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

ДОПУСТИТЬ К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ ГЭК
Руководитель ООП к. ф.-м. наук
_____А.Г. Коротаев
«_21_» _июня_ 2018 г.

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах подготовленной научно – квалификационной работы (диссертации)

ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА GaAs:Cr СТРУКТУР

по основной образовательной программе подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре
направление подготовки 03.06.01 – Физика и астрономия

Колесникова Ирина Игоревна

Научный руководитель
д-р. ф.-м. наук, профессор
_____О.П. Толбанов
«_21_» _июня_ 2018г.

Автор работы
аспирант
_____И.И. Колесникова

Томск-2018

Актуальность работы

Синхротронное излучение высокой интенсивности (СИ) в последнее время стало важнейшим универсальным инструментом исследования свойств материи, звёзд, строения Земли, ископаемых артефактов, биомедицинских исследований молекул, вирусов, при создании веществ с новыми свойствами. При высокой энергии фотонов рентгеновского излучения в современных пучках, спрос на полупроводниковый высокоэффективный детекторный материал с высоким атомным номером Z стремительно растет в течение последних лет. Наиболее перспективными полупроводниковыми материалами для этого диапазона энергий рентгеновских лучей являются GaAs и Cd(Zn)Te. Арсенид галлия по потребительским и технологическим свойствам и соотношению цена/качество значительно превосходит Cd(Zn)Te.

В лаборатории функциональной электроники ТГУ выполнен и систематизирован большой объём научных исследований по модификации свойств арсенида галлия при легировании примесными нанокластерами переходной группы Fe периодической таблицы, с характеристиками, превышающими лучшие мировые аналоги. На основе структур разработан широкий спектр полупроводниковых приборов функциональной электроники различного назначения: УФ-фотоприёмники, ИК-преобразователи, импульсные лавинные S-диоды пикосекундного быстродействия, детекторы ионизирующих излучений.

Прогресс в технологии GaAs детекторного качества позволил ТГУ разработать не имеющую мировых аналогов технологию HR-GaAs:Cr полупроводниковых структур, выйти в мировые лидеры по созданию матричных детекторов для синхротронных центров нового поколения и открыть новые возможности для проведения научных экспериментов в ведущих научных центрах мира в области регистрации синхротронного излучения.

Объединение в линейку HR-GaAs:Cr матричных детекторов является революцией в области регистрации единичных фотонов синхротронного излучения и источников на свободных электронах (XFEL). В коллаборации с мировыми лидерами в области экспериментов на коллайдерах (LHC, ILC и др.) и с синхротронным излучением (DESY, ESRF, PSI, RAL, BNL, JINP и др.) в ТГУ были разработаны матричные детекторы большой площади, 84,6x28,2 мм^2, с числом элементов более 1,5 миллиона пикселей.

Технологии HR-GaAs:Cr полупроводниковых структур и продукция в виде матричных детекторов, разработанных и изготавливаемых в ТГУ, востребованы на мировом рынке, используется в научных центрах DESY, ESRF, PSI, RAL, BNL, JINP и ряде “spin-off” компаний мира (Dectris, X-Counter, ImXPad, MARS, SkyScan). Сегодня ТГУ поставляет детекторы с числом элементов более 400 тысяч пикселей, используемые для регистрации синхротронного излучения, в экспериментальной физике высоких энергий, в системах формирования цифрового цветового изображения в рентгеновских и гамма лучах медицинского, научного и промышленного назначения.

Участие в крупнейших международных проектах накладывает жесткие требования к качеству изготовляемых структур. Исследование этих структур представляет также самостоятельный научный интерес, поскольку при поглощении единичных квантов ионизирующего излучения в ионизационном треке формируется электронно-дырочная плазма с концентрацией 10^{13}-10^{17} см$^{-3}$ в зависимости от типа регистрируемой частицы. Детальный анализ амплитудных спектров показывает, что импульс тока, наблюдаемый во внешней цепи сенсора, формируется электронами трека, а дырки должны захватываться на глубокие отрицательно заряженные акцепторы хрома. Это должно приводить к накоплению заряда и деформации распределения напряжённости электрического поля в структуре сенсора. Это обуславливает необходимость создания новых эффективных методик по более глубокому исследованию материала и оценки его пригодности для технологических процессов.

Объект, предмет, цель и задачи исследования

Целью работы является экспериментальное исследование влияния электрического поля на захват носителей заряда глубокими центрами в арсениде галлия, построение физической модели перезарядки глубоких уровней и создание методики оценки пригодности полупроводникового материала для изготовления детекторных структур.

Объектом исследования являются HR-GaAs:Cr структуры. Предметом исследования является явление перезарядки глубоких уровней в структурах HR-GaAs:Cr при внешних воздействиях.

Для достижения заявленной цели решались следующие задачи:

1) оценка концентрации и времени жизни неравновесных носителей заряда на поверхности арсенида галлия при возбуждении фемтосекундными импульсами;
2) изготовление образцов и исследование значений фотоэлектрических характеристик HR-GaAs:Cr структур в зависимости от распределения параметров исходного GaAs, условий легирования и типа нанесенных контактов;
3) исследование закономерности распределения напряженности электрического поля в структуре HR-GaAs:Cr сенсора при различных внешних воздействиях.

Научная новизна

1. По распределению коэффициентов пропускания излучения оптического диапазона исследованы профили распределения напряжённости электрического поля по толщине и площади структуры при различных внешних воздействиях. Полученные результаты сопоставлены с результатами исследования вольт-амперных характеристик структур. Полученные данные доказывают равномерность распределения напряженности и отсутствие флуктуаций поля в объеме HR-GaAs:Cr структур. Разработана оптическая методика контроля качества проведенной диффузии.
2. Проведено комплексное исследование временной динамики процессов релаксации неравновесной концентрации носителей заряда в полупроводниковых кристаллах HR-GaAs:Cr методом терагерцовой pump-probe спектроскопии. Впервые исследована зависимость эффективного времени жизни с разложением на вклады от отдельных механизмов рекомбинации от температуры образца, уровня фотовозбуждения и способа обработки поверхности.
3. Проверена гипотеза о влиянии температуры отжига на вид и значение фотоэлектрических характеристик. Показано влияние типа контактов на фотоэлектрические характеристики сенсоров на основе HR-GaAs:Cr. Впервые определена высота барьера для HR-GaAs:Cr структур фотоэлектрическим методом.

Практическая и научная значимость

Теоретическая значимость работы заключается в том, что, несмотря на то, что арсенид галлия, компенсированный хромом, достаточно давно используется для изготовления детекторных структур, до сих пор нет модели, описывающей перезарядку глубоких уровней. Данная модель поможет прийти к пониманию процессов, происходящих при высокотемпературной диффузии арсенида галлия хромом, а это в свою очередь позволит оптимизировать технологический процесс и увеличить полезный выход материала. Кроме того, взаимодействие HR-GaAs:Cr структур с различными типами оптического излучения также слабо изучено и требует более тщательного рассмотрения.

Полученные результаты имеют большое *прикладное значение*. Были проведены расчеты времени жизни, высоты барьера и других характеристик, являющихся основополагающими при выборе материала для изготовления детекторов ионизирующего излучения. Методы, используемые в лаборатории для оценки времени жизни в данный момент являются трудозатратными по времени. Новая методика измерения позволит существенно сократить время на отбор пригодных образцов. Был проведен подбор оптимальных температурных режимов диффузии, исследовано влияние типа контактов на

характеристики сенсоров. Разработана методика оценки наличия дефектов в исходном материале. Полученные результаты позволяют создать принципиально новую методику определения электрических параметров высокоомных полупроводниковых материалов.

Методология исследования

Для изготовления образцов были подобраны материалы из различных слитков GaAs с необходимыми параметрами. Далее была проведена обработка материала, напыление слоя Cr на полупроводниковые пластины и последующий высокотемпературный отжиг при различных режимах. После шлифовки и полировки изготавливались рабочие образцы.

Исследование кинетики заряда проводилось на стандартной установке терагерцовой спектрометрии. Оборудование для построения терагерцового спектрометра в комплекте с комбинированным фемтосекундным лазерным усилителем находится в ТГУ и входит в центр коллективного пользования. Экспериментальная схема установки представлена в зарубежных литературных источниках. Принцип проведения эксперимента основан на методике бесконтактного измерения компонент комплексного показателя преломления в диапазоне частот 0.1-3 ТГц. За счет воздействия на поверхность образцов фемтосекундных импульсов ИК диапазона, на ней возбуждаются свободные носители заряда. Через образец проходят импульсы терагерцового излучения, доля которого поглощается возбужденными носителями заряда. Использование линии задержки позволяет описать рекомбинацию заряда на поверхности образца.

Для измерения импульсных характеристик контактным путем на пластину HR-GaAs:Cr с двух сторон напыляется слой металла, затем она колется на падовые сенсоры нужного размера. Пластины подбирались с равномерным распределением удельного сопротивления по площади. Для оценки распределения удельного сопротивления использовалась методика бесконтактного измерения удельного сопротивления на установке COREMA. Измерение импульсных характеристик проводилось на установке, собранной в ЛФЭ ТГУ. Методика проведения эксперимента основана на снятии уровня фототока при помощи высоковольтного источника-измерителя и снятии импульсов фототока при помощи осциллографа при импульсной засветке торцевой части PAD сенсора LED источником ИК диапазона.

Методика исследования закономерности распределения напряженности электрического поля в структуре HR-GaAs:Cr сенсора при различных внешних воздействиях основана на эффекте Поккельса - электрооптический эффект, обусловленный изменением показателя преломления вещества под действием электрического поля. Блок схема установки представлена на рисунке 1.

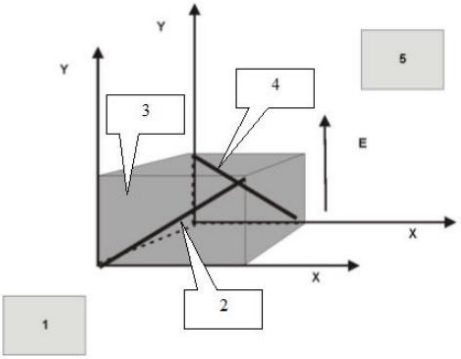


Рисунок 1. Блок схема экспериментальной установки по исследованию распределения электрического поля с помощью эффекта Поккельса в детекторных структурах на основе арсенида галлия, компенсированного хромом: 1 – источник излучения МДР-3; 2 – поляризатор (ColorPol® IR 950 BC4); 3 – образец GaAs структуры; 4 – анализатор (ColorPol® IR 950 BC4); 5 – оптическая система на основе микроскопа МБС-9 и ИК видеокамеры W902H.

При подаче напряжения на образец вследствие вращения плоскости поляризации на выходе анализатора наблюдалось просветление изображения поперечного скола экспериментального образца. Полученное изображение записывалось с помощью ИК видеокамеры и, с помощью специальной программы, написанной в среде MathCad 15.0, обрабатывалось для определения профиля распределения напряженности электрического поля.

Основные результаты исследования

При исследовании характеристик HR-GaAs:Cr сенсоров рентгеновского излучения получены следующие основные научные результаты:

1. Экспериментально доказаны равномерность распределения напряженности и отсутствие флуктуаций поля в объеме HR-GaAs:Cr структур. Экспериментально определены оптимальные температурные режимы диффузии Cr с точки зрения равномерности распределения напряженности поля. Разработана оптическая методика определения структурных дефектов в пластинах HR-GaAs:Cr, а также методика контроля качества проведенной диффузии.
2. Проведено исследование временной динамики процессов релаксации неравновесной концентрации носителей заряда в полупроводниковых кристаллах GaAs с EL2 центрами, LT-GaAs и HR-GaAs:Cr методом терагерцовой pump-probe спектроскопии. Проведен анализ полученных экспериментальных данных, составлены модели кинетики заряда на поверхности высокоомного HR-GaAs:Cr. Проведена оценка скорости поверхностной рекомбинации носителей.

Исследовано влияние поверхности на рекомбинационные процессы. Шлифовка образцов GaAs с EL2 центрами приводит к образованию дополнительных дефектов на поверхности, в данном случае наблюдается доминирующее влияния рекомбинации на поверхности, время жизни уменьшилось. После окисления образцов происходит пассивация поверхности, это привело к увеличению времени жизни, обусловленного рекомбинацией Шокли-Рида. Для образцов HR-GaAs:Cr механическая шлифовка на шлифовальном порошке с размером зерна 2 мкм приводит к увеличению времени жизни. Травление в плазме и окисление в растворе серной кислоты не привело к изменению времени жизни, обусловленному поверхностной рекомбинацией.

Исследовано влияние уровня фотовозбуждения. Полученные значения времени жизни неравновесных носителей заряда уменьшаются с уменьшением уровня фотовозбуждения. Полученные результаты можно объяснить влиянием поверхностной рекомбинации (с увеличением мощности фотовозбуждения поверхностные состояния оказываются все в большей степени занятыми, и большая часть излучения проникает вглубь полупроводника, где происходят более медленные процессы рекомбинации в объёме). При максимальном уровне мощности фотовозбуждения 260 мВт и при уровнях концентрации неравновесных носителей заряда выше $2 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$ в HR-GaAs:Cr преобладают механизмы Оже-рекомбинации. При уровнях инжекции 10^{17} $см^{-3}$ и ниже время жизни определяется практически только рекомбинацией Шокли-Рида и составляет величину порядка 1,5 нс. При минимальном уровне мощности фотовозбуждения 1,2 мВт, для которого получены значения времени жизни, оно обусловлено рекомбинацией Шокли-Рида и находится на уровне 40 нс.

3. Исследовано влияние источника возбуждения на время жизни носителей заряда в структурах HR-GaAs:Cr. Исследованы фотоэлектрические характеристики HR-GaAs:Cr. Проверена гипотеза о влиянии температуры отжига на вид и значение фотоэлектрических характеристик. Уровень фотоотклика различается для образцов, изготовленных из разных слитков, и имеющих различные типы контактов, что позволяет оценивать фоточувствительность материала. Для пластин AG – 437 максимальное значение фототока соответствует образцу с контактами Cr-Al, а минимальное значение - образцу с

контактами Cr-Ni. Для пластин Н – 1266 максимальное значение фототока у образца с контактами Ni-V-Al, а минимальное значение соответствует образцу с контактами Cr-Al.

В исследованных структурах величина высоты барьера лежит в пределах 0,617−1,035эВ. Максимальное значение высоты барьера Шоттки для образцов Н1266 наблюдается на образцах с контактами *Ni-Au* - 0,985 эВ. А максимальное значение высоты барьера Шоттки для пластин AG437 на образцах с контактами *Cr-Ni* - 1,035 эВ. Полученные значения высоты барьера согласуются со значениями, указанными в литературных источниках. Погрешность измерений находится в допустимых пределах, ее наличие связано с технологическими особенностями изготовления образцов, такими как: дефекты в объеме самого материала, неидеальность поверхности, измерительная неточность.

Список публикаций по теме исследования

1. Kolesnikova, A. Lozinskaya, T. Mihaylov, V. Novikov, A. Shemeryankina, I. Sherbakov, O. Tolbanov, A. Tyazhev and A. Zarubin “Temperature dependencies of current-voltage characteristics of GaAs:Cr”, 2016 JINST 11 C03059, doi:10.1088/1748-0221/11/03/C03059
2. D. Budnitsky, V. Novikov, A. Lozinskaya, I. Kolesnikova, A. Zarubin, A. Shemeryankina, T. Mikhailov, M. Skakunov, O. Tolbanov, A. Tyazhev “Characterization of 4 inch GaAs:Cr wafers”, 2017 JINST 12 C01063, doi:10.1088/1748-0221/12/01/C01063
3. Chsherbakov, I. Kolesnikova, A.Lozinskaya, T. Mihaylov, V. Novikov, A. Shemeryankina, O. Tolbanov, A. Tyazhev and A. Zarubin “Electron mobility-lifetime and resistivity mapping of GaAs:Cr wafers”, 2017 JINST 12 C02016, doi:10.1088/1748-0221/12/02/C02016
4. I. Chsherbakov, I. Kolesnikova, A.Lozinskaya, T. Mihaylov, V. Novikov, A. Shemeryankina, O. Tolbanov, A. Tyazhev and A. Zarubin “GaAs:Cr X-ray sensors noise characteristics investigation by means of amplitude spectrum analysis”, 2018 JINST 13 C01030, doi:10.1088/1748-0221/13/02/C01030

АНТИПЛАГИАТ
ТВОРИТЕ СОБСТВЕННЫМ УМОМ

Отчет о проверке на заимствования №1

Автор: varsharova@mail.ru / ID: 5914426
Проверяющий: (varsharova@mail.ru / ID: 5914426)

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

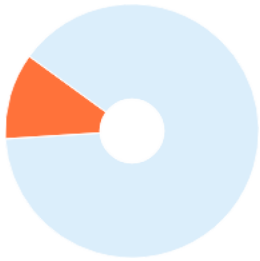
ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 1
Начало загрузки: 21.06.2018 11:32:13
Длительность загрузки: 00:00:00
Имя исходного файла: Nauchny_doklad1 (2)
Размер текста: 17 кБ
Символов в тексте: 16414
Слов в тексте: 1929
Число предложений: 134

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Последний готовый отчет (ред.)
Начало проверки: 21.06.2018 11:32:13
Длительность проверки: 00:00:01
Комментарии: не указано
Модули поиска:

ЗАИМСТВОВАНИЯ	ЦИТИРОВАНИЯ	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ
10,69%	0%	89,31%



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]	5,76%	9,25%	Сенсоры на основе арсенид...	http://tsu.ru	22 Сен 2016	Модуль поиска Интернет	11	14
[02]	3,64%	5,52%	сайте Института (17/20)	http://web.nioch.nsc.ru	01 Окт 2016	Модуль поиска Интернет	4	6
[03]	0,74%	0,74%	В ТГУ может появиться цент...	http://tsu.ru	22 Сен 2016	Модуль поиска Интернет	1	1

Еще источников: 1
Еще заимствований: 0,55%