДП на ФА сигнал при пьезоэлектрической регистрации. В большинстве случаев ДП приводила к гашению ФА сигнала, в то же время для ряда образцов CdS наблюдалось возрастание ФА сигнала при включении ДП. Характерной особенностью было то, что все образцы, для которых наблюдалось влияние ДП, имели нелинейную зависимость ФА сигнала F от интенсивности модулированного излучения I_M в отсутствие ДП; при достаточно большой интенсивности ДП эта зависимость становилась линейной. Нелинейность зависимости $F(I_M)$ сопровождалась наличием зависимости фазы ФА сигнала от I_M .

При газомикрофонной регистрации ни для одного из исследованных образцов влияния ДП на ФА сигнал обнаружено не было. Во всех случаях, включая и газомикрофонную регистрацию, когда не наблюдалось влияния ДП на ФА сигнал, зависимости $F(I_M)$ были линейны.

На основании полученных результатов был сделан вывод, что в образцах, в которых обнаруживается влияние ДП на ФА сигнал, существуют, по крайней мере, два источника акустических колебаний, один из которых не термоупругой природы. Термоупругий компонент характеризуется линейной

зависимость амплитуды от I_M второй же сложным образом зависит от I_M и может быть подавлен дополнительной подсветкой. Математической обработкой экспериментальных данных были выделены два компонента ФА сигнала. Оказалось, что термоупругий компонент ФА сигнала имеет обратно пропорциональную зависимость от частоты модуляции (в полном согласии с теорией [5]), зависимость от I_M другого компонента наименее слабая, а для некоторых образцов и вообще не просматривается в исследуемом диапазоне частот.

Поскольку наличие нетермоупругого компонента ФА сигнала наблюдалось нами только для кристаллов, обладающих пьезоэлектрическими свойствами, логично предположить, что он генерируется за счет обратного пьезоэлектрического эффекта. Была исследована конденсаторная фотоЭДС в этих же образцах, влияние на нее ДП и постоянного электрического поля. Установлено, что в исследованных образцах наблюдается значительная фотоЭДС, которая гасится ДП. Зависимости фотоЭДС от интенсивности, частоты модуляции, длины волны возбуждающего излучения, а также от интенсивности и длины волны ДП хорошо коррелировали с соответствующими зависимостями нетермоупругого компонента ФА сигнала. Кроме того, в образцах CdS установлено сильное влияние постоянного электрического поля, вплоть до смены знака, на ФА сигнал.

Таким образом, показано, что при освещении пьезополупроводника модулированным светом в нем может возникать, помимо термоупругого, фотоэлектрический компонент акустических колебаний, обусловленный пьезоэлектрическим преобразованием переменной фотоЭДС. Влияние дополнительной подсветки на фотоакустический эффект обусловлено, в основном, подавлением фотоЭДС, а, следовательно, и нетермоупругого компонента акустических колебаний.

В четвертой главе диссертации теоретически и экспериментально исследуется генерация фотоакустического сигнала в пьезоэлектриках. В пьезоэлектриках при фотоакустическом эффекте помимо акустических колебаний термоупругой природы дополнительно должны возбуждаться акустические колебания пьезоупругой природы: возникающие в результате периодического нагрева переменные

пироэлектрические поля должны генерировать через обратный пьезоэффект упругие деформации. Анализ уравнений движения с учетом термоупругого и пироэлектрического эффектов при заданном температурном поле показывает, что влияние пьезоэффекта эквивалентно изменению термоупругого коэффициента кристалла. Модифицированный термоупругий коэффициент представляет собой сумму истинного термоупругого коэффициента и величин, пропорциональных произведению пиро- и пьезоэлектрических констант - термоупругого коэффициента. Оценки, выполненные для типичных пироэлектриков, дают значения добавочной величины сравнимые с величиной термоупругого коэффициента.

Экспериментальные исследования были проведены на керамиках ЦТС-19 и ТБК-3, а также монокристаллических образцах ниобата лития. В каждом случае были изготовлены по две группы образцов, имеющих форму пластин. В образцах группы I полярная ось была перпендикулярна плоскости пластины, а в образцах группы II - лежала в плоскости пластины. ФА сигнал генерировался лучом гелий-неонового лазера на частоте 500 Гц и регистрировался электрически экранированным пьезодатчиком. Для сравнения в этих же образцах производилось измерение ФА сигнала в газомикрофонной камере при той же геометрии освещения. При газомикрофонном методе регистрации пьезоэффект не должен проявляться.

Численные оценки показали, что отношение термоупругих откликов пластин группы I и группы II должно составить $\approx 1,02$ для ЦТС-19; $\approx 0,98$ для ТБК-3 и $\approx 0,78$ для LiNbO_3 . Экспериментально измеренные отношения ФА сигналов при пьезоэлектрической регистрации от пластин группы I и группы II составили $\approx 0,32$ (ЦТС-19); $\approx 0,73$ (ТБК-3) и $\approx 2,1$ (LiNbO_3). Соответствующие отношения, рассчитанные теоретически с учетом пьезоэффекта, были: 0,27 для ЦТС-19; 0,75 для ТБК-3 и 1,77 для ниобата лития. Видно, что учет термоупругого механизма приводит к появлению хорошей корреляции экспериментальных и теоретических результатов, а также то, что величина термоупругого компонента ФА сигнала сравнима с величиной термоупругого.

Проведенные исследования позволяют реализовать новый

метод измерения пьезоэлектрического коэффициента материала, не требующий нанесения металлических контактов на образец. Зная соответствующие упругие, термоупругие, электрические и пьезоэлектрические постоянные исследуемых материалов, можно из сравнения амплитуд ΦA откликов пластин с различной ориентацией полярной оси определять значение пьезоэлектрического коэффициента. Измеренные таким образом значения пьезоэлектрических коэффициентов исследуемых пластин дали значения, близкие к табличным.

Измерения в газомикрофонной камере показали, что в пределах ошибки эксперимента величина ΦA сигнала для пластин обеих групп была одинаковой.

Таким образом, показано, что в пьезоэлектрических материалах возбуждение акустических колебаний модулированным светом за счет пьезоэлектрического эффекта может быть столь же эффективным, как и за счет термоупругого.

Хорошее овладение теоретических расчетов и экспериментальных результатов для исследуемых пьезоэлектриков позволило произвести оценку доли термоупругого компонента в ΦA сигнале для ряда полупроводников группы A^2B^6 , обладающих пьезоэлектрическими свойствами: ZnO, CdS, CdSe. Расчеты показали, что в данных материалах эффективность термоупругого механизма примерно на два порядка ниже, чем термоупругого.

Пятая глава диссертации посвящена исследованиям фотоакустического эффекта в полупроводниковых структурах.

Экспериментально исследован процесс оптической генерации звука в кристалле кремниевого фотодиода ФД-К-155 при различных режимах его работы. Впервые выделен источник генерации ΦA сигнала, связанный с нагревом области p-n перехода током неравновесных носителей, исследована его зависимость от прикладываемого к переходу постоянного напряжения, интенсивности и частоты модуляции возбуждающего света. Показано, что в режиме короткого замыкания удельный вклад "токового" источника составляет лишь несколько процентов от вклада основного (обусловленного термализацией и безызлучательной рекомбинацией фотоносителей). При приложении же к переходу обратного электрического смещения величина токового компонента ΦA сигнала возрастает линейно

о приложенным напряжением $V_{\text{п}}$ и при $V_{\text{п}} = -7$ В сравнивается о величиной термализационно-рекомбинационного компонента. Эффект увеличения удельного вклада токового компонента Φ_A сигнала приложением постоянного смещения можно использовать для повышения контраста топограмм при Φ_A микроскопии полупроводниковых структур.

Теоретически и экспериментально разработан метод Φ_A исследования полупроводниковых структур при термоэлектрической регистрации сигнала. Применение указанного способа регистрации сигнала привлекательно тем, что процесс преобразования тепловых волн в электрическое поле более чувствителен к электронным параметрам полупроводника, чем термоупругий. Теоретически исследуется формирование термоэлектрического сигнала в пластине о планарным p-n переходом и металлизированными поверхностями. Показано, что электрический сигнал, снимаемый о металлических электродов пластины, сильно зависит от глубины залегания p-n перехода и коэффициентов термоЭДС p и n областей. Теоретически рассчитаны зависимости амплитуды и фазы термоэлектрического сигнала от частоты модуляции возбуждающего излучения f_m имеют особенности при приближении длины тепловой диффузии к глубине залегания p-n перехода. В то же время термоупругий сигнал не должен проявлять заметной чувствительности к электронным характеристикам структуры, поскольку вклад неравновесных носителей в формирование источников нагрева образца имеет второй порядок малости: нагрев образца при поглощении света металлическим электродом генерирует неравновесные носители, которые затем рекомбинируют о выделением тепла.

Экспериментально исследовались пластины кремния о p-n переходом, лежащим примерно посередине пластины и о металлическими электродами на поверхностях. Производилось параллельное детектирование термоэлектрического и термоупругого сигналов. Получено удовлетворительное совпадение частотной зависимости сигнала термоЭДС о рассчитанной теоретически: она имеет излом, когда длина тепловой диффузии ор знивается о глубиной залегания перехода. В то же время термоупругий сигнал имеет практически монотонную частотную зависимость.

Таким образом, продемонстрировано, что термоэлектрический сигнал имеет большую чувствительность к электронным параметрам полупроводниковой структуры, чем термоупругий. С этой точки зрения термоэлектрический метод регистрации ФА сигнала представляется перспективным для применения в термоволновой микроскопии полупроводниковых структур.

Выполненные в гл.3 исследования послужили основой для разработки совмещенной фотоакустической и фотоэлектрической (ФЭ) микроскопии полупроводниковых структур. В данной работе на базе существующего ФА микроскопа с пьезоэлектрической регистрацией были впервые проведены сравнительные исследования одних и тех же образцов методами ФА и ФЭ микроскопии. Для этой цели была разработана и установлена на микроскоп система емкостного съема сигнала фотоЭДС, что позволяло одновременно регистрировать в каждой точке сканирования ФА и ФЭ сигналы. Были исследованы образцы, представляющие собой пластины кремния р-типа проводимости, в которых методами анизотропного травления и последующего эпитаксиального наращивания созданы области n-типа проводимости. Оптический контраст получаемых структур не наблюдался. Эксперимент показал, что оба метода позволяют визуализировать области эпитаксии на пластинах. При этом фотоэлектрический метод визуализировал в основном границы раздела р и n областей, фотоакустический же метод давал главное возрастание сигнала при переходе луча из подложки в эпитаксиальную область, а кроме того позволял визуализировать неоднородности тепловых свойств внутри эпитаксиальных областей. Таким образом, сочетание двух указанных методов позволяет получать взаимодополняемую информацию о топологии расположения и однородности областей эпитаксиального наращивания на кремниевых пластинах.

Основные результаты и выводы.

1. В результате исследований генерации фотоакустического сигнала в пьезополупроводниках установлено, что помимо термоупругого может возникать фотоэлектрический компонент упругих колебаний, обусловленный пьезоэлектрическим преобразованием переменной фотоЭДС. Этот компонент может значительно превосходить термоупругий, особенно в области

малых интенсивностей и высоких частот модулированного излучения; его удельным вкладом в результирующий сигнал можно эффективно управлять постоянной подоветкой или приложенным электрическим полем.

2. Воздействие дополнительной немодулированной подоветки на фотоакустический эффект в пьезополупроводниках обусловлено подавлением переменной фотоЭДС, а, следовательно, нетермоупругого компонента акустических колебаний.

3. Впервые теоретически и экспериментально исследован процесс генерации фотоакустического сигнала в пироэлектриках. Показано, что возникающие в результате периодического нагрева образца пироэлектрические поля могут генерировать за счет обратного пьезоэффекта упругие колебания, добавочные к термоупругим. Установлено, что оба компонента имеют одинаковые зависимости от частоты модуляции возбуждающего излучения.

4. Теоретически р-считано и экспериментально подтверждено, что в типичных пироэлектриках (пьезокерамика, ниобат лития) пироупругий компонент фотоакустического сигнала сравним с термоупругим, в то же время для ряда полупроводников группы A^2B^6 , обладающих пироэлектрическими свойствами, пироупругим компонентом можно пренебречь.

5. На основе уравнения фотоакустического отклика образцов с различной ориентацией полярной оси возможна реализация нового метода измерения величины пироэлектрического коэффициента материалов. Метод не требует нанесения металлических контактов на исследуемый образец.

6. Экспериментально исследован процесс генерации фотоакустического сигнала в кремниевом фотодиоде при различных режимах его работы. Впервые выделен источник возбуждения фотоакустического сигнала, связанный с нагревом области перехода током генерируемых светом неравновесных носителей. Продемонстрировано, что удельным вкладом этого источника можно эффективно управлять путем подачи постоянного напряжения на p-n переход.

7. Впервые теоретически и экспериментально исследован термоволновой эффект в p-n переходе при термоэлектрической регистрации. Из уравнения частотных зависимостей фотоакустического эффекта при термоэлектрическом и

акустическом методах регистрации продемонстрирован факт большей чувствительности сигнала переменной термоЭДС к неоднородности электрических характеристик исследуемых полупроводниковых структур.

8. впервые предложен и реализован вариант совмещенной фотоакустической и фотоэлектрической микрокопии. Показано, что получаемые двумя указанными методами топограммы дают взаимодополняемую информацию о свойствах исследуемых образцов. При этом информативность фотоакустического метода выше: помимо расположения областей с различными электрическими свойствами на пластине они позволяют визуализировать дефекты и неоднородности тепловых свойств внутри этих областей.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на:

- н/т конференции "Акустоэлектрические и фотоакустические методы исследования полупроводников. Состояние и перспективы" (Киев, 14-16 октября 1987 г.);
 - н/т семинаре "Вопросы метрики полупроводников и диэлектриков" (Киев, 4-5 октября 1988 г.);
 - Всесоюзном семинаре "Лазерная техника и технология" (Вильнюс, 24-28 октября 1988 г.);
 - Всесоюзной школе-семинаре "Фотоакустическая спектроскопия и микроскопия" (Душанбе, 24-30 сентября 1989 г.);
 - н/т конференции "Акустоэлектрические и фотоакустические методы исследования полупроводников и диэлектриков" (Киев, 24-26 октября 1989 г.);
 - VIII Всесоюзной конференции по взаимодействию оптического излучения с веществом (Ленинград, 6-11 сентября 1990 г.);
 - III и IV Регион. конференциях "Динамические задачи механики сплошной среды. теоретические и прикладные вопросы вибрационного просвечивания Земли" (Геленджик: 1990, 1992 г.);
 - XV Всесоюзной конференции "Акустоэлектроника и физическая акустика твердого тела" (Ленинград, 4-8 июня 1991 г.);
 - VII Международном тематическом совещании по фотоакустическим и фототермическим явлениям (Дурверт, Нидерланды, 26-30 августа 1991 г.);
 - IV Всесоюзной конференции "Применение лазеров в технологии и системах передачи и обработки информации" (Киев, 22-24 октября 1991 г.);
 - Международной н/т конференции "Актуальные проблемы фундаментальных наук" (Москва, 28 октября - 3 ноября 1991 г.).
- Доклады по теме диссертации ключены в программы международных конференций и совещаний:
- Международного симпозиума по физической акустике (Кортрейк, Бельгия, 1990 г.);
 - Международной конференции "Ультразвук-91" (Ле-Туке, Франция, 1-4 июля 1991 г.);
 - XX Европейского конгресса по молекулярной спектроскопии (Загреб, Югославия, 25-30 августа 1991 г.).

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Булах Г.И., Бурбело Р.М., Волчанский О.В., Кучеров И.Я. Фотоакустический эффект в CdS в условиях постоянной моды // тезисы докладов Всесоюзной школы-семинара "Фотоакустическая спектроскопия и микроскопия" (Душанбе, 24-30 сентября 1989 г.), Москва, 1989, с.23.
2. Булах Г.И., Бурбело Р.М., Волчанский О.В., Кучеров И.Я. Аналитическое гашение фотоакустического сигнала в кремниевых структурах // в тематич. об. "Акустоэлектрические и фотоакустические методы исследования вещества", Киев. - 1989. - с.35-36.
3. Булах Г.И., Бурбело Р.М., Волчанский О.В., Хабитенко Н.К., Кучеров И.Я. Особенности пьезоэлектрической регистрации фотоакустического сигнала в полупроводниковых структурах // там же, с.38-40.
4. Булах Г.И., Бурбело Р.М., Волчанский О.В., Кучеров И.Я. Исследование фотоакустического эффекта в кремниевых эпитаксиальных структурах // там же, с.49-50.
5. Bulakh G.I., Burbelo R.M., Volchanski O.V., Kucherov I.Ya. Photoacoustical Studies of Semiconductors under Additional Unmodulated Light // Symposium on Physical Acoustics. Fundamental and applied Abstracts., KULAK, Kortrijk, 1990, p.14.
6. Булах Г.И., Волчанский О.В., Кучеров И.Я. Исследование лазерного возбуждения звука в пьезоэлектриках // тезисы докладов VIII Всесоюзной конференции по взаимодействию оптического излучения с веществом (Ленинград, 6-11 сентября 1990 г.), из-во ГОИ, 1990, с.190-191.
7. Булах Г.И., Волчанский О.В., Кучеров И.Я. Термоупругий эффект в пьезоэлектрических материалах // материалы III Региональной конференции "Динамические задачи механики сплошной среды, теоретические и прикладные вопросы вибрационного просвечивания Земли" (Геленджик, 1990), Краснодар, из-во Кубанского ун-та, 1990, ч.1, с.37-38.
8. Булах Г.И., Бурбело Р.М., Волчанский О.В., Кучеров И.Я. Фотоакустический эффект в CdS при комбинированном световом воздействии // тезисы докладов XV Всесоюзной конференции "Акустоэлектроника и физическая акустика твердого тела"

(Ленинград, 4-8 июня 1991 г.), Л., 1991, ч.2, с.73-75.

9. Булах Г.И., Бурбело Р.М., Волчанский О.В., Гуляев А.Л., Кучеров И.Я., Утробин Ю.Б. Сравнительная фотоакустическая и фотоэлектрическая микроскопия полупроводниковых структур // в об. "Ультразвуковые и лазерные методы неразрушающего контроля", Киев, 1991, с.5-7.

10. Bulakh G.I., Burbelo R.M., Volchanski O.V., Kucherov I.Ya. Photoacoustic Effect in CdS under Combined Optical Exposure // in "Photoacoustic and Photothermal Phenomena III" (Ed. by D.Bicanio). - Springer Series in Optical Sciences - 1992 - vol.69, p.360-362.

11. Bulakh G.I., Burbelo R.M., Volchanski O.V., Kucherov I.Ya. The Influence of Unmodulated Illumination on Photoacoustic Effect in CdS // an International conference "Ultrasonics International'91" (1-4 July 1991, Le Touquet, France), program and abstract book, p.105.

12. Булах Г.И., Волчанский О.В., Кучеров И.Я. Лазерное возбуждение акустических колебаний в пьезополупроводниках // тезисы докладов I. Всесоюзной конференции "Применение лазеров в технологии и системах передачи и обработки информации" (Киев, 22-24 октября 1991 г.), Киев, из-во об-ва "Знание" Украины, 1991, с.103.

13. Булах Г.И., Бурбело Р.М., Волчанский О.В., Кучеров И.Я. Влияние постоянной подсветки на фотоакустический эффект в полупроводниках // Укр. физ. журн. - 1992. - т.37, N3, с.411-415.

14. Bulakh G.I., Volchanski O.V., Kucherov I.Ya. The features of photoacoustic spectra of CdS and GaAs under piezoelectric detection // Journal of Molecular Structure. - 1992. - v.267, p.1-6.

15. Булах Г.И., Бурбело Р.М., Волчанский О.В., Кучеров И.Я. Возбуждение акустических колебаний в пьезополупроводниках модулированным лазерным излучением // материалы докладов IV Региональной конференции "Динамические задачи механики сплошной среды, теоретические и прикладные вопросы вибрационного просвечивания Земли" (Геленджик, 19-22 сентября 1992 г.), Краснодар, из-во Кубанского ун-та, 1992, с.17.

Список цитируемой литературы

1. Булах Г.И., Бурбело Р.М., Кучеров И.Я. Исследование фотоакустического эффекта в полупроводниках. - Киев: Дип. УкрНИИТИ, 1984, № 1618.
2. Булах Г.И. and Mandelis A. Combined photoacoustic and photoconductive spectroscopic investigation of nonradiative recombination and electronic transport phenomena in crystalline n-type CdS. I.Experiment. II.Theory // Phys. Rev. B. - 1986. - v.34, N 10, p.7209-7233.
3. Wada H., Yoshioka H., Morimoto J. and Miyakawa T. Secondary photoacoustic Spectra of CdS:Cu by gas-microphone method // Jap. Journ. Appl. Phys. - 1985. - vol.24, Suppl.24-1, p.217-219.
4. Yamamoto H., Suenune I. and Yamanishi M. photoacoustic study of surface and bulk nonradiative recombinations in GaAs with two-wavelength excitations // Journ. Appl. Phys. - 1985. - vol.60, N 7, p.2621-2623.
5. Jackson W. and Amer R.M. Piezoelectric photoacoustic detection: Theory and experiment // J.Appl.Phys. - 1980.- vol.51, N 6, p.3343-3353.

АН УССР
ИИФ им. С.Стефанька

471037

AB 26.824