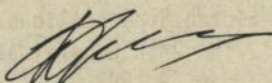


Министерство образования Украины
Харьковский политехнический институт

На правах рукописи

УДК 621.315.592



Брченко Владимир Борисович

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА И ВОЗБУЖДЕНИЕ ЭДС
В МИКРОННЫХ И СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУРАХ

01.04.07 - физика твердого тела

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Харьков, 1994

Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Харьковском политехническом институте
Министерства образования Украины

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, профессор,
главный научн. сотр. ИРЭ АН Украины
Басс Фридрих Гермонович

доктор физ.-мат. наук,
зав. отделом ИФП АН Украины
Климовская Алла Ивановна

доктор физ.-мат. наук,
профессор кафедры физики
Тернопольского приборостроительного
института
Булат Лев Петрович


Ведущая организация: Институт физики АН Украины, г.Киев

Защита состоится "22" марта 1994 г. в 15⁰⁰ часов
на заседании специализированного совета Д 016.64.01 при
Институте радиофизики и электроники АН Украины по адресу:
310085, г.Харьков, ул. Академика Проскуря, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
ИРЭ АН Украины.

Автореферат разослан "12" февраля 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор физ.-мат. наук


Лукин К.А.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЛНБ України ім. В. Стефаніка



00756717 (X)

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные тенденции твердотельной электроники, связанные с миниатюризацией полупроводниковых приборов и с постоянным их совершенствованием, а также потребности сравнительно новых областей применения полупроводниковой техники, таких как гелиоэнергетика, требуют поиска и исследования новых физических эффектов, которые возникают в твердотельных структурах малых размеров и могут послужить основой для дальнейшего развития электронного приборостроения. Широкие и еще недостаточно изученные возможности связаны здесь с применением полупроводниковых структур микронных и, особенно, субмикронных размеров, в которых могут иметь место нестандартные электронные кинетические явления, интересные как в научном, так и в прикладном отношении. В отличие от квантовых эффектов, типичных для структур нанометрового диапазона, подобные явления, классические по своей природе, значительно проще реализовать и поэтому можно более широко использовать на практике.

Общая характерная черта процессов переноса в структурах столь малых размеров - возникновение существенной энергетической неравновесности носителей тока, сопровождаемой, как правило, и неравновесностью концентрационной. Эти два вида неравновесности оказываются тесно взаимосвязанными, причем равновесие носителей обычно нарушается пространственно неоднородно, а возникающие физические эффекты сильно зависят от природы кинетических процессов, происходящих на границах структуры: на электрических контактах, на внутренних границах раздела или же на свободных внешних поверхностях. Все это вместе взятое значительно усложняет неравновесные электронные явления в микронных и субмикронных структурах, но в то же время именно это делает такие явления особенно интересными и перспективными для приложений.

В связи с наиболее важными практическими приложениями, инициировавшими выполнение данной работы, в диссертации можно выделить три главных направления исследований:

1. Изучение фотоэлектрических процессов в полупроводниковых микроструктурах в связи с практическими задачами поиска новых путей совершенствования фотоэлектрических преобразователей энергии разного назначения, включая солнечные элементы для производства электрической энергии, а также приемники электро-

магнитных излучений для разных диапазонов длин волн, от инфракрасной области до миллиметровых и субмиллиметровых волн;

2. Изучение процессов термоэлектрического преобразования энергии в микронных и субмикронных структурах, что также связано с практической потребностью производства электрической энергии и создания других термоэлектрических приборов - датчиков температуры, миниатюрных холодильников и прочих устройств;

3. Изучение нелинейных эффектов электронного переноса в тонкослойных структурах, на основе которых могут быть разработаны новые типы активных элементов твердотельной электроники, использующие такие эффекты, как появление в структурах отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП), а также другие особенности процессов переноса, например, снижение уровня шумов активного элемента за счет охлаждения его электронной подсистемы и т.п.

Основной интерес представляют при этом поперечные явления переноса, т.е. такие явления, в которых электрические токи и тепловые потоки протекают поперек структуры, поскольку именно такие ситуации на практике являются наиболее типичными и в то же время как раз они оказываются наиболее сложными и наименее изученными.

С учетом сказанного, целью работы явилось теоретическое исследование нелинейных эффектов поперечного электронного переноса, возникающих в микронных и субмикронных полупроводниковых структурах в условиях неоднородной энергетической и концентрационной неравновесности носителей заряда, и изучение связанных с такими эффектами явлений нелинейной проводимости, электрической неустойчивости, генерации нетрадиционных видов фото- и термоэдс, которые могут найти применение при разработке новых приборов микроэлектроники и полупроводниковой энергетики.

Научная новизна результатов работы состоит в том, что в диссертации впервые:

1. Исследовано появление ВАХ с участками ОДП при протекании тока поперек тонких полупроводниковых слоев в условиях, когда одновременно имеет место разогрев и инжекция носителей заряда из контактов. Показано, что разные типы ВАХ с ОДП возникают при других механизмах релаксации импульса и энергии электронов по сравнению с теми, которые приводят к появлению аналогичных ВАХ в массивных образцах. Изучено развитие электрических неустойчивостей в подобных тонкослойных структурах.

2. Изучены эффекты сильного охлаждения электронного газа в тонкослойных структурах со встроенными полями, открывающие новые возможности для получения ВАХ с падающими участками за счет нелинейных явлений переноса холодных носителей заряда.

3. Предложены нетрадиционные пути повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей энергии, основанные на использовании в р-п-структурах разного типа (в частности, варизонных) сильно нелинейных эффектов, вызванных фоторазогревом неосновных носителей заряда. Найдены условия, обеспечивающие использование этих эффектов в обычных экспериментальных ситуациях, являющихся типичными, когда такие эффекты выражены слабо и еще не становятся доминирующими при формировании фототока.

4. Установлено существование нового механизма возбуждения эдс за счет нарушения максвелловского вида симметричной части функции распределения носителей, обеспечивающего появление эдс даже в условиях пространственной однородности макроскопических параметров, описывающих неравновесную систему носителей заряда.

5. Обнаружено появление в пленочных фотопреобразователях на основе гетероструктуры р-CdTe/n-CdS варизонных прослоек, имеющих необычный профиль запрещенной зоны и позволяющих повысить эффективность этих преобразователей, что было подтверждено позже работами японских исследователей.

6. Предложены новые пути совершенствования термоэлектрических преобразователей энергии за счет использования эффектов энергетической неравновесности носителей заряда, в частности, эффектов, связанных с немаксвелловским распределением носителей по энергиям, возникающим при протекании тепловых потоков поперек слоев и структур субмикронных размеров.

7. Изучены особенности протекания тока поперек субмикронных слоев в баллистическом и в квазибаллистическом режиме при наличии магнитного поля, которые позволяют использовать такие слои в качестве высокочувствительных датчиков магнитного поля. В субмикронных слоях с потенциальными барьерами на боковых границах обнаружена инверсия функции распределения носителей по энергиям, возникающая при продольном протекании электрического тока.

Практическая значимость работы заключается в том, что ее результаты составляют научную базу для разработки новых и совершенствования известных типов полупроводниковых приборов для фотоэлектрического и термоэлектрического преобразования энер-

гии, микрoэлектронных приборов для генерации и детектирования высокочастотных электромагнитных полей, быстродействующих микрoэлектронных переключателей и фотоприемников, и других приборов. Предсказание в работе новые эффекты открывает нетрадиционные пути для улучшения параметров таких приборов. В частности, открываются возможности для повышения эффективности полупроводниковых солнечных элементов за счет нелинейных эффектов фоторазогрева носителей, для повышения чувствительности и быстродействия фотоприемников за счет использования новых, малоинерционных механизмов генерации эдс, связанных с нарушением максвелловского вида энергетического распределения носителей заряда, для генерации высокочастотных колебаний за счет новых видов электрических неустойчивостей в неоднородных микроструктурах, для уменьшения тепловых шумов и разработки новых методов охлаждения микрoэлектронных устройств, связанных с охлаждением одной лишь электронной подсистемы этих устройств и с нелокальностью такого охлаждения в приборах столь малых размеров, и другие подобные возможности, которые могут быть использованы в современной полупроводниковой электронике.

Достоверность результатов, полученных в работе, обеспечивается использованием адекватных теоретических моделей, применением апробированных методов исследования, выполнением предельных переходов к известным, более простым ситуациям, хорошим качественным и количественным совпадением выводов теории с имеющимися экспериментальными данными, а также ясной физической интерпретацией тех эффектов, для которых пока отсутствуют экспериментальные результаты.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Разработана теория нелинейного переноса энергетически неравновесных электронов и дырок в полупроводниковых слоях и структурах микронных и субмикронных размеров с разными типами электрических контактов и внутренних гомо- или гетеропереходов.

1.1. Показано, что в тонких слоях при разогреве электронов, возникающем в режиме токов, ограниченных пространственным зарядом, возможны разные типы ВАХ с участками ОДП. Последние возникают при других механизмах релаксации импульса и энергии носителей по сравнению с теми, которые приводят к подобным ОДП в массивных образцах. В нестационарных процессах инжекция носителей стимулирует электрический пробой тонких слоев, даже

если те имеют высокую концентрацию ловушек. В структурах с N-ОДП и пилообразным профилем легирования, за счет ослабления инжекционных явлений при одном из направлений тока, возможна генерация электромагнитных колебаний на более высоких частотах по сравнению с теми, которые достигаются в однородных образцах.

1.2. В тонкослойных структурах с выпрямляющими контактами и большими встроенными полями достигается сильное охлаждение носителей, существенно уменьшающее шумовую температуру образца и позволяющее получать ВАХ с ОДП в системе холодных электронов при других условиях по сравнению с известными ранее.

1.3. В субмикронных слоях при баллистическом протекании тока поперек слоя и при наличии параллельного слоя магнитного поля возникает большое магнитосопротивление, возрастающее линейно по магнитному полю в слабых полях и экспоненциально по квадрату поля - в сильных. В условиях, когда выполняются приближения энергетической баллистики, в субмикронных слоях с потенциальными барьерами на боковых границах обнаружена инверсия функции распределения носителей по энергиям, возникающая при продольном протекании электрического тока.

2. Построена нелинейная теория фото- и термоэдс в тонкослойных p-n гомо- и гетероструктурах, в том числе в варизонных структурах и классических сверхрешетках, в условиях появления неоднородной энергетической неравновесности носителей заряда.

2.1. Выполнен общий анализ условий и механизмов возникновения эдс в проводящей среде с неравновесными носителями заряда при произвольном нарушении термодинамического равновесия.

2.2. Предложены новые пути повышения эффективности полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей за счет использования нелинейных эффектов, вызванных сильными фоторазогревом неосновных носителей заряда в варизонных p - n - структурах. Определены параметры структур, при которых эти эффекты улучшают работу фотопреобразователей в обычных условиях их эксплуатации. Обнаружено появление в пленочных преобразователях p-CdTe/n-CdS варизонных прослоек с нетипичным профилем запрещенной зоны, увеличивающим к.п.д. этих преобразователей.

2.3. Предсказано увеличение термоэдс в классических p - n - сверхрешетках, связанное с появлением энергетической неравновесности электронов при протекании тепловых потоков вдоль оси этих сверхрешеток.

3. Предсказаны и исследованы новые механизмы формирования

эдс в полупроводниковых структурах, связанные с нарушением максвелловского вида симметричной части неравновесной функции распределения носителей заряда по импульсам.

3.1. Существует механизм генерации эдс, обусловленный нарушением максвелловского вида симметричной части функции распределения носителей, который обладает высоким быстродействием и позволяет генерировать фотоэдс даже в монополярной среде с постоянной концентрацией и средней энергией носителей заряда.

3.2. Предсказано увеличение фотоэдс и быстродействия полупроводниковых фотоприемников на основе субмикронных слоев и структур, использующих эффект нарушения максвелловского вида функции распределения носителей при внутризонном возбуждении этих носителей высокочастотным электромагнитным излучением.

3.3. Установлено, что протекание тепловых потоков поперек субмикронных слоев и структур нарушает максвелловский вид симметричной части функции распределения носителей заряда, что приводит к увеличению термоэдс, возникающей в слоях и, особенно, в структурах, в которых существует большое встроенное поле.

Апробация работы. Материалы диссертации представлялись и обсуждались на:

12-й Международной конференции по термоэлектричеству (Йокогама, Япония, 1993 г.),

24-й Генеральной Ассамблее Международного Радиотехнического Союза (Киото, Япония, 1993 г.),

18-й Международной конференции по инфракрасным и миллиметровым волнам (Колчестер, Великобритания, 1993 г.).

Международной конференции "Оптическая технология и связь", Анкара, Турция, 1992 г.

8-й Вильнюсском симпозиуме по ультрабыстрым явлениям в полупроводниках, Вильнюс, Литва, 1992

8-й и 9-й Международных совещаниях по фотоэлектрическим и оптическим явлениям в твердых телах, Варна, НРБ, 1986 и 1989 г.

12-й Всесоюзной конференции по физике полупроводников, Киев, 1990 г.

1-й Всесоюзной конференции "Физические основы твердотельной электроники", Ленинград, 1989 г.

5-й, 6-й и 7-й Симпозиумах "Плазма и неустойчивости в полупроводниках", Вильнюс, 1983, 1986 и 1989 г.

12-й и 13-й Всесоюзных совещаниях по теории полупроводни-

ков, Ташкент, 1985 г., Ереван, 1987 г.

1-я, 2-я и 3-я Всесоюзных школах-семинарах "Взаимодействие электромагнитных волн с полупроводниками и полупроводниково-диэлектрическими структурами", Саратов, 1985, 1988 и 1991 г.

Всесоюзном совещании "Пленочные термоэлектрические преобразователи и устройства на их основе", Москва, 1988 г.

12-я Всесоюзной научной конференции по микроэлектронике, Тбилиси, 1987 г.

Всесоюзной конференции "Физика и применение контакта металл-полупроводник", Киев, 1987 г.

8-я Всесоюзной конференции "Химия, физика и техническое применение халькогенидов", Ужгород, 1988 г.,

Публикации. По теме диссертации опубликовано 27 печатных работ. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Объем и структура работы. Диссертация содержит 305 страниц, включая 33 рисунка и 3 таблицы, и состоит из введения, семи глав, заключения и списка цитируемой литературы из 220 названий.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, описаны направления исследований, развиваемые в работе, названы полученные автором новые результаты и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены уравнения, на которых строится теория классических кинетических явлений в тонкослойных полупроводниковых структурах, и рассмотрены граничные условия для этих уравнений в случаях, когда в таких структурах через границы раздела или внешние контакты протекают электрические токи и тепловые потоки энергетически неравновесных электронов и дырок.

Основным уравнением в работе является кинетическое уравнение Больцмана. Для структур субмикронных толщин, в которых при появлении электрических токов и тепловых потоков неравновесная функция распределения носителей значительно отличается от равновесной и явления переноса не описываются макроскопическими уравнениями, использовано приближение энергетической баллисти-

ки / 1, 2/ . В условиях этого приближения, которое имеет место при выполнении неравенств

$$l_i \ll d \ll l_{ee}, l_\varepsilon, \quad (1)$$

где l_i - длина релаксации импульса носителей заряда, l_ε , l_{ee} - длины релаксации энергии носителей при их рассеянии на фононах и в процессе межэлектронных столкновений, d - толщина структуры, общее уравнение Больцмана приводится к одному уравнению относительно симметричной части функции распределения носителей $f_s(\varepsilon, x)$, где ε - энергия носителей, x - координата поперек полупроводниковой структуры. В данной работе указанное уравнение получено в явном виде для общего случая сильной неравновесности носителей, произвольного механизма рассеяния импульса и разных условий возбуждения электронной системы - как внешним электрическим полем, так и протекающим поперек структуры тепловым потоком.

В случае более толстых структур, для которых справедливо приближение эффективной температуры электронов и дырок /3, 4/, сформулированы макроскопические уравнения непрерывности электрического тока и баланса энергии носителей заряда, которые обобщают уравнения, использовавшиеся ранее, и позволяют описывать нелинейные явления переноса в биполярных и пространственно неоднородных тонкослойных структурах (в частности, в варизонных и различным образом неоднородно легированных), в условиях как энергетической, так и концентрационной неравновесности носителей, возникающей в результате различных внешних воздействий, в том числе - межзонного поглощения квантов света с энергией $\hbar\omega$, существенно превышающей ширину запрещенной зоны полупроводника ε_g .

Вторая глава посвящена изучению нелинейных явлений, связанных с протеканием тока поперек тонкослойных полупроводниковых структур с инжектирующими контактами. В первом параграфе рассмотрено протекание инжекционных токов (токов, ограниченных пространственным зарядом) поперек тонкого слоя однородно легированного электронного полупроводника в условиях, когда приложенное электрическое поле $E(x)$ (x - координата поперек слоя) вызывает разогрев инжектированных носителей. Возникающие при этом нелинейные явления исследованы в приближении эффективной электронной температуры $T_n(x)$, которая, как и концентрация носителей $n(x)$, при выполнении условий $l_\varepsilon, r_2 \ll d$ (r_2 - дебаевский радиус экранирования, d - толщина слоя)

предполагается локально зависящей от напряженности поля $E(x)$.

Исследовано формирование нелинейных вольтамперных характеристик (ВАХ) при различных механизмах рассеяния импульсы и энергии носителей и выяснены условия появления на ВАХ участков с ОДП. Показано, что с увеличением напряжения в случае $l_{\epsilon} \ll \ll r_2^2 / d$ вначале возникает инжекция носителей, а затем наступает их разогрев, тогда как в случае $l_{\epsilon} \gg r_2^2 / d$ при меньших напряжениях происходит разогрев носителей, а затем развивается явление инжекции. При заданных значениях l_{ϵ} , r_2 и d границы соответствующих нелинейных участков ВАХ определяются характерными величинами напряжения на структуре, не зависящими от выбора механизмов рассеяния носителей (в отличие от характерных значений тока).

Наложение эффектов инжекции и разогрева во всех случаях проявляется как увеличение на единицу показателя степени в зависимости тока от напряжения по сравнению с зависимостью, характерной для чисто разогревной нелинейности ВАХ [4]. В связи с этим, в случае развитых процессов инжекции и разогрева изменяются условия, необходимые для формирования ВАХ с участками ОДП. Если времена релаксации импульса и энергии носителей описываются формулами $\tau_i = \tau_{i0} (\epsilon / T)^2$ и $\tau_e = \tau_{e0} (T_n / T)^{1-r}$, то условия, при которых реализуются разные виды ВАХ: а) монотонная, б) S-образная, в) N-образная, г) петлеобразная, - определяются, соответственно, неравенствами: а) $r > 0$, $r > q$, б) $r > 0$, $r < q$, в) $r < 0$, $r > q$, г) $r < 0$, $r < q$.

Исследованы стационарные распределения температуры и концентрации носителей в слое в разных ситуациях. Показано, что при $r < q$ $T_n(x)$ убывает, а при $r > q$ - возрастает с увеличением расстояния от инжектирующего контакта. Исследована проблема постановки граничного условия, заменяющего традиционное условие обращения в нуль электрического поля на виртуальном катоде, в тех случаях, когда $r < q$. Адекватным граничным условием является тогда требование, чтобы у контакта, противоположного инжектирующему, разогрев носителей оставался достаточно слабым, что реализуется в случае омического контакта или тоже контакта со слоем обогащения. В завершение исследования выполнен анализ применимости использованного локального приближения во всех рассмотренных ситуациях.

Во втором параграфе на базе представлений о нестационарной инжекции электронов проведен теоретический анализ эффекта

быстрого переключения пленок теллурида кадмия из высокоомного состояния в низкоомное, происходящего под действием коротких импульсов электрического напряжения, которое подводится к металлическим контактам на противоположных поверхностях пленки. На основе имеющихся экспериментальных данных разработана теоретическая модель, позволившая не только качественно, но и количественно объяснить наблюдаемые явления, а также указать пути улучшения тех количественных показателей, которые определяют сферу практического применения эффекта.

Объяснение эффекта строится на предположении о запаздывании захвата инжектированных носителей на ловушки, имеющиеся в пленке, благодаря чему при импульсной подаче напряжения реализуется значительная неравновесная электропроводность пленки и происходит образование расплавленного канала под металлическим контактом. Последнее в конечном итоге и обеспечивает наблюдаемое электрическое переключение. Построенная модель позволила описать динамику процесса переключения на всех стадиях, включая и образование расплавленного канала, а также объяснить характерные значения напряжений переключения, что дало возможность улучшить эксплуатационные параметры переключателей.

В третьем параграфе исследованы проявления инжекционных эффектов в процессах, связанных с возникновением электрической неустойчивости при разогреве носителей заряда электрическим полем в периодически легированных структурах на основе полупроводников, обладающих N-образной вольтамперной характеристикой. В однородных образцах таких полупроводников разогрев электронов приводит к появлению бегущих электрических доменов сильного поля и к возникновению высокочастотных осцилляций электрического тока. При наличии плавной неоднородности полупроводника, связанной, например, с его неоднородным легированием, в результате влияния встроенного поля, обусловленного неоднородностью, параметры электрических доменов изменяются по мере прохождения доменов вдоль образца. Это приводит к появлению дополнительных, более высокочастотных колебаний тока в электрической цепи. Однако, при малом пространственном периоде легирования действие встроенного поля, связанного с неоднородностью, из-за инжекционных явлений в значительной степени ослабевает и амплитуда дополнительных осцилляций тока уменьшается.

Для достижения более сильного влияния неоднородности на высокочастотные осцилляции тока, в работе исследован случай

асимметричного пилообразного профиля легирования полупроводникового образца, обладающего N-ОДП. Путем численного моделирования на ЭВМ нелинейных явлений, связанных с распространением электрических доменов в такой периодической полупроводниковой структуре, показано, что при одном из направлений электрического тока, а именно, когда электроны из области повышенного легирования движутся в направлении, в котором концентрация носителей убывает более плавно, наблюдается значительно большая амплитуда дополнительных высокочастотных осцилляций тока, соответствующих прохождению доменом каждого периода легирования в изучаемом образце. Описанный эффект сохраняется даже в случае, когда период легирования всего лишь в несколько раз превышает максимальное значение дебаевского радиуса экранирования в данной структуре.

В третьей главе рассмотрены нелинейные явления, связанные с протеканием тока энергетически неравновесных носителей через тонкослойные структуры с электрическими контактами другого типа - с выпрямляющими контактами в виде барьера Шоттки, а также через структуры со встроенными потенциальными барьерами в виде $n^+ - n$ - перехода. При таком направлении тока, когда внешнее электрическое поле E направлено навстречу встроенному полю структуры E_B или электрическому полю в барьере Шоттки, и при этом выполняется неравенство $|E| < |E_B|$, происходит охлаждение носителей, известное как эффект Пельтье. В тонкослойных структурах это охлаждение затрагивает лишь электронную подсистему (фононы остаются равновесными), так что при сильной и резкой неоднородности структуры охлаждение оказывается значительным и может стать причиной появления новых типов нелинейных ВАХ неоднородных полупроводниковых структур.

В первом параграфе указанные явления изучены на примере барьера Шоттки к тонкому полупроводниковому слою (толщиной $d \approx l_E$), в котором при появлении эффекта Пельтье еще не успевает наступить заметный джоулев разогрев электронов, поскольку из-за малой толщины полупроводника внешнее напряжение все еще в основном остается приложенным к обедненному слою контакта. В рамках диодной модели контакта в работе получены нелинейные граничные условия, описывающие перенос заряда и энергии электронов через барьер в случае сильного охлаждения носителей, и аналитически решена соответствующая граничная задача, к которой сводится проблема самосогласованного ~~взаимо-~~

ления нелинейной ВАХ данной структуры в случае квазиупругого рассеяния носителей тока. Показано, что при таких параметрах контакта, которые характерны для типичных экспериментальных ситуаций, в условиях квазиупругого рассеяния носителей, реализующихся во многих полупроводниках при $T \lesssim 100 \text{ K}$, у контакта к полупроводниковому слою толщиной $d \approx l_E$ достигается примерно двукратное локальное уменьшение температуры электронов, которое имеет место в узком интервале положительных напряжений, соответствующих почти полностью открытому контакту (в области напряжений $V \approx V_K - 0.5 T/e \ln(\tau_E / \tau_i)$), где V_K - контактная разность потенциалов барьера Шоттки).

Во втором параграфе путем численного решения нелинейного уравнения баланса энергии электронов исследована возможность сильного охлаждения носителей тока в тонком полупроводниковом слое с n^+ - p - переходом. Показано, что при таких значениях параметров структуры, которые могут быть реализованы экспериментально, в условиях квазиупругого рассеяния электронов также достигается существенное охлаждение носителей. При этом происходит резкое уменьшение эффективной шумовой температуры образца, поскольку последняя определяется температурой электронов в наименее легированной области структуры, где локально температура электронов тоже может уменьшаться более чем в два раза. Охлаждение носителей в тонкослойных n^+ - p - структурах, как и на барьере Шоттки, также реализуется в довольно узком интервале напряжений, очень чувствительно к профилю легирования образца и может заметно влиять на форму нелинейных ВАХ коротких неоднородно легированных структур.

С целью выявления возможностей формирования новых типов нелинейных ВАХ с падающими участками в случае, когда в образце возникает охлаждение носителей заряда, в третьем параграфе данной главы охлаждение электронов исследовано качественными аналитическими методами в предположении о достаточно плавном изменении температуры носителей вдоль неоднородной структуры. Качественный анализ функциональной зависимости средней температуры носителей в образце от характерной величины внешнего электрического поля обнаружил, что такие возможности могут реализоваться в том случае, если механизмы рассеяния импульса и энергии носителей таковы, что соответствующие показатели γ и q (см. выше) удовлетворяют неравенству $\gamma > q+3$.

Четвертая глава открывает раздел, посвященный изучению

нелинейных фотоэлектрических и термоэлектрических явлений в различных тонкослойных полупроводниковых структурах. В первом параграфе этой главы выполнен общий анализ условий, необходимых для возникновения эдс \mathcal{E} в произвольной проводящей среде в случае произвольного нарушения термодинамического равновесия в системе носителей заряда. В результате проведенного анализа показано, что, в отличие от общеизвестных представлений, согласно которым появление фотоэдс возможно лишь в биполярной неоднородной среде при обязательной генерации неосновных носителей заряда, при более общем подходе оказывается, что фотоэдс может быть получена и за счет генерации только основных носителей (даже энергетически равновесных) в строго монополярной среде, но имеющей разное по своим кинетическим свойствам носители заряда одного и того же знака (например, фотоэдс в дюрочном полупроводнике с двумя сортами дырок с разной зависимостью их подвижности от координаты, в случае генерации неравновесных дырок с примесных уровней). Аналогично, вопреки утверждению, что для возбуждения термоэдс необходимы градиенты температуры, показано, что в неоднородном полупроводнике в условиях, когда температуры электронов и дырок (T_n и T_p) отличаются от температуры фононов T , термоэдс возникает, даже если температуры T_n и T_p постоянны вдоль всего полупроводникового контура.

Общей причиной найденных новых условий генерации различных видов эдс является возможность избежать взаимной компенсации разных потоков неравновесных носителей заряда в неоднородной среде с носителями разного сорта (независимо от их знака), что формально выражается в отсутствии полного дифференциала в интегральном выражении, определяющем величину эдс в тех достаточно общих ситуациях, которые были рассмотрены в работе.

На основе проведенного выше анализа рассмотрен вопрос о наблюдении (измерении) возникающих эдс во внешней электрической цепи. При этом показано, что корректно определенные понятия эдс и электрического напряжения не могут быть введены внутри тех участков цепи, где имеются термодинамически неравновесные носители заряда, и применимы лишь для таких участков, на концах которых все носители заряда термодинамически равновесны. Соответственно, в неоднородной среде при нарушении термодинамического равновесия полное электрическое поле нельзя однозначно разложить на внутреннее (встроенное) электрическое поле и поле, приложенное извне.

Описанный выше анализ продолжен во втором параграфе, где рассмотрен вопрос о генерации эдс в полупроводнике в условиях, когда неравновесная функция распределения носителей по энергиям является немаксвелловской (нефермиевской) и тем самым становится неприменимым приближение эффективной электронной температуры. В результате проведенного исследования показана возможность генерации эдс в однородном монополярном полупроводнике только лишь за счет неоднородного нарушения максвелловского вида симметричной части функции распределения носителей f_s , т.е. в условиях, когда ни концентрация, ни средняя энергия носителей не изменяются при возбуждении и вдоль всего образца остаются постоянными. Появление эдс в подобных условиях оказывается возможным в том случае, если отклонение $f_s(\epsilon, x)$ от максвелловской функции $f_T(\epsilon)$ не может быть представлено в виде $\delta f(\epsilon, x) = f_s(\epsilon, x) - f_T(\epsilon) = g(\epsilon) N(x)$ и при этом время релаксации импульса носителей τ_i зависит от энергии ϵ .

Механизм появления эдс в данном случае состоит в том, что потоки неравновесных носителей заряда, имеющих разные энергии и, следовательно, разные кинетические свойства, не компенсируют друг друга, что вполне аналогично традиционному механизму, когда потоки создаются носителями разного сорта. Если распределение носителей максвелловское, то выполняется соотношение Эйнштейна $u_n = e_n D_n / T_n$ (u_n и D_n - подвижность и коэффициент диффузии носителей); ток описывается выражением $\vec{j}_n = -e_n n u_n \nabla \varphi - e_n D_n \nabla n = -\sigma_n \nabla \tilde{\varphi}_n$ ($\tilde{\varphi}_n$ - электрохимический потенциал), компенсация парциальных потоков происходит всегда и эдс отсутствует ($\mathcal{E} = -\oint \nabla \tilde{\varphi}_n \cdot d\vec{x} = 0$). Если же функция $f_s(\epsilon, x)$ отличается от максвелловской, то соотношение Эйнштейна нарушается, дрейфовые токи не могут одновременно уравновесить все парциальные потоки носителей, вызванные неоднородностью $f_s(\epsilon, x)$, и появление эдс становится возможным (интеграл, определяющий эдс \mathcal{E} , не содержит интегрирующего множителя, и эдс получается отличной от нуля). Описанный механизм возникновения эдс обладает малой инерционностью и может сопровождать другие механизмы генерации эдс, изменяя величину наблюдаемых эффектов.

В третьем параграфе данной главы изучены некоторые фотоэлектрические эффекты, возникающие в тонкопленочных полупроводниковых структурах в отсутствие энергетической неравновесности фотовозбужденных носителей заряда. Один из них связан с образованием в пленочных гетероструктурах $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ тонких

варизонных прослоек $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ с шириной запрещенной зоны $\epsilon_g < \epsilon_{g\text{CdTe}} = 1.5$ эВ и нетипичным профилем $\epsilon_g(x)$, таким, что минимум ϵ_g находится вблизи р-п - перехода. В работе построена теория фотоэлектрических процессов, происходящих в данной структуре, позволившая предсказать наличие прослоек $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ и оценить значения существенных для фотоэффектов характерных длин в разных слоях структуры, исходя из полученных экспериментальных данных по спектральной чувствительности изготовленных структур. Результаты теории позволили также оптимизировать параметры изучаемых структур с целью увеличения к.п.д. данного фотопреобразователя за счет расширения области его спектральной чувствительности в сторону длинноволнового участка спектра солнечного излучения.

В пятой главе рассмотрены нелинейные фотоэлектрические и термоэлектрические эффекты, возникающие в полупроводниковых р - п - структурах с активными слоями толщиной в единицы микрон в условиях, когда носители заряда в таких структурах становятся энергетически неравновесными. В случае фотоэффектов причиной энергетической неравновесности является фотогенерация значительного количества неосновных носителей заряда, имеющих энергии более чем на порядок превышающую температуру равновесных основных носителей и фононов, особенно в полупроводниках с легкими неосновными носителями (электронами) и тяжелыми основными (дырками). В последнем случае возникает значительный термоток горячих электронов из объема квазинейтральной р - области в направлении р - п - перехода, где электроны релаксируют по энергии либо за счет поверхностных процессов на гетерогранице, либо за счет эффективного теплообмена с электронами п - области. Согласно результатам квазилинейной теории, разработанной автором ранее, этот термоток увеличивает суммарный фототок, если длины остывания l_E и диффузии электронов l_R в объеме р - области сравнимы между собой, а также с глубиной поглощения света l и с толщиной р - области d . В данной работе проведено исследование нелинейного фотоэффекта, связанного с подобным неоднородным фоторазогревом неосновных носителей, возникающим в достаточно тонкослойных р - п - гомоструктурах и в аналогичных гетероструктурах с варизонной р - областью.

В первом параграфе построена аналитическая теория указанного нелинейного фотоэффекта, вызванного сильным разогревом фотовозбужденных электронов в р - области полупроводниковой

структуры, для которой выполняются неравенства $l, d \ll l_{\epsilon}, l_R$. Рассмотрены разные варианты граничных условий на фронтальной поверхности освещаемой p -области, описывающие как случаи эффективной поверхностной рекомбинации и релаксации энергии электронов, так и отсутствие этих поверхностных процессов. Аналитическое решение соответствующей нелинейной граничной задачи для уравнений непрерывности тока и баланса энергии носителей было получено благодаря использованию специальной замены переменных, позволившей упростить указанные уравнения и затем пренебречь объемными процессами релаксации, которые малоэффективны по сравнению с аналогичными процессами на границах.

В результате проведенного исследования выяснено, что в нелинейном режиме работы описанного фотопреобразователя относительный вклад термоэлектрических токов горячих электронов в суммарный фототок структуры убывает с увеличением интенсивности света. Тем не менее, даже в случае естественного солнечного освещения при выполнении перечисленных выше условий (прежде всего - при выполнении неравенства $l_{\epsilon} > d$) и при типичных значениях прочих параметров структур, характерных для реальных экспериментальных ситуаций, термоток остается сравнимым по величине с обычным фототоком и заметно увеличивает результирующий фототок.

В реальных структурах при температурах $T \approx 300$ К длины остывания носителей обычно являются малыми ($l_{\epsilon} < 0.1$ мкм), так что разогрев носителей даже при большой избыточной энергии фотонов невелик. Поэтому, для достижения ощутимого эффекта от фоторазогрева электронов представляется целесообразным использовать гетероструктуры с варизонными слоями, в которых, подобно растяжению длины диффузии носителей за счет действия квазиэлектрического поля валентных сил, происходит аналогичное эффективное растяжение и длины остывания электронов.

Учитывая сказанное, во втором параграфе данной главы изучен нелинейный фотоэффект, вызываемый фоторазогревом электронов в гетероструктуре с варизонной p -областью. Решение нелинейных уравнений непрерывности тока и баланса энергии электронов было выполнено на ЭВМ для структур с разным профилем ширины запрещенной зоны $\epsilon_g(x)$ в освещаемой p -области и с разными граничными условиями на освещаемой поверхности. Проведенное исследование показало, что при выполнении определенных условий фоторазогрев электронов может быть использован для увеличения

фототока варизонных фотопреобразователей.

Вяснено, что даже при малых длинах оствивания l_c электроны разогреваются значительно, причем практически во всей варизонной области, а не только в тонком приповерхностном слое. Эффект такого разогрева оказывается весьма заметным и, в зависимости от ряда условий, может быть разного знака. Установлено, что в структурах с варизонной p -областью, в которой поле валентных сил способствует собиранию неравновесных фотоносителей, при тех значениях основных физических параметров, которые являются типичными для экспериментальных ситуаций, неоднородный фоторазогрев электронов, возникающий внутри p -области, увеличивает фототок, если на освещаемой поверхности, где расположен токосъемный контакт к широкозонной части структуры, отсутствуют процессы рекомбинации и релаксации энергии неравновесных носителей заряда. В то же время, подобные эффекты разогрева, наоборот, могут значительно уменьшить фототок, если на поверхности происходит интенсивная рекомбинация носителей даже в отсутствие релаксации их энергии.

Полученные результаты объясняются тем, что при малых длинах оствивания носителей основной эффект возникает за счет обычных диффузионных процессов. Появление неоднородного разогрева неравновесных носителей приводит к перераспределению этих носителей в образце. При этом в варизонных гетероструктурах, в отличие от p - n -структур с постоянной запрещенной зоной, распределение температуры электронов оказывается таким, что возникающие термотоки направляют заметную часть неравновесных носителей к освещаемой поверхности, что при наличии интенсивной рекомбинации на этой поверхности приводит к существенному снижению общей концентрации неравновесных электронов в p -области и тем самым уменьшает фототок. Если же скорости релаксации энергии и рекомбинации электронов на поверхности достаточно малы, то термотоки в варизонных слоях способствуют более эффективному собиранию неравновесных носителей и таким образом увеличивает суммарный фототок.

В третьем параграфе этой главы рассмотрен термоэлектрический эффект, который возникает в результате появления отличия температуры носителей заряда T_n от температуры фононов T в тонкослойных p - n -структурах или классических p - n -сверхрешетках при наличии тепловых потоков, протекающих поперек p - n -переходов. Эффект обусловлен появлением больших

термоэдс на контактах со слоями обеднения, если реализуются условия, когда в таких слоях $T_n \neq T$. В рассмотренных структурах указанные условия реализуются при выполнении неравенств $l_{\epsilon}^{(p)} \ll d_p \ll d_n \ll l_{\epsilon}^{(n)}$, где d_p , d_n - толщины p- и n- слоев, а $l_{\epsilon}^{(p)}$, $l_{\epsilon}^{(n)}$ - длины остывания электронов и дырок в соответствующих слоях. Отличие T_n от T в окрестности p-n-переходов в таких структурах возникает потому, что обедненные слои переходов не представляют сопротивления для потока тепла по фононной подсистеме, но препятствуют протеканию тепловых потоков по системе носителей заряда, навязывая тем самым пилообразный профиль распределения температур носителей вдоль образца с отличием T_n от T именно в области p-n-переходов. Рассмотренный термоэлектрический эффект может быть использован для создания миниатюрных датчиков температуры и полупроводниковых термометров с высокой чувствительностью, особенно если в качестве датчика применяются p-n-сверхрешетки, поскольку в них происходит сложение термоэдс, возникающих на каждом из чередующихся p-n-переходов.

В шестой главе проведено исследование ряда нелинейных кинетических эффектов, которые возникают в структурах, имеющих значительно меньшие толщины слоев по сравнению с рассмотренными выше, и в которых явления переноса не могут быть описаны в приближении эффективной температуры носителей заряда.

В первом параграфе изучены эффекты баллистического переноса электронов поперек субмикронного полупроводникового слоя, возникающие при наличии параллельного слоев магнитного поля. Влияние магнитного поля H на перенос заряда в неоднородной среде с участками баллистического (бесстолкновительного) движения электронов может приводить к зависимостям проводимости от поля H , существенно отличающимся от обычной зависимости, характерной для однородной среды. В данной работе исследовано протекание тока в простейшей структуре такого типа, состоящей из трех полупроводниковых слоев: двух сильно легированных "берегов" с малой длиной свободного пробега носителей и тонкого (толщиной d) слоя чистого материала, через который осуществляется баллистический перенос заряда.

В результате проведенного исследования установлено, что магнитосопротивление описанного выше тонкого слоя в широком интервале магнитных полей определяется искривлением баллистических траекторий носителей в слое. Существует характерное

магнитное поле H_0 , в котором электрон с тепловой скоростью движется по траектории с циклотронным радиусом $r_c = d/2$. В полях $H \ll H_0$ магнитосопротивление линейно возрастает с увеличением магнитного поля, а в полях $H \gg H_0$ наблюдается экспоненциальный рост сопротивления слоя с магнитным полем. Учет слабого рассеяния в слое изменяет эти результаты лишь в области очень слабых ($H \lesssim 4 H_0 (d/l_c)^2$, l_c - длина свободного пробега электронов в слое) и сильных магнитных полей ($H \gtrsim H_0 \ln^{1/2}(l_c/d)$, где $l_c \gg d$).

При наложении сильного магнитного поля возникает специфическая нелинейность вольт-амперной характеристики слоя в случае как симметричного, так и несимметричного контактов. Она вызвана конкуренцией между закручиванием траекторий электронов магнитным полем и их распрямлением в электрическом поле. Начальный линейный участок ВАХ в сильном магнитном поле затягивается за счет диффузионного движения электронов, обусловленного рассеянием на примесях.

Полученные в работе результаты могут быть применимы для полупроводниковых гетероструктур (здесь условия активационного баллистического преодоления барьера выполняются, например, при $d = 0.2 \dots 0.4$ мкм, высоте барьера $eV_k = 0.5$ эВ, концентрации ионизованных примесей $N_D \sim 10^{15}$ см⁻³ ($l_c/d \approx 5$), $T = 100$ К), структур металл - полупроводник и структур типа $p^+ - n - p^+$ на основе одного материала, если для промежуточной n -области субмикронной толщины дебаевский радиус $r_D \ll d$. Эти результаты можно использовать также для разработки датчиков магнитного поля; при этом в качестве чистого слоя целесообразно применять висмут, в котором длина свободного пробега электронов может быть порядка 1 нм, благодаря чему описанные выше эффекты могут возникать уже в полях $H \sim 10$ Э.

Во втором параграфе рассмотрен нелинейный перенос электронов в полупроводниковых слоях несколько большей толщины, для которых выполняются неравенства $l_c \ll d \ll l_{ee}$, l_ε , т.е. имеет место приближение энергетической баллистики /1, 2/. При этом был изучен эффект, связанный с продольным протеканием тока в таком слое при наличии потенциальных барьеров на его боковых границах. В указанном случае, из-за отсутствия процессов релаксации энергии в объеме слоя и ограничения на эти процессы на поверхности, диктуемого условием $\varepsilon > eV_k$, где eV_k - высота потенциальных барьеров на границах, следует

ожидать формирования в слое при продольном протекании тока инвертированного распределения носителей заряда по энергиям.

Исследование данного эффекта выполнено путем численного решения на ЭВМ нелинейного кинетического уравнения, определяющего симметричную часть функции распределения электронов, которая в рассматриваемой задаче является также и функцией от пространственной координаты x поперек слоя.

Основные результаты проведенных расчетов состоят в том, что, во-первых, численное моделирование позволило доказать, что инверсия функции распределения действительно имеет место, и, во-вторых, в ходе этого исследования были уточнены условия, необходимые для появления инверсии, и выяснен общий вид неравновесной функции распределения электронов по энергиям, который она приобретает в различных условиях. В результате расчетов установлено, что наиболее ярко инверсия функции распределения носителей проявляется при некоторой оптимальной напряженности продольного электрического поля в слое, которая по порядку величины определяется условием $E = V_k / d$.

В седьмой главе проведено исследование фотоэлектрических и термоэлектрических явлений, возникающих в субмикронных структурах, в которых не выполняются условия температурного приближения и неравновесная функция распределения носителей заряда по энергиям является существенно немаксвелловской.

В первом параграфе рассмотрено возникновение в указанных структурах нелинейной фотоэдс в результате формирования неоднородного немаксвелловского распределения электронов по энергиям при внутризонном возбуждении электронной подсистемы высокочастотным электромагнитным излучением. Структуры с активными слоями субмикронных толщин являются наиболее подходящими объектами для наблюдения фотоэффектов, обусловленных немаксвелловостью неравновесных распределений электронов, поскольку в столь тонких слоях из-за влияния поверхностных процессов релаксации не может сформироваться максвелловское распределение электронов, характеризуемое эффективной температурой носителей и соответствующим квазиуровнем Ферми. В итоге в таких структурах, в соответствии с общими результатами, описанными в четвертой главе, возникает дополнительные эдс, которые могут быть использованы для улучшения работы различных фотоэлектрических приборов.

Исследование фотоэдс в субмикронных слоях при внутризон-

ном высокочастотном возбуждении электронов было выполнено для неоднородно легированных структур с разной зависимостью концентрации электронов n от координаты x поперек слоя. Были рассмотрены также разные механизмы рассеяния носителей внутри слоя. Исследование было проведено путем численного решения кинетического уравнения для симметричной части функции распределения носителей $f_s(\epsilon, x)$. Результаты, полученные в итоге этого исследования, позволили сделать вывод, что нарушение максвелловского вида неравновесной функции распределения электронов $f_s(\epsilon, x)$, которое возникает при возбуждении основных носителей в субмикронных структурах, приводит к увеличению эдс в этих структурах по сравнению с той эдс, которая генерируется в условиях температурного приближения. Этот эффект оказывается весьма значительным, настолько, что уже в условиях слабого возбуждения, когда $2/3 \langle \epsilon \rangle / T - 1 \approx 0.05$, эдс возрастает более чем в два раза (в случае DA-рассеяния импульса электронов). Различие в приросте средней энергии носителей составляет при этом не более 50%, так что значительная часть эффекта (примерно половина всего прироста эдс) действительно создается за счет изменения формы симметричной части функции распределения. Качественно это изменение состоит в том, что вследствие возбуждения носителей уменьшается их количество в области малых энергий, но при этом из-за релаксации на границах структуры не может сильно возрасти и количество высокоэнергетичных носителей, в результате чего появляется избыток носителей в области средних энергий $\langle \epsilon \rangle \sim 3/2 T$, что вполне согласуется с отсутствием значительного изменения средней энергии $\langle \epsilon \rangle$ по сравнению с максвелловским распределением.

Что касается оптимальных условий, при которых возникающая фотоэдс максимальна, то наилучшими оказываются такие ситуации, когда рассеяние импульса электронов происходит на деформационном потенциале акустических фононов (DA - рассеяние, $q = -1/2$) и все встроенное поле структуры сконцентрировано внутри полупроводникового слоя, где возникает наибольшая деформация функции распределения $f_s(\epsilon, x)$. Оптимальность именно этих условий объясняется тем, что в случае DA - рассеяния в области малых энергий выполняется граничное условие, которое в большей степени способствует нарушению максвелловского вида функции f_s , чем условие, которое имеет место при других механизмах рассеяния, а выбор такого профиля легирования $n(x)$, при котором

встроенное поле имеет максимум в центре слоя, приводит к тому, что наибольшая деформация функции $f_s(\varepsilon, x)$ возникает как раз в области наибольшей неоднородности полупроводниковой структуры.

Во втором параграфе седьмой главы изучены термоэдс, возникающие в субмикронных структурах при протекании поперек этих структур тепловых потоков, которые тоже нарушают максвелловскую форму функции распределения носителей $f_s(\varepsilon, x)$. Поскольку это приводит к появлению дополнительных эдс, то термоэдс V_ε , наблюдаемые в этих условиях, тоже отличаются от тех термоэдс, которые появляются в температурном приближении, и тем более от традиционных термоэдс V_T , возникающих в еще более толстых слоях, в которых температура электронов совпадает с температурой фононов.

Термоэдс, возникающие в субмикронных структурах при немасвелловском распределении электронов по энергиям, были исследованы на примере трех типов структур:

- 1) однородного полупроводникового слоя;
 - 2) неоднородного слоя с экспоненциальным профилем легирования и заданным отношением концентраций $n(d) / n(0) = 10$;
 - 3) неоднородного слоя с тем же отношением концентраций $n(d) / n(0) = 10$, но с профилем легирования, соответствующим концентрации встроенного поля в середине субмикронного слоя.
- Для неоднородных структур рассматривались два разных случая взаимной ориентации градиента концентраций электронов ∇n и приложенного извне градиента температуры фононов ∇T , когда:
- а) направления ∇n и ∇T совпадают;
 - б) направления ∇n и ∇T противоположны.

Во всех случаях предполагалось DA - рассеяние импульса электронов ($q = -1/2$). С целью наиболее яркого проявления эффекта перепад температур $\Delta T = T_2 - T_1$ выбирался довольно большим ($|\Delta T| \sim T_0 = 0.5(T_1 + T_2)$), при котором деформация функции распределения была существенной.

Результаты проведенных расчетов показали, что протекание теплового потока поперек полупроводникового слоя приводит к деформации функции распределения электронов $f_s(\varepsilon, x)$, выражающейся в появлении избытка электронов в области некоторых средних энергий $\varepsilon \sim \varepsilon_0$ и соответствующего их дефицита в области меньших и больших энергий, причем это имеет место даже в случае однородного слоя. Подобная деформация обусловлена тем, что при максвелловском распределении парциальные токи носителей с

разными энергиями не обращаются в нуль одновременно даже при равном нулю полном токе. Поэтому носители с разными энергиями приобретают или теряют в имеющемся термоэлектрическом поле определенную энергию и тем самым переходят в другие области энергетического пространства. Возникающее отличие функции распределения носителей от максвелловской функции и приводит к появлению дополнительных термоэдс. Последние появляются даже в однородном слое, хотя в этом случае они довольно малы и составляют лишь единицы процентов по отношению к обычной термоэдс V_T . Малость отличия V_E от V_T в этом случае связана с тем, что деформация f_S возникает лишь в малом интервале энергий $\Delta \epsilon \sim T$ в окрестности характерной энергии $\epsilon_0 \sim T$. В неоднородных структурах появляется другой характерный масштаб энергий, равный высоте потенциального барьера, созданного неоднородным легированием, который может в десятки раз превышать тепловую энергию $\epsilon \sim T$. Поэтому в таких структурах деформация функции f_S и, следовательно, дополнительные термоэдс более существенны, т.к. в этом случае на электроны, движущиеся поперек полупроводникового слоя, кроме термоэлектрического поля действует сильное встроенное поле структуры.

Проведенное численное моделирование позволило установить, что деформация функции $f_S(\epsilon, x)$ во всех рассмотренных случаях приводит к возрастанию термоэдс. При этом в неоднородных образцах дополнительная термоэдс $\Delta V = V_E - V_T$ в исследованных условиях достигала нескольких десятков процентов (в однородном слое ее рост составляет менее одного процента). Величина дополнительной эдс больше в тех структурах, у которых встроенное поле сосредоточено внутри образца, поскольку в этом случае локальное встроенное поле больше, а влияние процессов релаксации на границах, соответственно, меньше. Если же встроенное поле примерно однородно, наблюдаемый эффект выражен не так ярко. Смена знака градиента концентрации в неоднородных образцах при заданном перепаде температуры не приводит к смене знака дополнительной эдс и лишь немного изменяет ее величину. Последнее обусловлено тем, что в случае разомкнутых контактов, когда полный ток равен нулю, деформация функции f_S в значительной степени связана с изменением средней энергии электронов, а это изменение таково, что связанная с ним часть дополнительной эдс всегда имеет тот же знак, что и обычная термоэдс V_T .

Проведенное исследование нелинейных фото- и термоэлектри-

ческих явлений, возникающих в субмикронных полупроводниковых структурах, позволило установить, что существуют значительные возможности для совершенствования различных фото- и термоэлектрических приборов за счет использования нового механизма формирования эдс, связанного с нарушением максвелловского вида неравновесной функции распределения носителей заряда в тонко-слоистых полупроводниковых структурах.

В заключении сформулированы основные научные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Разработана теория нелинейного переноса энергетически неравновесных носителей заряда в микронных и субмикронных полупроводниковых структурах с инжектирующими и выпрямляющими контактами при выполнении условий импульсной и энергетической баллистики и в приближении эффективной электронной температуры.

1.1. Изучено формирование нелинейных ВАХ тонких полупроводниковых слоев с инжектирующими контактами в условиях разогрева электронов при протекании поперек слоев тока, ограниченного пространственным зарядом (ТОПЗ). В указанных условиях ВАХ с участками ОДП формируются при других механизмах релаксации импульса и энергии электронов по сравнению с теми, которые приводят к появлению аналогичных ОДП в массивных образцах. При этом области существования S- и N-образных ВАХ сужаются и за их счет расширяются области петлеобразных и монотонных ВАХ. Формирование нелинейных ВАХ начинается с участков безразогревных ТОПЗ, если $l_{\epsilon} < r_D^2/d$, и с чисто разогревной нелинейности, если $l_{\epsilon} > r_D^2/d$, где l_{ϵ} - длина остывания носителей, r_D - дебаевская длина экранирования, d - толщина полупроводникового слоя. Исследованы пространственные распределения электрического поля, концентрации и температуры электронов в разных ситуациях. Выяснены условия, когда концентрация и температура инжектированных электронов локально зависят от величины электрического поля, неоднородно распределенного в образце.

1.2. Предложено теоретическое объяснение экспериментально наблюдавшегося эффекта переключения в тонких полупроводниковых слоях теллурида кадмия, основанное на рассмотрении нестационарных инжекционных явлений. Показано, что в нестационарных

процессах инжекция носителей стимулирует электрический пробой в полупроводниковых слоях, даже если последние имеют высокую концентрацию ловушек.

1.3. Показано, что в периодически легированных полупроводниках с N-ОДП и пилообразным профилем легирования, за счет ослабления инжекционных явлений при одном из направлений тока, достигается повышение частоты электромагнитных колебаний, генерируемых в результате эффекта электрической неустойчивости.

1.4. Теоретически изучено сильное охлаждение электронов в тонкослойных структурах с выпрямляющими контактами и большими встроенными полями, позволяющее в реально достижимых условиях почти в два раза уменьшать эффективную шумовую температуру образца и открывающее возможности получать ВАХ с ОДП за счет нелинейных явлений переноса в системе холодных электронов в других условиях по сравнению с теми, которые требуются в эффектах разогрева.

1.5. В субмикронных слоях при поперечном баллистическом переносе электронов реализуется линейное магнитосопротивление в слабом магнитном поле, повышающее чувствительность слоя как датчика магнитного поля. В сильном магнитном поле сопротивление возрастает как экспонента от квадрата напряженности магнитного поля. Слабое рассеяние электронов в слое не оказывает существенного влияния на магнитосопротивление в области сильного изменения сопротивления при переходе от линейного к экспоненциальному участку.

1.6. В условиях энергетической баллистики для слоев с потенциальными барьерами на боковых границах предсказано появление инверсии функции распределения носителей по энергии при продольном протекании электрического тока. Развита техника эффективного численного моделирования неравновесной неакселеровской функции распределения электронов в субмикронном слое в приближении энергетической баллистики, позволяющая теоретически исследовать широкий круг нелинейных явлений электронного переноса в тонкослойных полупроводниковых структурах.

2. Построена нелинейная теория фото- и термоэдс в тонкослойных p-n-структурах разного типа, включая варизонные структуры и классические сверхрешетки, в условиях неоднородной энергетической неравновесности носителей заряда, описываемой в приближении эффективных температур неравновесных электронов и дырок.

2.1. Выполнен общий анализ причин, механизмов и условий формирования электродвижущих сил в среде с неравновесными носителями заряда в случае произвольного нарушения термодинамического равновесия.

2.2. Предложены новые пути повышения эффективности полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей за счет нелинейных эффектов фоторазогрева неосновных носителей заряда в варизонных р-п-структурах. Определены параметры структур, при которых эти эффекты улучшают работу преобразователей в обычных экспериментальных ситуациях, являющихся типичными, когда такие эффекты выражены слабо и не становятся доминирующими. В структурах с варизонными слоями толщиной $d \sim 1$ мкм эффекты разогрева заметны даже при малых длинах остывания ($l_E \sim 0.1$ мкм), но при этом, наряду с требованием отсутствия разогрева электронов и дырок на р-п-переходе, существенным условием является отсутствие рекомбинации и релаксации энергии неосновных носителей на освещаемой поверхности, поскольку в противном случае, в отличие от гомоструктур, термоток неосновных носителей уменьшает фототок.

2.3. Обнаружено появление в пленочных преобразователях р-CdTe/n-CdS варизонных прослоек с нетипичным профилем запрещенной зоны, увеличивающим к.п.д. этих преобразователей. Показано, что в поликристаллических преобразователях для уменьшения токов утечки, вызванных влиянием межзеренных границ, размер зерен должен превышать длину рекомбинации неравновесных носителей в большей степени, чем предполагалось ранее.

2.4. Предсказано увеличение термоэдс в классических р-п-сверхрешетках, связанное с появлением энергетической неравновесности электронов при протекании тепловых потоков вдоль оси этих сверхрешеток.

3. Открыты и исследованы новые механизмы формирования эдс в полупроводниковых структурах, связанные с нарушением максвелловского вида симметричной части неравновесной функции распределения носителей заряда по импульсам.

3.1. Установлено существование нового механизма возбуждения эдс за счет нарушения максвелловского вида симметричной части функции распределения носителей. Этот механизм обладает высоким быстродействием и обеспечивает появление фотоздс даже в монополярной среде в условиях пространственной однородности макроскопических параметров, описывающих неравновесную систему,

таких как концентрация и средняя энергия носителей заряда.

3.2. Предсказано увеличение фотоэдс и быстродействия полупроводниковых фотоприемников на основе субмикронных слоев и структур, действующих за счет эффекта нарушения максвелловского вида функции распределения носителей при внутризонном возбуждении этих носителей высокочастотным электромагнитным излучением.

3.3. Установлено, что за счет формирования немаксвелловской функции распределения носителей при протекании теплового потока поперек тонкого полупроводникового слоя происходит увеличение эдс термоэлектрических преобразователей энергии на основе полупроводниковых структур субмикронных размеров.

Цитированная литература

1. Гуревич Д.Г., Логвинов Г.Н. Функция распределения (ФР) электронов в субмикронных слоях в гравитационных электрических полях // ФТП.- 1990.- Т.24, вып.10.- С.1715-1720.
2. Логвинов Г.Н. Аппроксимация кинетического уравнения Больцмана в ограниченных полупроводниках // Известия вузов. Физика. - 1991.- Вып.1.- С.59-64.
3. Басс Ф.Г., Гуревич Д.Г. Горячие электроны и сильные электромагнитные волны в плазме полупроводников и газового разряда. - М.: Наука, 1975. - 400 с.
4. Басс Ф.Г., Бочков В.С., Гуревич Д.Г. Электроны и фононы в ограниченных полупроводниках. - М.: Наука, 1984. - 288 с.

ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Гуревич Д.Г., Машкевич О.Л., Врченко В.Б. Вольтамперные характеристики слоев обогащения с горячими носителями тока // ФТП.- 1988.- Т.22, вып.11.- С.1955-1960.
2. Бояко Б.Т., Гашка К.И., Копач Г.И., Копач В.Р., Хрипунов Г.С., Врченко В.Б. Индуцированные поля явления неустойчивости в полужизолирующем теллуриде кадмия // VII Всесоюз. конф. "Химия, физика и техническое применение халькогенидов". Тез. докл., Ч.3. г.Ужгород.- 1988.- С.318.
3. Yurchenko V.B. Extra Oscillations in Periodically Doped Structures with Negative Differential Resistance // Lithuanian J. Phys.- 1992.- V.32, n.5 Suppl.- P.181-184.

4. Гулянов Г., Закиров Н., Дрченко В.Б. Глубокое охлаждение носителей тока в структурах с выпрямляющими контактами // УФХ.- 1990.- Т.35, вып.2.- С.282-285.
5. Гуревич Д.Г., Зозуля В.Л., Дрченко В.Б. Сильное охлаждение электронов в неоднородно легированных полупроводниках // УФХ.- 1990.- Т.35, вып.6.- С.904-907.
6. Гуревич Д.Г., Зозуля В.Л., Дрченко В.Б. Отрицательное дифференциальное сопротивление при охлаждении электронов в неоднородно легированном полупроводнике // ФТП. - 1989. - Т.23, вып.4.- С.643-646.
7. Гуревич Д.Г., Зозуля В.Л., Дрченко В.Б. Эффективный фотоприемник на "холодных" носителях тока // I Всесоюз. конф. "Физические основы твердотельной электроники". Тез. докл., т.А. г. Ленинград.- 1989.- С.186.
8. Гуревич Д.Г., Зозуля В.Л., Дрченко В.Б. Новые механизмы формирования ОДП при охлаждении электронов в коротких неоднородных образцах // VII Всесоюзный симпозиум "Плазма и неустойчивости в полупроводниках" (28-30 сентября 1989г., г.Паланга). Тез. докл., Ч.2. г.Вильнюс.- 1989.- С.270-271.
9. Гуревич Д.Г., Дрченко В.Б. Проблема формирования ЭДС в полупроводниках и вывода ее во внешнюю цепь // ФТП.- 1991. - Т.25, вып.12.- С.2109-2114.
10. Гуревич Д.Г., Дрченко В.Б. Высокочастотная генерация носителей и возникновение эдс в полупроводниковых структурах // Взаимодействие электромагнитных волн с полупроводниками и полупроводниково-диэлектрическими структурами. Труды II Всесоюзн. школы-семинара. Ч.1. г.Саратов.- 1988.- С.38-45.
11. Гуревич Д.Г., Дрченко В.Б. Новый класс фотозлектрических эффектов в варизонных структурах кремний-германий // VIII Коорд. совещание по исследованию и применению твердых растворов кремний - германий. Тез. докл., Ташкент. - 1991. - С.21.
12. Gurevich Yu.G., Yurchenko V.B. Generation of Photovoltage in Homogeneous Unipolar Conductive Medium // Solid State Commun. - 1989. - Vol.72, No.10. - P.1057-1058.
13. Gurevich Yu.G., Yurchenko V.B. Anomalous Electromotive Forces in Semiconductors with Non-Fermian Carrier Distribution Functions // The 8th Vilnius Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors, Sept. 22-24, 1992: Abstracts. - Vilnius, 1992. - P.41.

14. Бойко Б.Т., Дрченко В.Б., Копач Г.И. и др. Фотоэлектрические свойства пленочных гетеропереходов с варизонными прослойками на основе CdTe // Болг. физ. журн.- 1987.- Т.14, N.2.- С.157-163.
15. Копач Г.И., Хрипунов Г.С., Дрченко В.Б. Численное моделирование фотоэлектрических процессов в пленочных гетероструктурах p-CdTe/n-CdS с варизонными прослойками CdTeS // Гелиотехника.- 1991.- N.3.- С.25-28.
16. Дрченко В.Б. Модель выпрямляющих и фотоэлектрических свойств p-n -переходов в поликристаллических полупроводниках // XII Совецание по теории полупроводников (г.Ташкент). Тез. докл., Ч.2. г.Киев.- 1985.- С.313-314.
17. Гуревич Д.Г., Дрченко В.Б. Нелинейные эффекты при мекзонном поглощении света в полупроводниках // Взаимодействие электромагнитных волн с полупроводниками и полупроводниково-диэлектрическими структурами и проблемы создания интегральных КВЧ-схем. Ч.1. г.Саратов.- 1985.- С.62-69.
18. Гуревич Д.Г., Дрченко В.Б. Фотовольтаический эффект на горячих носителях тока // Болг. физ. журн.- 1987.- Т.14, N.1.- С.52-58.
19. Yurchenko V.B. Hot Carriers in Photoreceivers: New Ways for Device Development // BILCON'92: The 1992 Bilkent Int. Conf. on Lightwave Technology and Communications, Bilkent, July 27-28, 1992 : Proceedings. Ankara, Turkey. - 1992. - P.137-143.
20. Бочков А.В., Гуревич Д.Г., Машкевич О.Л., Дрченко В.Б. Новые механизмы возникновения термоэдс// Всесоюзн. совещание "Пленочные термоэлектрические преобразователи и устройства на их основе". Тез. докл., г.Москва.- 1988.- С.11.
21. Гуревич Д.Г., Дрченко В.Б. Аномальные термоэдс в классических p - n -сверхрешетках в многотемпературной модели // XII Всесоюзн. конф. по физике полупроводников. Тез. докл., Ч.2. г.Киев. - 1990. - С.130.
22. Глазман Л.И., Дрченко В.Б. Сопротивление и ВАХ чистого полупроводникового контакта в магнитном поле // ФТП.- 1988.- Т.22, вып.3.- С.465-470.
23. Гуревич Д.Г., Логвинов Г.Н., Дрченко В.Б. Немаксвелловские распределения электронов в субмикронных структурах - физическая основа новых элементов СВЧ электроники // Труды III Всесоюзной школы-семинара "Взаимодействие электромагнитных

- волн с твердым телом", *Г.Баратов, 1991, С.18-23*
24. Гуревич Д.Г., Логвинов В.И., Дрченко В.Б. Избирательное распределение носителей по энергиям при протекании тока вдоль субмикронного полупроводникового слоя // ФТТ.- 1992. - Т.34, вып.6.- С.1666-1670.
 25. Yurchenko V.B. New Hot-Carrier Effects in Submicron Structures for Infrared and Millimeter Wave Receivers // The 18th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves. Ed. J.R.Birch, T.J.Parker, Proc. SPIE 2104, 1993. - P.46-47.
 26. Yurchenko V.B. Hot-Carrier Photovoltaic Effects in Submicron Superlattices as a Basis for Novel Photonic Devices //The 24th General Assembly of the URSI. Abstracts. Kyoto, Japan. - 1993. - P.147.
 27. Анопоченко А.С., Дрченко В.Б. Численное моделирование нелинейных термоэдс в субмикронных полупроводниковых структурах // Международн. научн.-техн. конф. "Компьютер: наука, техника, технология, здоровье". Тез. докл., Харьков, Микольц: ХПИ, МУ. - 1993. - С.214-215.

Дрченко Владимир Борисович
**НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА И ВОЗБУЖДЕНИЯ ЭДС
 В МИКРОННЫХ И СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУРАХ**

Подп. в печ. 07.02.94. Формат 60x84/16.
 Бум.офс. Офс.печ. Усл.печ.л. 2,0 уч.-из.
 Тираж 100 экз. Зак. 12.

ИРЭ АН Украины, Харьков-85, ул.Ак.Проскуры,12.