

13 07

14 ДЕК 1998

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

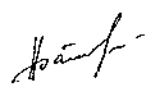
БАТАНОВА Наталья Леонидовна

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТОЭЛЕКТРОННОГО  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ И  
РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ОБРАБОТКИ  
СИГНАЛОВ НА ЕГО ОСНОВЕ

Специальность 05.12.01 - Теоретические основы радиотехники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук



КАЗАНЬ-1998

Работа выполнена в Казанском филиале Московского энергетического института (ТУ)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Голенищев-Кутузов В. А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Белавин В.А. (КФ МЭИ)

доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
Богданова Х.Г. (Физико-  
технический институт КНЦ РАН)

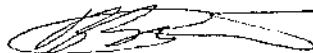
Ведущая организация: Федеральный научно-производственный  
центр радиоэлектроники, г.Казань

Защита состоится "30" апреля 1998 г. в 14 часов на заседании  
диссертационного совета Д 053.29.05 при Казанском государственном  
университете по адресу : г.Казань 420008, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им.  
Н.И.Лобачевского Казанского государственного университета

Автореферат разослан "28" апреля 1998 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук



В.С.Бухмин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы.* Разработка новых способов преобразования, обработки и записи радиосигналов в наши дни представляется одной из наиболее важных проблем радиоэлектроники. Высокие, а иногда и противоречивые требования (быстродействие, чувствительность, частотная перестройка, избирательность), предъявляемые к подобным устройствам, могут быть удовлетворены только с использованием в них разнообразных физических явлений. Поэтому на смену чисто радиотехническим способам приёма и обработки сигналов начинают приходиться новые способы, в том числе основанные на акустическом преобразовании радиосигналов [1,2].

С помощью акустоэлектронных устройств возможно выполнение таких линейных операций над сигналами как преобразование во времени (задержка сигналов, изменение длительности); частотные и фазовые преобразования (сдвиг фаз, изменение амплитуды), а также более сложные функциональные преобразования (умножение частоты, интегрирование и дифференцирование, свертка, корреляция сигналов).

Главное преимущество применения акустических волн перед электромагнитными волнами состоит в уменьшении скорости распространения на 5 порядков и в таком же уменьшении длины волны. В основном используются поверхностные акустические волны (ПАВ). Поскольку они располагаются вблизи поверхности, то возникает возможность воздействия на них оптическими пучками для модуляции, а также простого съема обработанных сигналов.

Немаловажную роль в сложных процессах преобразования играют нелинейные среды, в которых осуществляется взаимное преобразование электромагнитных и акустических полей. В настоящее время для сложных преобразований волн и сигналов используется нелинейное акустоэлектронное взаимодействие, возникающее при распространении ПАВ в средах с достаточной проводимостью. Элементная база акустоэлектронных устройств нелинейного типа основана на использовании слоистых структур пьезоэлектрик-полупроводник. В них взаимодействие свободных электронов полупроводника с ПАВ, распространяющимися в пьезоэлектрике, осуществляется посредством пьезоэлектрического поля, проникающего в полупроводник [3]. Однако несмотря на очевидную перспективность таких устройств, их реальное применение сдерживается как

сложностью технологических процессов изготовления слоистых структур, так и малым временем жизни носителей, что затрудняет запись и хранение сигналов.

Для расширения возможностей устройств, использующих нелинейное акустоэлектронное взаимодействие, необходимо использовать материалы, в которых бы с одной стороны сочетались пьезоэлектрические свойства с высокой концентрацией свободных носителей, а с другой стороны, центры захвата электронов существовали бы достаточно долгое время.

В результате исследований, выполнявшихся в течении последних 20 лет, было установлено, что такими свойствами обладает ряд нецентросимметричных оксидных сегнетоэлектриков ( $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$ ,  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ ) [4]. Эти кристаллы имеют превосходные акустические и пьезоэлектрические параметры. Их проводимость может возрасти в десятки раз под действием оптического облучения. Свободные электроны в таких кристаллах возникают за счет фотоионизации донорных центров, в качестве которых выступают примесные ионы группы железа и структурные центры, например, ионы ниобия в ниобате лития. Примесные и структурные центры способны создавать концентрацию фотовозбужденных электронов до  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>, т.е. сравнимую с концентрацией свободных носителей в легированных полупроводниках. Эти кристаллы способны сохранять фотоиндуцированный заряд при комнатных температурах и в отсутствие внешних излучающих полей от секунд до многих месяцев. Фотоиндуцированные поля, возникающие при перезарядке центров, могут достигать значений до  $10^5$  В/см.

До середины 80-х годов в акусто- и оптоэлектронных устройствах для преобразования сигналов в основном использовались монокристаллы сегнето- и пьезоэлектрические оксидные кристаллы. Перелом наступил во второй половине 80-х годов, когда началось использование кислородно-октаэдрических кристаллов со сформированными в них периодическими доменными структурами [5]. Вначале периодические доменные структуры (ПДС) стали применяться для преобразования оптического излучения во вторую гармонику [6]. Затем появились работы китайских ученых по генерации ультразвука на ПДС [7]. Стала очевидной перспективность использования доменных структур в различных системах преобразования сигналов. Тем не менее, развитие применений доменных структур сдерживалось, в

основном, уровнем фундаментальных исследований по механизмам образования фотоиндуцированных носителей, их взаимодействия с акустическими волнами, и отсутствием достаточно простых способов формирования доменных структур.

Таким образом, представлялось актуальным использование фотоиндуцированных эффектов для создания периодических доменных структур и на их базе устройств для преобразования и записи различных сигналов.

*Цель диссертационной работы* состояла в разработке экспериментальных опто- и акустических способов формирования сегнетоэлектрических доменов и структур и исследовании особенностей преобразования радио- и акустических волн на доменных структурах.

*Объект исследования.* В качестве объекта исследования был выбран монокристалл ниобата лития. К настоящему времени он наиболее хорошо исследован. Выращивание крупных монокристаллов достигло большого совершенства, хорошо отработаны методы изучения его электрических, оптических и акустических характеристик. Он обладает уникальной совокупностью наиболее высоких среди кислородно-октаэдрических кристаллов оптических, акустических и пьезоэлектрических характеристик. Поэтому ниобат лития широко используется в пьезопреобразовательных, модуляционных и других устройствах.

*Предметом исследования* являлось изучение механизмов формирования доменов и периодических доменных структур, в том числе и акустическим способом; исследование взаимодействия акустических волн с доменными структурами с целью создания устройств для записи и преобразования радиосигналов.

*Научная новизна* состоит в следующем:

1. Впервые обнаружено возникновение области с инвертированной поляризацией по отношению к спонтанной поляризации под действием лазерного облучения. На основе экспериментальных исследований установлен неполевой механизм фоторефрактивного эффекта, заключающийся в перераспределении зарядов фотоиндуцированных примесных центров.

2. Впервые обнаружена и исследована пространственно-периодическая структура электрического поля, возникающая за счет перераспределения зарядов пьезоэлектрическим полем стоячей ультразвуковой волны.

3. Впервые обнаружено возникновение периодической доменной структуры при одновременном распространении стоячей поверхностной акустической волны и оптического облучения монокристаллического образца ниобата лития.

4. Обнаружено отражение и преломление акустических волн на акустически индуцированной периодической доменной структуре.

5. Обнаружена генерация акустических волн на периодической доменной структуре под действием радиочастотного поля и оптического излучения.

#### ***Практическая значимость работы.***

1. Разработанная методика одновременного воздействия на сегнетопьезоэлектрик лазерным облучением и возбуждения стоячей поверхностной акустической волны использована для создания периодической доменной структуры.

2. Акустически индуцированные периодические доменные структуры были использованы для генерации ультразвуковых волн в заданном частотном диапазоне, а также в качестве акустических фильтров и резонаторов.

3. Установлено повышение коэффициента прямого и обратного преобразования электромагнитных волн в акустические волны посредством использования периодических доменных структур.

Полученные результаты были включены в отчеты по грантам РФФИ (гранты 94-02-04234 и 96-02-18229), а также были использованы в учебном процессе кафедры промышленной электроники КФ МЭИ при выполнении дипломных и курсовых работ и чтении курса по акустоэлектронике.

#### ***На защиту выносятся следующие положения:***

1. Образование области с инвертированной поляризацией под действием лазерного пучка объясняется пространственным перераспределением зарядов ионов  $Fe^{2+}$ , которые образуют совокупность градиентов электрических полей, обратных направлению спонтанной поляризации.

2. Электрическая компонента стоячей поверхностной акустической волны в пьезоэлектрике  $LiNbO_3$  создает перераспределение фотоиндуцированных электронов, вследствие чего происходит возникновение пространственного периодического электрического поля, создающего структуру инвертированных доменов.

3. Периодическая доменная структура, подобно встречно-

штыревым преобразователям, способна генерировать и детектировать поверхностные акустические волны, т.е. осуществлять прямое и обратное взаимное преобразование радио- и акустических волн.

4. Взаимодействие модулированного оптического излучения с периодической доменной структурой создает генерацию акустических волн в частотном интервале, сравнимом с периодом доменной структуры, посредством двух механизмов: термоупругого и токового.

5. Индуцированная в ниобате лития доменная структура обладает дополнительной акустической нелинейностью, что проявляется в отражении и преломлении поверхностных акустических волн, распространяющихся через такую структуру.

*Достоверность результатов и выводов* обеспечивается использованием разнообразных экспериментальных методик, хорошим совпадением экспериментальных результатов с теоретическими моделями, а также хорошим согласованием полученных нами результатов с экспериментальными данными других исследователей.

*Апробация работы и публикации.* Основные результаты диссертации изложены в 10 опубликованных работах; были представлены и обсуждены на Международном симпозиуме по поверхностным волнам и акустоэлектронике (Москва-С.Петербург, 1994), Международном конгрессе по ультразвуку (Берлин, 1995), VII Международном семинаре по физике сегнетоэлектриков-полупроводников (Ростов-на-Дону, 1996), а также регулярно докладывались на научных конференциях Республики Татарстан по проблемам энергетики (Казань, 1995, 1996) и Казанского филиала МЭИ (1995, 1996, 1998).

Разработка экспериментальных методик, выполнение экспериментов и обсуждение результатов проведены диссертантом совместно с соавторами.

*Структура и объем диссертации.* Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения, списка литературы. Работа содержит 119 страниц печатного текста, приводятся 27 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* к диссертации описано современное состояние исследований по акустическим способам преобразования и записи сигналов, физике и применению сегнетоэлектриков, содержащих

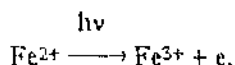
доменные структуры. Далее сформулированы положения, определяющие актуальность и цели работы, приведены полученные результаты, характеризующие научную и практическую значимость выполненных исследований, основные положения выносимые на защиту.

*В начале первой главе* представлен аналитический обзор основных акустоэлектронных процессов, используемых в настоящее время для преобразования, обработки и записи радиосигналов. Показаны преимущества и недостатки применения нелинейных акустоэлектронных процессов, возникающих при распространении ПАВ в слоистых структурах сегнетоэлектрик-полупроводник. Далее показаны возможности использования оксидных сегнетоэлектрических кристаллов в акустоэлектронных устройствах преобразования сигналов и особенно с применением периодических доменных структур. Рассмотрены способы формирования периодических доменных структур, отмечена их технологическая сложность. Затем приведены основные физические характеристики кристалла ниобата лития, применяемого в работе в качестве основного объекта исследований. На основе рассмотрения различных микроскопических механизмов фотоиндуцированных процессов генерации свободных носителей и перезарядки примесных центров сформулировано основное положение о возможности возникновения локальной переполаризации за счет больших фотоиндуцированных электрических полей. Предположено, что электрические поля, создаваемые при оптической перезарядке примесных и структурных центров в ниобате лития и достигающие значений до  $10^5$  В/см, могут быть достаточными для образования локальных доменов в первоначально монодоменизированных образцах.

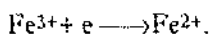
Далее изложена разработанная при участии автора комплексная методика исследования оптически индуцированных процессов генерации свободных носителей и образования индуцированных электрических полей, которая включала определение изменений в концентрации примесных (ионы железа) и структурных (ионы ниобия) центров ниобата лития в результате оптически индуцированных процессов, определение напряженности фотоиндуцированных электрических полей. Особое внимание было обращено на идентификацию возможных индуцированных сегнетоэлектрических доменов.



Основное внимание в первой главе обращено на результаты по обнаружению в ниобате лития области с инвертированной поляризацией по отношению к спонтанной поляризации монокристаллического образца ниобата лития. Этот эффект возникал при облучении ниобата лития узким пучком второй гармоники лазера на иттрий-алюминиевом гранате с длиной волны 0,53 мкм в температурном диапазоне 130-160° С. Сам домен представлялся в виде узкой ~150-200 мкм полосы, расположенной перпендикулярно оси поляризации и смещенной по отношению к лазерному пучку на 100 мкм к положительному полюсу поляризации. Форма изменения электрического поля в этой области, полученная с помощью оптического интерферометра Маха-Цендера, представлена на рисунке 1. Предложенная нами микроскопическая модель формирования доменной структуры при лазерном облучении основана на процессе индуцированного перераспределения зарядов ионов железа с различной валентностью (рис.2). При этом за счет фотоионизации электронов с донорных ионов  $Fe^{2+}$  в области облучения возникает повышенная концентрация ионов  $Fe^{3+}$



Возбужденные в зону проводимости электроны, мигрируют под действием поля поляризации из области облучения и поглощаются акцепторными ионами  $Fe^{3+}$



Значительное возрастание концентрации ионов  $Fe^{2+}$ , приводит к образованию макроскопического электрического поля, направленного навстречу полю поляризации. Это поле создается микроскопическими электрическими градиентами ионов  $Fe^{2+}$ , каждый из которых направлен против поля поляризации. Как показали наши оценки, суммарное поле ионов может составлять  $10^4$ - $5 \cdot 10^4$  В/см, что достаточно для переполаризации локальной области при температурах выше 130° С. При комнатной температуре для поляризации необходимо поле выше  $10^6$  В/см. Выше 170°С дальнейшее увеличение концентрации свободных носителей приводит к экранировке поля переполаризации. Полученные домены достаточно устойчивы к внешним воздействиям: нагреву до 500°С и облучению ультрафиолетом при комнатной

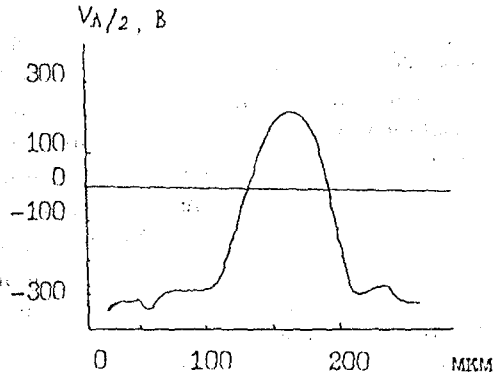


Рис.1. Пространственное изменение электрического поля в области образования сегнетоэлектрического домена.

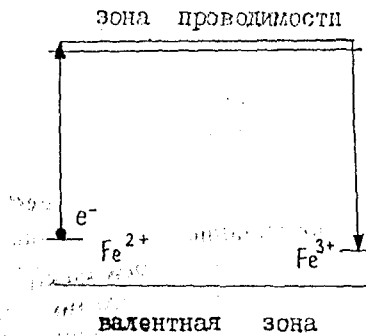


Рис.2. Схема энергетических уровней примесных центров.

температуре.

Во второй главе содержатся результаты изучения формирования периодической доменной структуры в первоначально монодоменных образцах ниобата лития за счет приложения градиентного электрического поля и перераспределения фотовозбужденных электронов полем стоячей поверхностной акустической волны. Глава начинается анализом различных способов формирования периодических доменных структур. Сопоставление различных способов, основанных на использовании градиентов внутренних и внешних электрических полей позволило предложить и реализовать новые способы формирования доменных структур. В первую очередь это касалось создания электрических полей с резкими градиентами напряженности. Такое градиентное поле создавалось с помощью системы встречно-штыревых электродов, напыленных на YZ поверхность пластины ниобата лития перпендикулярно оси поляризации Z. Импульсы постоянного электрического поля подавались к соседним электродам, вследствие чего могла создаваться структура доменов типа "голова к хвосту". Возникновение инверсной поляризации устанавливалось по скачкам тока переключения поляризации в зависимости от величины приложенного поля и температуры образца, используя известную методику определения процесса реполяризации сегнетоэлектриков. Скачки токовой реполяризации были обнаружены только при повышении температуры образца до 120°C, причем время реполяризации было обратно пропорционально величине приложенного электрического поля. Значение поля реполяризации  $\sim 6 \cdot 10^4$  В/см при температуре 150 °C вполне соответствовала температурному ходу поляризации, предсказанному ранее в работе Шувалова и Волк [8]. Таким образом, нам удалось создать приповерхностную структуру периодических доменов с размером домена порядка 90-100 мкм и толщиной порядка 50 мкм.

Результаты изучения температурной зависимости поля реполяризации были использованы при изучении процесса формирования периодической доменной структуры с помощью пьезоэлектрического поля стоячей поверхностной акустической волны. Суть этого способа состоит в том, что фотовозбужденные электроны, ранее равномерно распределенные по сечению оптического облучения будут перераспределяться в постоянном пьезоэлектрическом поле

стоячей ПАВ. Этот процесс приводит к перезарядке примесных и структурных центров, которые образуют градиенты электрических полей с периодичностью, равной длине акустической волны. При достаточности этих градиентов для переполаризации будет происходить периодическое изменение поляризации, т.е. образование доменной структуры.

Экспериментально, формирование периодической доменной структуры происходило при облучении YZ поверхности монокристалла ниобата лития, содержавшего  $10^{-3}$  ат % ионов железа с соотношением относительных концентраций  $Fe^{2+}/Fe^{3+} \sim 0,3$  широким пучком ( $\varnothing 20$  мм) второй гармоники лазера на иттрий-алюминиевом гранате ( $\lambda = 0,53$  мкм). Одновременно с помощью двух встречно-штыревых преобразователей вдоль оси поляризации (ось Z) возбуждалась стоячая ПАВ на частоте 34 МГц. При увеличении амплитуды деформации в акустической волне до  $10^{-4}$  и в температурном диапазоне 130-170°C после окончания процесса и охлаждения образца наблюдалась структура периодических доменов (рис.3).

Физически механизм формирования доменов с помощью электрической компоненты ПАВ походит на оптический способ. В обоих случаях оптическое возбуждение электронов приводит к перезарядке и пространственному перераспределению примесных двух и трехвалентных ионов железа. Ионы  $Fe^{2+}$ , создающие вокруг себя градиенты электрического поля, направленного на встречу полю поляризации, ответственны за образование доменной структуры. Доменная структура, сформированная полем ПАВ, вполне соответствовала по своим параметрам структуре, полученной с помощью пространственно-модулированного электрического поля.

Поскольку распределение пространственных градиентов электрического поля вдоль направления распространения ПАВ соответствовало распределению интенсивности ПАВ, то это делает возможным запись и обработку и более сложных акустических сигналов.

*Третья глава* диссертации посвящена изучению особенностей преобразования электромагнитных полей в акустические на периодической доменной структуре и взаимодействию поверхностных акустических волн с такими структурами. В первой части главы обоснуются особенности генерации акустических волн с помощью

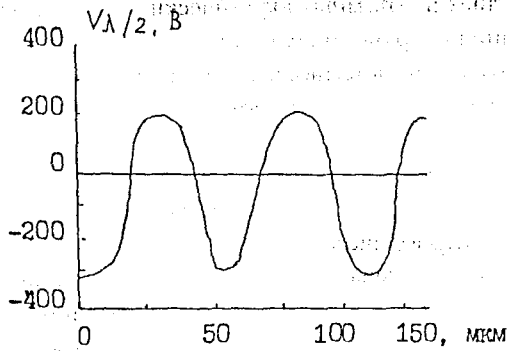


Рис.3. Пространственное распределение электрических полей в периодической доменной структуре.

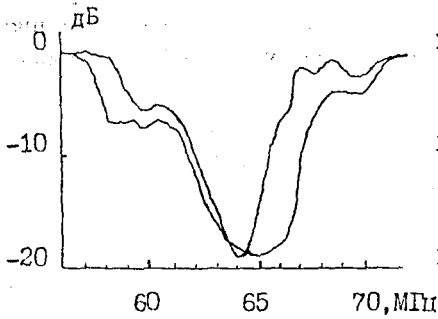


Рис.4. Спектр возбужденных ПАВ на системах инвертированных доменов, созданных: 1-акустическим; 2-электрическим методами.

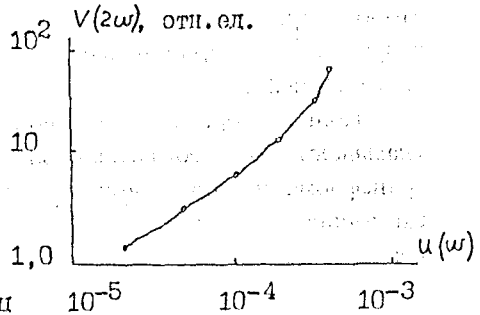


Рис.5. Зависимость электрического сигнала второй гармоники ( $V$ ) от амплитуды относительной деформации ( $u$ ) на частоте  $\omega$ .

ПДС, изложена методика возбуждения и детектирования поверхностных и объемных акустических волн и приведены результаты по генерации поверхностных и объемных волн на доменной структуре в ниобате лития. Установлено, что амплитудно-частотная характеристика возбужденных акустических волн определяется периодом доменной структуры.

Далее в главе приведены экспериментальные результаты по изучению нелинейных эффектов, обнаруженных при распространении ПАВ через периодическую доменную структуру. Для выполнения экспериментов была разработана методика, позволяющая генерировать и детектировать поверхностные и объемные акустические волны в диапазоне частот 20-100 МГц. Поскольку ниобат лития обладает сильным пьезоэффектом, то для этих целей использовались встречно-штыревые и уголковые преобразователи и емкостные детекторы. При относительно малых интенсивностях поверхностных акустических волн (амплитуда относительной деформации не превышала  $10^{-5}$ ) были обнаружены отраженные и преломленные поверхностные акустические сигналы на той же частоте, что и падающая на ПДС волна (рис.4). При увеличении амплитуды деформации до  $10^{-4}$  в спектрах преломленных и отраженных волн были обнаружены частоты акустических колебаний, соответствующие второй гармонике падающей волны. Амплитуда второй гармоники возрастала пропорционально квадрату амплитуды ПАВ на основной частоте (рис.5).

Таким образом, результаты выполненных экспериментов указывают на согласованный по фазе процесс нелинейной трансформации акустических волн, падающих на ПДС, во вторую гармонику. Следует подчеркнуть принципиальную разницу в нелинейных процессах, происходящих в монодоменных образцах и образцах с ПДС. В первом случае сам эффект нелинейности мал и его увеличение происходит за счет протяженности образца, во втором случае нелинейность носит локальный характер только в пределах ПДС, но величина эффекта значительно больше.

В третьей части главы рассмотрены особенности различных механизмов лазерной генерации акустических волн. В монодоменных образцах такая генерация возникает в основном за счет термоупругого эффекта в широком спектральном диапазоне, определяемым длительностью лазерных импульсов. Во втором случае механизмы

акустических волн более разнообразны. В ходе экспериментов было установлено, что при термоупругом механизме возбуждения роль ПДС возбуждения сводится к сужению полосы акустических колебаний, поскольку ПДС представляет собой распределенно сфазированную резонансную систему.

ПДС также может сама генерировать акустические колебания за счет периодического изменения напряженности внутреннего электрического поля модулированным лазерным пучком.

*В заключении сформулированы основные результаты работы:*

1. Разработаны физические принципы построения акустоэлектронных устройств для генерации и преобразования акустических сигналов на основе использования акустически, оптически и электрически индуцированных доменных структур в оксидных сегнетоэлектриках, обладающих пьезоэффектом.

2. Впервые, в ходе проведенных экспериментальных исследований, обнаружено возникновение локальной переполаризации ранее монодоменного образца под действием лазерного облучения. Разработана физическая модель взаимодействия лазерного излучения с примесными ионами железа, объясняющая возникновение фотондуцированного домена перераспределением концентраций зарядов ионов двух и трехвалентного железа. Именно совокупность зарядов ионов двухвалентного железа создает поле, необходимое для переполаризации.

3. Исследованы процессы взаимодействия акустических волн со структурными и примесными центрами в ниобате лития. Экспериментально осуществлено формирование периодической доменной структуры в пьезоэлектрическом поле стоячей поверхностной акустической волны. При этом пространственно периодические градиенты перераспределенных зарядов примесных ионов железа создают локальные изменения поля спонтанной поляризации, приводящие к возникновению периодической доменной структуры "голова к голове".

4. Обнаружена и исследована генерация поверхностных и объемных акустических волн на структуре периодических доменов, при приложении переменного электрического поля или облучения модулированным лазерным пучком. Рассмотрены механизмы генерации акустических волн. Применение ПДС повышает коэффициент преобразования электромагнитных волн в акустические

волны и обратно акустических волн в электромагнитные.

5. Впервые установлено, что периодические доменные структуры, сформированные вблизи поверхности кристалла ниобата лития обладают значительной акустической нелинейностью, что проявляется в отражении, преломлении и генерации второй гармоники поверхностной акустической волны, распространяющейся через ПДС. Эффективность процессов преобразования значительно возрастает при кратности ПАВ периоду доменной структуры.

6. Показано, что кристаллы ниобата лития могут быть использованы для записи сигналов в акустической форме.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Голенищев-Кутузов А.В., Батанова Н.Л., Ефимова Л.В. Акустические волны на поверхности пьезо-сегнетоэлектриков с индуцированной периодической доменной структурой // Республиканская научная конференция "Проблемы энергетики": Докл.-Казань -1996. С.79.
2. Батанова Н.Л., Голенищев-Кутузов А.В. Нелинейные акустоэлектронные взаимодействия в пьезо-сегнетоэлектрических кристаллах // Межвузовский сборник научных трудов "Интенсификация тепло- и электроэнергетических процессов"// Каз.фил.Моск.энерг.ин-та.Казань. 1995.С.101-103.
3. Batanova N.L., Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Shakurova E.A. Acoustically induced domain structure in lithium niobate // Ultrasonics world congress: Proceedings. Berlin. 1995.Part 1 P.427-428.
4. Голенищев-Кутузов А.В., Батанова Н.Л. Акустически индуцированные доменные структуры в ниобате лития // Итоговая научная конференция проф.-препод. состава Каз.фил.Моск.энерг.ин-та. Казань. 1995. С.37-39.
5. Батанова Н.Л., Голенищев-Кутузов А.В. Акустоиндуцированные домены в ниобате лития // VII Международный семинар по физике сегнетоэлектриков-полупроводников: Докл. Ростов-на-Дону. 1996. В6.
6. Батанова Н.Л., Голенищев-Кутузов А.В. Инвертированные домены в сегнетоэлектриках // Вестник МЭИ. 1997. №4. С.46-50.
7. Батанова Н.Л., Голенищев-Кутузов А.В. Распространение



- акустических волн в сегнетоэлектриках с периодическим рельефом // Акуст.журн. 1997. Т.4. №4. С.545-547.
8. Калимуллин Р.И., Батанова Н.Л. Возникновение инвертированной доменной структуры в ниобате лития под действием лазерного излучения // Труды КФ МЭИ, 1998.
  9. Batanova N.L., Golenishchev-Kutuzov V.A., Migachev S.A. Investigation of physical properties of piezo-ferroelectric and semiconductors by the optoacoustic method. International symposium on surface waves in solids. Proceeding Moscow-St.Peterburg. 1994. P.237-240.
  10. Батанова Н.Л., Калимуллин Р.И., Голенищев-Кутузов А.В. Возникновение доменной структуры в ниобате лития под действием лазерного излучения Изв.РАН. 1998. Т.62 №2. С.384-386.

#### СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каринский С.С. Устройства обработки сигналов на ультразвуковых поверхностных волнах. М. Наука. 1975. С.236.
2. Гуляев Ю.В. Акустоэлектронные устройства для систем связи и обработки информации // Проблемы современной радиотехники и электроники. Под ред. В.А.Котельникова. М. Наука. 1980.
3. Лямов В.В., Левин В.М., Чернозатонский А.А. Акустоэлектроника // Физическая энциклопедия. М. Советская энциклопедия. 1988. Т.4. С.52-55.
4. Gunter P., Huignard J. Photorefractive Materials and Their Applications I,II // Heidelberg. Springer. 1988. С.363.
5. Антипов В.В., Блистанов А.А., Сорокин Н.Г. и др. Формирование регулярной доменной структуры в сегнетоэлектриках  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiTaO}_3$  вблизи фазового перехода // Кристаллография. 1985. Т.30. №4. С.734-738.
6. Feist A., Koidl P. Current induced periodic ferroelectric domain applied the efficient nonlinear optical frequency mixing structures in  $\text{LiNbO}_3$  // Appl.Phys.Lett. 1985.V.47.P.1125-1128.
7. Zhu Y., Ming N., Jiang W. Acoustic superlattice of  $\text{LiNbO}_3$  crystals and its applications to bulk-wave transducers for ultrasonic generation and detection only to 800 MHz // Appl.Phys.Lett. 1988. V53. №15. P.1381-1383.
8. Kovalevich V., Shuvalov L., Volk T. Polarization reversal and photorefractive effect in  $\text{LiNbO}_3$ . Phys.Stat.Sol. 1978. V45A.P.249-252.

Подписано к печати

18.11.98

Печ.л.1.0

Тираж 100

Заказ 286

Типография КФ МЭИ (ГУ) г.Казань, Красносельская, 51