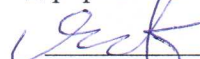


Министерство образования и науки Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра полупроводниковой электроники (КПЭ)

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Руководитель ООП

д-р физ.-мат. наук, профессор

 В.П. Якубов

« 06 » июня 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

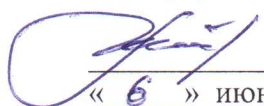
ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА КОНТАКТОВ И МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ
ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИН НА ХАРАКТЕРИСТИКИ
АРСЕНИДГАЛЛИЕВЫХ СЕНСОРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

по основной образовательной программе подготовки магистров
направление подготовки 03.04.03 – Радиофизика

Шаймерденова Лейла Калитаевна

Руководитель ВКР

доктор физ.-мат. наук, профессор

 О.П. Толбанов

« 6 » июня 2018 г.

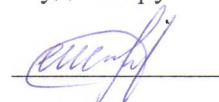
Научный консультант

науч. сотрудник ЛФЭ ТГУ

 А.В. Тяжев

Автор работы

студент группы № 720

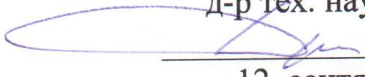
 Л.К. Шаймерденова

Министерство образования и науки Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (ТГУ)
Радиофизический факультет (РФФ)
Кафедра полупроводниковой электроники (КПЭ)

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ООП

д-р тех. наук, профессор

 Г.Е. Дунаевский
12 сентября 2016 г.

ЗАДАНИЕ

по подготовке ВКР магистра

студенту Шаймерденовой Лейле Калитаевне группы № 720

1.Тема ВКР работы Влияние материала контактов и методов обработки поверхности пластин на характеристики арсенидгаллиевых сенсоров рентгеновского излучения

2.Срок сдачи студентом выполненной ВКР:

а) на кафедре 06.06.2018

б) в ГЭК 18.06.2018

3.Исходные данные к работе

Целью работы является исследование влияния методов обработки поверхности пластин HR-GaAs:Cr и материала контактов на вольт-амперные характеристики, распределение напряженности электрического поля и детекторные характеристики HR-GaAs:Cr сенсоров.

Решаемые задачи: изготовление экспериментальных образцов сенсоров структуры «металл – HR-GaAs:Cr – металл», с использованием различных металлических контактов; отработка технологии изготовления ионно-имплантированных p^+ и n^+ слоев с концентрацией не менее 10^{17} см^{-3} на пластинах HR-GaAs:Cr и изготовление экспериментальных образцов сенсоров на их основе; измерение вольт-амперных и детекторных характеристик сенсоров; анализ полученных результатов.

Объекты исследования – опытные образцы сенсоров ионизирующего излучения, имеющих структуру «металл – HR-GaAs:Cr – металл», « p^+ – HR-GaAs:Cr – металл», « n^+ – HR-GaAs:Cr – металл», « p^+ – HR-GaAs:Cr – n^+ ».

Исследования электрофизических, электрических и детекторных характеристик сенсоров выполняются с использованием методов на основе эффекта Холла и эффекта Поккельса, а также с использованием методики измерения статических вольт-амперных характеристик сенсоров на основе HR-GaAs:Cr и метода амплитудного анализа при воздействии 60 кэВ гамма-квантов. Контроль морфологии поверхности пластин HR-GaAs:Cr проводится с использованием атомно-силового микроскопа.

Достоверность результатов оценивается на основе статистически значимого количества экспериментальных результатов.

4. Краткое содержание работы

Работа содержит:

- обзор теоретических положений и экспериментальных результатов по теме исследований (Глава 1);
- описание методов изготовления экспериментальных образцов и методик проведения исследований (Глава 2);
- описание и анализ результатов эксперимента (Глава 3);
- заключение и список использованных источников.

Срок выполнения работы: 20.09.2016 – 01.06.2018.

Ожидаемые результаты:

- оценка влияния методов обработки поверхности пластин HR-GaAs:Cr на вольт-амперные характеристики и выбор оптимального метода обработки для минимизации темнового тока структур;

- оценка влияния материала металлических контактов сенсоров типа «металл – HR-GaAs:Cr – металл» на величину темнового тока и на распределение напряженности электрического поля в сенсорах;

- оценка термостабильности исходного (n-GaAs) и высокоомного (HR-GaAs:Cr) материала к режимам пост имплантационного отжига;

- оптимальные режимы проведения ионной имплантации и пост имплантационного отжига для изготовления ионно-имплантированных p^+ и n^+ слоев с концентрацией не менее 10^{17} см^{-3} на пластинах HR-GaAs:Cr;

- оценка влияния типа контактов на детекторные характеристики сенсоров.

5. Дата выдачи задания – 14 сентября 2016 г.

Руководитель ВКР

профессор, НИ ТГУ

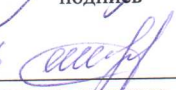
должность, место работы


подпись

О.П. Толбанов

Задание принял к исполнению

14.09.16


дата, подпись студента

АННОТАЦИЯ

Магистерская диссертация содержит 62 страницы, 3 главы, 29 рисунков, 10 таблиц, 31 формулу, 39 источников, 3 приложения.

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА КОНТАКТОВ И МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИН НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АРСЕНИДГАЛЛИЕВЫХ СЕНСОРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

Цель работы – исследование влияния материала контактов и методов обработки поверхности пластин HR-GaAs:Cr на характеристики сенсоров рентгеновского излучения, изготовленных на их основе.

По результатам исследований показано, что на уровень протекающего темнового тока оказывают влияние способ обработки поверхности и материал контакта к HR-GaAs:Cr. Наименьший темновой ток через сенсоры на основе HR-GaAs:Cr протекает при обработке поверхности HR-GaAs:Cr с дополнительным травлением в серноокислотном травителе. Экспериментально определен оптимальный режим ионной имплантации примесей Mg и Si в высокоомный арсенид галлия, компенсированный хромом. Данный режим позволяет получать контактные слои с концентрацией носителей заряда, превышающей 10^{18} см^{-3} . Установлено, что контакт в виде пленок Ni/AuGe/Ni/Au является омическим и протекающий ток обусловлен монополярной инжекцией носителей заряда. Из вольт-амперной характеристики определена концентрация ловушечных центров в HR-GaAs:Cr и глубина залегания данных уровней.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Полупроводниковые детекторы ионизирующего излучения и их характеристики	7
1.1 Основные сведения о полупроводниковом детекторе ионизирующего излучения	7
1.2 Контакт металл-полупроводник	9
1.2.1 Контакты металл-полупроводник	9
1.2.2 Механизмы протекания тока	10
1.2.3 Эффекты, обуславливающие увеличение протекающего тока	11
1.2.4 Механизмы протекания тока в реальных детекторных структурах	13
1.3 Распределение напряженности поля в детекторных структурах	17
1.4 Выводы по литературному обзору и постановка задачи	18
2 Методика эксперимента	20
2.1 Исследуемые образцы	20
2.2 Методика исследования морфологии поверхности	22
2.3 Методика измерения вольт-амперных характеристик сенсоров	24
2.4 Методика определения электрофизических параметров структур на основе эффекта Холла	24
2.5 Методика измерения амплитудных спектров и определения эффективности сбора заряда	25
2.6 Методика измерения напряженности электрического поля	27
3 Экспериментальные результаты	30
3.1 Морфология поверхности	30
3.2 Вольт-амперные характеристики	34
3.3 Исследование термостабильности и электрофизических характеристик HR-GaAs:Cr структур	40
3.4 Эффективность сбора заряда и оценка времени жизни носителей заряда	42
3.5 Распределение напряженности электрического поля по толщине	44
3.6 Анализ полученных результатов	45
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	46
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	48
ПРИЛОЖЕНИЕ А	51
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	52
ПРИЛОЖЕНИЕ В	53

ВВЕДЕНИЕ

Арсенид галлия, компенсированный хромом в процессе диффузии – технология, которая позволяет создать высокоомные структуры (HR-High Resistivity, HR-GaAs:Cr), аналогов которым в мире нет. HR-GaAs:Cr является перспективным материалом для создания сенсоров рентгеновского излучения, работающих в диапазоне энергий от 10 до 50 кэВ [1-5]. В данном диапазоне арсенид галлия является оптимальным материалом, так как обладает лучшим коэффициентом поглощения в сравнении с кремнием (Si), а также выигрывает в ценовых показателях у других бинарных и тройных полупроводниковых соединений, например, у теллурида кадмия (CdTe). Компенсация хромом увеличивает удельное сопротивление до 10^9 Ом·см, а значение произведения подвижности электронов на время жизни электронов ($\mu\tau$) превышает 10^{-4} см²/В. На основе данного материала можно создавать детекторы для медицины, систем безопасности, экспериментов в области физики высоких энергий.

В связи с интересом мирового сообщества и перспективностью детекторов на основе HR-GaAs:Cr, возникла необходимость постоянного контроля и улучшения характеристик сенсоров. К основным характеристикам относятся: эффективность сбора заряда (CCE), уровень темнового тока, распределение напряженности электрического поля.

На уровень темнового тока и распределение напряженности поля с точки зрения технологии оказывают влияние качество исходного материала, способы обработки поверхности арсенида галлия и материал контактов. Опосредованное влияние данные технологические процессы оказывают и на эффективность сбора заряда. Учет выявленных особенностей переноса заряда необходим для дальнейшей интерпретации эффективности детектирования и других характеристик приборов.

Исследование контакта металл-полупроводник – это шаг в сторону понимания свойств границы раздела металл-полупроводник и методик создания качественного контакта для дальнейшей работы, а именно, создания систем детектирования.

Таким образом, совершенствование методов обработки поверхности и технологии создания контактов к HR-GaAs:Cr структурам позволяют выйти на новый уровень в технологии изготовления сенсоров и расширить границы применимости готовых систем.

В связи с вышесказанным, целью магистерской диссертации является исследование влияния материала контактов и методов обработки поверхности пластин HR-GaAs:Cr на характеристики сенсоров рентгеновского излучения, изготовленных на их основе.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Подготовка образцов с различной обработкой поверхности и с различными типами контактов;
2. Исследование морфологии поверхности пластин при помощи атомно-силовой микроскопии;
3. Измерение вольт-амперных характеристик;
4. Исследование электрофизических характеристик детекторных структур методом Ван-дер-Пау;
5. Измерение амплитудных спектров и определение эффективности сбора заряда сенсоров с различными типами контактов;
6. Оценка времени жизни носителей заряда в HR-GaAs:Cr сенсорах;
7. Исследование распределения напряженности электрического поля в сенсорах с различными типами контактов.

Объект исследования – единичные сенсоры на основе HR-GaAs:Cr структур с различными методами обработки поверхности и типами контактов.

Предмет исследования – процессы в арсениде галлия, компенсированном хромом, и на границе раздела металл-полупроводник, обуславливающие свойства сенсоров рентгеновского излучения на основе данного материала.

Научная новизна полученных результатов: определена концентрация ловушечных уровней в высокоомном арсениде галлия, компенсированном хромом (HR-GaAs:Cr): $N_t \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Практическая значимость результатов:

1. Отработана технология проведения ионной имплантации кремния (Si) и магния (Mg) на пластинах HR-GaAs:Cr: установлен оптимальный режим процесса ионной имплантации;
2. Определена оптимальная технология обработки поверхности HR-GaAs:Cr для минимизации уровня протекающего темнового тока.

Положения, выносимые на защиту:

1. Травление поверхности HR-GaAs:Cr структур понижает уровень протекающего темнового тока, за счет снижения поверхностной шероховатости, обеспечивающей исчезновение в структуре областей с повышенной напряженностью поля.
2. Оптимальным режимом ионной имплантации примесей в HR-GaAs:Cr является облучение HR-GaAs:Cr ионами с энергией 50кэВ и дозой облучения 10^{15} см^{-2} и последующая активация примесей при температуре 800°C в атмосфере аргона в течении 15 секунд.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается использованием различных экспериментальных методик с использованием современного оборудования и набранной статистикой измерений.

Содержание и выводы работы опубликованы в 3 статьях, в том числе англоязычных, в различных научных сборниках. Результаты работы апробированы на международных и российских научных конференциях и конкурсах 2016-2018 годов. По тематике исследования выиграно 3 конкурса.

Основные результаты диссертации представлены на следующих конференциях и конкурсах:

1. XIV Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа: «Влияние способов обработки поверхности на вольт-амперные характеристики сенсоров рентгеновского излучения на основе GaAs:Cr»;
2. III Всероссийский конкурс студенческих научных обществ и конструкторских бюро: «Исследование методов обработки поверхности пластин GaAs:Cr и их однородности»;
3. Конкурс научно-технического творчества молодежи (НТТМ-2017): «Разработка и исследование сенсоров рентгеновского излучения на основе арсенида галлия, компенсированного хромом»;
4. III Всероссийский научный форум «Наука будущего – наука молодых»: «Исследование характеристик арсенида галлия, компенсированного хромом, как материала для сенсоров рентгеновского излучения»;
5. Nano and Giga Challenges in Electronics, Photonics and Renewable Energy (NGC-2017): «The study of ion-implanted structures based on chromium compensated gallium arsenide»;
6. Всероссийский инженерный конкурс (ВИК-2017): «Сенсоры GaAs:Cr для технологии обогащения алмазосодержащей руды».

1 Полупроводниковые детекторы ионизирующего излучения и их характеристики

1.1 Основные сведения о полупроводниковом детекторе ионизирующего излучения

Полупроводниковый детектор – это прибор для регистрации ионизирующих излучений, основным элементом которого является кристалл полупроводника. Ионизирующее излучение – это поток заряженных или нейтральных частиц, при взаимодействии которых с веществом образуются электрические заряды различных знаков [6]. Важной характеристикой ионизирующего излучения является его высокая проникающая способность.

Прохождение частицы вызывает в объеме полупроводника образование разноименных носителей зарядов: электронов и дырок (рис. 1.1). Внешнее напряжение U создает внутри кристалла электрическое поле. Электроны и дырки движутся под действием этого поля к разнополярным электродам.



Рисунок 1.1 - Схема включения полупроводникового детектора

Связь между током (i) в проводнике и скоростью движения зарядов определяется, используя теорему Рамо–Шокли:

$$i(t) = E_v(t)v(t)e, \quad (1.1)$$

где E_v – составляющая вектора напряженности электрического поля; $v(t)$ – скорость смещения заряда к электродам; e – заряд электрона.

По мере того, как носители смещаются, они индуцируют на металлических контактах заряд, пропорциональный пройденной ими разности потенциалов. Возникающие при этом импульсы тока или напряжения используются для регистрации излучений [7].

Рассмотрим основные свойства и характеристики детекторов:

1. Эффективность регистрации излучения – вероятность регистрации частицы при попадании в рабочий объём.

2. Эффективность сбора заряда (CCE-Charge Collection Efficiency) – отношение заряда, собранного детектором при воздействии ионизирующей частицы к заряду, генерируемому в детекторе этой частицей. В случае однородного плоскопараллельного детектора CCE для электронов определяется из уравнения Хехта [8]:

$$CCE(U) = \frac{Q}{N_0 e} = \frac{\mu_n \tau_n U}{d^2} \left(1 - \exp \left(- \frac{d^2}{\mu_n \tau_n U} \right) \right), \quad (1.2)$$

где Q – величина наведенного заряда; N_0 – среднее количество электронно-дырочных пар, созданных при поглощении α -частицы; e – заряд электрона; μ_n – подвижность электронов; τ_n – время жизни электронов; U – напряжение смещения; d – толщина детектора.

3. Энергетическое разрешение. Прохождение ионизирующей частицы в чувствительном объеме детектора приводит к образованию большого числа электронно-дырочных пар. Число образовавшихся пар равно [7]:

$$N_0 = \frac{E_0}{E_i}, \quad (1.3)$$

где E_0 – энергия, теряемая частицей в объеме полупроводника; E_i – энергия, расходуемая частицей на ионизацию одной электронно-дырочной пары.

Если все носители будут собраны на соответствующих электродах, то величина импульса тока во внешней цепи будет пропорциональна энергии. Неполный сбор заряда приведет к меньшим сигналам и ухудшит разрешающую способность, так как сбор заряда будет неравномерным.

4. Распределение напряженности электрического поля по толщине чувствительного слоя. Согласно [8] в детекторных структурах HR-GaAs:Cr напряженность поля распределена пропорционально распределению удельного сопротивления по толщине.

5. Темновой ток – электрический ток, протекающий через сенсор при отсутствии поглощенных фотонов. Физической причиной темнового тока является тепловая генерация носителей заряда в объеме полупроводника, которые начинают упорядоченное движение в сильных электрических полях.

6. Шумы в детекторах. В полупроводниковых детекторах встречаются три вида шума [9]: дробовой, фликкер и генерационно-рекомбинационный. Они являются фактором, ограничивающим функциональные возможности детекторов.

1.2 Контакт металл-полупроводник

1.2.1 Контакты металл-полупроводник

Металлические контакты к полупроводнику подразделяются на два типа [10]: барьерный (выпрямляющий) и омический (невыпрямляющий). Тип контакта зависит от соотношения между значениями работы выхода электронов из полупроводника и металла и от плотности поверхностного заряда полупроводника. Свойства контакта определяются свойствами поверхности полупроводника.

Барьерный контакт металла и полупроводника n -типа реализуется, когда работа выхода полупроводника A_{III} меньше работы выхода металла A_M . За счет этого электроны из полупроводника переходят в металл. Уход электронов из полупроводника, сопровождающий процесс выравнивания уровней Ферми, снижает их концентрацию в приконтактной области полупроводника и вызывает изгиб энергетических зон «вверх» (рис. 1.2а). Изгиб зон создает энергетический потенциальный барьер для электронов из полупроводника в металл, равный внутренней контактной разности потенциалов U_0 .

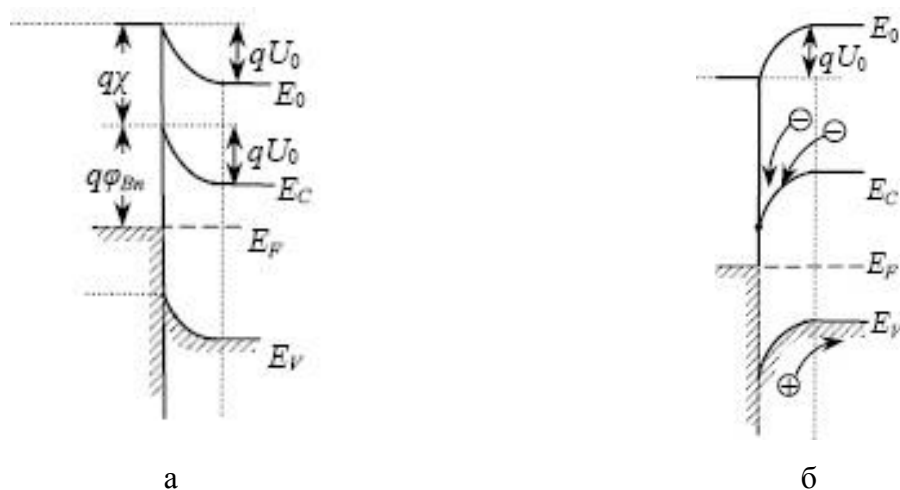


Рисунок 1.2 – Зонные диаграммы металл– n -полупроводник: а) барьерный (выпрямляющий) контакт, б) омический (невыпрямляющий) контакт.

E_C – дно зоны проводимости, E_V – потолок валентной зоны, E_F – уровень Ферми, E_0 – энергия свободного электрона, $q\phi_{Bn}$ – барьер для электронов из металла в полупроводник, $q\chi$ – энергия электронного сродства полупроводника

Омический (невыпрямляющий) контакт в случае полупроводника n -тип реализуется при $A_{III} > A_M$. Электроны переходят из металла в полупроводник. В данном случае зоны изогнутся «вниз» (рис. 1.2б). Изгиб зон «вниз» означает, что на контакт

действует электрическое поле, направленное из металла в полупроводник, которое притягивает электроны полупроводника к контакту.

Технологически создание невыпрямляющего контакта с $A_{ПП} > A_M$ затруднено, поэтому для получения омического контакта используется невыпрямляющий контакт у которого потенциальный барьер туннельно-прозрачен или имеет малую высоту барьера [11].

1.2.2 Механизмы протекания тока

При контакте металла с полупроводником перенос зарядов может осуществляться следующим образом [10-12] (рис. 1.3):

1. Термоэлектронная эмиссия, то есть надбарьерный переход;
2. Туннелирование электронов через барьер;
3. Рекомбинация в области пространственного заряда;
4. Инжекция дырок из металла в полупроводник.

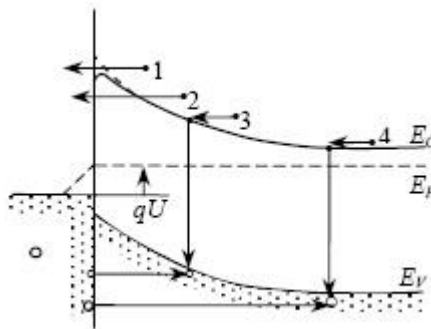


Рисунок 1.3 – Механизмы переноса зарядов при контакте металл–полупроводник

Основным механизмом переноса зарядов является термоэлектронная эмиссия. Плотность прямого тока термоэлектронной эмиссии («плюс» на металле для полупроводника n -типа) определяется выражением [11]:

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (1.4)$$

где J_s – плотность тока насыщения, e – заряд электрона, U – внешнее смещение, k – постоянная Больцмана, T – температура.

Плотность обратного тока («плюс» на полупроводнике) равна плотности тока насыщения:

$$J_{\text{обр}} = ej_{\text{мп}} = A^*T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_0 - F}{kT}\right) = J_s, \quad (1.5)$$

где A^* – постоянная Ричардсона, Φ_0 – максимальный изгиб зон, F – уровень Ферми.

1.2.3 Эффекты, обуславливающие увеличение протекающего тока

Увеличение тока может происходить за счет влияния поверхностного заряда, снижения потенциального барьера в сильном электрическом поле, наличия генерационного тока в области пространственного заряда (ОПЗ) и туннельной составляющей тока.

- Понижение высоты потенциального барьера при увеличении приложенного внешнего электрического поля называется эффектом Шоттки [11]. Электрон, покинувший металл, индуцирует на его поверхности положительный заряд. Сила притяжения между электроном и индуцированным зарядом называется силой изображения. Электрон и положительный заряд его зеркального изображения возбуждают электрическое поле ($\xi_{зер}$) направленное навстречу полю барьера ($\xi_{бар}$), за счет этого уменьшается высота потенциально барьера. Понижение высоты барьера Шоттки равно:

$$\Delta\varphi = \sqrt{\frac{e\xi}{4\pi\epsilon_s}}, \quad (1.6)$$

где e – заряд электрона, ξ – электрическое поле в полупроводнике вблизи границы раздела, ϵ_s – диэлектрическая проницаемость полупроводника.

- Другим эффектом понижения высоты потенциального барьера в сильном электрическом поле является эффект Пула–Френкеля. Данный эффект состоит в увеличении темпа термической ионизации примесных центров [13-15] во внешнем электрическом поле (ξ). Энергия ионизации притягивающей примеси понижается на величину:

$$E_{PF} = \alpha\sqrt{\xi}, \quad (1.7)$$

где $\alpha = 2\sqrt{Ze^3/\epsilon_0}$, Z – кратность заряда центра, e – заряд электрона, ϵ_0 – электрическая постоянная.

Тогда высота потенциального барьера:

$$\varphi_m = \varphi_0 - \Delta W = W_{d0} - \beta E^{1/2}, \quad (1.8)$$

где ΔW – уменьшение высоты потенциального барьера по сравнению со случаем отсутствия поля.

- Атомы на поверхности имеют несвязанный электрон, то есть оборванную связь. Данные оборванные связи образуют энергетические состояния на поверхности полупроводника, которые называются поверхностными электронными состояниями контакта [16]. Так как плотность поверхностных состояний велика (10^{12} см⁻²), то они захватывают носители заряда на энергетические уровни вблизи запрещенной зоны. Таким

образом, на поверхности полупроводника еще до нанесения металлических контактов формируется изгиб зон и потенциальный барьер (поверхностный потенциальный барьер). При нанесении металла равновесие устанавливается между металлом и поверхностными состояниями. Это, согласно [10], уменьшает работу выхода металла и снижает высоту потенциального барьера, что способствует увеличению тока.

- Ток генерации в ОПЗ увеличивает ток диодов Шоттки и определяется по формуле:

$$I_{\text{ген}} = S \frac{e w n_i}{\tau_b}, \quad (1.9)$$

где S – площадь, e – заряд электрона, w – ширина ОПЗ, которая зависит от напряжения смещения, n_i – собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике, τ_b – эффективное время жизни носителей заряда.

- В сильно легированных полупроводниках с малой шириной ОПЗ наблюдается туннелирование электронов через барьер. Это возможно, когда уровень дна зоны проводимости (E_C) опускается ниже уровня Ферми (F) (рис. 1.4). Электрон из металла сквозь барьер переходит на свободное состояние в зоне проводимости. В данном случае ток увеличивается за счет наличия туннельной составляющей тока, называемой полевым током (j_n).

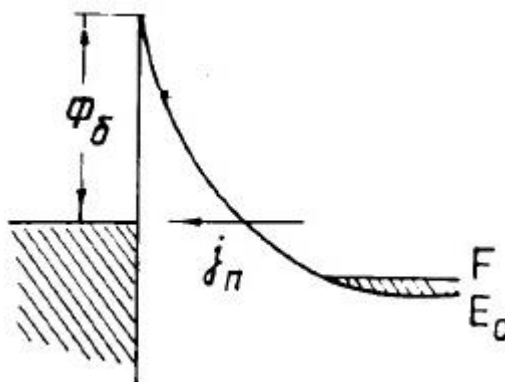


Рисунок 1.4 – Пояснение к процессу туннелирования электронов через барьер

- На поверхности GaAs при нормальных условиях [20] существует тонкий слой собственного оксида, состоящий в основном из Ga_2O_3 с элементами As_2O_3 и монослой собственного As [21]. Авторы работ [24,25] утверждают, что элементарный мышьяк на поверхности может являться одной из причин понижения высоты потенциального барьера. В данном случае увеличивается количество As_{Ga} -центров по сравнению с Ga_{As} -центрами и уровень Ферми должен сдвигаться к уровню 0,75 эВ, одному из двух донорных уровней, образующихся на поверхности при нанесении металла и высота потенциального барьера должна понижаться.

1.2.4 Механизмы протекания тока в реальных детекторных структурах

В источниках [21,22] рассматриваются структуры N -полуизолятор- N и P -полуизолятор- P (рис. 1.5), где V_{j1} – напряжение, приложенное к левому контакту, V_{j2} – напряжение, приложенное к правому контакту, V_{SI} – напряжение, приложенное к полуизолирующему слою, V_a – полное напряжение на структуре, $L_P(L_N)$ – толщина $P(N)$ слоя, L_{SI} – толщина полуизолирующего слоя. В диапазоне прикладываемых напряжений характеристики структур не зависят от электрического поля.

При малых прикладываемых напряжениях структура симметрична $V_{j1}=V_{j2}$ и отношение V_{SI}/V_{j1} зависит от вкладов объема и контактов, а также от длины образца L_{SI} . Для более высокого напряжения V_a , в непосредственной близости от прямо смещенного контакта $\Delta n > 0$ и $\Delta p > 0$, где Δn , Δp – избыточные концентрации электронов и дырок, тонкий слой становится сильно проводящим. Это переходное напряжение всегда небольшая часть от общего приложенного напряжения V_a , поскольку большая часть напряжения оказывается на обратно смещенном контакте и/или слое полуизолятора, где $\Delta n < 0$ и $\Delta p < 0$.

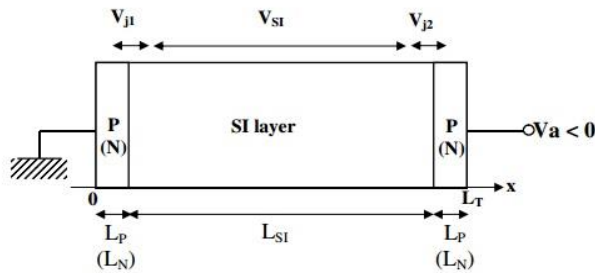


Рисунок 1.5 – Модель N -полуизолятор- N (P -полуизолятор- P) структур

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) N -полуизолятор- N образцов являются линейными до $V_a = -130$ В. На данном участке при слабом истощении электронов и дырок наблюдается омический закон проводимости и ток определяется из выражения:

$$J \approx J_n \approx \sigma_n E \approx \sigma_n \frac{|V_a|}{(L_{SI} - 2W_{N-SI})}, \quad (1.10)$$

где σ_n – проводимость электронов, E – напряженность электрического поля, W_{N-SI} – толщина ОПЗ.

Для образцов P -полуизолятор- P омический закон проводимости наблюдается на участке $V_a < 10kT/e$. Такое низкое значение напряжения получено из-за большой толщины слоя полуизолятора ($L_{SI} = 800$ мкм) и ток определяется из формулы:

$$J \approx J_p \approx \sigma_p \frac{|V_a|}{L_{SI}}. \quad (1.11)$$

Далее наблюдается выход ВАХ на участок насыщения. Для толстой структуры плотность дырок сохраняет постоянное значение на протяжении всего слоя полуизолятора, а полное истощение электронов наблюдается на левом, обратном смещенном переходе, и перенос зарядов через структуру контролируется обратным смещенным контактом. Выход на насыщение характеризуется диффузией электронов и может быть описан формулой:

$$J \approx \frac{eD_n n_e}{L_{Da}}, \quad (1.12)$$

где D_n – коэффициент диффузии, L_{Da} – длина амбиполярной диффузии.

Описанные в данной работе ВАХ, представлены на рисунке 1.6.

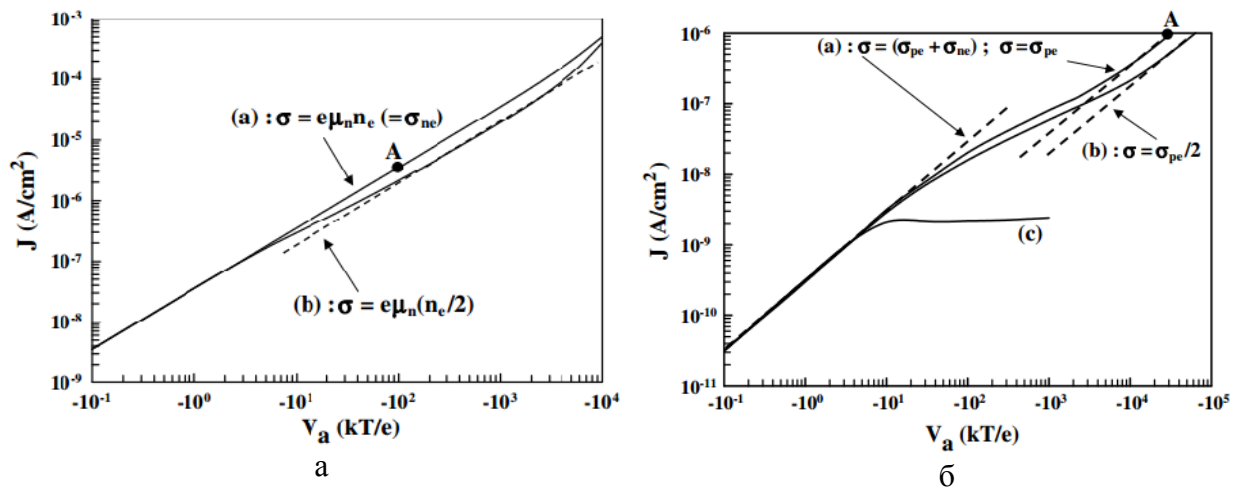


Рисунок 1.6 – ВАХ структур: а) N -полупроводник- N ; б) P -полупроводник- P

В работе [23] описаны ВАХ сенсоров на основе HR-GaAs:Сг структур, у которых анод и катод выполнены из ванадия (V), и ВАХ сенсоров на основе HR-GaAs:Сг структур, у которых анод выполнен из V, а катод из сплава AuGe. Удельное сопротивление таких структур было близко к значению 1 ГОм·см. Образцы, у которых анод и катод из V, имеют симметричные ветви ВАХ при обеих полярностях напряжения (рис. 1.7). При напряжениях выше 10 В ВАХ линейны. Для образцов, у которых катод из AuGe, анод из V, ветвь ВАХ, измеренная при обратной полярности напряжения (барьерный контакт – катод), совпадает с ветвями ВАХ образцов с симметричными V контактами. Когда катодом выступает AuGe, зависимость тока от напряжения носит квадратичный характер, начиная с $U \approx 10$ В (рис. 1.7). В данном случае катод ведет себя как инжектирующий контакт и обуславливает режим протекания тока, ограниченного пространственным зарядом (ТОПЗ). В соответствие с теорией ТОПЗ при малых токах на ветви ВАХ присутствует линейный участок, а за ним следует участок квадратичной зависимости, подчиняющийся закону Мотта. Согласно [23] обратный смещенный контакт с барьером

Шоттки на катоде прибора определяет вид ВАХ в детекторах из компенсированного материала.

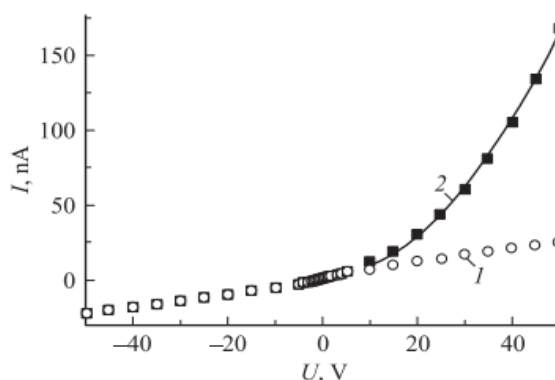


Рисунок 1.7 – ВАХ образцов. 1 – анод и катод из V; 2 – катод из AuGe, анод из V

Квадратичный участок на ВАХ (рис. 1.8) наблюдается и в структурах на основе CdTe легированного хлором [24], у которых анодный контакт выполнен из индия (In), а катод из платины (Pt). При высоких напряжениях поле у омического контакта (Pt контакт) незначительное, электроны инжектируются и перемещаются полем и определяют основной вклад в ток. Зависимость $V^{1/2}$ при низких значениях напряжения соответствует эффекту Шоттки и, как описывается в [25], на данном участке преобладает термическая генерация носителей заряда в частично истощенных зонах.

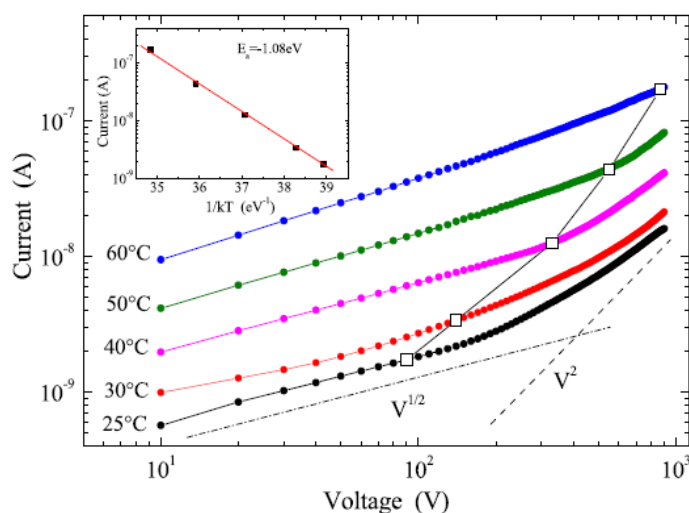
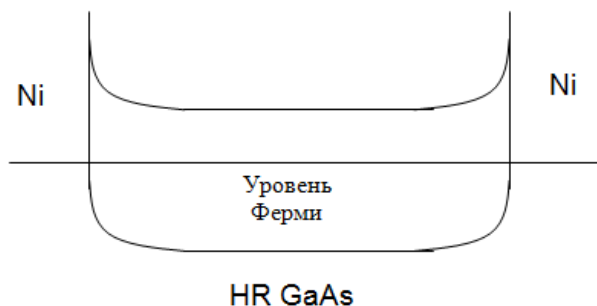


Рисунок 1.8 – ВАХ структуры CdTe:Cl при различных температурах

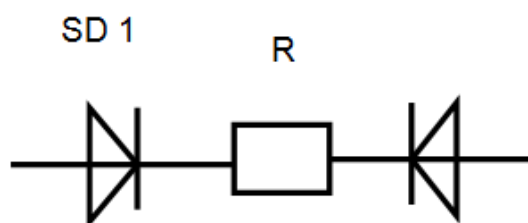
Вольт-амперные характеристики, описанные в работе [26], для единичных сенсоров из HR-GaAs:Cr структур вида: Ni-GaAs:Cr-Ni и Ni/Cr-GaAs:Cr-Cr/Ni. В данном случае Ni контакты изготавливались путем химического осаждения, а Cr/Ni контакты получались путем электронно-лучевого напыления пленок. Согласно статье [27] зонная диаграмма такой структуры представлена на рисунке 1.9а и может быть описана эквивалентной

схемой последовательно включенных диодов с барьером Шоттки (SD) и объемного сопротивления (R) (рис. 1.9б).

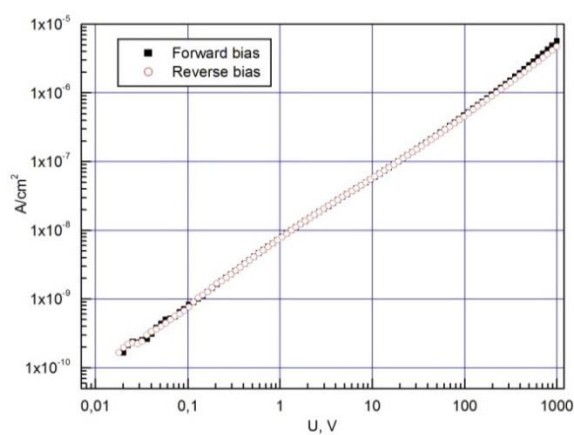
ВАХ (рис. 1.9в), таких структур описываются функциональной зависимостью $J \sim U^B$, где J – плотность тока, U – напряжение на сенсоре, B – показатель степенной зависимости плотности тока от напряжения.



а



б



в

Рисунок 1.9 – Структура металл-полупроводник-металл: а) зонная диаграмма; б) эквивалентная схема; в) вольт-амперная характеристика

Участок ВАХ в диапазоне от 0,02 до 0,5 В имеет линейную зависимость плотности тока от напряжения, т.е. $B \approx 1$. Данный участок определяется объемным сопротивлением R чувствительной области сенсора, следовательно, данный участок должен быть использован для оценки удельного сопротивления материала. Удельное сопротивление для данных образцов находится в диапазоне 0,7-1,5 ГОм·см.

Далее идет участок сублинейной зависимости плотности тока от напряжения с коэффициентом $B \approx 0,7-0,9$. Данная зависимость наблюдается на участке от 1 до 15 В. В отличие от описанного в теории термоэлектронной эмиссии, экспериментальные ВАХ демонстрируют рост тока вместо выхода на насыщение, что обусловлено понижением высоты потенциального барьера вследствие эффекта Шоттки.

1.3 Распределение напряженности поля в детекторных структурах

Распределение электрического поля оказывает влияние на свойства сбора заряда [28,29] и способствует описанию механизмов переноса зарядов [24,30].

В детекторах на основе полуизолирующего CdTe наблюдается поляризационный эффект, который ухудшает сбор заряда, а соответственно, и характеристики обнаружения. Поляризационный эффект (или эффект Поккельса) заключается в изменении показателя преломления вещества под действием внешнего электрического поля. При этом изменение показателя преломления пропорционально первой степени напряженности электрического поля. Поляризационный эффект зависит от свойств границы раздела металл-полупроводник [31], а в CdTe *p*-типа он вызван генерацией дырок на глубоких акцепторных уровнях за счет накопления пространственного заряда [32].

В CdTe Шоттки детекторах, материал которых представляет собой легированный хлором полуизолирующий монокристалл CdTe (*p*-тип, удельное сопротивление $\sim 10^9$ Ом·см), анодный контакт получен осаждением In, Pt контакт получен химическим осаждением и является катодом, распределение электрического поля зависит от времени [28]. В момент прикладывания напряжения, поле больше у анода, со временем оно движется в направлении положительного In контакта и спустя 2 часа оно распространено на 2/3 толщины образца (рис. 1.10). Увеличение электрического поля на аноде связано с генерацией дырок, которая усиливает ионизацию акцепторов. При этом происходит увеличение тока, которое приводит к уменьшению ионизации акцепторов и, следовательно, система достигает стационарных условий при определенном уровне ионизации акцепторов. То есть, распределение электрического поля определяется ионизованными глубокими акцепторами, которые являются объемными дефектами. Так как ток растет с увеличением напряжённости поля на границе раздела, то высота барьера Шоттки также зависит от поля. Изменение высоты барьера пропорционально напряжённости поля на границе раздела (E_{int}):

$$\Delta\Phi(t) = \alpha E_{int}(t), \quad (1.13)$$

где α – константа, связанная с толщиной слоя на границе раздела.

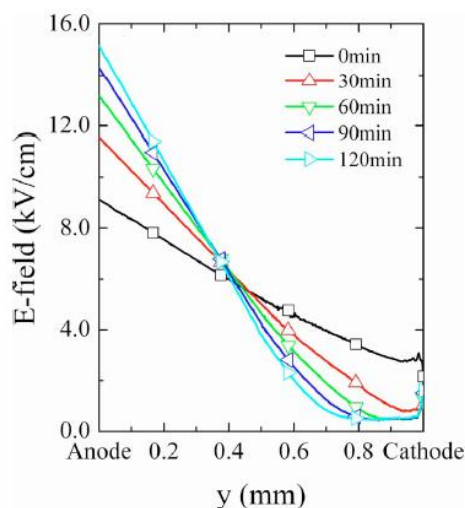


Рисунок 1.10 – Изменение профиля электрического поля во времени при напряжении смещения на детекторе 500 В

Неоднородное распределение электрического поля также объясняется тем, что электроны и дырки во время дрейфа к электродам захватываются на глубокие уровни и образуют объемный заряд в приконтактных областях. Ослабление электрического поля приводит к увеличению времени сбора носителей заряда. Если время сбора носителей становится сравнимым или больше чем время захвата на глубоких уровнях, то эффективность сбора заряда уменьшается. Таким образом, для детекторных структур важно однородное распределение электрического поля по толщине.

1.4 Выводы по литературному обзору и постановка задачи

Обзор и анализ литературных данных по полупроводниковым детекторам ионизирующего излучения и их основным характеристикам позволяет сделать следующие выводы:

- арсенидгаллиевые детекторы рентгеновского излучения являются перспективными для использования в диапазоне энергий от 10 до 50 кэВ и находят применения в различных областях;
- существует два типа контактов металл-полупроводник: барьерный (выпрямляющий) и омический (невыпрямляющий);
- основной механизм переноса зарядов в HR-GaAs:Cr структурах – термоэлектронная эмиссия.
- увеличение тока в детекторных структурах может происходить за счет влияния поверхностного заряда, снижения высоты потенциального барьера в сильном

электрическом поле, наличия генерационного тока в ОПЗ и туннельной составляющей тока;

- вид ВАХ зависит от типа контактов и границы раздела металл-полупроводник;
- в детекторных структурах наблюдается поляризационный эффект, который зависит от границы раздела металл-полупроводник, и оказывает влияние на характеристики приборов, в том числе уменьшает значение эффективности сбора заряда.

Исходя из выше сказанного, целью данной работы является изучения влияния материала контактов и методов обработки поверхности пластин на характеристики HR-GaAs:Cr сенсоров. Данные исследования позволят оптимизировать технологию производства сенсоров и дать обоснование электрофизическим процессам, проходящим в HR-GaAs:Cr структурах.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Подготовка литературного обзора по полупроводниковым детекторам ионизирующего излучения и их основным характеристикам;
2. Исследование морфологии поверхности HR-GaAs:Cr структур при помощи атомно-силовой микроскопии;
3. Исследование электрофизических характеристик структур методом Ван-дер-Пау;
4. Измерение вольт-амперных характеристик сенсоров с различными типами контактов и различной обработкой поверхности;
5. Исследование распределения напряженности поля в сенсорах с различными типами контактов;
6. Измерение амплитудного спектра и полевой зависимости эффективности сбора заряда сенсоров с различными типами контактов;
7. Оценка времени жизни носителей заряда в HR-GaAs:Cr сенсорах;
8. Анализ и обоснование полученных результатов.

2 Методика эксперимента

2.1 Исследуемые образцы

Исследуемые образцы представляют собой пластины арсенида галлия, компенсированные хромом. Технология компенсации хромом состоит в напылении на пластину арсенида галлия, легированного теллуром, слоя хрома и в последующем высокотемпературном отжиге при температурах, близких к температуре роста GaAs. При отжиге происходит диффузия хрома в арсенид галлия и компенсация донорной примеси так, что создаются HR-GaAs:Cr структуры.

Для экспериментов были подготовлены различные группы образцов:

1. Для исследования влияния морфологии поверхности на характеристики сенсоров, пластина H3295₂₂ диаметром 76 мм была разделана на четыре части, как показано на рисунке 2.1, каждая из которых была подвергнута различной обработке, представленной в таблице 2.1. Метод 4 включает в себя обработку лицевой стороны пластины (сторона с номером) методом 3, а обратной стороны пластины (без номера) методом 1. Далее пластина была отправлена на измерения при помощи атомно-силового микроскопа для исследования микрорельефа и локальных свойств поверхности.

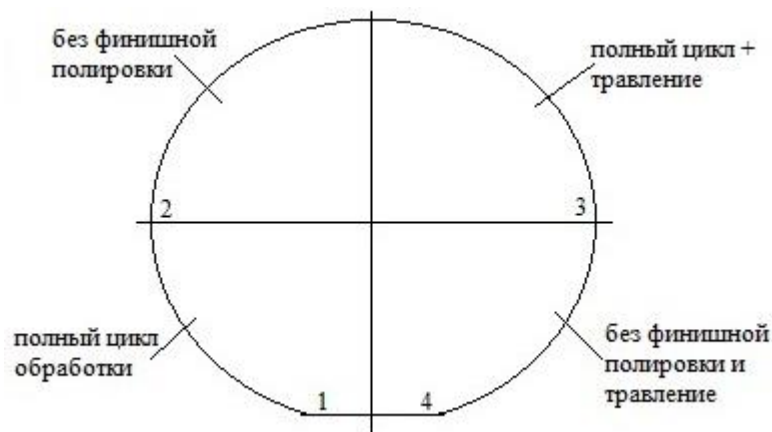


Рисунок 2.1 – Схематическое изображение пластины HR-GaAs:Cr с различными типами обработки поверхности

Таблица 2.1 – Методы обработки пластин HR-GaAs:Cr

Метод 1 (без финишной полировки)	Метод 2 (полный цикл обработки)	Метод 3 (полный цикл + травление)
1. Механическая шлифовка полупроводниковых пластин; 2. Механическая полировка полупроводниковых пластин; 3. Отмывка полупроводниковых пластин.	1. Механическая шлифовка полупроводниковых пластин; 2. Механическая полировка полупроводниковых пластин; 3. Химико-динамическая полировка полупроводниковых пластин; 4. Отмывка полупроводниковых пластин.	1. Механическая шлифовка полупроводниковых пластин; 2. Механическая полировка полупроводниковых пластин; 3. Химико-динамическая полировка полупроводниковых пластин; 4. Травление в течение 1 минуты в сернокислотном травителе; 5. Отмывка полупроводниковых пластин.

После проведения измерений на атомно-силовом микроскопе при помощи электронно-лучевого напыления были нанесены контакты в виде пленки Cr/Ni в следующем соотношении: 25 нм : 80 нм. Далее из пластин были выколоты единичные образцы размером $3 \times 3 \text{ мм}^2$, параметры которых представлены в таблице 2.2, где $S_{\text{сред}}$ – среднее значение площади образцов, $d_{\text{сред}}$ – среднее значение толщины образцов, и на данных единичных образцах были проведены измерения характеристик сенсоров.

Таблица 2.2 – Геометрические параметры образцов с различной обработкой поверхности

Способ обработки поверхности	$S_{\text{сред}}, \text{см}^2$	$d_{\text{сред}}, \text{мкм}$
Без финишной полировки (метод 1)	0,09	511
Полный цикл обработки (метод 2)	0,09	489
Полный цикл обработки + травление (метод 3)	0,09	482
Несимметричная обработка (метод 4)	0,09	507

2. Для исследования влияния контактов на характеристики сенсоров были подготовлены образцы с контактами Ni/AuGe/Ni/Au с помощью электронно-лучевого напыления. Контакты Ni/AuGe/Ni/Au напылены в следующем соотношении 5нм:180нм:20нм:50нм. Для улучшения адгезионных свойств проведен быстрый высокотемпературный отжиг в атмосфере водорода при температуре 400°C в течении 15 секунд. Далее были выколоты единичные образцы размером 3×3 мм², толщиной $d_{\text{сред}}=501,5$ мкм и проведено измерение различных характеристик сенсоров.

3. Следующая группа образцов – это структуры с ионно–имплантированными слоями. Пластина АГ 221₇ диаметром 76 мм была разделена на 4 части. На каждой из частей были изготовлены следующие экспериментальные структуры: Me-p⁺-GaAs:Cr-Me; Me-p⁺-GaAs:Cr-n⁺-Me; Me-n⁺-GaAs:Cr-Me; Me-GaAs:Cr-Me. Контактный p⁺-слой получен ионной имплантацией магния с энергией ионов 160 кэВ и дозой облучения 10¹⁴ см⁻², контактный n⁺-слой получен ионной имплантацией кремния с энергией ионов 210 кэВ и дозой облучения 10¹⁴ см⁻². Глубина внедрения примеси 0,2 мкм. Для активации примеси проведен быстрый высокотемпературный отжиг. Режим отжига: 15 минут при температуре 900°C в атмосфере аргона. При данных параметрах проведения ионной имплантации расчетная концентрация электронов достигает 5·10¹⁸ см⁻³. В качестве металлического контакта использовался Cr/Ni, полученный электронно-лучевым напылением. Исследуемые структуры представляют собой единичные образцы размером 3×3 мм² и толщиной $d_{\text{сред}} \approx 500$ мкм.

2.2 Методика исследования морфологии поверхности

Для исследования микрорельефа и локальных свойств поверхности используется сканирующая зондовая микроскопия. В основе работы атомно-силового микроскопа (АСМ) лежат силы Ван-дер-Ваальса и силы упругого взаимодействия. Для контроля

расстояния между зондом и поверхностью используется система обратной связи (ОС) [33].

Взаимодействие зонда с поверхностью характеризуется параметром P . Если существует достаточно резкая и взаимно однозначная зависимость параметра P от расстояния зонд-образец $P=P(z)$, то данный параметр может быть использован для организации системы обратной связи.

Система обратной связи поддерживает значение параметра P постоянным, равным величине P_0 , задаваемой оператором. Если расстояние зонд-поверхность изменяется, то происходит изменение параметра P . В системе ОС формируется разностный сигнал, пропорциональный величине $\Delta P = P - P_0$, который усиливается до нужной величины и подается на исполнительный элемент (ИЭ) (рис.2.2).

Исполнительный элемент обрабатывает данный разностный сигнал, приближая зонд к поверхности или отодвигая его до тех пор, пока разностный сигнал не станет равным нулю. При перемещении зонда вдоль поверхности образца происходит изменение параметра взаимодействия P , обусловленное рельефом поверхности. Система ОС обрабатывает эти изменения, так что при перемещении зонда в плоскости XY сигнал на исполнительном элементе оказывается пропорциональным рельефу поверхности.

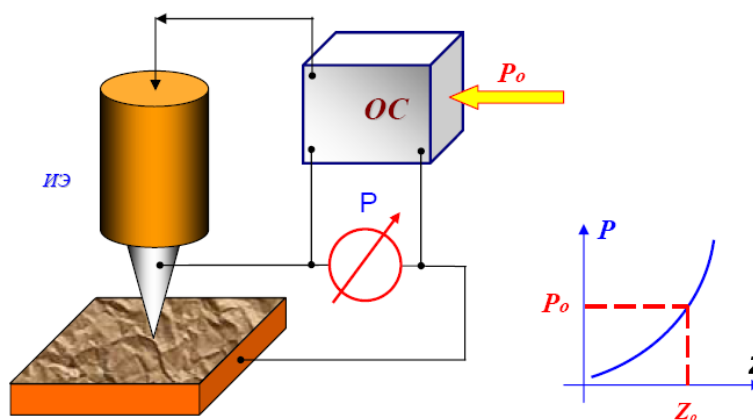


Рисунок 2.2 – Система обратной связи сканирующего зондового микроскопа [33]

Для получения изображения осуществляют специальным образом организованный процесс сканирования образца. При сканировании зонд вначале движется над образцом вдоль определенной линии (строчная развертка), при этом величина сигнала на исполнительном элементе, пропорциональная рельефу поверхности, записывается в память компьютера. Затем зонд возвращается в исходную точку и переходит на следующую строку сканирования (кадровая развертка), и процесс повторяется вновь. Записанный таким образом при сканировании сигнал обратной связи обрабатывается компьютером и строится изображение рельефа.

Измерения проводятся в полуконтактном режиме [34]. Игла кантилевера колеблется на резонансной частоте ω_z и, проходя в плоскости XY , по изменению амплитуды колебаний в моменты соприкосновения острия с поверхностью строит изображение рельефа поверхности и фазового контраста. Измерения проведены при помощи атомно-силового микроскопа фирмы NTEGRA.

2.3 Методика измерения вольт-амперных характеристик сенсоров

Проходящий через образец ток измерялся при помощи источника-измерителя Keithley 2410 (рис. 2.3а), принципиальная схема которого представлена на рисунке 2.3б. Образец помещается в специальную камеру, при помощи измерительного прибора на него подается напряжение в интервале от 0 до 500 В в обеих полярностях и измеряется проходящий через образец ток. Усредняя полученные значения, строятся характерные зависимости плотности тока от напряжения.

а



б

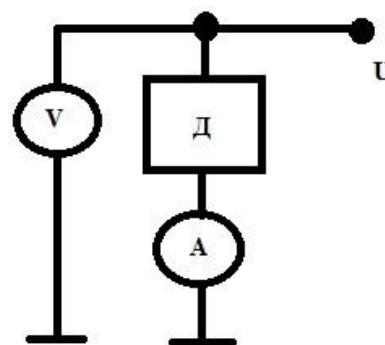


Рисунок 2.3 – Экспериментальная установка: а – источник-измеритель Keithley 2410; б – принципиальная схема Keithley 2410, где V-вольтметр, А – амперметр, Д – детектор, U – подаваемое напряжение смещения

2.4 Методика определения холловской подвижности

Используя эффект Холла [35] возможно измерение концентрации и подвижности носителей заряда. Определение данных параметров проведено методом Ван дер Пау [36]. Метод Ван дер Пау основан на измерении протекающего через образец тока и напряжения в момент нахождения образца в магнитном поле. Образец представляет собой прямоугольник с точечными In контактами, расположенными по периметру образца.

В соответствии с этим методом для расчета холловской подвижности необходимо определить значение проводимости и постоянной Холла. Прикладывая напряжение к одной паре контактов, измеряется разность потенциалов (U_σ) на другой паре контактов. Изменяя направление тока (I_σ), измеряется разность потенциалов на другой паре контактов. Проводимость образцов определяется по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{I_\sigma}{U_\sigma \cdot d \cdot C_\rho}, \quad (2.1)$$

где d – толщина образца, C_ρ – поправочный коэффициент, зависящий от периметра образца и расстояния между контактами.

Среднее значение напряжения Холла определяется по формуле:

$$U_x = \frac{U_{x+}^{B+} - U_{x+}^{B-} + U_{x-}^{B-} - U_{x-}^{B+}}{4}, \quad (2.2)$$

где $U_{x(+/-)}^{B(+/-)}$ – значение напряжения Холла при различном направлении магнитного поля.

Постоянная Холла определяется по следующему выражению:

$$R = \frac{U_x \cdot d \cdot 2.44 \cdot 10^4}{I_H \cdot C_H}, \quad (2.3)$$

где I_H – холловский ток, C_H – поправочный коэффициент, зависящий от периметра образца и расстояния между контактами, $(2,44 \cdot 10^4)$ – значение, полученное с учетом магнитной индукции $B=0,41$ Тл.

Используя формулы 2.1 и 2.3, определяется значение холловской подвижности равной произведению проводимости на постоянную Холла ($\sigma \times R$).

2.5 Методика измерения амплитудных спектров и определения эффективности сбора заряда

Блок-схема установки для измерения амплитудных спектров детекторных структур представлена на рисунке 2.4.

В качестве источника постоянного напряжения смещения U_{num} на детекторе используется источник высокого напряжения спектрометрического комплекса, выполненного в стандарте «САМАС». Ограничивающий резистор R обеспечивает установление режима детектора по постоянному току. Детектор облучается γ -излучением через металлический контакт перпендикулярно плоскости контактов. В качестве источника γ -излучения выступает радиоактивный изотоп ^{241}Am . Сигнал с детектора поступает на вход зарядо-чувствительного предусилителя (ЗЧУ). ЗЧУ интегрирует входной сигнал (ток) с детектора, усиливает его и передает на вход усилителя-формирователя (УФ) в виде импульса напряжения. Максимальная амплитуда импульса

напряжения пропорциональна заряду, который генерируется в детекторе. Усилитель-формирователь трансформирует форму входного сигнала для повышения отношения сигнал/шум и усиливает сигнал для согласования с динамическим диапазоном аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Коэффициент усиления УФ: $K_{yf}=640$. Оцифровка сигнала производится посредством АЦП с разрядностью 10 бит (1024 канала) и временем преобразования 3 мс. Вывод данных на ПК производится через плату интерфейса. Специальное программное обеспечение позволяет выводить данные на монитор в реальном масштабе времени и сохранять их на жестком диске в файле формата *.dat.



Рисунок 2.4 – Блок-схема экспериментальной установки для измерения амплитудного спектра

Эффективность сбора заряда (CCE) – отношение заряда, собранного детектором Q_{det} при воздействии ионизирующей частицы к заряду Q_{max} , генерируемому в детекторе этой частицей:

$$CCE = \frac{Q_{det}}{Q_{max}}. \quad (2.4)$$

Вычисление номера канала АЦП, соответствующего наиболее вероятному событию в пике, производится путем аппроксимации каждого пика распределением Гаусса [7]:

$$G = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{(N_i - N)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2.5)$$

где N_i – текущий номер канала АЦП; N – номер канала АЦП, соответствующего наиболее вероятному событию; σ – среднеквадратичное отклонение.

N является линейной функцией заряда, собираемого детектором Q_{det} :

$$Q_{det} = a \cdot N + b, \quad (2.6)$$

где a , b – коэффициенты линейной зависимости, определяемые параметрами измерительного тракта спектрометрического комплекса в стандарте «САМАС», Q_{det} измеряется в электронно-дырочных парах.

Таким образом, выражение (2.6) – калибровочная зависимость, позволяющая определять заряд Q_{det} , собранный детектором, по измеренному значению номера канала АЦП. Для γ – излучения: $a=48,9$ и $b=33$.

Для детекторов на основе арсенида галлия, компенсированного хромом, характерно отсутствие четко выраженного пика на амплитудном спектре при энергиях γ -квантов больше 20 кэВ [37]. На рисунке 2.5 представлен характерный вид амплитудного спектра детектора на основе HR-GaAs:Cr структур. Вместо пика, соответствующего γ -квантам с энергией $E_\gamma=59.4$ кэВ, наблюдается так называемая «полка» событий. В этом случае номер канала N определяется по спаду «полки» на уровне $\frac{1}{2}$ от среднего значения событий на «полке».

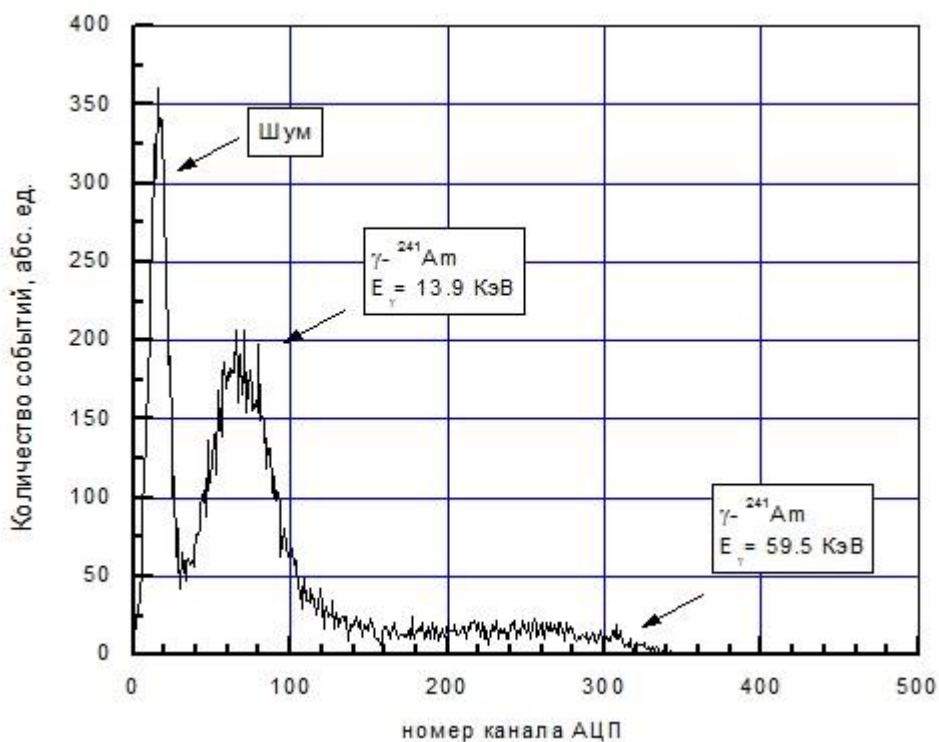


Рисунок 2.5 – Характерный вид амплитудного спектра детектора на основе HR-GaAs:Cr структур

2.6 Методика измерения напряженности электрического поля

Методика измерения напряженности электрического поля основана на использовании электрооптического эффекта. Электрооптический эффект – это изменение показателя преломления вещества под действием электрического поля. Если изменение

показателя преломления пропорционально первой степени напряженности электрического поля, то это линейный электрооптический эффект или эффект Поккельса.

Для наблюдения эффекта Поккельса кристалл под действием внешнего электрического поля должен становиться анизотропным. При этом изменяется показатель преломления для световой волны, поляризованной параллельно внешнему электрическому полю:

$$\Delta n = \frac{1}{2} r n_0^3 E, \quad (2.7)$$

где r – линейный электрооптический эффект, n_0 – показатель преломления вещества в отсутствии внешнего электрического поля, E – напряженность электрического поля в образце.

Так как показатель преломления изменился, то скорость распространения волны поляризованной параллельно полю будет определяться из следующего выражения:

$$v = \frac{c}{n_0 \Delta n}, \quad (2.8)$$

где c – скорость света в вакууме, Δn – величина изменения показателя преломления.

В результате различной скорости распространения, рассматриваемые волны приобретут разность хода:

$$\varphi = \frac{2\pi l}{\lambda} \Delta n, \quad (2.9)$$

где l – оптический путь в кристалле, λ – длина световой волны в вакууме.

Интенсивность света, прошедшего через кристалл и систему поляризатора и анализатора:

$$J = J_0 \cdot \cos^2(\beta - \alpha) - J_0 \cdot \sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right), \quad (2.10)$$

где J_0 – интенсивность линейно поляризованного света, выходящего из кристалла в отсутствие электрического поля и поглощения в кристалле, α – угол между плоскостью поляризации поляризатора и напряженности электрического поля в образце, β – угол между плоскостью поляризации анализатора и напряженности электрического поля в образце.

Если угол $\alpha=45^\circ$, $\beta=135^\circ$, то (2.10) принимает следующий вид:

$$J = J_0 \cdot \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right). \quad (2.11)$$

Используя эти выражения, получаем формулу для определения напряженности электрического поля в образце:

$$E = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot l \cdot n^3 \cdot r} \arcsin\left(\sqrt{\frac{J}{J_0}}\right). \quad (2.12)$$

То есть, измеряя распределение интенсивности прошедшего через кристалл излучения, можно исследовать профиль электрического поля.

Блок-схема экспериментальной установки для исследования распределения напряженности электрического поля с помощью эффекта Поккельса в детекторных структурах HR-GaAs:Cr, представлена на рисунке 2.6.

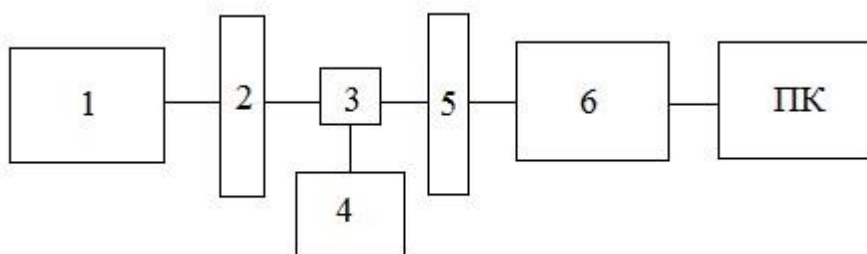


Рисунок 2.6 – Блок схема экспериментальной установки по исследованию распределения электрического поля с помощью эффекта Поккельса: 1 – источник излучения МДР-3; 2 – поляризатор; 3 – исследуемый образец; 4 – источник измеритель; 5 – анализатор; 6 – оптическая система на основе микроскопа МБС-9 и ИК видеокамеры W902H; ПК – персональный компьютер

Из источника (1) излучение последовательно проходит поляризатор (2), образец (3), к граням которого подведено напряжение смещения от источника измерителя Keithley 2140 (4), анализатор (5) и оптическую систему (6) записывается на видеокамеру W902H, обладающую высокой чувствительностью в ближнем ИК диапазоне (700-1100 нм). Изображение с видеокамеры оцифровывается восьми разрядным АЦП и передается на персональный компьютер (ПК), где производится его регистрация, хранение и последующая обработка.

3 Экспериментальные результаты

3.1 Морфология поверхности

Проведено исследование поверхности HR-GaAs:Cr структур с размерами анализируемой области от $2 \times 2 \text{ мкм}^2$ до $100 \times 100 \text{ мкм}^2$. Изображение рельефа поверхности представлено на рисунке 3.1.

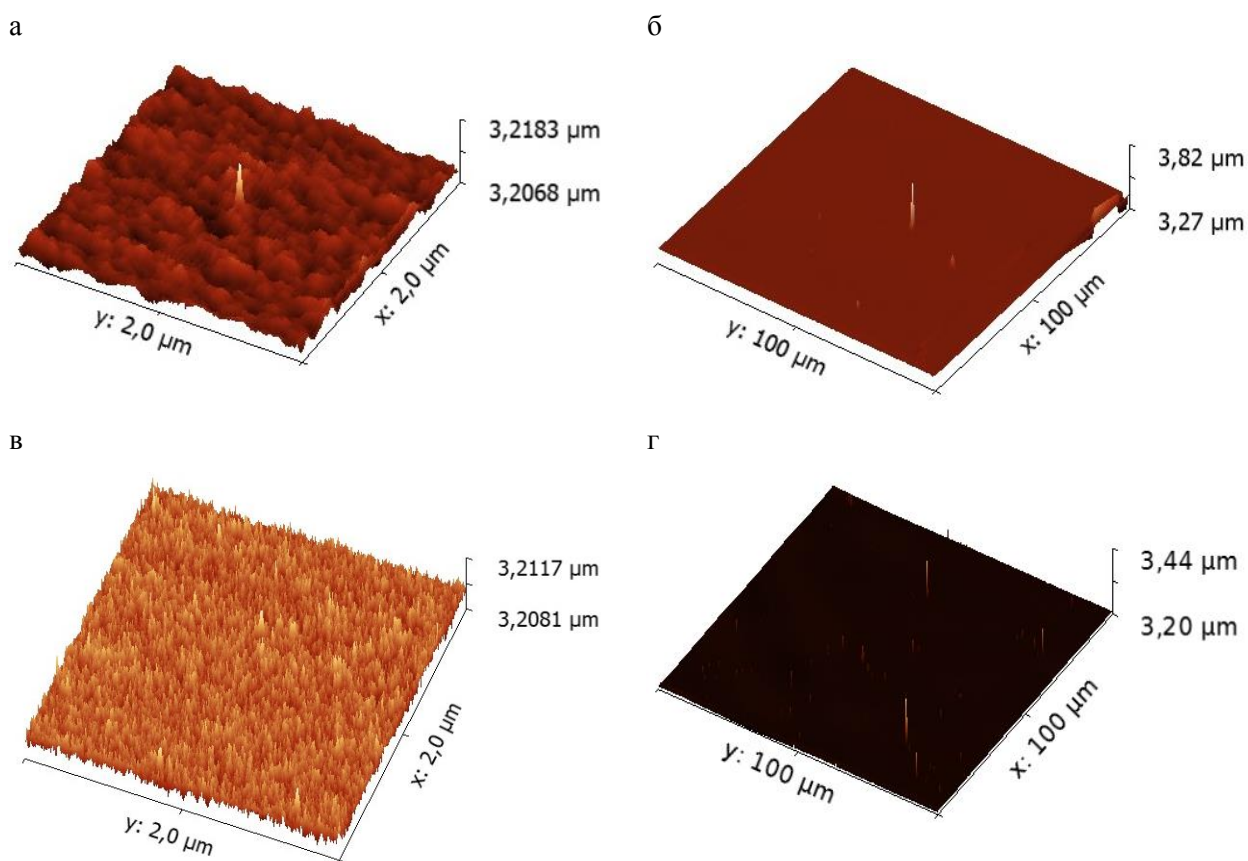


Рисунок 3.1 – 3D изображение рельефа поверхности с различными размерами анализируемой области: а), б) – без финишной полировки (метод 1); в), г) – полный цикл обработки + травление (метод 3)

Поверхность исследуемых образцов состоит из микродефектов. Из представленных изображений наглядно видно, что после обработки методом 3 неровности стравливаются полирующим травителем на основе серной кислоты, и поверхность становится более гладкой.

Введем понятие шероховатости поверхности. Под шероховатостью поверхности подразумевается совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами на базовой длине. Величина среднеквадратичной шероховатости определяется по следующей формуле:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r_j^2}, \quad (3.1)$$

где N – число строк поля данных, r – среднее значение отклонения от базовой линии.

Сравнение обработки без финишной полировки (метод 1) и полного цикла обработки с травлением (метод 3) по величине шероховатости (рис. 3.2) и среднеквадратичной шероховатости (таблица 3.1) говорит о том, что обработка с травлением уменьшает значение среднеквадратичной шероховатости примерно в 2 раза.

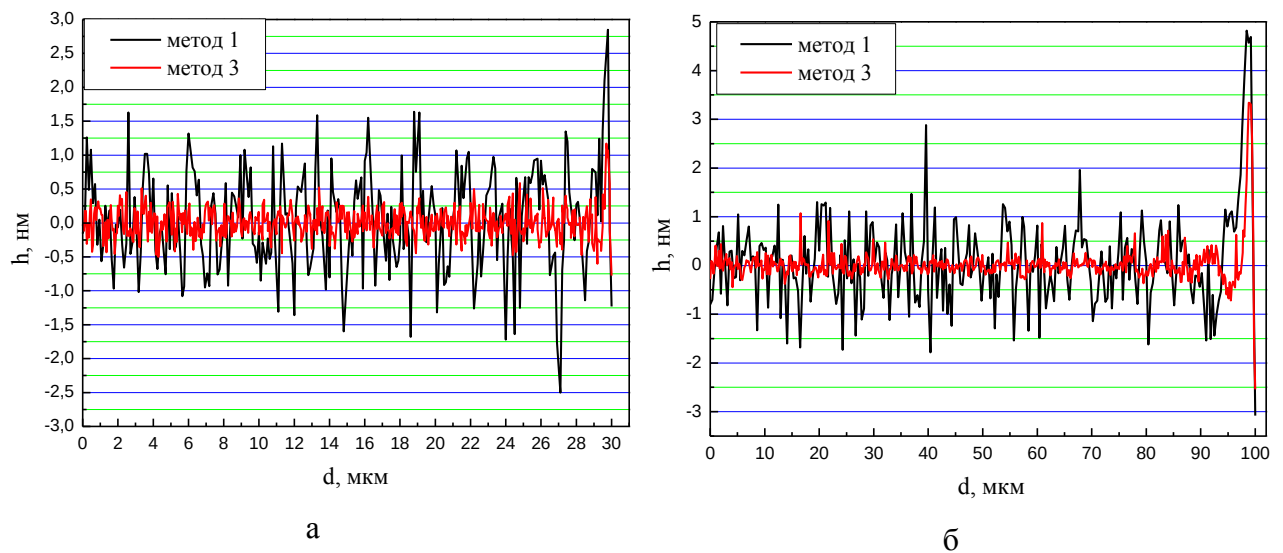


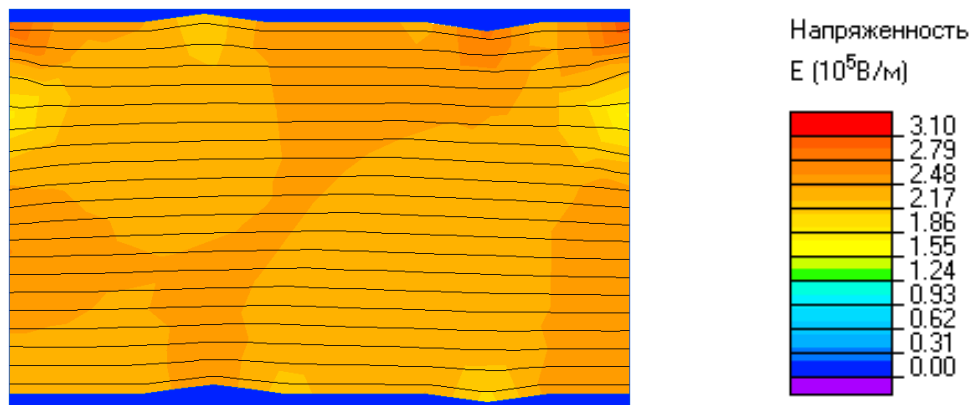
Рисунок 3.2 – Шероховатость поверхности с размерами анализируемой области: а - $30 \times 30 \text{ мкм}^2$; б - $100 \times 100 \text{ мкм}^2$, где h – величина шероховатости, d – длина анализируемой области

Таблица 3.1 – Среднеквадратичная шероховатость поверхности для различных размеров анализируемой области

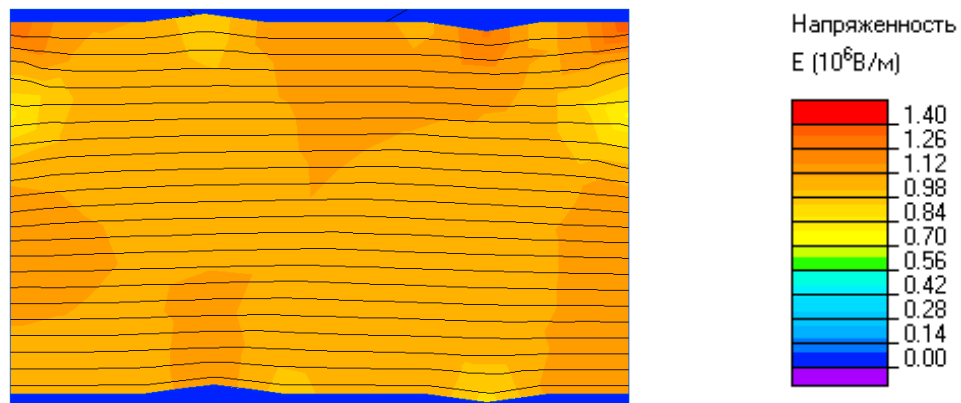
Размер анализируемой области, мкм	Расположение анализируемой области по направлению от центра к краю пластины:		
	0 – центр пластины; 1 – середина расстояния между центром и краем пластины; 2 – край пластины		
	0	1	2
Среднеквадратичная шероховатость поверхности, нм			
Обработка без финишной полировки (Метод 1)			
100	1.01	0.8	0.9
50	0.7	0.7	0.7
30	0.5	0.6	0.65
5	0.356	0.25	0.27
2	0.239	0.1	0.09
Полный цикл обработки + травление (Метод 3)			
50	0.26	0.23	
30	0.253	0.3	
5	0.23	0.198	0.183
2	0.19	0.161	0.14

По данным, представленным в таблице 3.1 видно, что при подготовке пластин к созданию сенсоров обработка поверхности однородная по всей поверхности пластины.

При помощи программного пакета ELCUT [38] выполнен расчет плотности тока в структурах с учетом морфологии поверхности в диапазоне напряжений от 0 до 500 В. На рисунках 3.3 и 3.4 представлено распределение напряженности поля для различной обработки поверхности при напряжениях 100 В и 450 В.



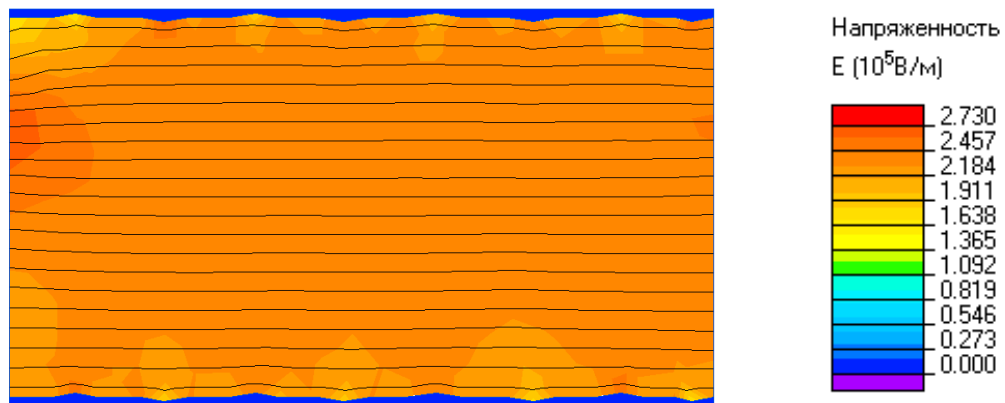
а



б

Рисунок 3.3 – Картина поля растекания токов для обработки без финишной полировки (метод 1):

а) – 100В; б) – 450В



а

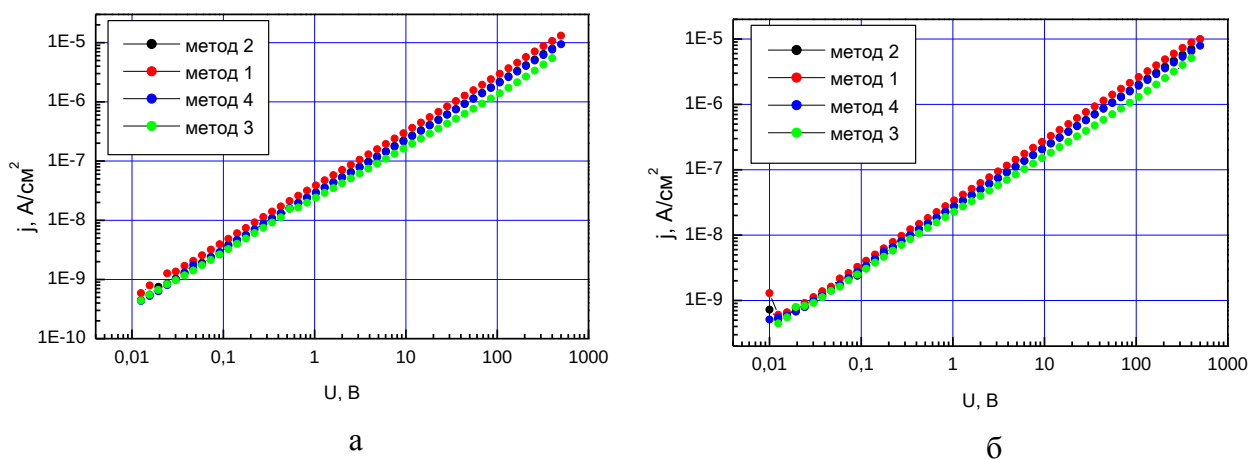
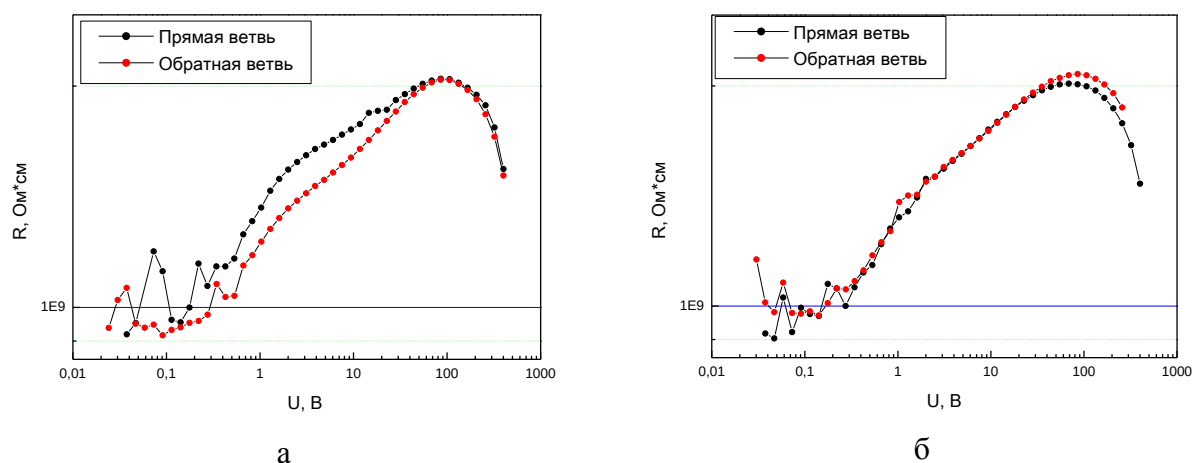


Рисунок 3.6 – Зависимость плотности тока от напряжения смещения для различных типов обработки поверхности: а) – прямая ветвь, б) – обратная ветвь

Под «прямой» и «обратной» ветвью подразумевается положительный или отрицательный потенциал на одном из контактов. Вольт-амперные характеристики симметричны во всем диапазоне смещений. Наибольший ток протекает при обработке без финишной полировки (метод 1). При полном цикле обработки (метод 2) и несимметричной обработке (метод 4) плотность тока, протекающего через образец, имеет аналогичные значения. А при полном цикле обработки с травлением поверхности (метод 3) через образец протекает наименьший ток.

Вольт-амперные характеристики имеют характерные линейный участок в интервале от 0,03В до 0,35В, сублинейный участок от 0,4В до 44В и сверхлинейный участок от 55В. Более отчетливо эти участки видны на графиках зависимости дифференциального удельного сопротивления от напряжения (рис.3.7).



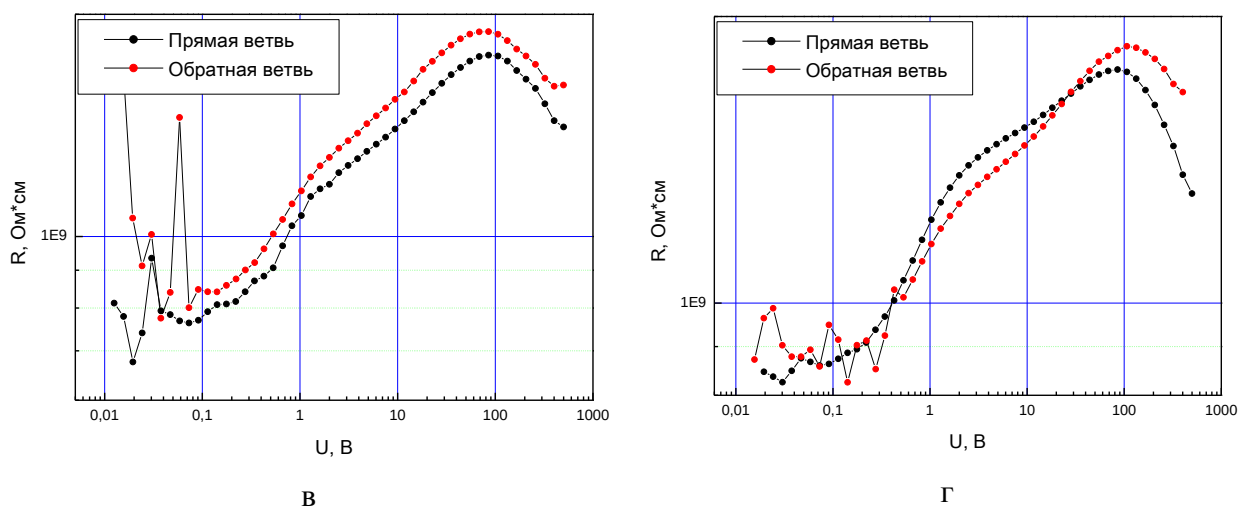
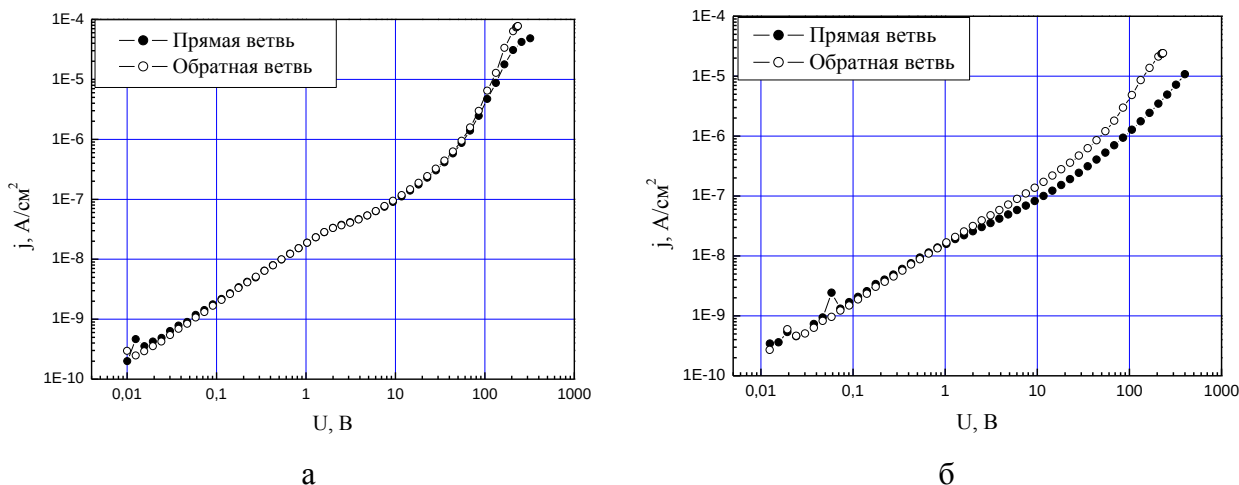


Рисунок 3.7 – Зависимость дифференциального удельного сопротивления от напряжения: а) – без финишной полировки (метод 1), б) – полный цикл обработки (метод 2), в) – полный цикл обработки + травление (метод 3), г) – несимметричная обработка (метод 4)

На рисунке 3.8 представлены усредненные по группе образцов зависимости плотности тока от напряжения смещения для структур с различными типами ионно-имплантированной примеси. Под «прямой» ветвью подразумевается положительный потенциал на контактном p^+ -слое в случае структур p^+ -GaAs:Cr-Cr/Ni и p^+ -GaAs:Cr- p^+ и на металлическом контакте в случае p^+ -GaAs:Cr-Cr/Ni и Ni/Cr-GaAs:Cr-Cr/Ni структур.



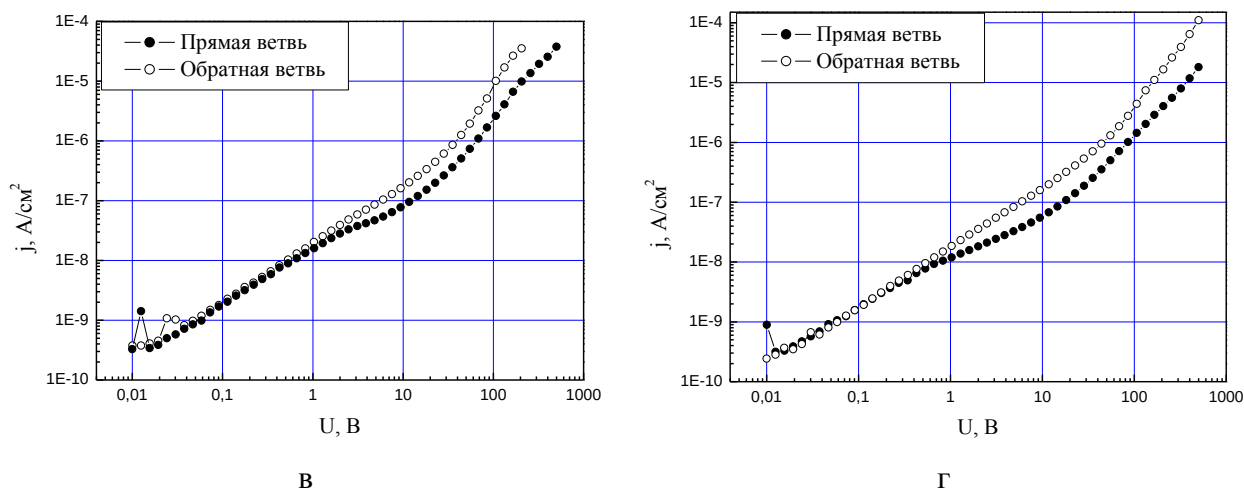
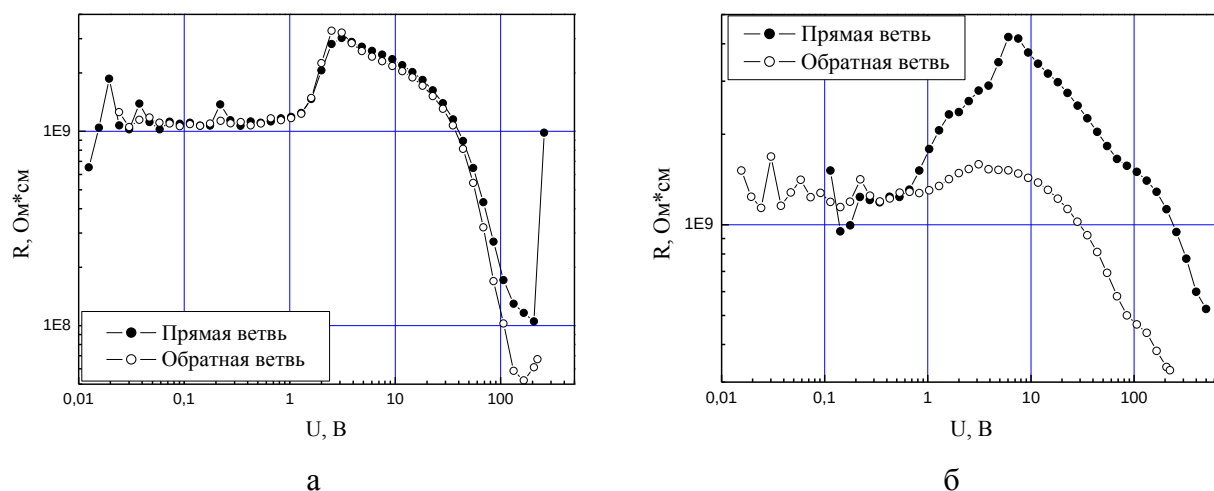


Рисунок 3.8 – Зависимость плотности тока от напряжения для структур с различным типом ионно-имплантированной примеси: а) – p^+ -GaAs:Cr-Cr/Ni, б) – p^+ -GaAs:Cr- n^+ , в) – n^+ -GaAs:Cr-Cr/Ni, г) – Ni/Cr-GaAs:Cr-Cr/Ni

Из графиков, представленных на рисунке 3.8 видно, что при введении ионно-имплантированной примеси происходит увеличение протяженности линейного участка 0,03-2 В. Для структур с симметричными металлическими контактами линейный участок ВАХ наблюдается в интервале 0,03-0,35 В.

Для более детального изучения вида ВАХ ионно-имплантированных структур, построены зависимости дифференциального удельного сопротивления от напряжения смещения (рис. 3.9).



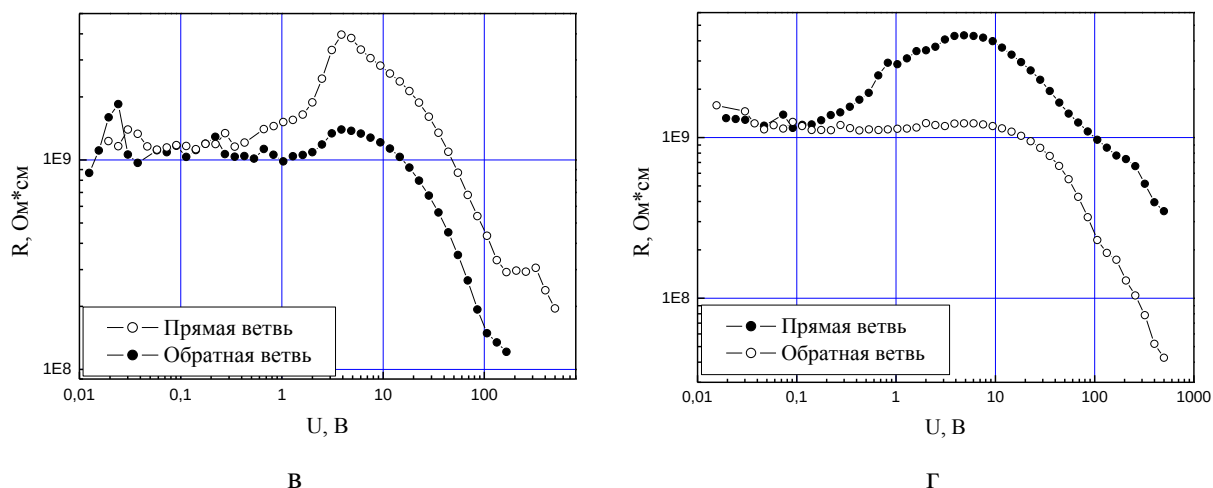


Рисунок 3.9 – Зависимость дифференциального удельного сопротивления от напряжения смещения: а) $-p^+-GaAs:Cr-Cr/Ni$, б) $-p^+-GaAs:Cr-n^+$, в) $n^+-GaAs:Cr-Cr/Ni$, г) $Ni/Cr-GaAs:Cr-Cr/Ni$

На рисунке 3.10 представлена усредненная по группе образцов зависимость плотности тока от напряжения смещения для сенсоров с контактами в виде пленок Ni/AuGe/Ni/Au. До напряжения 9 В наблюдается линейный участок зависимости плотности тока от напряжения. В интервале от 9 В до 202 В наблюдается квадратичный участок зависимости плотности тока от напряжения, а далее участок резкого роста тока. Участок квадратичной зависимости и резкого роста зависимости плотности тока от напряжения соответствует режиму токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ).

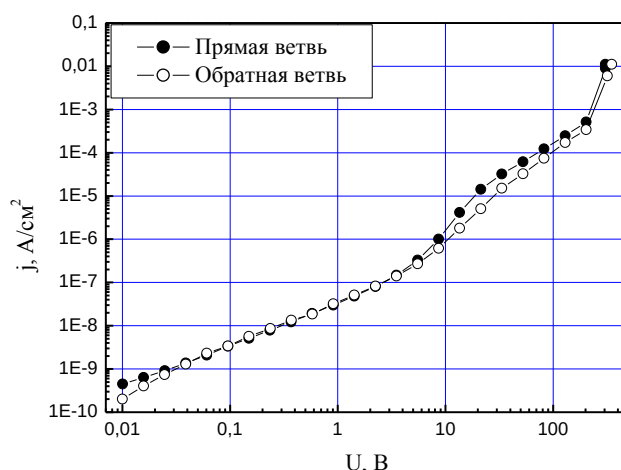


Рисунок 3.10 – ВАХ сенсоров с контактами в виде пленки Ni/AuGe/Ni/Au

ВАХ на линейном участке описывается следующим уравнением:

$$j = e p_0 \mu_p \frac{U}{d}, \quad (3.2)$$

где j – плотность тока, e – заряд электрона, p_0 – концентрация свободных равновесных носителей заряда, μ_p – подвижность дырок, U – напряжение смещения, d – толщина исследуемой структуры.

ВАХ на последующих участках с учетом наличия ловушечных уровней описывается выражением:

$$j = \frac{9}{8} \theta \varepsilon \mu_p \frac{U^2}{d^3}, \quad (3.3)$$

где θ – постоянная, не зависящая от уровня инжекции до тех пор, пока ловушечные уровни остаются мелкими. Формула для определения θ :

$$\theta = \frac{N_v}{2N_t} \exp \frac{E_v - E_t}{kT}, \quad (3.4)$$

где N_v – эффективная плотность состояний в валентной зоне, N_t – концентрация ловушечных центров, $E_v - E_t$ – глубина залегания ловушечных центров, k – постоянная Больцмана, T – температура.

Напряжение перехода от линейного участка к квадратичному участку определяется выражением:

$$U_x = \frac{4ep_0d^2}{3\theta\varepsilon}, \quad (3.5)$$

где ε – абсолютная диэлектрическая проницаемость.

С ростом уровня инжекции уровень Ферми поднимается и при некотором значении напряжения он пересекает ловушечный уровень. Это соответствует напряжению предельного заполнения ловушек, начиная с этого напряжения, наблюдается резкий рост уровня тока:

$$U_{пзл} = \frac{eN_t d^2}{2\varepsilon}, \quad (3.6)$$

Используя выражения (3.2)-(3.6) проведен анализ кривой на рисунке 3.10.

Из линейного участка кривой, соответствующего закону Ома, согласно формуле (3.2), определена концентрация свободных равновесных носителей заряда: $p_0 \approx 7,5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$. Напряжение перехода от линейного к квадратичному участку $U_x = 9 \text{ В}$. Тогда значение концентрации свободных равновесных носителей заряда из формулы (3.5): $p_0 \approx 4,5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$. Достаточно хорошее совпадение свободной равновесной концентрации дырок на линейном и квадратичном участке также свидетельствует о реализации режима ТОПЗ.

Напряжения предельного заполнения ловушек $U_{пзл} \approx 202 \text{ В}$. Тогда из формулы (3.6) концентрация ловушечных центров: $N_t \approx 1,1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Наконец, из формулы (3.4) оценивается глубина залегания ловушечных уровней: $E_t - E_v \approx 0,6 \text{ эВ}$.

3.3 Исследование термостабильности и электрофизических характеристик HR-GaAs:Cr структур

Проведены измерения холловской подвижности исходного материала (арсенид галлия, легированный теллуром) и высокоомного материала (арсенид галлия, компенсированный хромом) для определения термостабильности материала и типа проводимости ионно-имплантированных структур. Исследование материала на термостабильность необходимо проводить, так как активация примеси в таких структурах проводится при температуре 900°C. Предварительно, образцы были закрыты слоем SiO₂ для предотвращения процесса испарения мышьяка с поверхности GaAs, а в процессе отжига исследуемые пластины дополнительно закрывались стеклом. При создании образцов для измерения эффекта Холла после сплавления индиевых контактов проводилось травление образцов в течение 30 секунд.

Холловская подвижность определяется как произведение проводимости на постоянную Холла ($\sigma \times R$). Компоненты холловской подвижности определяются, используя формулы 2.1 и 2.3, где $C_H=0.65$ и $C_p=4.80$. Данные значения поправочных коэффициентов определены экспериментально.

На основе данных, представленных в таблице 3.2, HR-GaAs:Cr можно считать термостабильным материалом, так как изменение холловской подвижности материала после высокотемпературного отжига в атмосфере аргона при 900°C в течении 15 минут не превышает 10%.

Таблица 3.2 – Термостабильность GaAs

	Без отжига	Отжиг (900°C, 15 мин, Ar)
Холловская подвижность см²/(В·с)	n-GaAs (исходный) материал	
	-5313,3	-4876,7
	HR-GaAs:Cr	
	-1613,3	-1446,7

Холловские измерения HR-GaAs:Cr структур с контактным p⁺-слоем показывают холловскую подвижность $\approx -2276,7$ см²/(В·с). Такой низкий уровень подвижности, возможно, обусловлен перераспределением хрома в приповерхностном слое. Возможность увеличения акцепторной примеси в HR-GaAs:Cr структурах подтверждается данными, представленными в таблице 3.3 и на рисунке 3.11. По данным таблицы 3.3 видно уменьшение удельного сопротивления при отжиге образцов и переход материала из n-типа проводимости в p-тип.

Таблица 3.3 – Измерения эффекта Холла на HR-GaAs:Cr структурах

Режим облучения	GaAs:Cr (исходные параметры)	700°C/ 15 сек	800°C/ 15 сек	Стравливание 5 мкм при режиме 800°C/15 сек
ρ , Ом·см	$1,65 \cdot 10^8$	$6,7 \cdot 10^3$	$1,23 \cdot 10^5$	$6,1 \cdot 10^8$
Холловская подвижность, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$		-78	-22	-1180

На рисунке 3.11 представлена зависимость распределения концентрации хрома по толщине GaAs:Cr структур при различных режимах высокотемпературного отжига. Как видно при температуре отжига свыше 800°C происходит уменьшение концентрации Cr в приповерхностном слое толщиной 2 мкм, что соответствует толщине ионно-имплантированного слоя в исследуемых нами структурах.

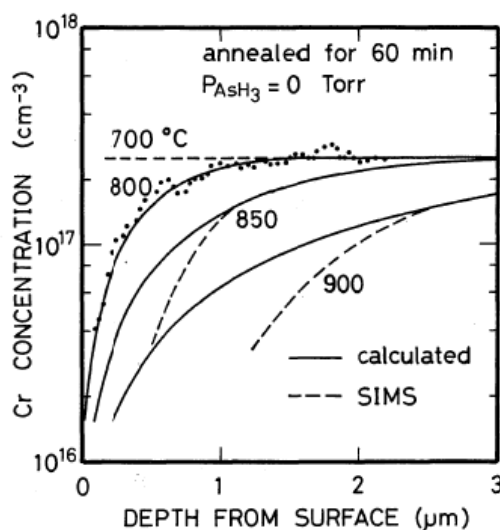


Рисунок 3.11 – Перераспределение профиля хрома после отжига в диапазоне температур в течение 60 минут [39]

После проведения процесса травления (стравливание 5 мкм с каждой стороны) происходит процесс восстановления исходных параметров.

При имплантации ионов с энергией 50кэВ, дозой облучения 10^{15} см^{-2} и режиме активации ионно-имплантированной примеси 800°C в течении 15 секунд концентрация носителей заряда в слое толщиной 0,15 мкм составляет: $n=7,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $p=7,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

3.4 Эффективность сбора заряда и оценка времени жизни носителей заряда

На спектрометрическом комплексе в стандарте «САМАС» проведено измерение амплитудных спектров. В качестве источника γ -излучения используется ^{241}Am .

На рисунке 3.12 представлены графики полевой зависимости эффективности сбора заряда для структур с различными типами ионно-имплантированных контактов. При более высоких значениях напряжения из-за высоких темновых токов (рис. 3.8) значение шума увеличивается и измерение амплитудных спектров невозможно. Под шумом подразумевается дробовой шум исследуемых структур.

Увеличение эффективности сбора заряда связано с соответствующим увеличением дрейфовой длины электронов при увеличении напряженности поля. Данные по среднему значению эффективности сбора заряда при -70В представлены в таблице 3.4.

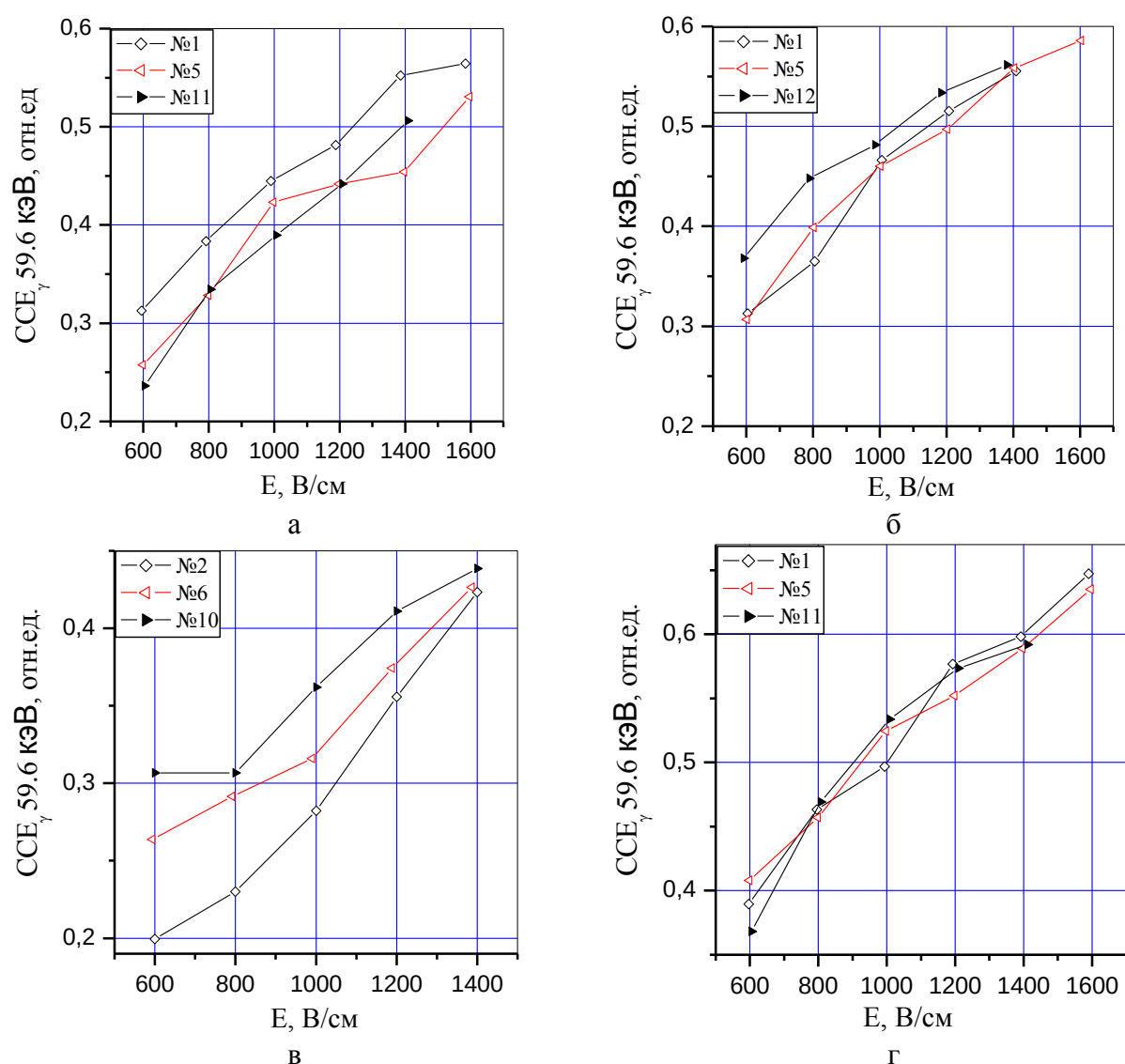


Рисунок 3.12 – Эффективность сбора заряда структур: а) $p^+ - \text{GaAs:Cr} - \text{Me}$; б) $p^+ - \text{GaAs:Cr} - n^+$; в) $n^+ - \text{GaAs:Cr} - \text{Me}$; г) $\text{Me} - \text{GaAs:Cr} - \text{Me}$

Таблица 3.4 – Эффективность сбора заряда при -70В для структур с различными типами ионно-имплантированной примеси

Тип структуры	CCE, %
p ⁺ - GaAs:Cr – Me	50
p ⁺ - GaAs:Cr – n ⁺	56
n ⁺ - GaAs:Cr – Me	43
Me – GaAs:Cr – Me	59

Время жизни электронов определяется с использованием уравнения Хехта (приложение А). В таблице 3.5 представлено произведение $\mu\tau$ для исследуемых образцов. Подвижность $\mu=2500\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Таблица 3.5 - $\mu\tau$ для образцов с различными типами ионно-имплантированных контактов

Тип структуры	$\mu\tau, 10^{-5}\text{см}^2/\text{В}$
p ⁺ - GaAs:Cr – Me	2,4,
p ⁺ - GaAs:Cr – n ⁺	2,9
n ⁺ - GaAs:Cr – Me	1,8
Me – GaAs:Cr – Me	3,3

Как видно из рисунка 3.10 после 4В на вольт-амперной характеристике образцов с контактами в виде пленок Ni/AuGe/Ni/Au наблюдается резкий рост тока с напряжением, что приводит к большим шумам при измерении амплитудных спектров. Поэтому представляется возможным провести измерения амплитудных спектров только до 20В с обратным знаком. Эффективность сбора заряда образцов при данных значениях напряжения представлена в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Эффективность сбора заряда образцов с контактами в виде пленки Ni/AuGe/Ni/Au

№ образца	Напряжение, В	
	«-»10	«-»20
	CCE, %	
2	59	
5	60	74
9	63	73

Как видно из таблицы 3.6 с увеличением напряженности поля значение CCE возрастает.

Произведение $\mu\tau$ для структур с контактами Ni/AuGe/Ni/Au составляет $2,2\cdot 10^{-4}\text{см}^2/\text{В}$.

3.5 Распределение напряженности электрического поля по толщине

На рисунке 3.13 представлено распределение напряженности поля по толщине в сенсорах с различными видами ионно-имплантированной примеси при напряжении на структуре 500В в обратной полярности. Программа для определения распределения напряженности поля представлена в приложении Б.

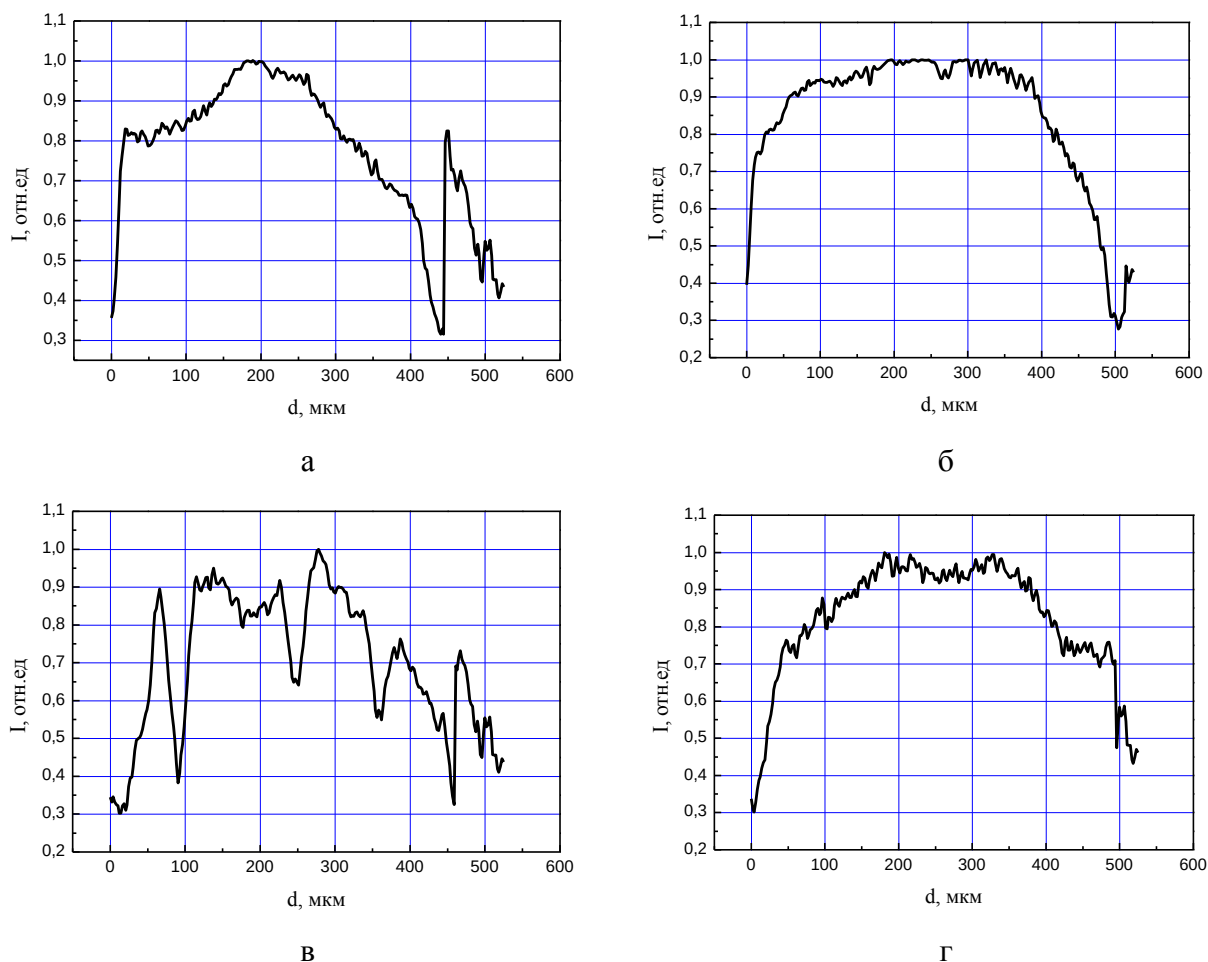


Рисунок 3.13 – Распределение напряженности поля по толщине в структурах: а) p^+ - GaAs:Cr – Me; б) p^+ - GaAs:Cr – n^+ ; в) n^+ - GaAs:Cr – Me; г) Me – GaAs:Cr – Me

В данных структурах наблюдается однородное распределение напряженности поля по толщине, что подтверждает относительно высокое значение эффективности сбора заряда в данных структурах.

3.6 Анализ полученных результатов

Анализируя экспериментально полученные данные можно сделать следующие выводы:

1. Дополнительное травление в сернокислотном травителе уменьшает значение среднеквадратичной шероховатости в 2 раза и понижает уровень протекающего темнового тока;
2. При обработке без финишной полировки наблюдается модуляция проводимости, так как на микроостриях формируются области с повышенной напряженностью электрического поля. В данных областях определяющим является эффект Шоттки, который относится к эффектам сильного поля;
3. Вольт-амперные характеристики образцов с различной морфологией поверхности являются симметричными и имеют следующие участки: линейный (от 0,03В до 0,35В), сублинейный (от 0,4В до 44В), сверхлинейный (от 55В);
4. Вольт-амперные характеристики сенсоров с контактами в виде пленок Ni/AuGe/Ni/Au симметричны и имеют следующие участки: до напряжения 9 В линейный участок зависимости плотности тока от напряжения смещения; в интервале от 9 В до 202 В квадратичный участок зависимости плотности тока от напряжения смещения, а далее участок резкого роста тока. Резкое увеличение тока связано с инжекцией носителей заряда из металла в полупроводник за счет наличия подлежащего слоя, в качестве которого выступает AuGe;
5. Концентрация ловушечных центров в HR-GaAs:Cr составляет порядка 10^{12} см^{-3} , а глубина их залегания $\approx 0,6 \text{ эВ}$;
6. Оптимальный режим активации ионно-имплантированной примеси в HR-GaAs:Cr структурах: 800°C в атмосфере аргона в течение 15 секунд, при дозе облучения 10^{15} см^{-2} и энергии ионов 50 кэВ. Данный режим позволяет создавать p^+ - и n^+ -слои с концентрациями: $n=7,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $p=7,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$;
7. Использование ионно-имплантированных слоев при создании контактов к HR-GaAs:Cr не оказывает влияние на основные характеристики детекторных структур: напряженность поля, эффективность сбора заряда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации было проведено комплексное исследование влияния материала контактов и методов обработки поверхности на характеристики арсенидгаллиевых сенсоров рентгеновского излучения.

Были проведены следующие измерения и использованы методики:

- атомно-силовой микроскопии для характеризации морфологии поверхности полупроводниковых пластин;
- амплитудной спектрометрии для оценки эффективности сбора заряда и времени жизни неравновесных носителей заряда;
- измерение вольт-амперных характеристик для контроля силы тока;
- электрооптического эффекта Поккельса для профилирования электрического поля.

Установлено:

1. Наименьшее значение среднеквадратичной шероховатости и плотности тока наблюдается при полном цикле обработки с травлением, то есть с точки зрения морфологии поверхности данный способ является самым эффективным;
2. Вольт-амперные характеристики структур Ni/Cr–GaAs:Cr–Cr/Ni имеют следующие участки: линейный (от 0,03В до 0,35В), сублинейный (от 0,4В до 44В), сверхлинейный (от 55В). Токи, протекающие через детектор обусловлены токами термоэлектронной эмиссии с учетом барьера Шоттки;
3. Вольт-амперные характеристики сенсоров с контактами в виде пленок Ni/AuGe/Ni/Au имеют следующие участки: линейный (до 9 В), квадратичный (9 В – 202 В) и участок резкого роста тока (от 202 В). Наблюдается удлинение линейного участка и отсутствует сублинейный участок на зависимости плотности тока от напряжения. Квадратичная зависимость силы тока от напряжения, при напряжениях выше 9 В, свидетельствует о реализации режима тока ограниченного пространственным зарядом (ТОПЗ), что объясняется инжекцией носителей заряда из контактных слоев, образующихся при изготовлении металлических контактов на основе пленок AuGe;
4. Определена концентрация ловушечных уровней в HR-GaAs:Cr : $N_t \approx 1,1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и оценена глубина залегания ловушечных уровней: $E_t - E_v \approx 0,6 \text{ эВ}$;
5. Ионная имплантация является альтернативным способом создания различных типов контактов к HR-GaAs:Cr. При использовании режима: 50кэВ, 10^{15} см^{-2} , и активации ионно-имплантированной примеси в режиме: 800°C в атмосфере аргона в

течение 15 секунд, концентрация носителей заряда в слое толщиной 0,15 мкм достигает значений : $n=7,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $p=7,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Characterization of a GaAs(Cr) Medipix 2 hybrid pixel detector / L. Tlustos [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2011. A633. P. 103-107
2. Characterization of photon counting pixel detectors based on semi-insulating GaAs sensor material / E. Hamann [et al.] // J.Phys: Conf. Ser. – 2013. Vol. 425, part 6
3. A matrix Gallium-Arsenide Detector for Roentgenography / O. Tolbanov [et al.] // Biomedical Engineering. – 2013. Vol. 46 (5). P. 194-198
4. MHz rate X-Ray imaging with GaAs:Cr sensors using the LPD detector system / M.C. Veale [et al.] // J. Instrum. – 2017. Vol. 12, № 2
5. Evaluation of Suitability of GaAs:Cr sensors for X-ray transmission technology of diamond-bearing ore enrichment / A.N. Zarubin [et al.] // NSS/MIC/RTSD – 2017
6. Черняев А.П. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом / А.П. Черняев. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 152 с.
7. Абрамов А. И. Основы экспериментальных методов ядерной физики / А. И. Абрамов, Ю. А. Казанский, Е. С. Матусевич. – М. : Атомиздат, 1977. – 524 с.
8. Толбанов О. П. Детекторы ионизирующих излучений на основе компенсированного арсенида галлия // Вестн. Том. Гос-ного ун-та. Серия «Физика». – 2005. – № 285. – С.155-163.
9. Физика шумов и флуктуации параметров : [учеб.-метод. пособие для вузов по специальности «Радиофизика»] / А.В. Якимов. – Нижний Новгород : Нижегородский гос. ун-т, 2013. – 85 с.
10. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи ; под ред. Р. А. Суриса. – М. : Мир, 1984. – 455 с.
11. Гаман В. И. Физика полупроводниковых приборов / В. И. Гаман. – Томск : НТЛ, 2000. – 426 с.
12. Шалимова К.В. Физика полупроводников / К.В. Шалимова. – СПб : Лань, 2010. – 400 с.
13. Юсупов А.Р. Кинетические явления в аморфных полупроводниках: учеб.пособие – Уфа, 2013. – 57 с.
14. Ионизация мелких примесей электрическим полем в случайном кулоновском потенциале / Н.Г. Жданов [и др.] // Письма в ЖЭТФ. – 1995. Т. 62, вып.2. – С. 108-111
15. Fu-Chien Chiu A review on Conduction Mechanisms in dielectric films // Advances in Materials Science and Engineering. – 2014.

16. Analysis of nonideal Schottky and p-n junction diodes – Extraction of parameters from I-V plots / M. Lyakas, R. Zaharia, M. Eizenberg // *J. Appl. Phys.* – 1995. - V.78. - P.5481-5489.
17. Торхов Н.А. Формирование структуры собственного оксида на поверхности n-GaAs при естественном окислении на воздухе // *ФТП.* – 2013. – Т. 37. – № 10. – С. 1205-1213.
18. Пассивация поверхности арсенида галлия халькогенидом галлия / Н.Н. Безрядин [и др.] // *Письма в ЖТФ.* – 2008. – Т. 34. – № 10. – С. 47-52.
19. The advanced unified defect model for Schottky barrier formation / W.E. Spicer [et al.] // *Sci.Technol.* – 1988. – V. 6. – P. 1245.
20. From synchrotron radiation to I-V measurements of GaAs Schottky barrier formation / W.E. Spicer [et al.] // *Appl.Phys.Lett.* – 1989. – V. 66. – P. 711.
21. Manificier J.C. Theoretical and numerical investigations of carriers transport in N – semi-insulating – N and P – semi-insulating – P diodes – A new approach // *Solid State Electronics.* – 2008. – № 52. – P. 1162-1169.
22. Manificier J.C. Contact vs bulk effects in N – semi-insulating – N and P – semi-insulating – P diodes // *Solid State Electronics.* – 2013. – № 80. – P. 45-54.
23. Измерение высоты барьера на границе металл – полуизолирующий арсенид галлия / Г. И. Айзенштат [и др.] // *Физика и техника полупроводников.* – 2007. – Т. 41, вып. 11 – С. 1327-1328.
24. Cola A. Electric fields and dominant carrier transport mechanisms in CdTe Schottky detectors / A. Cola, I. Farella // *Applied physics letters.* – 2013. – V. 102.
25. Charge collection properties of CdTe Schottky diode for X- and γ -rays detectors / L. Kosyachenko [et al.] // *Semicond. Sci. Technol.* – 2008. – V. 23. – p. 1-8.
26. Investigation of the current-voltage characteristics, the electric field distribution and the charge collection efficiency in X-ray sensors based on chromium compensated gallium arsenide / A. Tyazhev [et al.] // *Proc. SPIE 9213, Hard X-Ray, Gamma-Ray, and Neutron Detector Physics XVI, 92130G (September 5, 2014); doi:10.1117/12.2061302*
27. Barrier-height measurement for a gallium arsenide metal-semi-insulator interface / G.I. Ayzenshtat [et al.] // *Semiconductors.* – 2007. – V. 41. – № 11. –P. 1310-1321.
28. Cola A. The polarization mechanism in CdTe Schottky detectors / A. Cola, I. Farella // *Applied physics letters.* – 2009. – V. 94.
29. Radiation induced control of electric field in Au/CdTe/In structures / J. Franc [et al.] // *Applied physics letters.* – 2011. – V. 98.

30. Parker G.H. Electric field dependence of GaAs schottky barriers / G.H. Parker, T.C. McGill, C.A. Mead // Solid-State Electronics. – 1968. – V.11. – P. 201-204.
31. Electrode structures in diode-type cadmium telluride detectors: field emission scanning electron microscopy and energy-dispersive x-ray microanalysis / K. Okada [et al.] // Applied physics letters. – 2008. – V. 92.
32. Quantitative analysis of polarization phenomena in CdTe radiation detectors / H. Toyama // Japanese Journal of Applied Physics. – 2006. – V.45. – P. 8842-8847.
33. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии / В.Л. Миронов. – учеб.пособие: Н.Новгород. – 2004. – С. 114.
34. Исследование свойств поверхности арсенида галлия методом сканирующей атомно-силовой микроскопии / В.Г. Божков [и др.] // ФТП. – 2008. – Т. 42. - № 5. – С. 546-554.
35. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников / В.И. Фистуль. – М. : Высш. шк., 1984. – 352 с.
36. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов / Л.П. Павлов. – М. : Высш. шк., 1987. – 239 с.
37. GaAs structures for X-ray imaging detectors / G.I. Ayzenshtat [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2001. – Section A 466. – P. 25-32.
38. ELCUT [Электронный ресурс] / электрон. учеб. – С.-Пб. – URL: http://elcut.ru/free_doc_r.htm
39. Kasahara J. Redistribution of Cr in Capless-Annealed GaAs under Arsenic Pressure / J. Kasahara, N. Watanabe // Japanese Journal of Applied Physics. – 1980. – V. 19. – No 3. – P. L151-L154.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Программа MathCad для определения произведения $\mu\tau$ для электронов

Облучение квантами со стороны катода. Область слабого поля ($E < 2,5$ кВ/см).

$BnLow$ – матрица данных эффективности сбора заряда электронов при воздействии гамма квантов: U - напряжение смещения; $CCElow$ – эффективность сбора заряда при напряженности менее 2,5кВ/см.

$$UL := BnLow^{(0)} \quad CCElow := BnLow^{(1)}$$

$$d := 530 \cdot 10^{-4} \text{ - толщина образца, см}$$

$$N1 := \text{length}(UL) \quad N1 = \blacksquare \quad in := 0..N1$$

$$Eav := \frac{UL}{d}$$

Определение коэффициентов аппроксимирующей функции ($g(V)$), где pnL – произведение $\mu\tau$ для электронов. Напряженность, не превышающая 2,5кВ/см (слабое поле).

$$FFnI(u, pnL) := \left[\begin{array}{c} \left[\frac{pnL \cdot u}{d^2} - \left(\frac{pnL \cdot u}{d^2} \right) \cdot \exp\left(\frac{-d^2}{pnL \cdot u}\right) \right] \\ \frac{1}{d^2} \cdot u - \frac{1}{d^2} \cdot u \cdot \exp\left(\frac{-d^2}{pnL \cdot u}\right) - \frac{1}{pnL} \cdot \exp\left(\frac{-d^2}{pnL \cdot u}\right) \end{array} \right]$$

$$vVnL := 1.0 \cdot 10^{-4}$$

$$b := 15 \quad \mu n := 2500$$

$$\mu p := \frac{\mu n}{b} \quad \text{- подвижность электронов } (\mu n) \text{ и дырок } (\mu p), \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$vVnL$ - начальное приближение произведения $\mu\tau$ для электронов.

$$PL := \text{genfit}(UL, CCElow, vVnL, FFnI) \quad PL = \blacksquare \quad VnL := 1, 2..300$$

$$gL(VnL) := FFnI(VnL, PL)_0 \quad \text{- аппроксимирующая функция}$$

$$\tau nLow := \frac{PL}{\mu n} \quad \text{время жизни электронов, с} \quad \frac{\tau nLow}{10^{-9}} = \blacksquare$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Программа MathCad для определения распределения напряженности электрического поля по толщине образца

$V0 := \text{READBMP}("C:\\100.BMP")$ - считывание из файла $\text{rows}(V0) = 480$ $\text{cols}(V0) = 720$

матрица нормировки  $x7 := 861$ пиксел/мм, при 7 кратном объективе

$\text{Norm} := \text{submatrix}(V0, 300, 340, 400, 460)$ $x4 := 486$ пиксел/мм, при 4 кратном объективе

$\text{mean}(\text{Norm}) = 88.627$ Norm

$V0_{\text{norm}} := \frac{V0}{255}$ $v0 := V0_{\text{norm}}^{\langle 300 \rangle}$ $i := 0.. \text{rows}(V0)$ $dVPE := \frac{(205 - 162) \cdot 10^3}{x7}$ мкм, толщина эпит. слоя

$dVPE = 49.942$

$\text{Area} := \text{submatrix}(V0, 110, 340, 444, 465)$ матрица анализируемой области $j := 0..(\text{rows}(\text{Area}) - 1)$

$\text{rows}(\text{Area}) = 231$

"Среднее значение распределения интенсивности в каждом пикселе"

Усреднение значения тока по K столбцам, т.е. каждый элемент вектора AvPlot - интенсивность в каждом пикселе, усредненная за K столбцов.

$\text{AvPlot} :=$

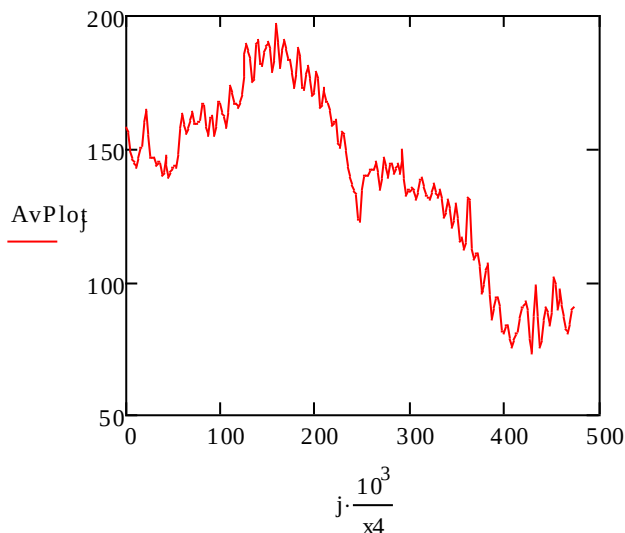
$h \leftarrow 0$	$D^{\langle h \rangle} \leftarrow \text{Area}^{\langle h \rangle}$
$k \leftarrow (\text{cols}(\text{Area}) - 1)$	
for $h \in 1..k$	
$D^{\langle 0 \rangle} \leftarrow D^{\langle 0 \rangle} + \text{Area}^{\langle h \rangle}$	
$h \leftarrow h + 1$	
D	
	$\frac{D}{\text{cols}(\text{Area})}$



V0



Area



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Отчет о патентных исследованиях

ЗАДАНИЕ на проведение патентных исследований

Наименование работы (темы) Влияние материала контактов и методов обработки поверхности пластин на характеристики арсенидгаллиевых сенсоров рентгеновского излучения

шифр работы (темы)

Этап работы _____, сроки его выполнения 01.02.2017- 01.04.2017

Задачи патентных исследований: исследовать способы уменьшения темнового тока в полупроводниковых детекторах

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Виды патентных исследований	Подразделения-исполнители (соисполнители)	Ответственные исполнители (Ф.И.О.)	Сроки выполнения патентных исследований. Начало. Окончание	Отчетные документы
1. Исследование технического уровня		Шаймерденова Л.К.	01.02.2017- 01.04. 2017	отчет о поиске
2. Анализ тенденций развития		Шаймерденова Л.К.	01.02.2017- 01.04. 2017	отчет о поиске

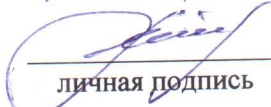
Руководитель
подразделения
исполнителя работы


личная подпись

В.П. Гермогенов
расшифровка подписи

26.01.17
дата

Руководитель НИР


личная подпись

О.П. Толбанов
расшифровка подписи

26.01.17
дата

Регламент поиска

28.01.2017

дата составления регламента

Наименование работы (темы) Влияние материала контактов и методов обработки поверхности пластин на характеристики арсенидгаллиевых сенсоров рентгеновского излучения

Номер и дата утверждения задания от 26.01.2017 Этап работы _____
при необходимости

Цель поиска информации (в зависимости от задач патентных исследований, указанных в задании)

Исследовать способы уменьшения темнового тока в полупроводниковых детекторах.

Определение достигнутого технического уровня в РФ и ведущих зарубежных странах.

Формирование групп патентов – аналогов для дальнейшей оценки перспективности защиты результатов научных исследований.

Обоснование регламента поиска поиск провести в базах ФИПС и USPTO
Начало поиска 01.02.2017 Окончание поиска 01.04.2017

Предмет поиска (объект исследования, его составные части, товар)	Страна поиска	Источники информации, по которым будет проводиться поиск				Ретроспектив- ность	Наименование информационной базы
		патентные		НТИ			
		Наименование	Классифика- ционные рубрики МПК	Наименование	Рубрики УДК		
1	2	3	4	5	6	7	8

Способы уменьшения темнового тока в полупровод- никовых детекторах	Россия, США	База данных ФИПС (Россия) База данных USPTO (США)	G01T H01L C30B	1. Вопросы атомной науки и техники 2. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 3. Solid-State and Integrated-Circuit Technology	539.089 539.1.074	2000 - 2018	База данных ФИПС (Россия) База данных USPTO (США)
--	-------------	--	----------------------	--	----------------------	-------------	--

Руководитель
подразделения
исполнителя работы


личная подпись

В.П. Гермогенов
расшифровка подписи

28.01.17
дата

Руководитель НИР


личная подпись

О.П. Толбанов
расшифровка подписи

28.01.17
дата

ОТЧЕТ О ПОИСКЕ

1 Поиск проведен в соответствии с заданием

№ от 26.01.2017 и Регламентом поиска № от 28.01.2017

2 Этап работы _____
при необходимости

3 Начало поиска 01.02.2017. Окончание поиска 01.04.2017

4 Сведения о выполнении регламента поиска (указывают степень выполнения регламента поиска, отступления от требований регламента, причины этих отступлений) – регламент поиска выполнен полностью.

5 Предложения по дальнейшему проведению поиска и патентных исследований – провести поиск патентов аналогов наиболее значимых патентов, обнаруженных при проведении патентных исследований. Более детально проанализировать направления исследований ведущих в рассматриваемых областях фирм и университетов. Расширить поиск текущей научной и патентной информации в смежных областях.

6 Материалы, отобранные для последующего анализа

Таблица В.1 – Патентная документация

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс	Заявитель (патентообладатель), страна. Номер заявки, дата приоритета.	Название изобретения	Сведения о действии охранного документа
1	2	3	4	5
Способы уменьшения темнового тока в полупровод- никовых детекторах	1.Патент РФ № 2 281 531 С2 МПК G01T 1/24 H01L 31/0296 H01L31/108	АКРОРАД КО., ЛТД (Япония) 2003133302/28 11.04.2002	Полупроводниковый элемент – детектор излучения	Действует
	2.Патент РФ № 2 550 374 С1 МПК H01L 29/872 H01L 21/329	Открытое акционерное общество «Оптрон» (Россия) 2014106480/28 21.02.2014	Кремниевый диод с барьером Шоттки и способ его изготовления	Действует
	3.Патент РФ № 2 408 955 С1 МПК H01L 31/117 G01T 1/24	Федеральное государственное учреждение «Научно-производственный комплекс «Технологический центр» Московского	P-I-N диодный преобразователь нейтронного излучения	Действует

		государственного института электронной техники» (ФГУ НПК «ТЦ» МИЭТ) (Россия) 2009124600/28 29.06.2009		
	4.Патент РФ № 2 575 939 С1 МПК G01T 1/18	Открытое акционерное общество «Интерсофт Евразия» (Россия) 2014148677/28 03.12.2014	Способ изготовления сенсора ионизирующего излучения	Действует
	5.Patent US No. 9,923,115 МПК H01L 31/115 G01T 3/08	Lithium Innovations Company, LLC (Toledo, OH) Appl. No. 15/038,768 Filed: 11.20.2014	Particle detector and method of making the same	Действует
	6.Patent US No. 9,759,822 МПК G01T 1/17 G01T 1/247	Koninklijke Philips N.V. (Eindhoven, NL) Appl. No. 15/337,798 Filed: 10.28.2016	Detection device for detecting photons and method therefore	Действует
	7.Patent US No. 9,755,098 МПК H01L 21/463 C30B 29/48	SIEMENS Aktiengesellschaft (Munich, DE) Appl. No. 14/893,539 Filed: 06.06.2014	Radiation detector manufactured by dicing a semiconductor wafer and dicing method therefor	Действует

	8. Patent US No. 9,202,961 МПК H01L 31/085 G01T 1/241	Redlen Technologies (Saanichton, CA) Appl. No. 13/910,358 Filed: 06.05.2013	Imaging devices with solid-state radiation detector with improved sensetivity	Действует
--	--	--	---	-----------

Таблица В.2 – Научно техническая, конъюнктурная, нормативная документация и материалы государственной регистрации (отчеты о научно-исследовательских работах)

Предмет поиска	Наименование источника информации с указанием страницы источника	Автор, фирма (держатель) технической документации	Год, место и орган издания (утверждения, депонирования источника)
1	2	3	4
Способы уменьшения темнового тока в полупроводниковых детекторах	1. В.Е. Кутний, Д.В. Кутний, А.В. Рыбка, А.А. Веревкин, Д.В. Наконечный, С.Ю. Саенко, Г.А. Холомеев, А.В. Пелепенко. Газостатическая обработка структур Au-CdZnTe-Au для детекторов рентгеновского и гамма-излучения		Вопросы атомной науки и техники. 2008. № 1. С. 123-128
	2. Q. Looker, M. Amman, K. Vetter. Leakage current in high-		Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:

	purity germanium detectors with amorphous semiconductor contacts		Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2005. V.777. P. 138-147
	3. Dejun Han, Chuanmin Wang, Shuchen Du. The reduction of the leakage current of radiation detectors by a simple cap implantation process		Solid-State and Integrated-Circuit Technology. 2002.

Выводы патентного исследования

Целью магистерской диссертации, в рамках которой проводились патентные исследования, является исследование влияния материала контактов и методов обработки поверхности пластин HR-GaAs:Cr на характеристики сенсоров рентгеновского излучения, изготовленных на их основе.

Цель патентных исследований – изучить способы уменьшения темнового тока в полупроводниковых детекторах. Определить технический уровень по данному вопросу в РФ и ведущих зарубежных странах. Сформировать группы патентов – аналогов для дальнейшей оценки перспективности защиты результатов научных исследований.

Патентный поиск (с глубиной поиска в 18 лет) был проведен по странам: РФ, США. В процессе патентного поиска были использованы следующие источники:

а) Российская БД: Федеральный институт промышленной собственности (ФИПС), <http://new.fips.ru/>;

б) Зарубежная БД: United states patent and Trademark Office, <https://www.uspto.gov/>.

Патентные исследования выполнены в соответствии с заданием, регламент поиска выполнен в полном объеме.

Заключение:

Проведенные патентные исследования подтверждают научную значимость и прикладную перспективность исследований в данной области.

Отчет о проверке на заимствования №1

Автор: leila-leika@mail.ru / ID: 1690839

Проверяющий: leila-leika@mail.ru / ID: 1690839

Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат»- <http://www.antiplagiat.ru>

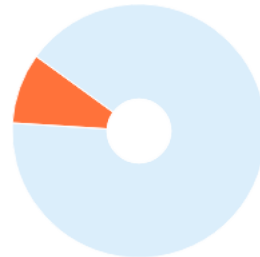
ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 13
Начало загрузки: 15.06.2018 10:05:57
Длительность загрузки: 00:00:01
Имя исходного файла: Шаймерденова-РФФ
Размер текста: 2116 кБ
Символов в тексте: 84752
Слов в тексте: 10277
Число предложений: 650

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Последний готовый отчет (ред.)
Начало проверки: 15.06.2018 10:05:59
Длительность проверки: 00:00:03
Комментарии: не указано
Модули поиска:

ЗАИМСТВОВАНИЯ	ЦИТИРОВАНИЯ	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ
9,08% 	0% 	90,92% 



Заимствования — доля всех найденных текстовых пересечений, за исключением тех, которые система отнесла к цитированиям, по отношению к общему объему документа.
Цитирования — доля текстовых пересечений, которые не являются авторскими, но система посчитала их использование корректным, по отношению к общему объему документа. Сюда относятся оформленные по ГОСТу цитаты; общеупотребительные выражения; фрагменты текста, найденные в источниках из коллекций нормативно-правовой документации.

Текстовое пересечение — фрагмент текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника.

Источник — документ, проиндексированный в системе и содержащийся в модуле поиска, по которому проводится проверка.

Оригинальность — доля фрагментов текста проверяемого документа, не обнаруженных ни в одном источнике, по которым шла проверка, по отношению к общему объему документа.

Заимствования, цитирования и оригинальность являются отдельными показателями и в сумме дают 100%, что соответствует всему тексту проверяемого документа.

Обращаем Ваше внимание, что система находит текстовые пересечения проверяемого документа с проиндексированными в системе текстовыми источниками. При этом система является вспомогательным инструментом, определение корректности и правомерности заимствований или цитирований, а также авторства текстовых фрагментов проверяемого документа остается в компетенции проверяющего.

№	Доля в отчете	Доля в тексте	Источник	Ссылка	Актуален на	Модуль поиска	Блоков в отчете	Блоков в тексте
[01]	1,87%	2,21%	не указано	http://propat.ru	раньше 2011	Модуль поиска Интернет	10	16
[02]	0,2%	2,19%	Стандарт РФ"Патентные исс...	http://isu.ru	раньше 2011	Модуль поиска Интернет	1	13
[03]	1,94%	1,94%	Скачать *.pdf	http://unn.ru	раньше 2011	Модуль поиска Интернет	11	12

Еще источников: 15

Еще заимствований: 5,07%