

АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
НПО “ФИЗИКА-СОЛНЦЕ” им. С.А.Азимова
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. С.В.Стародубцева

На правах рукописи
УДК 621.315.592

НАБИЕВ ГУЛАМЖАН АБДУКУНДУЗИВИЧ

**ЭФФЕКТЫ АНОМАЛЬНО-БОЛЬШИХ ФОТОНАПРЯЖЕНИЙ И
ФОТОЭЛЕКТРЕТНЫХ СОСТОЯНИЙ БЕЗ ВНЕШНЕГО
ПОЛЯРИЗУЮЩЕГО ПОЛЯ В ПЛЕНКАХ Si И CdTe**

01.04.10 - Физика полупроводников

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Ташкент - 2009

Работа выполнена в Ферганском политехническом институте
Министерства высшего и среднего специального образования
Республики Узбекистан

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Шамирзаев Сезгир Хабибуллаевич
доктор физико-математических наук, профессор
Зайнабидинов Сирожиддин Зайнабидинович
доктор физико-математических наук, профессор
Сафаров Абдуназар Сафарович

Ведущая организация: Национальный Университет Узбекистана

Защита состоится «_____» 2009 года в _____ часов на заседании
Специализированного совета Д.015.08.01 при Физико-техническом институте
НПО «Физика-Солнце» АН РУз по адресу: Узбекистан, 100084, г.Ташкент,
ул.Мавлянова, 2б.

Тел.: (8-10-99-871) -233-12-71 Факс: (8-10-99-871) -235-42-91

E-mail: karimovi@uzsci.net

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического
института НПО «Физика-Солнце» АН РУз.

Автореферат разослан «____» _____ 2009 г.

Отзывы на автореферат диссертации в двух экземплярах, заверенной печатью
организации, просим направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого
секретаря Специализированного совета

Ученый секретарь
Специализированного совета,
д.ф.-м.н., профессор

Каримов А.В.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность работы. Развитие полупроводниковой оптоэлектроники во многом связано исследованием полупроводниковых структур в виде тонких плёнок, в особенности тонкопленочных многоэлементных приёмников излучений. К числу таких элементов относится и полупроводниковые пленки, генерирующие аномально-большие фотонапряжения (АФН) [1-10], величина которой, вопреки зонной теории, превышает значение ширины запрещенной зоны соответствующего полупроводника.

К настоящему времени получены АФН-пленки как из элементарных полупроводников, так и из полупроводниковых соединений A_2B_6 , A_3B_5 и др.; исследованы электрические, фотоэлектрические и оптические свойства; показана возможность использования АФН-пленок как датчиков магнитного поля, ионизирующего излучения, построены преобразователь оптического изображения в электрический потенциальный рельеф, оптоэлектронный трансформатор напряжения [1, 6].

Но, к сожалению, нет теорий АФН-эффекта с учетом конкретной конфигурационной модели, микроскопическими параметрами, условиями освещения, фотоэлектретного состояния без внешнего поляризующего поля, объясняющие экспериментальные данные и позволяющие определения параметров этих пленок. Не исследовано также влияние легирования на эффект аномально-больших фотомагнитных напряжений (АФМН) в таких пленках. Исследование этих вопросов дает существенные результаты, проясняющие механизм возникновения АФН-эффекта, объясняющие экспериментальные характеристики АФН-пленок ($I_{ВХ}$, угловая зависимость, зависимость АФН от толщины, $ВАХ$, спектральные) позволяет находить новые решения их практического применения. Все это определяет **актуальность** данной работы.

Степень изученности проблемы. Целый ряд важных вопросов, касающихся физики этого явления, несмотря на большое число работ, остаются недостаточно выясненными или дискуссионными. К ним относятся такие вопросы как метод определения механизмов АФН-эффекта, определение характеристических микропараметров АФН-пленок, распределение косоосажденных пленок по толщине, теория АФН-эффекта в полупроводниковых пленках с однородными микрообластями, с p-n-p – переходами в связи с конкретными конфигурационными моделями, теория фотоэлектретного состояния в полупроводниках с демберовским механизмом фотонапряжения, разработка технологии получения и экспериментальное

изучение фотоэлектретного состояния в таких пленках, теория фотоэлектретного состояния в р-п – переходных структурах с двумя глубокими уровнями, определение параметров уровней прилипания ответственных за фотоэлектретное состояние, фотомагнитный эффект в активированных АФН-пленках. Кроме этого, пути практического применения и использования пленок с АФН-эффектом требуют своей дальнейшей разработки.

Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР. Работа выполнена в Ферганском политехническом институте в рамках Госбюджетной НИР кафедры «Физика».

Цель исследования заключалась в разработке технологий получения легирования и активации АФН-пленок, исследовании их свойств с помощью фотоэлектрических методов, построении теории, а также в создании на основе АФН-пленок элементов оптоэлектронных приборных структур.

Для достижения этой цели были сформулированы следующие основные задачи исследования:

- разработка технологии получения полупроводниковых пленок с АФН-эффектом, однородных по толщине, обладающих фотоэлектретным состоянием, высокой магниточувствительностью;
- создание методов определения механизмов АФН-эффекта, определение характеристических микропараметров, изучение основных характеристик АФН-пленок;
- создание теории АФН-эффекта в полупроводниковых пленках с демберовским, р-п-р – переходными механизмами в связи с конкретными конфигурационными моделями при различных освещениях;
- создание теории фотоэлектретного состояния без внешнего поляризующего поля в однородных полупроводниках, в р-п – переходных структурах с двумя глубокими уровнями;
- определение параметров глубоких уровней, ответственных за фотоэлектретное состояние;
- расширение путей возможного применения АФН-, АФМН- и фотоэлектретных пленок.

Объект и предмет исследования. Объектом теоретических исследований фотовольтаических, фотоэлектретных свойств являются полупроводники с однородными областями, р-п-р – и р-п – переходами. Технологические и экспериментальные исследования проведены в пленках Si и CdTe как на представителях, для которых приняты фотодиффузионная и барьерная модели АФН-эффекта, соответственно. Фотоэлектретное

состояние исследовано в пленках Si:Ag, CdTe: Ag, фотомагнитный эффект в CdTe:Si.

Методы исследований. Исследование влияния различных технологических процессов на фотовольтаические, фотоэлектретные свойства пленок, экспериментальные методы снятия угловых диаграмм, спектральных, эрстед–вольтовых, люкс–вольтовых и релаксационных характеристик, решение уравнения непрерывности, кинетического уравнения, проверка выполнимости закона взаимозаменяемости.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Механизм аномально-больших фотонапряжений в полупроводниковых пленках и выбор модели может быть произведен на основе анализа спектральных зависимостей наблюдаемых явлений.
2. Теория АФН-эффекта с демберовским механизмом в полупроводниковых пленках в связи с конфигурационными моделями, микроскопическими параметрами, условиями освещения.
3. Особенности фотовольтаического эффекта в полупроводниках с р-п-р-переходами при неоднородном освещении.
4. Фотоэлектретное состояние без внешнего поляризующего поля в полупроводниках с однородными микрообластями (АФН-пленки Si:Ag), р-п-переходами с двумя глубокими уровнями (АФН-пленки CdTe:Ag).

Научная новизна:

- предложен метод определения механизмов АФН-эффекта, основанный на исследовании спектральных зависимостей коэффициента поглощения и АФН, в отличие от предыдущих, которые были применимы только в случае сильного поверхностного поглощения;

- найдено аналитическое выражение для распределения косоосажденных пленок по толщине, устанавливающее связь между толщиной и местонахождением рассматриваемой точки пленки. Показано, что распределение толщины осаждаемой пленки очень чувствительно к углу отклонения подложки от нормали. С увеличением угла отклонения увеличивается максимальное значение толщины; максимум толщины сдвигается в сторону больших значений длины подложки; нарушается симметрия относительно максимального значения толщины;

- показано, что на формирование АФН-эффекта в пленках CdTe вносят вклад как различие параметров р-п- и п-р-переходов, так и фактор асимметрии освещения, в отличие от известных работ, в которых АФН объяснялся либо первой, либо второй причиной;

- разработана теория АФН- эффекта с демберовским механизмом в полупроводниковых пленках. Особое внимание уделено теории угловой зависимости АФН как основной характеристики АФН-эффекта, ввиду отсутствия таковой в предыдущих работах, хотя имеются многочисленные экспериментальные данные. Получено общее аналитическое выражение, из которого как частный случай получаются нормальный, аномальный дембер-эффекты. Показано, что для реализации последнего при освещении светом слабого поглощения, генерации неравновесных носителей по всему объему ($kd \ll 1$, $kL \ll 1$) должно выполняться и условие $kD \ll S$, которое является более жестким и зависимым от конкретных параметров пленки (k - коэффициент поглощения света, d - толщина пленки, L - длина диффузии, D - коэффициент диффузии, S - скорость поверхностной рекомбинации);

- показано, что при переходе к освещению сильно поглощаемым монохроматическим излучением аномальный дембер-эффект переходит в нормальный. Показано, что при этом должно выполняться не только $kd \gg 1$, $kL \gg 1$, которые ранее считались достаточными, но и $kD \gg S$, который является более жестким и связанным с конкретными параметрами пленки;

- показано, что в р-п-р-структуре и АФН-плёнке с р-п-р-переходами наблюдается явление, аналогичное аномальному эффекту дембера в однородных полупроводниках, т.е. знак генерируемого фотонапряжения не зависит от угла освещения. Этот эффект назван аномальным фотовольтаическим эффектом в р-п-р-структуре и АФН-плёнке;

- получено аналитическое выражение для фотонапряжения в р-п-р-структуре и АФН-плёнке с р-п-р-переходами при неоднородном освещении, из которого в частном случае получаются нормальные, аномальные фотовольтаические эффекты и переход аномального фотовольтаического эффекта в нормальный в случае сильного поверхностного поглощения света, поверхностной генерации неравновесных носителей, объясняющая экспериментальные результаты (угловую зависимость АФН-эффекта, ЛВХ, зависимость АФН от толщины) в CdTe, в отличие от других работ, в которых полностью отсутствовало теория угловой зависимости; ЛВХ была линейной.

- показана возможность наблюдения и разработана теория фотоэлектретного состояния без внешнего поляризующего поля в полупроводниках с однородными областями, где поляризующим фактором является различие подвижностей электронов и дырок, которая объясняет экспериментальные результаты в АФН-пленках кремния, легированных серебром;

- показано, что для наблюдения фотоэлектретного состояния, время, затрачиваемое на любой процесс, приводящий к увеличению концентрации

электронов (дырок) на акцепторном (донорном) уровне, должно быть намного меньше времени любого процесса приводящего к рекомбинации;

- разработана теория фотоэлектретного состояния в полупроводниках с р-п – переходами с двумя глубокими уровнями, объясняющая экспериментальные результаты в АФН-пленках теллурида кадмия, легированных серебром, в котором показано, что фотоэлектретное напряжение релаксирует с двумя характеристическими временами. Начальный участок, где фотоэлектретное напряжение падает сравнительно быстро, соответствует более мелкому уровню. Далее концентрация неравновесных носителей заряда, генерируемые теплом со второго уровня больше чем с первого и фотоэлектретное напряжение определяется вторым – более глубоким уровнем; найдены критерии участия каждого уровня в создании фотоэлектретного напряжения; показано, что когда время жизни электрона на локальном уровне, больше времени жизни свободного электрона, определяемого рекомбинацией, уходом из р-п – области и когда эти величины (отдельно взятые) превышают время захвата на уровень прилипания, то этот уровень участвует в создании фотоэлектретного состояния. Если это условие выполняется для обоих уровней двухуровневой системы, то в формировании фотоэлектретного состояния участвуют оба уровня. При выполнении этого условия только для одного уровня фотоэлектретное состояние обусловлено только одним уровнем, хотя система двухуровневая. Локализованные на пассивном уровне носители заряда практически не влияют на кинетику фотонапряжения и не приводят к фотоэлектретному состоянию;

- найдены технологические режимы получения АФН-пленок Si и CdTe, посредством легирования Ag достаточной концентрации ($\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ Ag в Si, $\sim 10^{18}$, $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ Ag в CdTe), позволяющие реализации фотоэлектретного состояния без внешнего поляризующего поля;

- предложен и разработан метод определения энергии ионизации, концентрации примесей глубоких уровней, ответственных за фотоэлектретное состояние с помощью релаксационных кривых фотоэлектретного и аномального фотонапряжений. Таким образом, параметры уровней определяются именно с помощью эффекта, к которому эти уровни приводят. Это дает возможность, в данном случае, исключения случаев приписки того или иного явления к уровням, за которые они неответственны.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Полученные экспериментальные результаты и технологические приёмы изготовления, легирования, активации пленок с АФН-эффектом,

фотоэлектретным состоянием могут быть использованы для построения ряда датчиков и определения их характеристических микропараметров. Создано устройство для измерения перемещений. Датчик магнитного поля на основе полученных пленок имеет высокую магниточувствительность и линейную эрстед-вольттовую характеристику.

Технология получения и методика исследования фотоэлектретного состояния без внешнего поляризирующего поля может быть применена для разработки технологии и исследования этого эффекта в других полупроводниках и построения элементов памяти.

Методы определения характеристических микропараметров могут быть использованы для определения параметров не только CdTe, но и других полупроводниковых пленок (CdSe, CdS, $\text{Bi}_2\text{Te}_3+\text{Sb}_2\text{Te}_3$), в которых наблюдается АФН-и АФМН-эффекты.

Метод определения параметров глубоких уровней, предложенный в работе, может быть применен не только для изучения параметров глубоких уровней в полупроводниках с фотоэлектретным состоянием, но и в полупроводниках в которых глубокие уровни влияют на релаксационные процессы.

Материалы диссертации могут быть использованы в курсах физики полупроводников (особенности фотовольтаического эффекта в р-п-р-структуре при различных освещениях, особенности дембер-эффекта, фотомагнитный эффект в легированных пленках CdTe), микро- и нанoeлектроники (вопросы распределения осаждаемых пленок по толщине, учет конфигурации микрофотоэлементов пленок).

Результаты, полученные в диссертации, развивают новое научное направление «Фотоэлектрические и фотоэлектретные эффекты без внешнего поля в полупроводниках».

Реализация результатов. Полученные результаты являются основой для разработки фотоприемных устройств в научно-производственных объединениях АН РУз и других приборостроительных организациях.

Апробация работы. Основные результаты данной диссертационной работы докладывались на шестом Международном совещании по фотоэлектрическим и оптическим явлениям в твердом теле (Варна, 1980), на Международной конференции по аморфным полупроводникам (Габрово, 1984), на втором Международном семинаре по глубоким уровням в полупроводниках (Ташкент, 1980), на VI-республиканской конференции молодых физиков (Ташкент, 1981), на Республиканской школе молодых ученых и специалистов «Актуальные проблемы физики полупроводников» (Фергана, 1982), на Международном школе – семинаре молодых учёных

«Физика и материаловедение полупроводников с глубокими уровнями» (Ташкент, 1984), на Международном совещании по фотоэлектрическим и оптическим явлениям в твёрдом теле (Варна, 1989), на Республиканской научно-практической конференции посвященной 600-летию Мирзо Улутбека (Гулистан, 1994), на Международной конференции «Материаловедение алмазоподобных и халькогенидных полупроводников (Черновцы, 1994), на Международной конференции «Твердотельная электроника» (Наманган, 1994), на Международной конференции «Современные проблемы физики полупроводников и диэлектриков» (Ташкент, 1995), на Международной конференции «Проблемы теоретической физики и физики твердого тела» (Бухара, 1997), на научно-теоретической конференции посвященной 8-летию независимости Республики Узбекистан (Фергана, 1999), на Республиканской научно-практической конференции «Использование нетрадиционных методов техники и технологий» (Фергана, 1999), на Международной конференции «Фото-, тензо- и термоэлектрические явления в полупроводниковых пленках» (Фергана, 1999), на научно-практическом семинаре-совещании «Проблемы полупроводникового материаловедения» (Андижан, 1999), на Международной конференции «Инновация-2000» (Бухара, 2000), на Международной конференции «Проблемы производства поли- и монокристаллов кремния для микроэлектроники и солнечной энергетики» (Андижан, 2000), на Республиканской научно-практической конференции профессоров и преподавателей (Ташкент, 2001), на Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью ВИП-2001» (Москва, 2001), на Республиканской конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» (Ташкент, 2003), на Республиканской научно-технической конференции «Применение передовых методов техники и технологии производства и информатики» (Фергана, 2003), на Международной конференции по «Фотоэлектронике и приборам ночного видения» (Москва, 2004), на международной конференции «Проблемы фундаментальной и прикладной физики полупроводников» (Андижан, 2005), на XIX международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, 2006), на республиканской научно-технической конференции «Оптические, акустические и радиоволновые методы и средства контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» (Фергана, 2006), на международной конференции по фотоэлектрическим и оптическим явлениям в полупроводниковых структурах (Фергана, 2006), на 9 международной конференции по электронике и информационным и коммуникационным технологиям (Корея–Узбекистан, 2008).

Опубликованность результатов. По материалам диссертации опубликовано 68 работ, из них 41 в научных журналах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения и списка цитированной литературы из 285 наименований. Она содержит 302 страницы машинописного текста, включая 90 рисунков и 11 таблиц.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность работы, формулируется цель и основные задачи, научная новизна и практическая ценность, основные положения, выносимые на защиту, апробация.

Первая глава диссертации посвящена обзору литературы. Основное внимание уделено работам, в которых исследуются технологические процессы получения АФН- плёнок, структурным исследованиям, вольт-амперным характеристикам, фотомагнитному эффекту, фотоэлектретному состоянию в АФН- плёнках. Сделан критический обзор модельных представлений о природе АФН- эффекта и его угловой зависимости в полупроводниковых плёнках.

Во второй главе описана технология получения и основные свойства АФН- пленок кремния и теллурида кадмия. Определены характеристические микропараметры пленок.

При получении пленок термическим осаждением веществ на подложку важными характеристиками являются толщина пленок и распределение этой толщины по длине пленки. Здесь проведен расчет распределения толщины по длине пленки для общего случая, когда плоскость подложки необязательно параллельна плоскости испарителя. Эта задача представляет самостоятельный интерес не только для АФН- пленок, но и для ферромагнитных пленок, пленок, широко применяемых для ориентации жидких кристаллов и др., которые получают специально косоугольным осаждением исходного вещества.

Обозначив через θ угол наклона подложки относительно нормали, и проводя соответствующие вычисления, получаем распределение толщины по длине пленки для случая испарителя с малой поверхностью

$$d / d_0 = \left[1 + \left(\frac{l}{h} \right) \sin \theta \right] \cos \theta \left[1 + \left(\frac{l}{h} \right)^2 + 2 \left(\frac{l}{h} \right) \sin \theta \right]^{-2} \quad (1)$$

где

$$d_0 = M(4\pi\rho)^{-1}h^{-2} \quad (2)$$

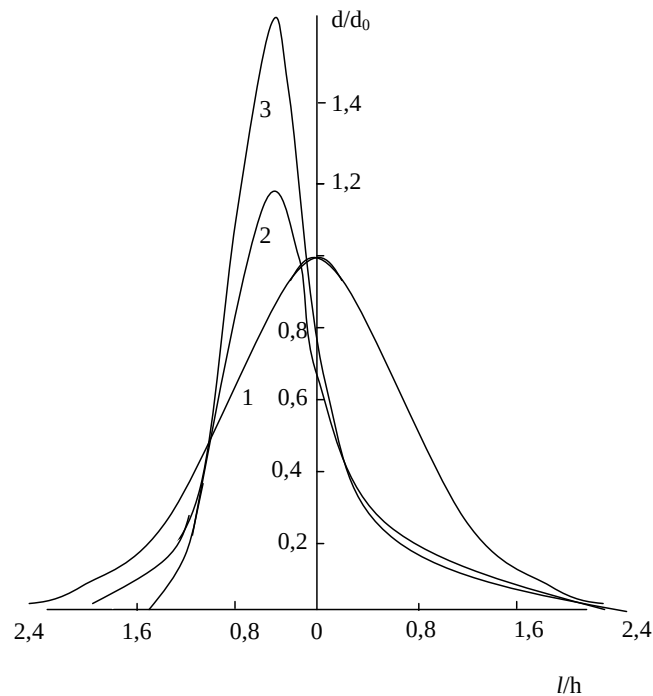
– толщина пленки в точке над испарителем, h – расстояние от испарителя до этой точки, l – расстояние от точки в подложке над испарителем до рассматриваемой точки; M , ρ – масса и плотность материала конденсированного вещества.

Максимум выражения (1) наблюдается при значениях $\frac{l}{h}$ равных

$$l/h = -\sin^{-1} \theta \left\{ 1 - \left(\frac{\cos \theta}{3} \right) [\cos \theta + (3 + \cos^2 \theta)^{1/2}] \right\}. \quad (3)$$

Аналогично для случая точечного испарителя

$$d/d_0 = \cos \theta \left[1 + \left(\frac{l}{h} \right)^2 + 2 \left(\frac{l}{h} \right) \sin \theta \right]^{-3/2}. \quad (4)$$



$\theta=0^\circ$ (1), 30° (2), 45° (3)

Рис.1. Распределение толщины при испарении из испарителя с малой поверхностью.

Из этих выражений следует, что распределение толщины очень чувствительно к углу отклонения (θ) подложки от нормали. С увеличением угла θ увеличивается максимальное значение толщины; максимум толщины сдвигается в сторону больших значений длины подложки; нарушается симметрия относительно максимального значения толщины (рис.1).

Описывается способ устранения неоднородности толщины по длине АФН-пленки, при косоугольном осаждении, путем дополнительного допыления. Этот вопрос является решающим для получения пленок с оптимальной толщиной.

Для получения плёнок равномерной толщины прибегают к нескольким приемам. В одном из них применяют ряд небольших испарителей, расположенных по кольцу параллельно подложке или одного испарителя, вращаемого вокруг оси, перпендикулярной к плоскости подложки.

В другой методике получения плёнок равномерной толщины подложку вращают вокруг оси, перпендикулярной её плоскости.

Эти приемы не применимы для случая АФН-плёнок, т.к. при испарении вышеописанными способами специфичная структура с наклонёнными дендритными выступами, которая возникает при косоугольном осаждении нарушается и АФН исчезает.

Другим недостатком этих методик, вообще, является применение многих испарителей, что технически не всегда возможно а тем более вращение испарителя или подложки с токопроводами.

Нами разработан способ устранения неоднородности толщины по длине АФН-пленки, при косоугольном осаждении. Для этого между испарителем и подложками в вакуумной камере устанавливаем металлическую шторку, которую можно перемещать с помощью магнита параллельно поверхности источника. По достижении близлежащего к испарителю конца пленки оптимальной толщины начинаем двигать шторку со скоростью в зависимости от скорости осаждения вещества, закрывая тем самым ход поступления молекулярного пучка к этой части подложки.

Таким образом, и остальная часть плёнки постепенно достигнет оптимальной толщины. Например, в одном из наших экспериментов при осаждении пленки под углом 60° , и расстоянии от подложки до испарителя 5 см, и длине слоя 1,7 см и при выборе оптимальной толщины как 1 мкм и росте близлежащего к испарителю конца плёнки со скоростью 0,04 мкм/мин. и отдаленного конца 0,02 мкм/мин. скорость перемещения шторки была равной 1 мм/мин.

Результаты проведенных экспериментов по дополнительному допылению для 6 образцов CdTe приведены в таблице (длина образцов 1,7 см).

Видно, что при применении разработанного способа увеличение АФН достигает 30%. Снятием зависимости $V_{\text{АФН}}$ от длины пленки показано, что в пленках с градиентом толщины $V_{\text{АФН}}$ распределено неравномерно, а в пленках, полученных вышеописанной технологией равномерно.

Таблица

Влияние дополнительного допыления на АФН в пленках CdTe.

Номер образца	$V_{\text{АФН}}$, В до допыления	$V_{\text{АФН}}$, В после допыления	Добавочное $V_{\text{АФН}}$,	
			В	%
9	84	101	17	16,8
11	95	137	42	30,7
12	103	152	48	31,8
14	110	143	33	23
16	120	165	45	27,3
19	115	168	53	31,6

Знание характеристических микропараметров АФН-пленок позволяет уточнить представления о природе генерации фотонапряжений в микрофотоэлементах и по ним в частности АФН-пленка оценивается как прибор и определяется область её применения. Обычно при определении характеристических микропараметров для нахождения подвижности прибегают к фотохолл-эффекту, расшифровка результатов которого в пленочных образцах связаны большими трудностями. В работе показано, что не обращаясь к фотохолловским измерениям, с помощью спектральных зависимостей АФМН- и АФН-эффектов есть возможность определения характеристических микропараметров таких как подвижность носителей, длина диффузии, число микрофотоэлементов, скорость поверхностной рекомбинации.

Третья глава посвящена методам определения механизмов АФН-эффекта, исследованию физической природы АФН-эффекта в пленках Si и CdTe, вопросу влияния токов поверхностной утечки зарядов на ВАХ АФН-пленок, кинетическим процессам в пленках CdTe и Si, разделению механизмов АФН-эффекта на р-п – переходной и аномальный дембер-эффект и механизмам АФН-эффекта в пленках CdTe.

Появление аномально-больших фотонапряжений складывается из трех процессов: 1) генерация неравновесных носителей заряда в полупроводнике; 2) пространственное разделение электронов и дырок; 3) суммирование фотонапряжений, образованных в отдельных микрофотоэлементах. Первый процесс осуществляется как правило, воздействием света. Третий процесс осуществляется в естественным образом возникающей в процессе роста, характерной для АФН-пленки, батарее последовательно включенных микрофотоэлементов. Второй процесс может быть осуществлен на

различного рода барьерах или с помощью фотодиффузионного эффекта (эффект Дембера) в однородных микрофотоэлементах.

Исследование зависимости $V_{\text{АФН}}(\alpha)$ для свеженапыленных пленок кремния при различных углах поступления молекулярного пучка на подложку показало, что на всех пленках аномальное фотонапряжение имеет инверсию знака фотонапряжения в пределах $0 \div 180^\circ$, причем угол инверсии практически соответствует углу осаждения пленки.

Установлено, что термообработка пленок, полученных при $\alpha_{\text{исп}}=60^\circ$ при температуре 400°C приводит к сдвигу угла инверсии знака АФН в сторону больших углов освещения. Такой сдвиг наблюдается в пленках с $\alpha_{\text{исп}}=45^\circ$ при 300°C . Термическая обработка пленок с $\alpha_{\text{исп}}=30^\circ$ уже 200°C приводит к сдвигу угла инверсии знака АФН, причем величина этого сдвига больше, чем в пленках с $\alpha_{\text{исп}}=45^\circ, 60^\circ$. Обработка при температуре 300°C показала, что в отличие от предыдущих случаев инверсия отсутствует. В угловых диаграммах $V_{\text{АФН}}(\alpha)$ пленок, обработанных при 400°C также не наблюдается инверсия. При снятии зависимости $V_{\text{АФН}}(\alpha)$ при освещении этих пленок монохроматическим светом из области $kd \gg 1$ опять выявило инверсию знака фотонапряжения.

Таким образом, меняя угол падения молекулярного пучка и режим окислительной термообработки получены пленки кремния как с инверсией знака фотонапряжения, так и без инверсии в белом свете, но имеющие инверсию в сильнопоглощаемом монохроматическом свете.

Исследования зависимости $V_{\text{АФН}}(\alpha)$ для свеженапыленных и термообработанных пленок CdTe показали, что в этих пленках инверсия знака АФН не наблюдается. При термообработке имеющиеся два максимума сдвигаются в середину так, что углы при которых наблюдается V_{max} имеют другие значения, что является существенным для термообработки при поиске наибольшего значения V_{max} . Таким образом, в таких случаях термообработку нужно проводить совместно с угловыми исследованиями.

При определении механизмов генерации АФН методом снятия $V_{\text{АФН}}(\alpha)$ необходимым условием является $kd \gg 1$. Но это условие выполняется не для всех пленок. Оценка значения величины kd с привлечением спектральной зависимости $V_{\text{АФН}}$ и коэффициента поглощения показала, что АФН вызывается широкой областью её значений.

АФН с фотовольтаическим эффектом на барьере и фотодиффузионном эффекте в однородных по типу микрообластях должны по-разному зависеть от длины волны падающего излучения.

Фотонапряжение, генерируемое на барьерах возрастает по мере приближения глубины проникновения монохроматического света к глубине

залегания барьера. В коротковолновой области длин волн коэффициент поглощения света велик; генерация происходит в поверхностной области пленки, поэтому часть возбужденных неосновных носителей рекомбинируют, не успевая дойти до барьера. С переходом в длинноволновую область коэффициент поглощения уменьшается; поглощение света и соответственно генерация неравновесных носителей происходит по всей толще полупроводника равномерно и фотонапряжение падает. Поэтому спектр АФН-эффекта в таких пленках должен иметь максимум. Спектральная зависимость АФН-эффекта в пленках CdTe имеет именно такую закономерность, что свидетельствует о барьерной природе АФН-эффекта в этих пленках.

Из самого определения фотодиффузионного эффекта как эффекта возникновения фотонапряжения при неоднородном освещении ясно, что она максимальна при освещении сильнопоглощаемым светом. Именно в этом случае создается максимальный градиент концентрации, необходимый для диффузионного процесса. С увеличением длины волны увеличивается глубина проникновения света, оставляя при этом меньшее пространство для развития диффузии. Спектр АФН-эффекта в таких пленках имеет монотонно спадающий характер, имея при этом наибольшие значения при относительно коротких длинах волн. Спектр АФН-эффекта в пленках Si имеет вид монотонно спадающей кривой с переходом в длинноволновую область, что свидетельствует о фотодиффузионной модели АФН-эффекта в этих пленках.

При выполнении условия $kd \gg 1$ работает только та часть пленки, которая возбуждена монохроматическим светом, остальная часть пленки остается пассивной, ввиду непроникновения фотоактивного света. Более надежные результаты должны получаться при работе всей толщины в целом, т.е. при $kd \ll 1$. Для этого случая в области спада фотонапряжения, показано, что определение механизма может быть произведено на основе определения функции $d\ell_{gk}/dV$.

Показано, что для барьерной модели

$$d \ell_{gk} / dV = A_B + B_B k^{-1} \quad (5)$$

а для фотодиффузионной модели

$$d \ell_{gk} / dV = A_D + B_D k^{-2} \quad (6)$$

где A_B, B_B, A_D, B_D – постоянные не зависящие от коэффициента поглощения.

Линейная зависимость $d \lg \kappa / dV$ от κ^{-1} в пленках CdTe свидетельствует о барьерной модели АФН-эффекта в этих пленках (рис.2).

Параболическая зависимость этой функции для пленок Si приводит к фотодиффузионной модели (рис.3).

Для более полной и подробной апробации данной методики рассматривались также виды этой функции для пленок Ge и $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Sb}_2\text{Te}_3$. Обработка данных показывает, что вид этой функции для пленок Ge параболический (фотодиффузионная модель), а для пленок $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Sb}_2\text{Te}_3$ линейный (барьерная модель).

ВАХ АФН-пленок ряда полупроводников имеют линейный участок с последующим переходом на суперлинейную зависимость. В диффузионных областях распространение носителей по всем направлениям равновероятно и следовательно в таких областях имеет место утечка через поверхность. Учет утечки зарядов по всем направлениям увеличивает ток в системе, вследствие этого ток в одном (в частности в измеряемом амперметром) направлении уменьшается. Показано, что утечка влияет и на вид ВАХ р-п – перехода, хотя р-п – переход является областью сильных внутренних электрических полей.

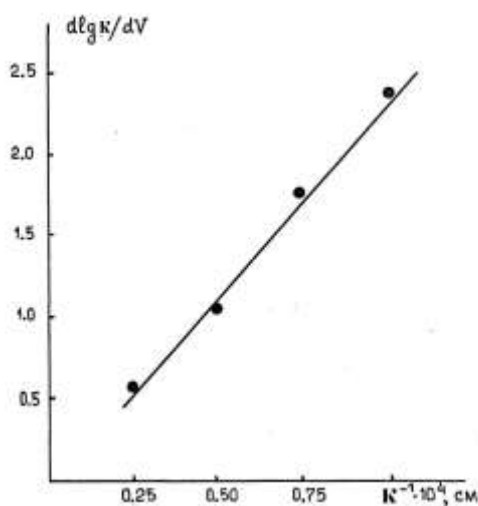


Рис.2.Зависимость $d \lg \kappa / dV(\kappa^{-1})$ для плёнок CdTe.

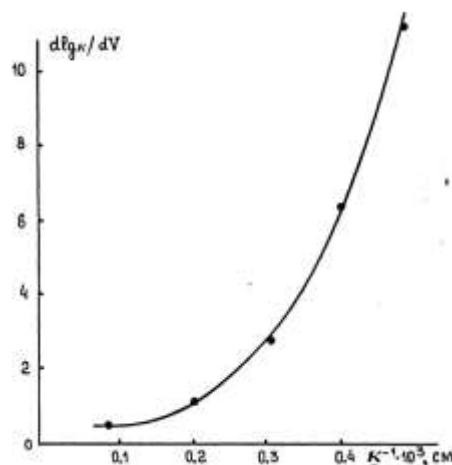


Рис.3.Зависимость $d \lg \kappa / dV(\kappa^{-1})$ для плёнок Si.

Таким образом, показано, что суперлинейность ВАХ нельзя связать с поверхностными утечками тока.

Обозначив концентрацию и величину АФН, в начальный момент ($t=0$) рассмотрения через Δn_0 , $V_{\text{АФН}0}$ и в произвольное время t через Δn , $V_{\text{АФН}}$, получено аналитическое выражение для зависимости $V_{\text{АФН}}(t)$ в полупроводниках с р-п-переходами

$$V_{A\Phi H} = V_{A\Phi H0} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (7)$$

где

$$V_{A\Phi H0} = N \frac{kT}{q} \frac{\Delta n_0}{n_0}, \quad (8)$$

и определено время жизни неравновесных носителей в пленках теллурида кадмия ($\tau=13\div 20$ с).

Приводятся также результаты исследования кинетики аномального фотонапряжения в полупроводниках с однородными микрообластями. Обозначая концентрацию неравновесных носителей при $t \rightarrow \infty$ в $x=0$ через $\Delta n_{0,\infty}$ в $x=d$ $\Delta n_{d,\infty}$, получим

$$V = V_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) \quad (9)$$

где

$$V_0 = N \frac{b-1}{b+1} \frac{kT}{q} \frac{1}{n_0} (\Delta n_{0,\infty} - \Delta n_{d,\infty}) \quad (10)$$

N – число однородных микрообластей, k – постоянная Больцмана, q – заряд электрона, n_0 – концентрация темновых носителей. Обозначая концентрацию неравновесных носителей в начальный момент ($t=0$) рассмотрения в $x=0$ через $\Delta n_{0,0}$ в $x=d$ $\Delta n_{d,0}$ для релаксации фотонапряжения получим аналогичное выражение (7), где

$$V_0 = N \frac{b-1}{b+1} \frac{kT}{q} \frac{1}{n_0} (\Delta n_{0,0} - \Delta n_{d,0}) \quad (11)$$

Видно, что отличие состоит лишь в абсолютных значениях фотонапряжения. Апробация проведена для пленок Si. На рис.4 приведено нарастание и спад фотонапряжения при АФН- эффекте для плёнок Si в координатах $\ln \frac{V_0}{V_0 - V}$ и

$\ln \frac{V_0}{V}$ соответственно. Видно, что теория, в основном, правильно описывает экспериментальные данные и что $\tau \approx 8,4$ с.

Необходимым условием снятия угловых диаграмм освещением коротковолновым монохроматическим светом является условие сильного поглощения $kd \gg 1$. Пленки некоторых полупроводников генерируют значительные фотонапряжения при $kd \ll 1$. Поэтому определение механизмов АФН-эффекта методом угловых диаграмм в этом случае нельзя провести.

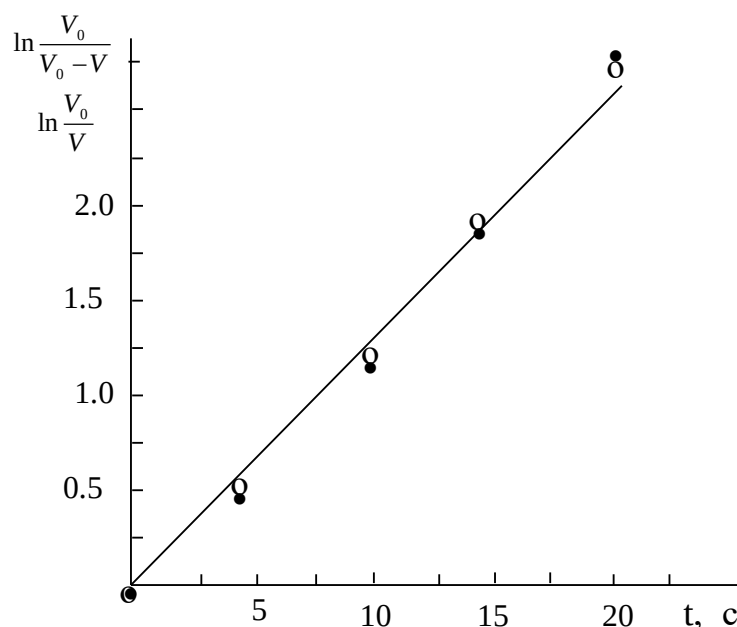


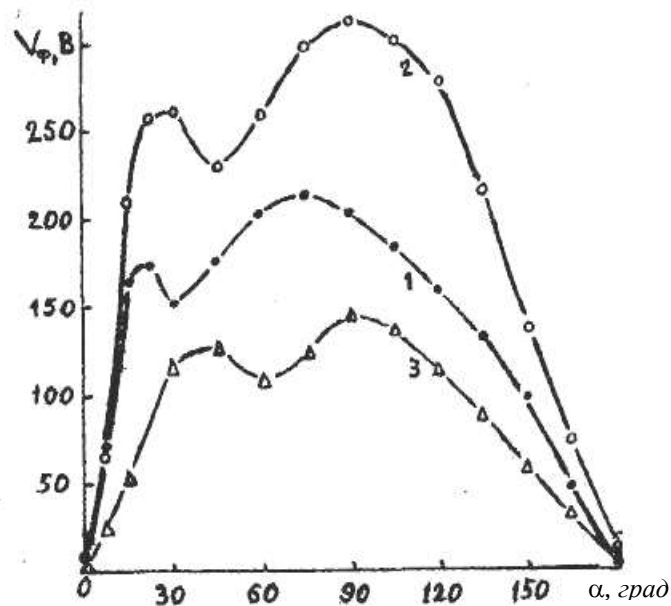
Рис.4. Нарастание $\ln \frac{V_0}{V_0 - V}$ (o) и спад $\ln \frac{V_0}{V}$ (•) аномального фотонапряжения в пленках (N16-3, $V_0=150$ В) кремния.

Обосновывая и определяя соотношение скоростей поверхностной рекомбинации с помощью отношений фотомагнитных напряжений при освещении фронтальной и тыльных поверхностей показана возможность разделения механизмов АФН-эффекта на р-п- переходной и аномальный дембер-эффект. Апробация методики проведена для пленок CdTe.

Причиной приводящей к АФН-эффекту в пленках с периодическими р-п-р-переходами является сложение нескомпенсированных фотонапряжений в р-п- и п-р – переходах. Считается, что различие в значениях генерируемого фотонапряжения возникает либо из-за асимметричного освещения р-п- и п-р – переходов, либо из-за различия параметров этих переходов.

Изучая зависимость $V_{\text{АФН}}$ от угла падения света для пленок CdTe, полученных под различными углами осаждения (рис.5) показано, что на формирование АФН-эффекта вносят вклад как различие параметров р-п- и п-р – переходов, так и фактор асимметрии освещения.

В четвертой главе в рамках двухслойной модели АФН-эффекта рассматривается вопрос о функции генерации, АФН-эффект в полупроводниковых пленках с р-п- переходами и демберовская модель АФН-эффекта.



30° (1), 45° (2), 60° (3).

Рис.5. Угловая зависимость АФН-эффекта для плёнок CdTe, полученных при различных углах.

Развитая в этой главе теория АФН-эффекта является теорией фотовольтаического эффекта в полупроводниковых многослойных структурах с учетом конкретной конфигурационной модели АФН-пленки.

Введение понятия эффективного микрофотоэлемента дает возможность перейти от системы уравнений непрерывности к двум уравнениям при р-п-переходной, к одному при демберовской и к трем уравнениям при р-п-р-переходной модели и в соответствующих выражениях перейти от суммирования фотонапряжений по всем элементам к произведению генерируемого фотонапряжения эффективным микрофотоэлементом на их число.

Развита теория АФН-эффекта в полупроводниках с р-п- переходами (рис.6). Особое внимание уделено угловой зависимости и показано, что в этом случае не наблюдается инверсия знака фотонапряжения (рис. 7).

Демберовский механизм АФН-эффекта был привлечен потому, что направление диффузионного потока неравновесных носителей заряда определяет знак АФН и поэтому при переходе от освещения одной грани дендритных выступов к другой фотонапряжение меняет знак. Но аналитически эти предположения не были разработаны.

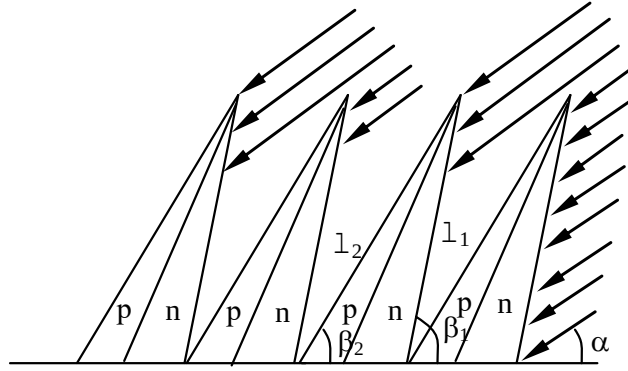
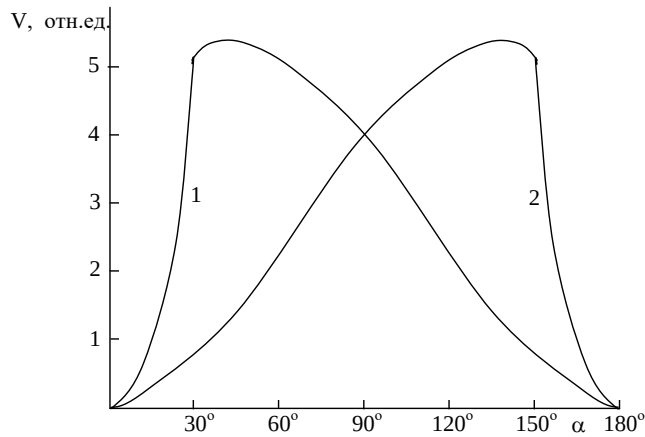


Рис.6. Освещение пленки с р-п-переходами.



$\beta_1=60^\circ, \beta_2=30^\circ$ (1), $\beta_1=150^\circ, \beta_2=120^\circ$ (2).

Рис. 7. Угловая зависимость АФН-эффекта в полупроводниковых пленках с р-п – переходами.

Получено аналитическое выражение для АФН-эффекта с демберовским механизмом в зависимости от подвижностей носителей заряда (b), скоростей поверхностных рекомбинации на освещаемой и тыльных гранях дендритов (S_1, S_2), длины диффузии (L), времени жизни (τ), коэффициента диффузии (D), скорости генерации (g) неравновесных носителей заряда, числа микрофотоэлементов (N), угла освещения пленки (α):

$$V = (N-1) \frac{kT}{q} \frac{b-1}{b+1} \ln \left[\frac{\left[\left(S_1 S_2 + \frac{D}{\tau} \right) Sh \frac{d}{L} + (S_1 + S_2) \frac{D}{L} ch \frac{d}{L} \right] \cdot [(bn_0 + p_0) + g_1 \tau (b+1)] -}{\left[\left(S_1 S_2 + \frac{D}{\tau} \right) Sh \frac{d}{L} + (S_1 + S_2) \frac{D}{L} ch \frac{d}{L} \right] \cdot [(bn_0 + p_0) + g_1 \tau (b+1)] -} \right. \\ \left. \times \frac{-g_1 \tau (b+1) \left[(S_1 + \kappa D) \left(\frac{D}{L} ch \frac{d}{L} + S_2 Sh \frac{d}{L} \right) + \frac{D}{L} (S_2 - \kappa D) \right]}{-g_1 \tau (b+1) \left[(S_1 + \kappa D) \frac{D}{L} + (S_2 - \kappa D) \left(\frac{D}{L} ch \frac{d}{L} + S_1 Sh \frac{d}{L} \right) \right]} \right] +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{kT}{q} \frac{b-1}{b+1} \ln \frac{\left[\left(S_1 S_2 + \frac{D}{\tau} \right) Sh \frac{d}{L} + (S_1 + S_2) \frac{D}{L} ch \frac{d}{L} \right] \cdot [(bn_0 + p_0) + g_3 \tau(b+1)] -}{\left[\left(S_1 S_2 + \frac{D}{\tau} \right) Sh \frac{d}{L} + (S_1 + S_2) \frac{D}{L} ch \frac{d}{L} \right] \cdot [(bn_0 + p_0) + g_3 \tau(b+1)] -} \times \\
& \times \frac{-g_3 \tau(b+1) \left[(S_1 + \kappa D) \left(\frac{D}{L} ch \frac{d}{L} + S_2 Sh \frac{d}{L} \right) + \frac{D}{L} (S_2 - \kappa D) \right]}{-g_3 \tau(b+1) \left[(S_1 + \kappa D) \frac{D}{L} + (S_2 - \kappa D) \left(\frac{D}{L} ch \frac{d}{L} + S_1 Sh \frac{d}{L} \right) \right]}
\end{aligned} \quad (12)$$

$$g_1 = g_0 \frac{\sin^2(\beta_1 - \beta_2)}{\sin^2 \beta_2} \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2(\beta_1 - \alpha)} \quad \text{при} \quad 0 \leq \alpha \leq \beta_2 \quad (12 a)$$

$$g_2 = g_0 \frac{\sin^2(\beta_1 - \beta_2)}{\sin^2 \beta_2} \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2(\alpha - \beta_2)} \quad \text{при} \quad \beta_1 \leq \alpha \leq \pi \quad (12 в)$$

$$g_3 = g_0 \sin(\beta_1 - \alpha) \quad \text{при} \quad \beta_2 \leq \alpha \leq \beta_1 \quad (12 c)$$

$$g_4 = g_0 \sin(\alpha - \beta_2) \quad (12 д)$$

Из полученного выражения следует, что при равенстве скоростей поверхностных рекомбинаций, когда пленка освещается слабо поглощаемым светом ($\kappa d \ll 1$), т.е. когда генерация происходит по всей толщине и при любом соотношении между κD и S_{12} аномальное фотонапряжение имеет инверсию знака (нормальный дембер-эффект) (рис.8 а).

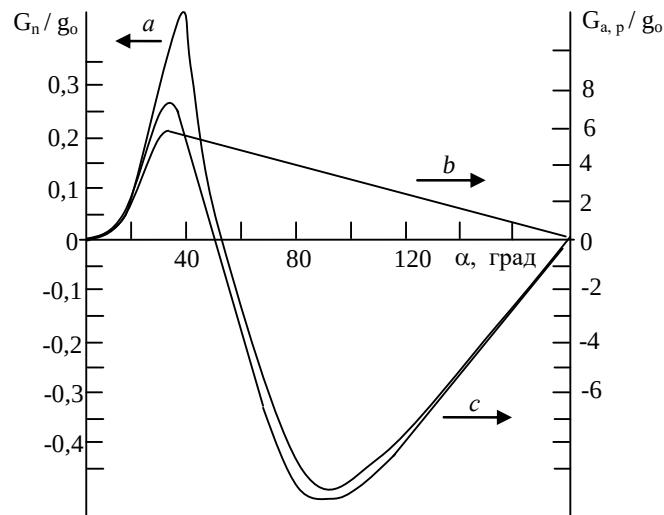


Рис. 8. Угловая зависимость нормального (а), аномального (б) и при переходе от аномального к нормальному (с) АФН-эффекту.

Из общего выражения следует, что при освещении образцов, у которых скорости поверхностных рекомбинаций граней равны ($S_1=S_2$), слабо поглощаемым ($\kappa d \ll 1$, $\kappa L \ll 1$) светом при выполнении условия $\kappa D \gg S_{1,2}$ фотонапряжение равно нулю.

В случае АФН-эффекта, возникающем при воздействии слабо поглощаемого монохроматического света, когда скорость поверхностной рекомбинации одной грани больше скорости поверхностной рекомбинации другой и при выполнении условия $S_1, S_2 \gg \kappa D$ в угловой зависимости не наблюдается инверсия знака фотонапряжения в пределах $0 \div 180^\circ$, т.е. наблюдается аномальный дембер-эффект (рис. 8 в).

Из общего выражения следует также, что переход к освещению коротковолновым монохроматическим светом приводит к инверсии знака фотонапряжения, т.е. аномальный дембер-эффект становится нормальным. При этом длина волны этого коротковолнового света должна быть таким, чтобы выполнялось условие $\kappa D > S_{1,2}$. Соотношение $\kappa D \gg S$ является критерием перехода аномального дембер-эффекта в нормальный. Ранее выполнение условия сильного поверхностного поглощения ($\kappa d \gg 1$) считалось достаточным. Результаты проведенного здесь анализа аналитического расчета показывают, что это условие является лишь необходимым, но недостаточным (рис.8 с).

На основе полученных выражений как пример рассчитаны зависимости от толщины, люкс-вольтовая зависимости АФН-эффекта (рис.9, 10).

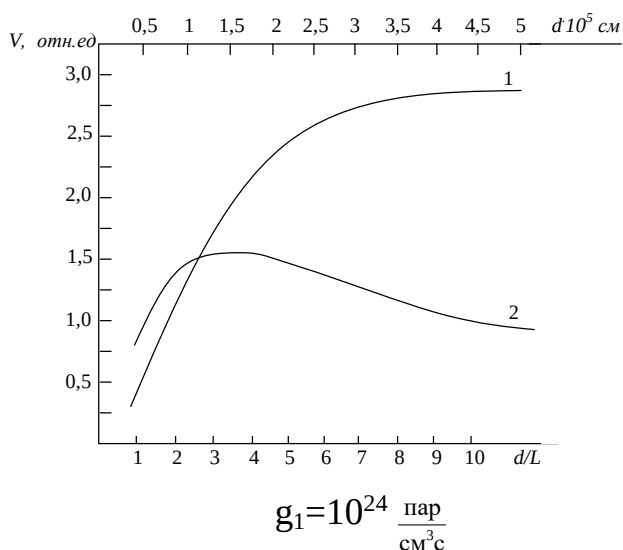


Рис. 9. Зависимость АФН-эффекта от толщины при переходе от аномального дембер-эффекта к нормальному (1), 2- зависимость АФН отнесенной к длине пленки.

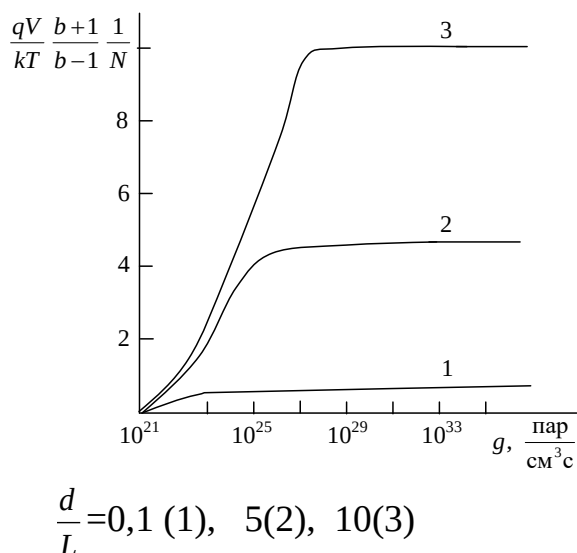


Рис. 10. ЛВХ при переходе от аномального дембер-эффекта к нормальному при различных толщинах пленки.

Сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей АФН от толщины пленок показывает, что на практике реализуется случай аномального дембер-эффекта и перехода аномального дембер-эффекта в нормальный.

В пятой главе рассмотрены особенности фотовольтаического эффекта в полупроводниках с р-п-р-переходами при неоднородном освещении.

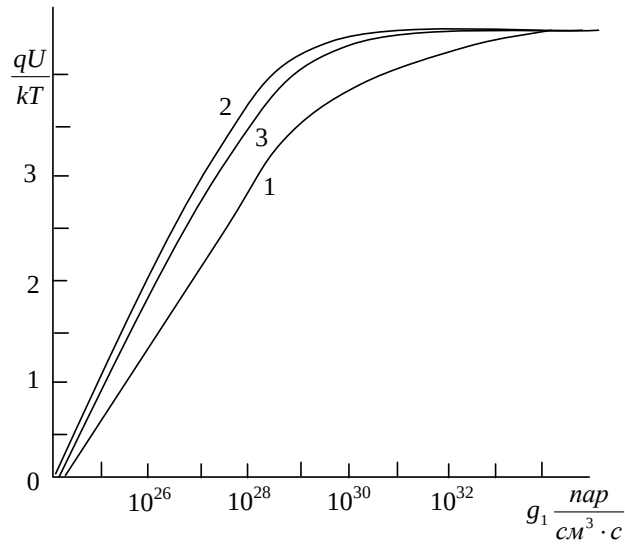
При рассмотрении случая однородного освещения объема образца возможные физические эффекты могут не выявляться. Поэтому фотовольтаический эффект в р-п-р-структуре и соответственно в многослойной структуре типа АФН-пленка рассмотрен для случая, когда генерация неравновесных носителей уменьшается с толщиной.

Получено общее аналитическое выражение

$$\begin{aligned}
 U = N & \left\{ \left\{ \left\{ \frac{kT}{q} \ln \left\{ 1 + \frac{1}{\frac{qL_h}{\tau_h} p_n \cosh \frac{\omega_n}{L_h} + \frac{qL_{e1}}{\tau_{e1}} n_{p1} \tanh \frac{\omega_{p1}}{L_{e1}} + \frac{qL_h p_n}{\tau_h} \cosh \frac{\omega_n}{L_h} \right. \right. \right. \right. \\
 & \times \left\{ \left(\exp\left(\frac{qU_2}{kT}\right) - 1 \right) \left(\frac{qL_h p_n}{\tau_h} \cosh \frac{\omega_n}{L_h} + \frac{qL_h p_n}{\tau_h} \cosh \frac{\omega_n}{L_h} + \frac{qL_{e2}}{\tau_{e2}} n_{p2} \tanh \frac{\omega_{p2}}{L_{e2}} \right) - \right. \\
 & - \frac{g_1(0)qL_{e1}}{\kappa^2 L_{e1}^2 - 1} \left[\kappa L_{e1} \left(1 - \exp(\kappa \omega_{p1}) \operatorname{sech} \frac{\omega_{p1}}{L_{e1}} \right) + \tanh \frac{\omega_{p1}}{L_{e1}} \right] + \\
 & + \frac{g_1(0)qL_h}{\kappa^2 L_h^2 - 1} \left(\kappa L_h + \exp(-\kappa \omega_n) \cosh \frac{\omega_n}{L_h} - \cosh \frac{\omega_n}{L_h} \right) + \\
 & + \frac{g_1(0)qL_h}{\kappa^2 L_h^2 - 1} \left(\kappa L_h \exp(-\kappa \omega_n) + \exp(-\kappa \omega_n) \cosh \frac{\omega_n}{L_h} - \cosh \frac{\omega_n}{L_h} \right) - \frac{g_1(0)qL_{e2} \exp(-\kappa(\omega_{p1} + \omega_n))}{\kappa^2 L_{e2}^2 - 1} \times \\
 & \times \left[\kappa L_{e2} - \kappa L_{e2} \exp(-\kappa \omega_{p2}) \operatorname{sech} \frac{\omega_{p2}}{L_{e2}} - \tanh \frac{\omega_{p2}}{L_{e2}} \right] \left. \right\} \left. \right\} - U_2 \left. \right\} \quad (13)
 \end{aligned}$$

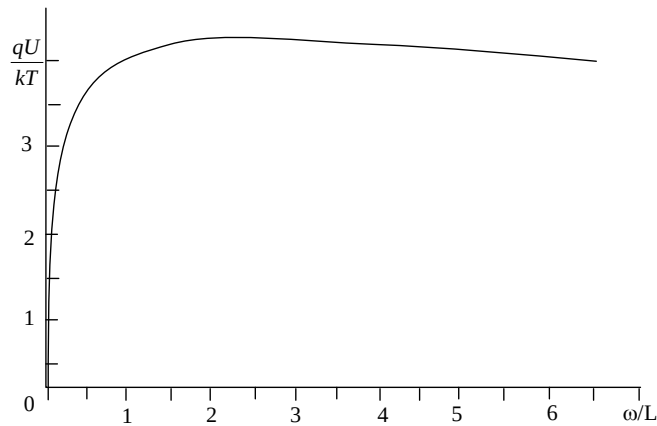
(L_{e1} , L_{e2} , ω_{p1} , ω_{p2} - длины диффузии и толщины первой, и второй р-области р-п-р-перехода, U_1 , U_2 - фотонапряжения, генерируемые на первом и втором барьерах соответственно) из которого как частный случай вытекает, что наблюдается нормальный фотовольтаический эффект, который характеризуется тем, что в угловой зависимости $V_{\text{АФН}}$ наблюдается инверсия (рис.8 а). Рассчитаны основные характеристики АФН-эффекта для р-п-р-переходной модели (рис.11, 12).

Рассмотрен случай однородного освещения и однородной генерации по объему образца. Из выражения (13), как частный случай неравномерного освещения следует, что при равномерном освещении батареи из N р-п-р-структур с идентичными р-п-и п-р-переходами и квазинейтральными областями фотонапряжение равно нулю.



$$\frac{\omega}{L} = 0,1 \text{ (1); } 1 \text{ (2); } 7 \text{ (3)}$$

Рис.11. ЛВХ нормального фотовольтаического эффекта в батарее р-п-р – переходов.



$$g_1 = 10^{28} \frac{\text{нар}}{\text{см}^3 \cdot \text{с}}; \quad g_2 = 10^{26} \frac{\text{нар}}{\text{см}^3 \cdot \text{с}}$$

Рис.12. Зависимость нормального фотовольтаического эффекта в батарее р-п-р – переходов от толщины пленок.

В случае, когда $L_{e1}th \frac{\omega_{p1}}{L_{e1}} \neq L_{e2}th \frac{\omega_{p2}}{L_{e2}}$ фотонапряжение не равно нулю. Из полученного выражения следует также, что фотонапряжение не имеет инверсии знака, причем при $L_{e1}th \frac{\omega_{p1}}{L_{e1}} > L_{e2}th \frac{\omega_{p2}}{L_{e2}}$ $U_1 > U_2$ при $L_{e1}th \frac{\omega_{p1}}{L_{e1}} < L_{e2}th \frac{\omega_{p2}}{L_{e2}}$ $U_1 < U_2$ и возникает АФН с другим – противоположным знаком.

Таким образом, в р-п-р-структуре и соответственно в АФН-пленке наблюдается явление аналогичное аномальному эффекту дембера в однородных

полупроводниках, т.е. знак генерируемого фотонапряжения не зависит от угла освещения. Этот эффект назван аномальным фотовольтаическим эффектом в р-п-р-структуре (рис.8 в).

Далее показано, что переход к освещению сильнопоглощаемым монохроматическим светом приводит к инверсии знака фотонапряжения в угловой зависимости АФН-эффекта:

$$V = N \frac{kT}{q} \ln \left(1 + \frac{g_1 L_{e1}}{\kappa D_{e1} n_{p01}} \right) \quad (14)$$

(рис.8 с), т.е. аномальный фотовольтаический эффект в р-п-р-структуре становится нормальным.

Как пример рассчитаны ЛВХ и зависимость АФН эффекта от толщины пленки для этого случая (рис.11, 12).

Сопоставление расчетных характеристик с экспериментальными данными показывает, что на практике реализуется случай нормального фотовольтаического эффекта в р-п-р-структуре.

В шестой главе развита теория фотоэлектретного состояния в однородных полупроводниках, технология получения и экспериментальные исследования фотоэлектретного состояния в АФН-пленках кремния, легированных серебром, предложена и апробирована методика определения параметров уровней прилипания.

Показана возможность и создана теория фотоэлектретного состояния в однородных полупроводниках с демберовским механизмом генерации фотонапряжения. Фотоэлектрет такого типа может быть создан, в отличие от традиционных, без внешнего поля, в результате одного лишь освещения. Поляризующим фактором, в данном случае, является различие подвижностей электронов и дырок.

Фотоэлектретное состояние в однородных микрофотоэлементах на основе эффекта Дембера наблюдается при неоднородной биполярной генерации электронно-дырочных пар, последующего их разделения за счет различия подвижностей электронов и дырок и прилипания неравновесных носителей заряда на глубокие уровни. Суммирование фотоэлектретных напряжений в многослойной структуре приводит к их существенным значениям.

Решая кинетическое уравнение и находя демберовское напряжение интегрированием напряженности поля Дембера, получен закон затухания, который в простейшем случае имеет экспоненциальный вид:

$$V = N \frac{kT}{qn_0} \frac{b-1}{b+1} \Delta n_0 \exp(-\tau_2 t / \tau_1 \tau'). \quad (15)$$

где τ' - время жизни свободного носителя, τ_1 – время жизни носителя на локальном

уровне, τ_2 – время захвата на уровень прилипания.

Показано, что для наблюдения фотоэлектретного состояния, время затрачиваемое на любой процесс, приводящий к увеличению концентрации неосновных на уровне прилипания должно быть намного меньше времени любого процесса приводящего к рекомбинации. При наличии в полупроводнике нескольких каналов убывания концентрации полное время жизни свободного неосновного носителя меньше наименьшего из времен жизни, соответствующего каждому каналу.

Приведена технология получения пленок с фотоэлектретным состоянием: термическим испарением Ag из алунодового и Si из тигеля BeO в вакууме 10^{-5} мм рт.ст., преимущественно на стеклянные подложки, предварительно обработанные в дистиллированной воде, ацетоне, спирте и просушенные на воздухе и прогретые в вакууме до 300°C . Тигель нагревался джоулевым теплом. Подложки нагреваются печкой вмонтированной в подложкодержатель. В подложкодержателе установленном напротив тиглей помещается 7,8 подложек, и он вращается от одного тигеля к другому специальной ручкой.

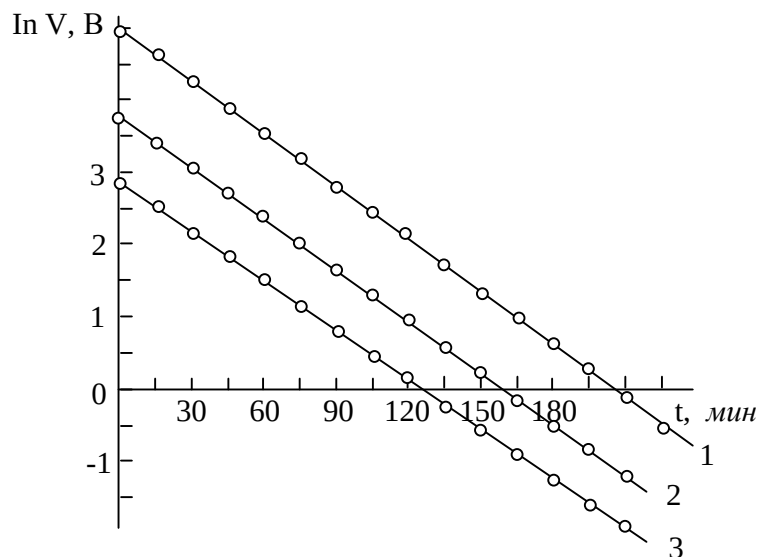
На стеклянную подложку, находящуюся под углом 45° относительно нормали размером $5 \cdot 10 \text{ мм}^2$ при температурах вариация которых находится в пределах $100 \div 400^\circ\text{C}$ напыляли Ag в течение 5-10 с. Масса напыляемой примеси при поиске оптимальной массы легирующей примеси находилось в пределах $0,01 \div 0,20$ от массы основного вещества. Далее температуру подложки и соответственно пленки поднимали до оптимальной температуры, и при этом происходила диффузия Ag в Si. Наиболее оптимальной температурой оказалась 350°C . Оптимальное время проведения диффузии при 350°C оказалось равным 5 мин.

Для проведения измерений полученным пленкам наносили омические контакты: обычно это Ag или Cu, нанесенные в сравнительно низком вакууме или серебряная паста; в основном в качестве контактов используется аквадаг. При этом, в силу больших значений фотоэлектретных напряжений контакты не влияли на характеристики пленок.

Пленка подключается к электрометру и освещается белым светом в течение нескольких минут. После такой фотополяризации электроды закорачивались на землю, и пленка несколько минут находилась в темноте. Когда один из электродов подключается к электростатическому вольтметру, в нем появлялось фотоэлектретное напряжение, значение которого, увеличиваясь со временем, достигает максимума и далее начинается медленная релаксация этого напряжения.

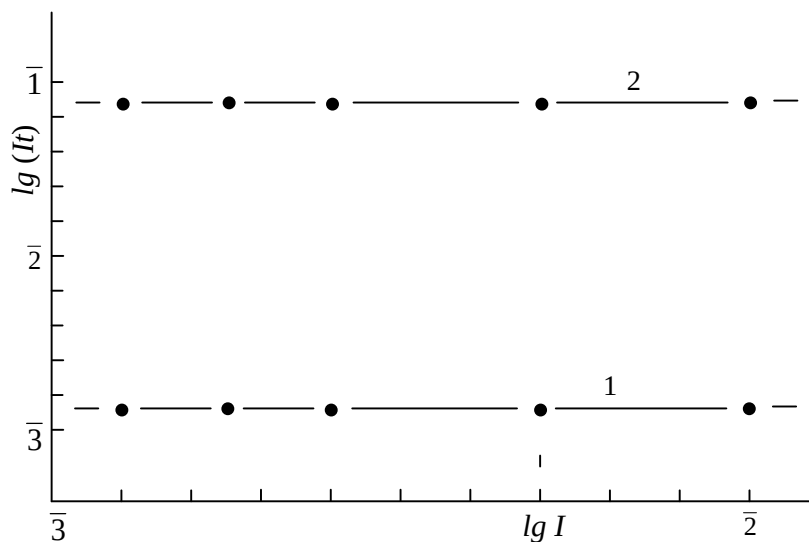
Величинами, характеризующими, фотоэлектретное состояние являются, для физики этого эффекта, значение фотоэлектретного напряжения и характеристическое время жизни неравновесных носителей заряда; в плане возможных применений опять-таки максимальное значение фотоэлектретного напряжения и время релаксации этого напряжения.

Для пленок Si:Ag максимальное значение $V_{\text{ФЭН}} \approx 250$ В, время релаксации ~ 220 мин, время жизни неравновесных носителей $40 \div 47$ с (рис.13).



1:образец 2-4; 2: 13-4; 3: 15-4

Рис. 13. Релаксация фотоэлектрического напряжения в пленках Si:Ag.



$V=160$ В (1), 200 В (2)

Рис.14. Изопаки фотополяризации пленок Si: Ag.

Изучение зависимости $\lg(It)$ от $\lg I$ показывает, что закон взаимозаместимости для пленок Si, легированных серебром практически выполняется в исследованных областях интенсивностей света (I) и времени (t) (рис.14).

При освещении в пленках кремния возбуждаются неравновесные носители заряда, и часть из них оседает на глубоких уровнях, создаваемых примесями

серебра. После выключения света происходит тепловая генерация носителей, локализованных на этих уровнях.

Показано, что по температурной зависимости времени релаксации фотоэлектретного напряжения, характеристического времени релаксации аномального фотонапряжения в нелегированных пленках снятых, как минимум, при двух различных температурах можно определить энергию активации и концентрацию примесей.

Этим методом, по-видимому, можно также определить параметры уровней прилипания в образцах, в которых отсутствует фотоэлектретное состояние, но ощутимы влияния глубоких уровней на релаксационный процесс.

Таким образом, параметры уровней определяются именно с помощью эффекта, к которому эти уровни приводят. Это дает возможность, в данном случае, исключения случаев приписки того или иного явления к уровням, за которые они неответственны.

Установлено, что в пленках кремния фотоэлектретное состояние создается примесями серебра энергиями активации $E_c=0,3\text{эВ}$ и концентрацией 10^{22} м^{-3} .

В седьмой главе развита теория фотоэлектретного состояния в р-п-переходных структурах с двумя глубокими уровнями, технология получения, экспериментальные исследования фотоэлектретного состояния, методика определения параметров уровней прилипания АФН-пленок теллурида кадмия, легированных серебром.

Фотоэлектретное состояние без внешнего поляризующего поля наблюдался в пленках ряда полупроводников генерирующих аномально-большие фотонапряжения, причем в пленках одних полупроводников релаксация фотонапряжения происходит с одним характеристическим временем релаксации, в других двумя [11-14]. Для объяснения этих экспериментальных результатов, а также для дальнейшего развития теории [11] показана возможность и разработана теория фотоэлектретного состояния в р-п-переходных структурах с двумя глубокими уровнями.

Решая систему кинетических уравнений, получен закон затухания. Показано, что в частном случае зависимость фотонапряжения от времени, в основном, описывается выражением

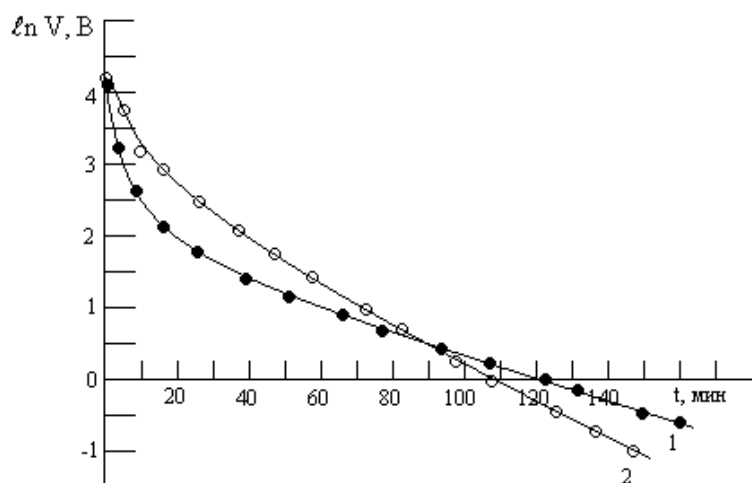
$$V=V_{01}\exp(-t/\tau^*_1)+ V_{02}\exp(-t/\tau^*_2) \quad (16)$$

где V_{01} , τ^*_1 , V_{02} , τ^*_2 - максимальные фотоэлектретные напряжения и времена релаксации связанные с первым и вторыми уровнями. Разработана и апробирована методика определения этих величин по релаксационным кривым.

Определены условия, при которых в формировании фотоэлектретного напряжения участвуют оба уровня и условия, при которых фотоэлектретное состояние обусловлено только одним уровнем. Когда время жизни электрона на локальном уровне, больше времени жизни свободного электрона, определяемого

рекомбинацией, уходом из р-п – области и когда эти величины (отдельно взятые) превышают время захвата на уровень прилипания, то этот уровень участвует в создании фотоэлектретного состояния. Если это условие выполняется для обоих уровней двухуровневой системы, то в формировании фотоэлектретного состояния участвуют оба уровня. При выполнении этого условия только для одного уровня фотоэлектретное состояние обусловлено только одним уровнем, хотя система двухуровневая. Локализованные на пассивном уровне носители заряда практически не влияют на кинетику фотонапряжения и не приводят к фотоэлектретному состоянию.

Выбор материала исследования обусловлен тем, что для пленок теллурида кадмия принят р-п-переходной механизм АФН-эффекта и то, что в системе CdTe:Ag было обнаружено фотоэлектретное состояние [13, 14], которое хорошо объясняется развитой здесь теорией фотоэлектретного состояния в р-п-переходных структурах с двумя глубокими уровнями. Но, отсутствие, к сожалению, некоторых экспериментальных данных, не позволило обойтись без воспроизведения и разработки технологии получения пленок CdTe:Ag с фотоэлектретным состоянием, проведения измерений релаксационных характеристик при различных температурах и концентрациях примесей. Приведена технология получения пленок CdTe и легирования серебром. Определены оптимальные режимы, при которых добываются поставленные цели.



№12-4 (1), 2 [14]

Рис.15. Релаксация фотоэлектретного напряжения в плёнках CdTe:Ag.

Методика измерений такая же, как и в случае исследования пленок Si:Ag.

На основе построенных изоопак можно заключить, что закон взаимозаместимости, необходимое и достаточное для фотоэлектретного состояния в пленках CdTe:Ag выполняется.

Релаксационная кривая, приведенная в полулогарифмических координатах состоит из двух линейных участков (рис.15). Начальный участок, где

фотоэлектретное напряжение падает сравнительно быстро, соответствует более мелкому уровню и описывается, в основном, первым слагаемым выражения (16), хотя в релаксационном процессе участвует и второй уровень его вклад в общее фотоэлектретное напряжение сравнительно меньше первого. Такая ситуация продолжается до $t = \tau_1^*$, начиная с которого вклад обоих уровней одного порядка (переходная область). Далее концентрация неравновесных носителей заряда, генерируемые теплом со второго уровня больше, чем с первого; кривая переходит на вторую прямую и V определяется вторым слагаемым выражения (16).

Определены основные характеристики релаксационного процесса: $V_{01} = 54$ В, $V_{02} = 16$ В, $\tau_1 \approx 12$ мин, $\tau_2 \approx 42$ мин.

Далее предлагается методика определения параметров уровней прилипания на основе изучения релаксационных характеристик АФН-эффекта и фотоэлектретного напряжения, как минимум при двух температурах в р-п-переходных структурах с двумя глубокими уровнями.

Так, найденное значение энергии активации первого уровня равно $E_c - 1,18$ эВ, а концентрация примесей $M_1 = 3,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Энергия активации второго уровня оказалось равной $E_c - 1,35$ эВ, а концентрация примесей $M_2 = 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

В восьмой главе рассматриваются вопросы расширения возможных применений АФН-пленок.

Задача создания датчика магнитного поля привела к разработке технологии получения, активации АФМН-пленок и экспериментальному исследованию характеристик АФМН- эффекта в этих пленках.

Для уменьшения скорости поверхностной рекомбинации, а значит и потери на рекомбинацию, проведена активация приповерхностных областей окружающих зёрна пленок CdTe, легированием кремнием, используя то обстоятельство, что коэффициент диффузии примесных атомов по границам зёрен намного больше чем по объему. В вакууме для напыления теллурида кадмия и кремния установлены два тигеля. Сначала на подложку осаждается кремний, а затем в течение 40 мин. CdTe. После этого температура подложек поднималась до 240°C (оптимальная температура активации) и держалась ~ 20 мин. для осуществления диффузии кремния в плёнку теллурида кадмия. Выяснено, что наиболее оптимальным является $0,2 \div 0,5\%$ массы легирующей примеси кремния от массы теллурида кадмия. Активированные АФМН-пленки CdTe генерируют фотомангнитные напряжения как линейно зависящие от интенсивности света, так и имеющие сублинейную область и область с насыщением. Эрстед-вольтовые характеристики активированных АФМН-пленок CdTe имеют линейный характер. Магниточувствительность АФМН-пленок CdTe доходила до 6 мВ/Э.

Таким образом, с помощью активации основанной на особенностях диффузии в поликристаллических структурах можно увеличить магниточувствительность АФМН-пленок CdTe.

Высокая чувствительность, линейность эрстед-вольтовых характеристик позволили, построить датчик магнитного поля на основе полученных пленок. При этом были использованы пленки, люкс-вольтовая характеристика которых быстро выходит на насыщение, что обеспечивает нечувствительность этих датчиков к изменению освещенности.

Был построен также датчик перемещений. В рамках этой задачи основное усилие было направлено не только на получение пленок с высоким АФН, но и на то, чтобы он был равномерно распределен на всем участке межэлектродного расстояния. Технология получения пленок с равномерной толщиной описана в гл. II. Построенный датчик имеет линейный сигнал на выходе, чувствительность 25 В/мм и проста по конструкции.

На основе изучения фотоэлектрических свойств пленок кремния и теллурида кадмия, легированных серебром построены два типа элементов памяти: элемент памяти света и элемент памяти электрического поля.

Показана возможность определения уровня жидкостей с помощью АФН-пленок.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследованы и апробированы технологические методы создания полупроводниковых пленок, обладающих АФН-эффектом, позволяющие получать структуры с высокой однородностью по толщине, воспроизводимые по своим характеристикам и обладающие высокой магниточувствительностью.

2. Предложен и апробирован метод определения характеристических микропараметров пленок с помощью спектральных зависимостей АФН- и АФМН-эффектов.

3. Найдено аналитическое выражение для распределения косоосажденных пленок по толщине, устанавливающее связь между толщиной и местонахождением рассматриваемой точки пленки. Показано, что распределение толщины осаждаемой пленки очень чувствительно к углу отклонения подложки от нормали. С увеличением угла отклонения увеличивается максимальное значение толщины; максимум толщины сдвигается в сторону больших значений длины подложки; нарушается симметрия относительно максимального значения толщины.

4. Исследование спектральных зависимостей АФН-эффекта позволяет определить механизмы и выбор модели для описания наблюдаемых явлений.

5. Показано, что определение соотношения скоростей поверхностной рекомбинации освещаемой и тыльных поверхностей с помощью АФМН-эффекта в области $kd \ll 1$ дает возможность разделения механизмов АФН-эффекта на р-п-переходной и аномальный дембер-эффект.

6. Показано, что на формирование АФН-эффекта в пленках CdTe вносят вклад как различие параметров р-п- и п-р-переходов, так и фактор асимметрии

освещения, в отличие от известных работ, в которых АФН объяснялся либо первой, либо второй причиной;

7. Установлено, что кинетика нарастания и спада аномального фотонапряжения в полупроводниках с однородными микрообластями описываются выражениями, идентичными выражениям для р-п- переходов, отличаясь лишь абсолютными значениями.

8. Получено аналитическое выражение для генерируемого аномального фотонапряжения с р-п- переходным механизмом, из которого, в частности, следует, что в угловой зависимости АФН- эффекта отсутствует инверсия знака как при освещении белым, так и при монохроматическим светом из области сильного поверхностного поглощения.

9. Разработана теория АФН- эффекта с демберовским механизмом в полупроводниковых пленках. Особое внимание уделено теории угловой зависимости АФН как основной характеристики АФН-эффекта, ввиду отсутствия таковой в предыдущих работах, хотя имеются многочисленные экспериментальные данные. Получено общее аналитическое выражение, из которого как частный случай получаются нормальный, аномальный дембер-эффекты. Показано, что для реализации последнего при освещении светом слабого поглощения, генерации неравновесных носителей по всему объему ($k_d \ll 1$, $k_L \ll 1$) должно выполняться и условие $kD \ll S$, которое является более жестким и зависимым от конкретных параметров пленки. Показано, что при переходе к освещению сильно поглощаемым монохроматическим излучением аномальный дембер-эффект переходит в нормальный. Показано, что при этом должно выполняться не только $k_d \gg 1$, $k_L \gg 1$, которые ранее считались достаточными, но и $kD \gg S$, который является более жестким и связанным с конкретными параметрами пленки.

10. Показано, что в р-п-р-структуре и АФН-плёнке с р-п-р-переходами наблюдается явление, аналогичное аномальному эффекту дембера в однородных полупроводниках, т.е. знак генерируемого фотонапряжения не зависит от угла освещения. Этот эффект назван аномальным фотовольтаическим эффектом в р-п-р-структуре и АФН-плёнке. Получено аналитическое выражение для фотонапряжения в р-п-р-структуре и АФН-плёнке с р-п-р-переходами при неоднородном освещении, из которого в частном случае получаются нормальные, аномальные фотовольтаические эффекты и переход аномального фотовольтаического эффекта в нормальный в случае сильного поверхностного поглощения света, поверхностной генерации неравновесных носителей, объясняющая экспериментальные результаты (угловую зависимость АФН-эффекта, ЛВХ, зависимость АФН от толщины) в CdTe, в отличие от других работ, в которых полностью отсутствовали теории угловой зависимости АФН-эффекта; ЛВХ была линейной.

11. Показана возможность образования и создана теория фотоэлектретного состояния в полупроводниках с демберовским механизмом генерации

фотонапряжения, где поляризующим фактором является различие подвижностей электронов и дырок, и в р-п- переходных структурах с двумя глубокими уровнями. Выяснена роль каждого уровня в формировании фотоэлектретного напряжения. Показано, что фотоэлектретное напряжение релаксирует с двумя характеристическими временами. Начальный участок, где фотоэлектретное напряжение падает сравнительно быстро, соответствует более мелкому уровню. Далее концентрация неравновесных носителей заряда, генерируемые теплом со второго уровня больше чем с первого и фотоэлектретное напряжение определяется вторым - более глубоким уровнем; найдены критерии участия каждого уровня в создании фотоэлектретного напряжения; показано, что когда время жизни электрона на локальном уровне, больше времени жизни свободного электрона, определяемого рекомбинацией, уходом из р-п – области и когда эти величины (отдельно взятые) превышают время захвата на уровень прилипания, то этот уровень участвует в создании фотоэлектретного состояния. Если это условие выполняется для обоих уровней двухуровневой системы, то в формировании фотоэлектретного состояния участвуют оба уровня. При выполнении этого условия только для одного уровня фотоэлектретное состояние обусловлено только одним уровнем, хотя система двухуровневая. Локализованные на пассивном уровне носители заряда практически не влияют на кинетику фотонапряжения и не приводят к фотоэлектретному состоянию.

Показано, что время, затрачиваемое на любой процесс, приводящий к увеличению концентрации электронов (дырок) на акцепторном (донорном) уровне, должно быть намного меньше времени любого процесса приводящего к рекомбинации.

12. Найдены технологические режимы получения АФН-пленок Si и CdTe, посредством легирования Ag достаточной концентрации ($\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ Ag в Si, $\sim 10^{18}$, $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ Ag в CdTe), позволяющие реализации фотоэлектретного состояния без внешнего поляризующего поля.

Показано, что в легированных АФН- пленках кремния и теллурида кадмия выполняется обязательный для фотоэлектретного состояния закон взаимозаменяемости.

13. Предложена методика определения энергии активации и концентрации примесей в АФН - пленках с демберовским механизмом и в р-п- переходных структурах с двумя глубокими уровнями, ответственных за фотоэлектретное состояние с помощью релаксационных кривых.

Таким образом, параметры уровней определяются именно с помощью эффекта, к которому эти уровни приводят. Это дает возможность, в данном случае, исключения случаев приписки того или иного явления к уровням, за которые они неответственны.

Установлено, что в пленках Si фотоэлектретное состояние создается примесями серебра энергиями активации $E_c - 0,3 \text{ эВ}$ с концентрацией 10^{16} см^{-3} и в пленках CdTe примесями серебра энергиями активации $E_c - 1,18 \text{ эВ}$, $E_c - 1,35 \text{ эВ}$ и концентрациями $3,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ соответственно.

14. Полученные экспериментальные результаты и технологические приемы изготовления пленок с АФН-, АФМН- эффектами и фотоэлектретным состоянием могут быть использованы для построения ряда датчиков и элементов оптоэлектронных устройств. Создано устройство для измерения перемещений. Датчик магнитного поля на основе полученных пленок имеет высокую магниточувствительность и линейную эрстед-вольтовую характеристику. Построены два типа элементов памяти: элемент памяти света и элемент памяти электрического поля. Показано, что с помощью АФН-пленок можно измерить уровень жидкостей.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адирович Э.И., Матов Э.М., Мирзамахмудов Т.М. и др. Аномально большие фотоэлектрический и фотоманитный эффекты в полупроводниковых плёнках// Сб. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и оптоэлектроника. –Ташкент. Изд. ФАН, 1972. -С.143-229.
2. Юабов Ю.М. Полупроводниковые плёнки с аномально большими фотонапряжениями: Автореф.дис. ... канд.физ.-мат.наук. –Ташкент.: ФТИ АН РУз, 1965, -22 с.
3. Мирзамахмудов Т. Аномально высокое фотонапряжение в полупроводниковых пленочных системах и принципы создания новых оптоэлектронных приборов; Дис док.физ.–мат.наук.–Фергана.: ФерПИ. 1978.–321с.
4. Шакиров Н. Кинетика и характеристические времена АФН-эффекта в полупроводниковых пленках с микро- р-п-переходами; Дис. ... канд.физ.-мат.наук. –Ташкент.: ФТИ АН РУз, 1970. -125 с.
5. Матов Э.М. Исследование аномально большого фотоманитного эффекта в пленках теллурида кадмия; Дис. ... канд.физ.-мат.наук. –Ташкент.: ФТИ АН РУз, 1973. -110 с.
6. Абдуллаев Н. Аномальные физические явления в многобарьерных пленочных структурах в условиях внешних воздействий; Дис. ... докт.физ.-мат.наук. –Ташкент.: ТГТУ. 1991, -333 с.
7. Дошанов К.М. Механизм АФН-эффекта в поликристаллических полупроводниках//ФТП. –Санкт-Петербург, 1990. -№7(24). -С.1251-1258.
8. Агарев В.Н., Степанова Н.А. К теории эффекта аномального фотонапряжения в многослойных структурах с р-п-переходами// ФТП. –Санкт-Петербург, 2000. -№4 (34).-С. 452-455.

9. Отажонов С.М. Аномальные фотоэлектрические явления в полупроводниковых структурах из соединений A_2B_6 с глубокими примесными уровнями: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук, -Ташкент: ФТИ, АН РУз, 2006. -33 с.
10. Агарев В.Н., Стафеев В.И. Нестационарный фотомагнитный эффект в многослойных структурах с р-п-переходами//ФТП. –Санкт-Петербург, 2000. -№9 (34).–С.1103-1104.
11. Адирович Э.И. Фотоэлектретное состояние в полупроводниках с р-п-переходами// ФТП. –Санкт-Петербург, 1970. -№4 (4).-С.745-753.
12. Ковальский П.Н., Шнейдер. Фотоэлектретный эффект в полупроводниках. –Львов: Вища школа, 1977. -150 с.
13. Эргашев Дж.Э. Фотополяризация в АФН-пленках теллурида кадмия ($CdTe:Ag$) с микро п-р-переходами // ФТП. –Санкт-Петербург, 1978. -№1 (12).-С.171-174.
14. Фридкин В.М., Мирзамахмудов Т., Эргашев Дж.Э. Фотоэлектретное состояние в АФН-пленках $CdTe$, активированных серебром// ЖНИПФИК. –Москва, 1978. -№5.-С.327-330.

4. СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Статьи, опубликованные в научных журналах:

1. Набиев Г.А. О механизмах эффекта аномально-больших фотонапряжений в пленках CdTe//ФТП. – Санкт-Петербург, 2009. -№7(43). –С.926-927.
2. Набиев Г.А. Определение механизмов генерации фотонапряжения в полупроводниковых пленках с помощью спектральных зависимостей коэффициента поглощения и фотонапряжения//ФТП. –Санкт-Петербург, 2009. -№7(43). –С.924-925.
3. Набиев Г.А. Фотоэлектретное состояние без внешнего поляризующего поля в термообработанных пленках кремния//Украинский физический журнал. –Киев, 2008. -№12(53). –С.1175-1177.
4. Набиев Г.А. Особенности фотовольтаического эффекта в многослойных полупроводниках с р-п-р-переходами при неоднородном освещении//Физическая инженерия поверхности. -Харьков, 2008.-№3-4(6). -С.202-209.
5. Набиев Г.А. Об условии квазистационарности для фотоэлектретного состояния//Естественные и технические науки. –Москва. 2008. –№4(36). –С.46–47.
6. Набиев Г.А. Кинетика АФН-эффекта в полупроводниковых пленках с однородными микрофотоэлементами// Естественные и технические науки. –Москва. 2008. –№4(36).–С.43–45.
7. Набиев Г.А. Технология получения датчика магнитного поля на основе пленок CdTe// Eastern-European journal of Enterprize Technologies. –Харьков, 2008.-4/6(34). -С.45-47.
8. Набиев Г.А. Определение параметров уровней прилипания, ответственных за фотоэлектретное состояние в пленках теллурида кадмия// Физическая инженерия поверхности.-Харьков, 2008.-№1-2(6).-С.89-92.
9. Мирзаева З.И., Набиев Г.А., Эргашов К.М. Фотоэлектретное состояние без внешнего поляризующего поля в однородных полупроводниках// Физическая инженерия поверхности. –Харьков, 2008.-№1-2(6).-С.65-70.
10. Набиев Г.А. Теория АФН-эффекта с дембировским механизмом в полупроводниковых пленках// Физическая инженерия поверхности. –Харьков, 2008.-№1-2(6).-С.51-58.
11. Набиев Г.А. Фотоэлектретное состояние без внешнего поляризующего поля в пленках Si: Ag// Письма в ЖТФ.–Санкт-Петербург. 2007.–№20 (33).-С. 1-4.
12. Nabiev G.A. Determination of capture levels parametrs responsible for photoelectret state in cadmium telluride films// Proceedings of SPIE. –Washington, 2007. -V.6636. –P.321–324.
13. Nabiev G.A. About mechanisms of anomalous photovoltage effect in CdTe films// Proceedings of SPIE. –Washington, 2007. –V.6636. –P.251-252.

14. Набиев Г.А. Аномальный фотовольтаический эффект в р-п-р – структуре//Естественные и технические науки. -Москва.2006.-№5.-С.26-28.
15. Набиев Г.А. Аномальный фотовольтаический эффект в р-п-р – структуре//Научно-технический журнал ФерПИ. –Фергана, 2006. -№2. -С.13-17.
16. Набиев Г.А. Определение параметров уровней прилипания в пленках теллурида кадмия, легированных серебром//Научно-технический журнал ФерПИ. –Фергана, 2005. -№3. -С.15-18.
17. Набиев Г.А. Определение параметров уровней прилипания в плёнках кремния, легированных серебром//Научно-технический журнал ФерПИ. –Фергана, 2005. -№2. -С.10-13.
18. Набиев Г.А. Об условии квазистационарности для фотоэлектретного состояния//Научно-технический журнал ФерПИ. –Фергана, 2005. -№1. -С.82-83.
19. Набиев Г.А. Фотоэлектретное состояние в р-п-переходных структурах с двумя глубокими уровнями//Научно-технический журнал ФерПИ. -Фергана, 2004. -№4. –С.11-15.
20. Набиев Г.А. Фотоэлектретное состояние в однородных полупроводниках//Научно-технический журнал ФерПИ. –Фергана, 2004. -№3. -С.11-15.
21. Набиев Г.А. Кинетика аномального фотонапряжения в полупроводниках с однородными микрофотоэлементами//Научно-технический журнал ФерПИ. –Фергана, 2004. -№2. -С.131-132.
22. Набиев Г.А. Релаксация аномального фотонапряжения в пленках CdTe// Научно-технический журнал ФерПИ. –Фергана, 2004. -№1. –С.106-107.
23. Набиев Г.А. АФН-эффект в полупроводниковых пленках с потенциальными барьерами//Научно-технический журнал ФерПИ. –Фергана, 2002. -№4. -С.3-7.
24. Набиев Г.А. Устройство для измерения линейных перемещений и угловых поворотов на основе АФН-пленок//Научно-технический журнал ФерПИ. –Фергана, 2002. -№2. -С.96-97.
25. Набиев Г.А. Дискриминация механизмов АФН-эффекта в полупроводниковых пленках на р-п-переходной и аномальный дембер-эффект// Научно-технический журнал ФерПИ. –Фергана, 2002. -№3. -С.106-107.
26. Набиев Г.А. Фотоэлектретный эффект без внешнего поляризующего поля в пленках Si:Ag//Научно-технический журнал ФерПИ. –Фергана. 2001. -№2. -С.94-96.
27. Набиев Г.А. Спектральные характеристики АФН-эффекта в полупроводниковых пленках//Научно-технический журнал ФерПИ. –Фергана, 2001. -№3. -С.17-23.
28. Набиев Г.А. Фотоэлектретный эффект без внешнего поляризующего поля в пленках CdTe:Cu// Научно-технический журнал ФерПИ. –Фергана, 2001. -№1. -С.83-84.

29. Набиев Г.А. О механизмах АФН-эффекта в пленках CdTe//Научно-технический журнал ФерПИ. 2000. –Фергана, -№3/4. -С.110-111.
30. Набиев Г.А. Фотоэлектретное состояние в термообработанных пленках кремния//Научно-технический журнал ФерПИ. 2000. –Фергана, -№2. -С.112-114.
31. Набиев Г.А. Теория АФН-эффекта в полупроводниковых пленках с демберовским механизмом//Научно-технический журнал ФерПИ. –Фергана, 2000. -№1. -С.13-18.
32. Набиев Г.А. Технология получения пленок CdTe с увеличенным и равномерно-распределенным фотонапряжением//Научно-технический журнал ФерПИ.1999. –Фергана, - №1.-С.98-100.
33. Набиев Г.А. К определению числа микрофотоэлементов в АФН-пленках//Научно-технический журнал ФерПИ. –Фергана, 1998. -№3/4. -С.95-97.
34. Набиев Г.А. Распределение косоосажденных пленок по толщине// Гелиотехника. –Ташкент, 1998. -№3. -С.82-84.
35. Набиев Г.А. Определение уровня жидкостей с помощью АФН-пленок. Научно-технический журнал ФерПИ. - Фергана, 1998. -№1. -С.98-100.
36. Набиев Г.А. Влияние термообработки на угловую зависимость АФН-эффекта в пленках Si//Узбекский физический журнал–Ташкент, 1996. -№4. -С.84-86.
37. Набиев Г.А. Угловая зависимость АФН-эффекта в полупроводниковых пленках с р-п-переходами//Узбекский физический журнал. –Ташкент, 1995. -№1 - С.38-40.
38. Набиев Г.А. Многослойные структуры на основе теллурида кадмия с высокой магниточувствительностью//Известия АН РУз, сер.ф.-м.н. –Ташкент, 1989. –№4. -С.79-81.
39. Хашимов Г., Набиев Г.А. Угловая зависимость АФН-эффекта в полупроводниковых пленках//Известия АН РУз, сер.ф.-м.н. –Ташкент,1988. -№6. -С.59-63.
40. Набиев Г.А. Влияние поверхностной утечки зарядов на ВАХ полупроводниковых диодов//Известия АН РУз, сер.ф.-м.н. –Ташкент, 1988. -№5. -С.84-86.
41. Абдуназаров А., Набиев Г.А. АФМН-эффект в некоторых полупроводниковых пленках//Известия АН РУз, сер.ф.-м. –Ташкент, 1982. -№2. -С.68.

Статьи в сборниках научных трудов, тезисы, депонированные научные работы:

42. Nabiev G.A. The photo–electret state in homogeneous semiconductors// Proceedins of УСЕУС. Korea and Uzbekistan. 2008. -Р.330–334.
43. Набиев Г.А. Определение параметров уровней прилипания, ответственных за фотоэлектретное состояние в плёнках CdTe. XIX международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Тез.докл. -Москва. 2006.- С. 210 – 211.

44. Набиев Г.А. О дискриминации механизмов АФН-эффекта в пленках CdTe. XIX международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Тез.докл. -Москва. 2006. –С.214 – 215.
45. Набиев Г.А., Тешабоева А.Р. АФН-эффект в полупроводниковых пленках с барьерным и демберовскими механизмами//Фотоэлектроника и приборы ночного видения: Тезисы международной конференции. ГНЦ РФ ФГУП “НПО” “Орион”. –Москва. 2004 . –С.170.
- Nabiev G.A., Teshaboeva A.R. Features of APV Effect in Semiconductor Films with Dember and Barrier Mechanisms//XVIII International Scientific and Engineering Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices. –Moscow. 2004. -P.154-155.
46. Набиев Г.А. Фотоэлектретный эффект без внешнего поляризующего поля в полупроводниковых пленках//Фотоэлектроника и приборы ночного видения: Тезисы международной конференции. ГНЦ РФ ФГУП “НПО” “Орион”. –Москва. 2004 . –С.160-161.
- Nabiev G.A. Photoelectret Effect without the External Polarizing Field in Semiconductor Films//XVIII International Scientific and Engineering Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices. -Moscow, 2004, - P.147-148.
47. Nabiev G.A. Photoelectret effect in homogeneous semiconductors//8 th International Conference Solid State Physics: -Almaty, 2004. –P.243-244.
48. Набиев Г.А. Влияние ионной бомбардировки на свойства АФН-пленок кремния// ВИП-2003.Материалы международной конф. -Москва. 2003. -С.83-85.
49. Набиев Г.А.Фотоэлектретное состояние в пленках кремния с примесью серебра//Наманган Давлат Университети илмий ахборотлари. –Наманган, 2001. -№3. -С.76.
50. Набиев Г.А. Угловая зависимость АФН-эффекта в пленках Si//Наманган Давлат Университети илмий ахборотлари. –Наманган, 2001. -№3. -С.66.
51. Набиев Г.А. К теории фотоэлектретного состояния в пленках GaAs с имплантированными ионами лития//Взаимодействие ионов с поверхностью: Материалы пятнадцатой международной конференции. ВИП-2001. -Москва. 2001. -Т2. -С.159.
52. Набиев Г.А. О механизме генерации АФН в полупроводниковых пленках//Техника фанлари ва XXI аср глобал муаммолари. Республика профессор-укутувчиларининг илмий-амалий анжумани туплами. 3-қисм. -Ташкент, ТДТУ. 2001. –С.120.
53. Набиев Г.А. Фотоэлектретный эффект без внешнего поляризующего поля в пленках CdTe:Cu. Техника фанлари ва XXI аср глобал муаммолари: Республика профессор-укутувчиларининг илмий-амалий анжумани туплами. –Ташкент. ТДТУ. 2001. 3-қисм. –С.104-105.
54. Набиев Г.А. Элементы памяти на основе пленок Si. Проблемы производства поли- и монокристаллов кремния для микроэлектроники и солнечной энергетики. Материалы международной конференции. –Андижон. 2000. -С.58.

55. Набиев Г.А. Датчики магнитного поля на основе пленок CdTe:Si// Инновация-2000 Халқаро илмий анжуман тезислари - Бухоро, 2000. -С.344-345
56. Набиев Г.А. О дискриминации механизмов АФН-эффекта в полупроводниковых пленках// Фото-, тензо-и термоэлектрические явления в полупроводниковых пленках. Тез. докл. международной конференции. -Фергана. ФерГУ. 1999. -С.14.
57. Набиев Г.А. О механизме АФН-эффекта в полупроводниковых фотопреобразователях//Техника ва технологиянинг ноанъанавий усулларида фойдаланиш: Республика илмий-амалий конференция материаллари. -Фергана. 1999. -С.112.
58. Набиев Г.А. Угловая зависимость АФН-эффекта в термообработанных пленках кремния. Актуальные проблемы физики полупроводниковых приборов. Сб. трудов международной конференции. -Ташкент. 1997. -С.51-52.
59. Набиев Г.А. Теория АФН-эффекта в полупроводниковых пленках с р-п-переходами//Ярим утқазгичлар ва диэлектриклар физикасининг ҳозирги замон муаммолари:Халқаро илмий анжуман тезислари. -Ташкент. 1995. -С.37.
60. Набиев Г.А. Теория АФН-эффекта в полупроводниковых пленках с р-п-переходами//Мирзо Улугбек таваллудининг 600 йиллигига бағишланган Республика илмий-амалий конференция докладлари тезислари. -Гулистон. 1994.1-кисм. 94 б.
61. Набиев Г.А. Угловая зависимость АФН-эффекта в полупроводниковых пленках//Международное совещание по фотоэлектрическим и оптическим явлениям в твердом теле: Тез.докл. -Варна. 1989. -С.79.
62. Набиев Г.А. Спектры фотовольтаического эффекта в полупроводниковых пленках –Москва, 1988. -22 с. -Деп. в ВИНТИ 14.06.88 №4677-В88.
63. Набиев Г.А. Влияние поверхностной утечки зарядов на электрические характеристики полупроводниковых приборов. –Москва, 1987. -7 с. -Деп. в ВИНТИ 10.11.87. №7879-В87.
64. Набиев Г.А. АФМН-пленки теллурида кадмия с высокой магниточувствительностью. –Москва, 1987. -9 с. -Деп. в ВИНТИ 23.09.87. №6822-В87.
65. Набиев Г.А. К определению характеристических микропараметров АФН-пленок//Физика полупроводниковых первичных преобразователей и их применение для теплофизических измерений. - Ташкент. 1984. -С.107-112.
66. Набиев Г.А. Дискриминация механизмов АФН-эффекта в полупроводниковых пленках//Аморфные полупроводники-84: Материалы международной конф. -Габрово. 1984. -С.150-152.
67. Набиев Г.А. Спектры АФН-эффекта в пленках кремния//Аморфные полупроводники-84: Материалы международной конф. –Габрово 1984. -С.147-149.
68. Абдуназаров А., Игамбеков Г., Набиев Г.А. АФМН-эффект в пленках теллурида кадмия//Полупроводники: Сб.науч. тр. ТашГПИ. -Ташкент, 1981.-С.131-135.

Физика-математика фанлари доктори илмий даражасига талабгор Набиев Гуламжан Абдुकундузивичнинг 01.04.10 – ярим ўтказгичлар физикаси ихтисослиги бўйича “Si ва CdTe қатламларида аномал-катта фотокучланиш ва ташқи кутбловчи майдонсиз фотоэлектрет ҳолати ҳодисалари” мавзuidaги диссертациясининг

РЕЗЮМЕ СИ

Таянч сўзлар: АФК, дембер фотокучланиши, қатламларнинг қалинлик бўйича тақсимооти, носимметрик ёритилиш, аномал фотомагнит ҳодиса, фотоэлектрет ҳолати, релаксация чизиқлари.

Тадқиқот объектилари: бир жинсли, p-n-, p-n-p – ўтишлари бўлган кўпқатламли тузилмалар; Si, CdTe, Si:Ag, CdTe:Ag, CdTe:Si қатламлари.

Ишнинг мақсади: АФК-қатламлар олиш, уларни легирлаш, фаоллаштириш, хусусиятлари аниқса, ташқи кутбловчи майдонсиз юзага келадиган фотоэлектрет ҳолатини фотоэлектрик усуллар билан ўрганиш, назариясини яратиш, улар асосида оптоэлектрон қурилмалар асбоблар яратиш.

Тадқиқот методлари: термик буғлатиш, легирлаш, фаоллаштириш, қўшимча ўтқазишга асосланган технологик усуллар, бурчак диаграммалар усули, АФК-ҳодиса спектрларини ўрганиш, релаксация чизиқларини ўрганиш, узлуксизлик ва кинетик тенгламаларни ечиш.

Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги: АФК-ҳодиса механизмини аниқлаш усули таклиф этилган, бурчак остида ўтқазилган қатламларнинг қалинлик бўйича тақсимоотининг аналитик ифодаси келтириб чиқарилган; CdTe қатламларида АФК-ҳодиса механизмлари аниқланган; дембер, p-n-p – механизмли қатламлардаги АФК-ҳодиса назарияси ишлаб чиқилган; бир жинсли ва икки чуқур сатҳли аралашмалар p-n – ўтишларда фотоэлектрет ҳолати назарияси ишлаб чиқилган, ташқи кутбловчи майдонсиз фотоэлектрет ҳолати кузатиладиган Si ва CdTe қатламлари олиш технологияси ишлаб чиқилган, чуқур сатҳларнинг параметрларини аниқлаш усули таклиф қилинган ва ишлаб чиқилган.

Амалий аҳамияти: АФК-ҳодисали қатламлар олиш, аралашма киритиш, фаоллаштириш каби технологик жараёнлар ва тажриба натижалари қатор оптоэлектрон қурилмалар яратиш ва уларнинг микропараметрларини аниқлаш имконини беради.

Тадбиқ этиш даражаси ва иқтисодий самарадорлиги: олинган натижалар ЎЗР ФА илмий-ишлаб чиқариш бирлашмаларида ва бошқа асбобсозлик ташкилотларида ёруғлик қабул қилгич қурилмаларини ишлаб чиқариш учун асос бўлади.

Қўлланиш соҳаси: ярим ўтказгичлар физикаси, юпқа қатламлар технологияси, ярим ўтказгичлар оптоэлектроникаси, ярим ўтказгичларда чуқур сатҳлар спектроскопияси, асбобсозлик, бузмасдан назорат қилиш.

Р Е З Ю М Е

диссертации Набиева Гуламжана Абдукундундузевича на тему:
«Эффекты аномально-больших фотонапряжений и фотоэлектретных состояний без
внешнего поляризующего поля в пленках Si и CdTe»
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.10. – физика полупроводников

Ключевые слова: АФН, демберовское фотонапряжение, распределение пленок по толщине, асимметрия освещения, аномальный фотомагнитный эффект, фотоэлектретное состояние, релаксационные кривые.

Объекты исследования: многослойные структуры с однородными полупроводниковыми микрообластями, р-п-, р-п-р – переходами; пленки Si, CdTe, Si:Ag, CdTe:Ag, CdTe:Si.

Цель работы: разработка технологий получения, легирования и активации АФН-пленок, исследовании их свойств, особенно фотоэлектретного состояния без внешнего поляризующего поля, с помощью фотоэлектрических методов, построении теории, а также в создании на основе АФН-пленок оптоэлектронных приборных структур.

Методы исследования: технологические методы, основанные на термическом испарении, легировании, активации примесями, дополнительным допылением; метод угловых диаграмм; изучение спектров АФН-эффекта; изучение релаксационных кривых; решение уравнения непрерывности, кинетического уравнения.

Полученные результаты и их новизна: предложен метод определения механизмов АФН-эффекта; найдено аналитическое выражение для распределения косоосажденных пленок по толщине; определены механизмы АФН-эффекта в пленках CdTe; разработана теория АФН-эффекта в пленках с демберовскими механизмом; в пленках с р-п-р – переходным механизмом; разработана теория фотоэлектретного состояния в однородных полупроводниках; в р-п – переходах с двумя глубокими уровнями; разработана технология получения пленок Si и CdTe с фотоэлектретным состоянием без внешнего поляризующего поля; предложена методика определения параметров глубоких уровней.

Практическая значимость: полученные экспериментальные результаты и технологические приёмы изготовления, легирования, активации пленок с АФН-эффектом, фотоэлектретным состоянием могут быть использованы для построения ряда оптоэлектронных устройств и определения их характеристических микропараметров.

Степень внедрения и экономическая эффективность: полученные результаты являются основой для разработки фотоприемных устройств в научно-производственных объединениях АН РУз и других приборостроительных организациях.

Область применения: физика полупроводников, технология тонких пленок, полупроводниковая оптоэлектроника, спектроскопия глубоких уровней в полупроводниках, приборостроение, неразрушающий контроль.

RESUME

Thesis of Nabiev Gulamjan Abdukunduzivich
on the scientific degree competition of the doctor sciences
in physic and mathematic on specialty 01.04.10 – semiconductor
physics subject:

“Effects of anomal big phototension and photoelectret statements without external
polarizing field in the Si and CdTe films”

Key words: APV, Demberov phototension, film distribution for thickness, asymmetry lighting, anomal photomagnetic effect, photoelectret state, relaxative curves.

Subjects of research: multilayers structures with similar semiconductors microareas, p-n-, p-n-p-transitions; Si, CdTe, Si:Ag, CdTe:Ag, CdTe:Si films.

Purpose of work: developing technology of obtaining, alloying and activation of APV-films, investigation their properties investigations, especially photoelectret state without external polarizing field, with the help of photoelectric methods, theory construction and creation of optical-electronic devices on the basis of APV-film.

Methods of research: technological methods based on thermal evaporation, alloying and impurities activation, additional predeposition, the method of angular diagrams; investigation of APV-effect spectrum, relaxative curves investigation; solving continuity equation and kinetic equation.

The results obtained and their novelty: the method of mechanisms discrimination of APV-effect is offered, the analytical expression for the distribution of film thickness at an angle deposited was found, the mechanisms of APV-effect in CdTe-films were defined, the theory of APV-effect in the films with demberov mechanism was worked out, in films with p-n-p-junction mechanism. It has been worked out the theory of photoelectret state in similar semiconductors, in p-n-transitions with two deep levels, the technology of getting Si and CdTe films with photoelectret state without external polarizing field and has been suggested the method of parameters definition in deep levels.

Practical value: it was obtained experimental results and technological ways of manufacturing, alloying and activation of films with APV-effect, photoelectret state can be used for making a number of photoelectronic sets and their characteristic microparameters definition.

Degree of embed and economic effectively: the obtained results are the base for development of photoreceiver devices in scientific – technical associations of Academy of Science of the Republic of Uzbekistan and other instrument making organizations.

Field of application: semiconductors physics, the technology of thin films, semiconductor optoelectronics, spectroscopy of deep levels in the semiconductors, instrument making industry and nondestructive check.

