

На правах рукописи



Гудзев Валерий Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛУБОКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ  
В БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО  
И АМОРФНОГО ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОГО КРЕМНИЯ**

01.04.10 – Физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико–математических наук

Рязань 2015

Работа выполнена на кафедре микро- наноэлектроники ФГБОУ ВПО "Рязанский государственный радиотехнический университет"

Научный руководитель: **Вихров Сергей Павлович**, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань

Официальные оппоненты: **Шерченков Алексей Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Москва, профессор кафедры "Материалы функциональной электроники"

**Андреев Владимир Викторович**, доктор технических наук, профессор, Калужский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», г. Калуга, профессор кафедры конструирования и производства электронной аппаратуры

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук, г. Москва

Защита диссертации состоится «24» декабря 2015 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

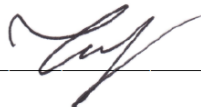
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет», <http://www.rsreu.ru>

Автореферат разослан «  » \_\_\_\_\_ 2015 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д 212.211.03, д.ф.-м.н., профессор



Чиркин Михаил Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Повышение стабильности параметров полупроводниковых приборов и интегральных схем является одной из наиболее важных прикладных задач физики полупроводников, неразрывно связанной с выявлением физических причин нестабильности параметров структур, а также разработкой научно обоснованных технологических решений и надежных методов контроля характеристик материалов и приборов.

Большинство интегральных схем и полупроводниковых структур изготавливаются на основе кристаллического кремния. В последнее время с развитием электроники на больших площадях (солнечные модули, ЖК-экраны и т.п.) в качестве полупроводникового материала все чаще используется аморфный гидрогенизированный кремний, а также его сочетание с кристаллическим кремнием. Одним из примеров такого использования является НИТ-структура (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) как основа для производства высокоэффективных и стабильных солнечных элементов. Исходя из этого, в качестве объектов исследования в данной работе выбраны барьерные структуры на основе кристаллического и аморфного гидрогенизированного кремния.

Нестабильность параметров элементов микро- и наноэлектроники во многом обусловлена дефектами и примесями, которые возникают в структурах в технологическом процессе изготовления или появляются в результате эксплуатации. В связи с тенденцией к уменьшению размеров активных областей степень влияния дефектов структуры материалов на параметры полупроводниковых приборов все более возрастает. Выявление таких дефектов на стадии отработки технологического процесса и подбор соответствующих режимов позволяет повысить стабильность и надежность полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Дефекты структуры и примеси, создающие глубокие уровни (ГУ), энергетически локализованные в запрещенной зоне кристаллического или щели подвижности аморфного полупроводников, называют глубокими центрами (ГЦ). Они могут придавать полезные или, чаще, нежелательные свойства материалам и приборам. Это обуславливает важность как контроля параметров электрически активных ГЦ, так и понимания их физической природы и роли в работе приборов. Применение материала с низкой концентрацией несовершенств структуры не является решением проблемы, так как число точечных и линейных дефектов, возникающих на протяжении всего технологического процесса изготовления прибора, намного превышает число исходных. Поэтому исследования глубоких энергетических уровней в структурах, являющихся основой современных элементов микро- и наноэлектроники, позволяет понять физику процессов, происходящих в них, и выбрать режимы технологического процесса для уменьшения дефектообразования.

**Степень разработанности темы.** Теоретические и экспериментальные аспекты исследования влияния ГУ на параметры полупроводниковых

барьерных структур представлены в работах П.Т. Орешкина, В.И. Фистуля, Л.С. Бермана, А.А. Лебедева и др. Анализ показал, что одним из наиболее чувствительных методов исследования параметров глубоких центров в полупроводниковых приборах является релаксационная спектроскопия глубоких уровней (РСГУ, в иностранной литературе DLTS – Deep Level Transient Spectroscopy). Изучению параметров ГУ указанным методом посвящено большое число работ. Анализ состояния проблемы свидетельствует о том, что ряд вопросов, касающихся физических механизмов процессов, протекающих в полупроводниковых приборах с ГЦ, остается открытым. Современный уровень понимания природы ГЦ допускает разную интерпретацию экспериментальных результатов и существование разных моделей, описывающих физические процессы в материалах и приборах, содержащих ГЦ, и являющихся основой для определения их параметров. Эффективность определения параметров ГУ может быть повышена путем использования упрощенных способов обработки данных и применения комплекса экспериментальных методов. Кроме того, актуальной задачей является адаптация экспериментальных методов исследования ГУ в полупроводниковых элементах к процессу технологического контроля и разработка методов экспресс-диагностики ГЦ.

**Цель диссертационной работы** – изучение влияния глубоких энергетических уровней на физические процессы в кремниевых кристаллических и аморфных барьерных структурах методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней с адаптивной компенсацией токов утечки.

Достижение поставленной цели требует решения следующих **основных задач**.

1. Систематизация данных по параметрам глубоких центров в барьерных структурах кристаллического кремния.
2. Анализ существующих методов исследования энергетического спектра глубоких уровней в кристаллических и аморфных полупроводниковых барьерных структурах.
3. Исследование влияния глубоких центров на электрофизические параметры полупроводниковых структур.
4. Разработка макета автоматизированного РСГУ-спектрометра с адаптивной компенсацией токов утечки.
5. Разработка метода экспресс-анализа параметров глубоких центров.
6. Исследование энергетического спектра электронных состояний в барьерных структурах на основе кристаллического и аморфного гидрогенизированного кремния методом РСГУ.

**Объектами исследований** являлись кремниевые диоды с барьером Шоттки PtSi-Si, Al-Si и планарные n-p-n-транзисторы, диоды с барьером Шоттки на основе аморфного кремния, НИТ- структуры.

**Научная новизна** представленных в работе результатов заключается в следующем.

1. Разработан способ компенсации аддитивной составляющей релаксационного сигнала в РСГУ-спектрометре, который заключается в измерении постоянной составляющей переходного релаксационного процесса на выходе преобразователя ток-напряжение и вычитании ее через звено обратной связи из входного сигнала. Полученный сигнал усиливается и обрабатывается для получения параметров ГУ.

2. Получены новые математические соотношения, позволяющие определять энергию ионизации глубокого уровня по разности максимумов РСГУ-пиков при различных амплитудах импульсов напряжения опустошения глубокого уровня и фиксированной температуре. В общепринятых соотношениях энергия ионизации ГУ определяется по РСГУ-пикам, полученным при разных температурах и фиксированном напряжении опустошения.

3. Предложен новый способ определения энергии ионизации глубоких уровней в полупроводниковой барьерной структуре по измерению двух сигналов релаксации тока или емкости при фиксированной характеристической температуре, что уменьшает время диагностики в 3-4 раза и позволяет использовать его при экспресс-анализе параметров глубоких центров.

4. Впервые на гетероструктурах солнечных элементов (НТ) Ag/ITO/a-Si:H(p)/a-Si:H(i)/c-Si(n)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n<sup>+</sup>)/ITO/Ag проведен анализ локализованных в щели подвижности электронных состояний методом токовой РСГУ. Обнаружен ГУ с энергией активации 0,52 эВ и концентрацией  $1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , который локализован в щели подвижности a-Si:H(p), и выступает в роли центра рекомбинации.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в следующем.

1. Получены математические соотношения, позволяющие определять энергию ионизации глубокого уровня по разности максимумов РСГУ-пиков при различных амплитудах импульсов напряжения опустошения глубокого уровня и фиксированной температуре.

2. Разработан автоматизированный РСГУ-спектрометр с компенсацией аддитивной составляющей сигнала релаксации, позволяющий проводить исследования энергетического спектра глубоких уровней в барьерных структурах с токами утечки до 1 мА.

3. Разработан оригинальный способ определения энергии ионизации и концентрации глубоких уровней, позволяющий в 4 раза сократить время эксперимента.

4. Разработана база данных по параметрам глубоких центров в полупроводниковых структурах на основе Si, GaAs, InP, позволяющая проводить их идентификацию.

5. Даны рекомендации по выбору режимов технологического процесса формирования базы диодов Шоттки и n-p-n-транзисторов в ИС.

6. Исследованы НТ - структуры солнечных элементов (Ag/ITO/a-Si:H(p)/a-Si:H(i)/c-Si(n)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n<sup>+</sup>)/ITO/Ag) с помощью разработанных

методов РСГУ и выявлено влияние глубоких локализованных электрически активных состояний на процессы генерации и рекомбинации носителей заряда.

**Методология и методы диссертационного исследования.** Для анализа результатов измерения РСГУ-спектров в барьерных структурах на основе кристаллического и аморфного гидрогенизированного кремния использовались генерационно-рекомбинационная модель Шокли-Рида-Холла и активационно-дрейфовая модель П.Т. Орешкина. Для проведения экспериментальных исследований применялись методы вольт-амперных, вольт-фарадных характеристик, релаксационной спектроскопии глубоких уровней. Для моделирования и проведения расчетов на ЭВМ использовались численные методы.

#### **Положения и результаты, выносимые на защиту**

1. Предложен способ, позволяющий определять энергию ионизации глубоких уровней в полупроводниковых барьерных структурах по разности максимумов РСГУ-пиков при различных амплитудах импульсов напряжения опустошения глубокого уровня и постоянной характеристической температуре. Выведены математические соотношения, позволяющие определять энергию ионизации глубокого уровня.

2. Разработан способ компенсации аддитивной составляющей релаксационного сигнала в РСГУ-спектрометре, который заключается в измерении постоянной составляющей переходного релаксационного процесса на выходе преобразователя ток-напряжение и вычитании ее через звено обратной связи из входного сигнала. Полученный сигнал усиливается и обрабатывается для получения параметров ГУ.

3. Экспериментально установлено с помощью метода РСГУ, что удаление слоя окисла при формировании интегрального планарно-эпитаксиального n-p-n-транзистора приводит к снижению на порядок концентрации глубоких центров, образующихся при разгонке акцепторной примеси в базе.

4. Экспериментально установлено из измерений спектров РСГУ НТ-структур Ag/ITO/a-Si:H(p)/a-Si:H(i)/c-Si(n)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n<sup>+</sup>)/ITO/Ag, что ГУ с энергией активации 0,52 эВ и концентрацией  $1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  локализован в щели подвижности a-Si:H(p) и является центром рекомбинации носителей заряда.

**Достоверность научных результатов** работы обеспечивается использованием общепринятого математического аппарата физики полупроводников, независимых экспериментальных методов для определения параметров ГЦ и соответствием с результатами других авторов. Эксперименты проводились в Региональном центре зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета на поверенном и калиброванном оборудовании.

Обработка результатов измерений производилась с использованием среды инженерного графического программирования NI LabVIEW 2010. База данных по параметрам глубоких уровней разработана с использованием СУБД MS ACCESS 2003. При разработке программного обеспечения использовались лицензионные пакеты программ.

**Апробация.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Республиканском семинаре “Новые материалы и технологические процессы микроэлектроники и прецизионной металлургии” (Ижевск, 1988), Научно-технической семинаре “Пути развития элементной базы и совершенствование технологии изготовления РЭА” (Севастополь, 1990), Международной научно-технической конференции “Актуальные проблемы фундаментальных наук” (М.: МГТУ им. Баумана, 1991), Всесоюзной научно-технической конференции “Метрологические проблемы микроэлектроники” (М.: “Радио и связь”, 1991), Всероссийском симпозиуме по эмиссионной электронике, посвященном памяти Г.Н. Шуппе: термоэлектронная, вторично-электронная, фотоэлектронная эмиссии и спектроскопия поверхности твердого тела. 17-19 сентября 1996. (Рязань, 1996), X международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» (Ульяновск, 2008), VI международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (г. Санкт-Петербург, 2008), VII международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (г. Санкт-Петербург, 2010), IEEE International Conference on Industrial Technology. (Испания, Севилья, 2015), 5-th international conference "Telecommunication, Electronics and Informatics" ISTEI-2015, (Молдова, Кишинев, 2015).

**Публикации.** Основные результаты опубликованы в 21 научной работе, из них 7 статей (по специальности) в журналах из списка ВАК, 5 статей в других изданиях, 9 тезисов докладов на российских и международных конференциях, и защищены 1 патентом.

**Внедрение результатов работы.** Полученные экспериментальные результаты использованы на предприятии ООО «ХЕЛИОС-Ресурс» для диагностики кремниевых диодных структур солнечных элементов, в Региональном центре зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМкп) РГРТУ для разработки методов диагностики гетероструктур для солнечной энергетики, вошли в научно-технические отчеты о выполнении 17 научно-исследовательских работ и внедрены в учебный процесс в Рязанском государственном радиотехническом университете по направлениям подготовки бакалавров 11.03.04 и магистров 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника», ООП «Нанотехнологии в электронике». Акты об использовании результатов работ размещены в Приложении.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы основные задачи исследований и научные положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** представлен обзор научных публикаций, посвященных проблеме влияния электрически активных дефектов (глубоких центров), создающих глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне кристаллических и щели подвижности аморфных полупроводников на

параметры приборов и элементов ИС. Показано, что понятие глубокого центра, как пространственно локализованной части структуры твердого тела со свойствами, достаточно сильно отличающимися от свойств идеальной структуры, основано на рассмотрении ближнего порядка и может, наряду с кристаллическими материалами, применяться к неупорядоченным. Электрически активные дефекты оказывают существенное влияние на функционирование полупроводниковых приборов и ИС. Например, увеличение концентрации ГЦ приводит к уменьшению времени жизни носителей заряда. Это может иметь как положительное влияние – увеличение быстродействия, так и отрицательное – увеличение генерационно-рекомбинационной составляющей тока, повышение плотности граничных состояний, снижение пробивных напряжений и т.д. Число точечных и линейных дефектов, возникающих во время проведения технологических операций изготовления полупроводникового прибора, значительно превышает число дефектов, изначально присутствующих в исходном материале. Таким образом, задача контроля электрически активных ГЦ в процессе изготовления полупроводниковых приборов и ИС является актуальной.

Анализ экспериментальных методов исследования электрически активных дефектов показал, что наибольшей чувствительностью по концентрации ГЦ и разрешающей способностью по энергии ионизации обладает метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней. Расширение динамического диапазона метода РСГУ с регистрацией токов релаксации возможно при условии снижения влияния токов сквозной проводимости (утечки) в исследуемых барьерных структурах, которого можно достичь технологическими и аппаратными способами.

**Вторая глава** посвящена разработке установки РСГУ, позволяющей исследовать ГЦ в полупроводниковых барьерных структурах методами емкостной и токовой РСГУ, токовой РСГУ с адаптивной компенсацией тока утечки и проводить экспресс-диагностику параметров ГЦ. Рассмотрены физические основы метода РСГУ, основанные на генерационно-рекомбинационной модели Шокли-Рида-Холла и активационно-дрейфовой модели П.Т. Орешкина.

Одной из проблем токовой РСГУ является наличие в сигнале как релаксационного тока, так и тока утечки, протекающих через барьерную структуру. Большое значение тока утечки, кроме того, искажает полезный сигнал и приводит к погрешности работы преобразователя ток – напряжение (ПТН). Разработан способ компенсации аддитивной составляющей релаксационного сигнала в РСГУ-спектрометре, который заключается в измерении постоянной составляющей тока сквозной проводимости на выходе ПТН после завершения процесса релаксации тока и вычитании ее через звено обратной связи из входного сигнала. Полученный сигнал усиливается и обрабатывается для получения параметров ГЦ.

Для снижения влияния тока утечки разработан ПТН, функциональная схема которого представлена на рисунке 1. Сигнал с выхода преобразователя



тока  $U_{\text{вых}}$  поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП). По сигналу синхронизации, приходящему в конце импульса опустошения (т.е. когда значение тока определяется в основном аддитивной составляющей), сигнал с входа АЦП поступает на вход цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). На выходе ЦАП формируется напряжение, пропорциональное значению тока утечки, умноженное на коэффициент преобразования ПТН. Это напряжение вычитается из входного сигнала с помощью дифференциального усилителя. Регистровая развязка ( $RG N_i, RG N_{i-1}$ ) и сумматор ( $\Sigma$ ) необходимы для сохранения предыдущего значения аддитивной составляющей и сложения ее с текущим значением.

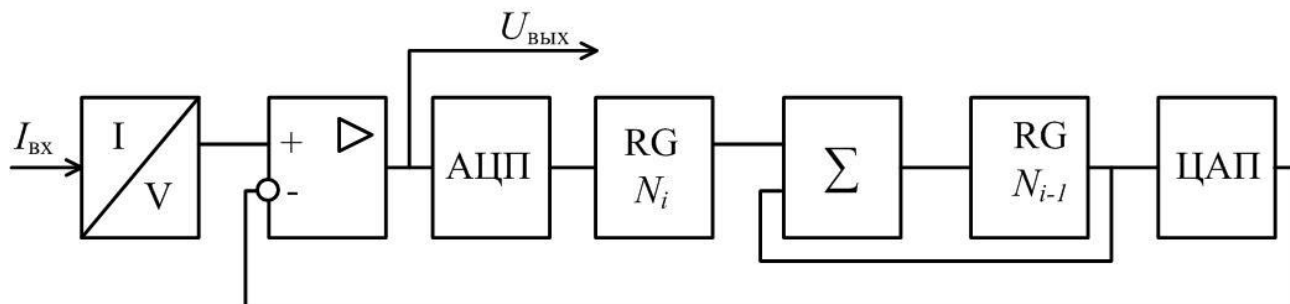


Рисунок 1 - Функциональная схема преобразователя ток-напряжение с компенсацией тока утечки

Аппаратная реализация разработанного способа позволила регистрировать РСГУ-спектры барьерных структур с токами утечки до 1 мА.

Основные временные затраты при определении энергии ионизации ГУ связаны с температурным сканированием. Снижение временных затрат возможно при замене температурного сканирования на сканирование ГУ по амплитуде импульса напряжения опустошения.

Для получения соотношения, связывающего амплитуды РСГУ-пигов с энергией ионизации ГЦ, рассмотрим зонные диаграммы барьерной структуры Me/c-Si(n), содержащей один донорный глубокий уровень с равномерным распределением концентрации в базе. Предположим, что в равновесии (рисунок 2, а) ГУ  $E_t$  целиком локализован под уровнем Ферми и полностью заполнен электронами, в том числе на поверхности. Это означает, что не учитывается область начального истощения глубокого уровня, и толщина ОПЗ приблизительно совпадает с толщиной слоя неполной ионизации  $\lambda$ :

$$\lambda = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0(E_F - E_t)}{e^2 n_0}}, \quad (1)$$

где  $E_F - E_t$  - разность между энергиями уровня Ферми  $E_F$  и ГУ  $E_t$  в запрещенной зоне полупроводника;  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая постоянная;  $n_0$  - равновесная концентрация электронов в зоне проводимости полупроводника;  $e$  - элементарный заряд.

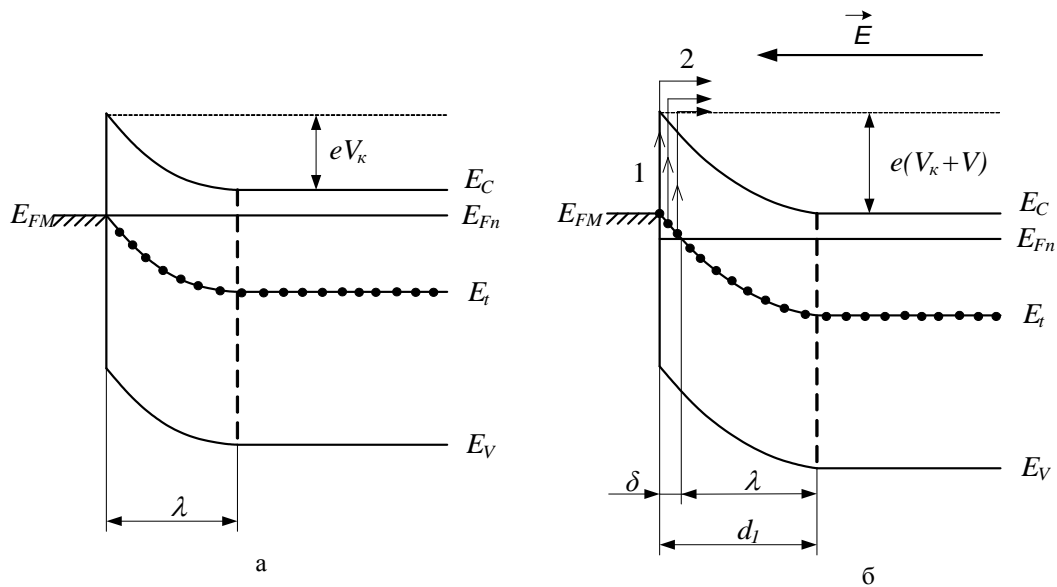


Рисунок 2 - Зонные диаграммы барьерной структуры Me/c-Si(n) в состоянии равновесия (а) и при приложении обратного смещения (б)

На рисунке 2,б приведена зонная диаграмма диода Шоттки после приложения напряжения обратного смещения  $V$ . После приложения к структуре напряжения обратного смещения наблюдаются следующие процессы: 1 - эмиссия электронов с ГУ из той части базы, в которой энергетический уровень  $E_t$  находится выше уровня Ферми (появляется ток генерации); 2 – вынос электронов за пределы ОПЗ в базу.

В соответствии с рисунком 2, б толщина области эмиссии носителей с ГУ имеет толщину  $\delta = d_1 - \lambda$ . В этом случае полный ток через полупроводниковую барьерную структуру, равный сумме токов генерации и смещения, может быть вычислен из соотношения:

$$i(t) = \frac{eN_t \delta S \theta}{\tau} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (2)$$

где  $\theta$  – множитель, учитывающий эффект смещения границы ОПЗ в процессе релаксации тока;  $S$  – площадь барьерного контакта Шоттки;  $t$  – время переходного процесса;  $\delta$  – толщина слоя ионизации ГЦ;  $\tau$  – время релаксации:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_C - E_t}{kT}\right), \quad (3)$$

где  $\tau_0 = 2\tau_M = \varepsilon\varepsilon_0\rho$  согласно активационно-дрейфовой модели перезарядки ГЦ, либо  $\tau_0 = (\sigma_n \nu_T N_C)^{-1}$  согласно модели Шокли-Рида, где  $\tau_M$  – максвелловское время релаксации в электронейтральной части базы диода,  $\rho$  – удельное сопротивление базы диода,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $\sigma_n$  – сечение захвата электронов на ГУ,  $\nu_T$  – средняя тепловая скорость электронов,  $N_C$  – эффективная плотность состояний в зоне проводимости.

Если указанный релаксационный процесс носит периодический характер с периодом  $T_0$ , то выходное напряжение  $\Delta U$  токового варианта РСГУ-спектрометра:

$$\Delta U = \frac{meN_t \delta S \theta}{\tau} \int_0^{T_0} F(t) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) dt, \quad (4)$$

где  $m$  - коэффициент передачи сквозного тракта РСГУ-спектрометра;  $F(t)$  - взвешивающая функция спектрометра.

Очевидно, что с ростом напряжения обратного смещения возрастают толщина ОПЗ и толщина слоя ионизации глубокого уровня  $\delta$ . Как следует из соотношения (4) при этом увеличивается амплитуда сигнала РСГУ.

Представим (4) для двух случаев амплитуды напряжения импульсов обратного смещения  $V_1$  и  $V_2$  при постоянной температуре:

$$N_t(V_1) = \frac{\Delta U_1 \tau}{meS\theta(d_1(V_1) - \lambda) \int_0^{T_0} F(t) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) dt}; \quad N_t(V_2) = \frac{\Delta U_2 \tau}{meS\theta(d_2(V_2) - \lambda) \int_0^{T_0} F(t) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) dt}. \quad (5)$$

При условии однородного распределения объемного заряда глубоких и мелких центров в ОПЗ  $N_t(V_1) = N_t(V_2)$ , и после преобразований имеем:

$$\lambda = \frac{\Delta U_2 \cdot d_1(V_1) - \Delta U_1 \cdot d_2(V_2)}{\Delta U_2 - \Delta U_1}, \quad (6)$$

где  $d_1(V_1)$  и  $d_2(V_2)$  - толщины ОПЗ соответственно для амплитуд напряжения импульсов обратного смещения  $V_1$  и  $V_2$ .

Выражение  $E_F - E_t$  преобразуем следующим образом:

$$E_F - E_t = (E_C - E_t) - (E_C - E_F) = \Delta E_t - (E_C - E_F). \quad (7)$$

Используем соотношение для расчета уровня Ферми в области истощения мелкой примеси:

$$E_C - E_F = kT \ln \frac{N_C}{N_{\text{дм}}}, \quad (8)$$

где  $N_{\text{дм}}$  - концентрация мелких доноров.

С учетом того, что все мелкие доноры ионизированы, т.е.  $n_0 = N_{\text{дм}}$ , получаем:

$$\Delta E_t = \frac{e^2 N_{\text{дм}}}{2\epsilon_0} \left( \frac{\Delta U_2 d_1 - \Delta U_1 d_2}{\Delta U_2 - \Delta U_1} \right)^2 + kT_{\text{max}} \ln \frac{N_C}{N_{\text{дм}}}. \quad (9)$$

Для расчета плотности состояний в зоне проводимости  $N_C$  кремния воспользуемся соотношением  $N_C = 5.5 \cdot 10^{15} T^{3/2}$ , см<sup>-3</sup>. Величины  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $N_{\text{дм}}$  определяются из вольт-фарадных характеристик (ВФХ) барьерной структуры.  $\Delta U_1$ ,  $\Delta U_2$  определяются по максимумам РСГУ-пиков, полученных при разных

напряжениях опустошения ГУ и постоянной характеристической температуре  $T_{\max}$ .

РСГУ-спектры измеряются при изменении временной настройки взвешивающей функции и при постоянной температуре. При этом наблюдается характерный максимум (пик) выходного напряжения РСГУ-спектрометра аналогично температурному сканированию (рисунок 3).

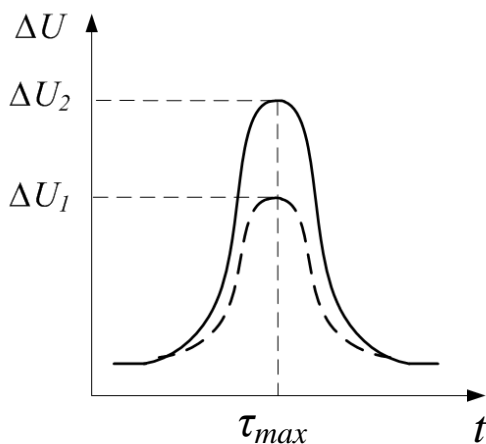


Рисунок 3 - Зависимость выходного напряжения РСГУ-спектрометра от времени

производится по амплитуде пика  $\Delta U$  из соотношения:

$$N_t = \frac{\Delta U}{meS\delta\theta}. \quad (10)$$

Разработан экспресс-метод определения энергии ионизации и концентрации глубоких уровней в полупроводниковой барьерной структуре по измерению релаксации тока при фиксированной характеристической температуре, который заключается в следующем. В криостате с исследуемой барьерной структурой устанавливается характеристическая температура, выбранная исходя из диапазона селективируемых  $\tau$  и соотношения сигнал/шум, при которой происходит эмиссия носителей заряда с ГУ. На исследуемую полупроводниковую структуру поочередно подаются импульсы напряжения обратного смещения  $V_1$  и  $V_2$ , причем  $|V_2 - V_1| \gg kT_{\max}/e$ . После каждого импульса получают соответствующие им токовые релаксационные сигналы. Сигналы умножают на взвешивающую функцию  $F(t, \tau)$  с изменяющейся селективной постоянной  $\tau$  («плавающее окно»), для которой время  $t$  отсчитывается от начала соответствующего импульса напряжения опустошения. В результате производят селекцию по времени релаксации и определяют два значения амплитуды пиков РСГУ-спектра  $\Delta U_1$  и  $\Delta U_2$ , соответствующих одной температуре и различной амплитуде импульсов напряжения обратного смещения  $V_1$  и  $V_2$ . По соотношениям (9) и (10) определяются энергия ионизации и концентрация ГЦ.

Предложенный способ уменьшает время диагностики в 3-4 раза за счет замены операции температурного сканирования на сканирование ГУ импульсами напряжения.

Разработана установка РСГУ, реализующая в дополнение к общепринятой методике РСГУ (D.V. Lang, 1974 г.) способ адаптивной компенсации токов утечки барьерной структуры и методику экспресс-контроля параметров ГЦ. Функциональная схема макета приведена на рисунке 4. Установка работает в режиме емкостной и токовой спектроскопии с электрическим способом создания неравновесного состояния исследуемой барьерной структуры. На исследуемый образец, помещенный в измерительную ячейку криостата, периодически подаются импульсы заполнения и опустошения ГУ. Амплитуды импульсного напряжения устанавливаются независимо друг от друга (ЦАП1, ЦАП2) в пределах  $\pm 10$  В. Длительности временных интервалов  $t_{\text{п}}$  и  $t_{\text{и}}$  задаются в диапазоне  $10^{-5} \div 1$  с.

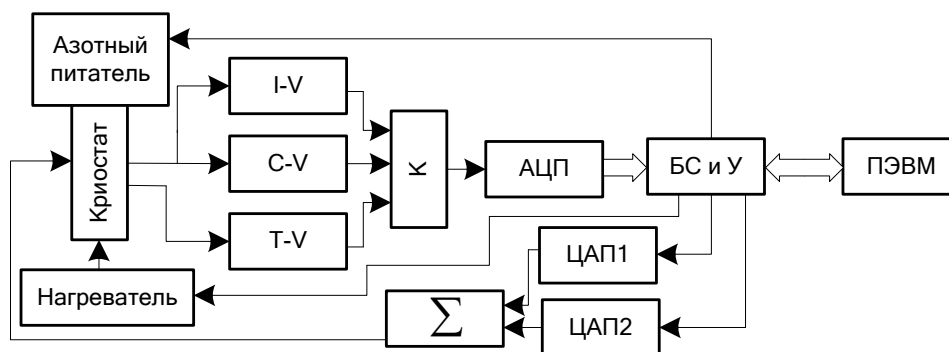


Рисунок 4 - Функциональная схема установки РСГУ

Релаксационный сигнал с выхода измерительной ячейки подается на преобразователи ток – напряжение (I-V) или емкость-напряжение (C-V). Далее сигнал поступает на коммутатор сигналов (К) и АЦП. После преобразования аналогового сигнала в его цифровой эквивалент данные поступают через блок сопряжения и управления (БСиУ) в компьютер (ПЭВМ), в котором обрабатывается релаксационный сигнал для получения РСГУ-спектра и информации о параметрах ГЦ. Для автоматизации процесса измерений разработано программное обеспечение в среде инженерного программирования LabVIEW, включающее цифровую фильтрацию входного релаксационного сигнала, корреляционный анализ с использованием взвешивающих функций, обработку сигнала в базисе экспоненциальных функций, определение энергии ионизации, сечения захвата и концентрации ГЦ.

Разработана база данных по параметрам глубоких центров в полупроводниковых структурах на основе Si, GaAs, InP, позволяющая производить идентификацию ГУ. Идентификация проводится по энергии ионизации ГУ. В алгоритм обработки релаксационного сигнала РСГУ с учетом базы данных закладываются наиболее оптимальная постоянная времени дискриминатора и характеристическая температура (или их диапазон) для контроля выбранного ГУ.

Кроме того, разработанная установка позволяет регистрировать вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики.

Таблица 1 – Параметры установки РСГУ с адаптивной компенсацией токов утечки

№ п/п	Технические параметры	Значения
1	Минимальная регистрируемая концентрация примеси Nt для токовой спектроскопии, см <sup>-3</sup>	$10^{-6} \cdot  N_D - N_A $
2	Максимальная чувствительность при измерении релаксации емкости ΔC/C	$10^{-5}$
3	Максимальный ток утечки, мА	1
4	Диапазон температур в измерительной ячейке, К	77 – 450
5	Скорость изменения температуры образца в измерительной ячейке, К/с	0,01–0,5

Спектры ГУ барьерных структур на основе кристаллического и аморфного гидрогенизированного кремния, приведенные в третьей и четвертой главах, измерялись с помощью разработанной установки РСГУ.

**В третьей главе** представлены результаты исследования глубоких уровней в барьерных структурах на основе кристаллического кремния. В качестве испытуемых образцов взяты тестовые ячейки типа ТЯ-52, включающие два элемента ИС - диод Шоттки Al/n-Si или PtSi/n-Si и n-p-n-транзистор, изготовленные при разных режимах травления при подготовке к проведению диффузии.

На тестовых структурах были проведены исследования диодов Шоттки с алюминиевым контактом (концентрация мелкой легирующей примеси базы диода  $N_M = 10^{15}$  см<sup>-3</sup>) типа ДШЗ из состава тестовой ячейки ТЯ-52. Изучались спектры дефектов с глубокими уровнями в базе диодов Шоттки, формируемых с использованием операций жидкостного химического травления (ЖХТ) и плазмохимического травления (ПХТ).

РСГУ-спектры измерялись в диапазоне температур 120 – 400 К. Амплитуда импульсов напряжения заполнения  $V_f$  и опустошения  $V_r$  ГУ была выбрана +2,5 В и -1,4 В соответственно. РСГУ-спектр для времени релаксации  $\tau = 1400$  мкс представлены на рисунке 5, а параметры ГЦ в диодах Шоттки приведены в таблице 2.

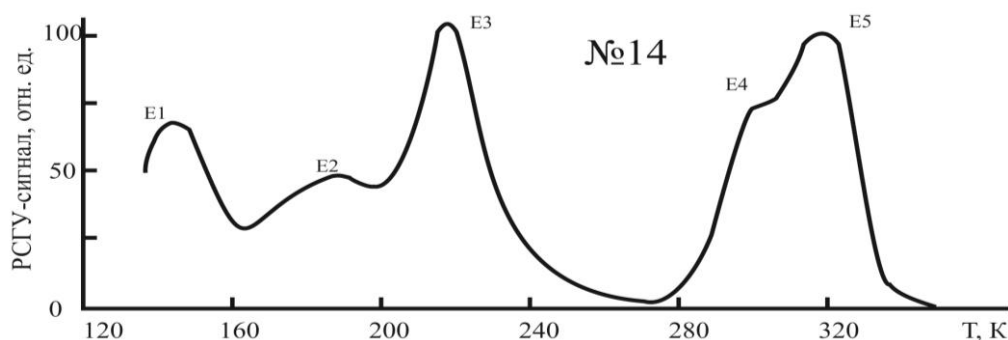


Рисунок 5 – РСГУ-спектр диодов Шоттки Al/n-Si (образец № 14)

Таблица 2 - Параметры ГЦ в диодах Шоттки Al/n-Si

№ образца	Температура отжига, °С	Вид травления	Концентрация глубоких центров, см <sup>-3</sup>				
			E1, $\Delta E_T=0,20$ эВ	E2, $\Delta E_T=0,33$ эВ	E3, $\Delta E_T=0,38$ эВ	E4, $\Delta E_T=0,50$ эВ	E5, $\Delta E_T=0,55$ эВ
10	—	ЖХТ					$8,1 \cdot 10^{11}$
12	900	ЖХТ					$6,0 \cdot 10^{11}$
14	—	ПХТ	$3,9 \cdot 10^{11}$	$2,4 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^{11}$	$8,4 \cdot 10^{10}$	$9,1 \cdot 10^{11}$
11	900	ПХТ				$8,0 \cdot 10^{10}$	$5,7 \cdot 10^{11}$

По спектрам определены пять ГУ: E1; E2; E3; E4; E5 с энергетической локализацией в запрещенной зоне Si ( $E_C - E_T$ ) 0,20 эВ; 0,33 эВ; 0,38 эВ; 0,50 эВ; 0,55 эВ, соответственно. Установлено, что уровни E1, E2, E3 и E4 связаны с образованием дефектов в процессе плазмо-химического травления (ПХТ). Уровень E5 связан с появлением дефектов упаковки в процессе выращивания эпитаксиальной пленки n-Si. Проведение отжига при температуре 900°С в течение 1 часа в атмосфере азота на образцах диодов Шоттки Al/n-Si, подвергнутых ПХТ, устраняет ГЦ E1, E2, E3, а концентрация ГЦ E4 и E5 снижается. Термообработка образцов при тех же условиях отжига, подвергнутых жидкостному химическому травлению (ЖХТ), вызывает снижение концентрации ГЦ E5.

Сопоставление ВАХ диодов Шоттки, изготовленных с использованием ПХТ и ЖХТ, показывает, что в структуре №14, по сравнению с другими образцами, наблюдалось резкое увеличение токов утечки при обратном смещении и уменьшение контактной разности потенциалов при прямом смещении. Введение операции отжига после ПХТ уменьшает обратный ток и увеличивает высоту потенциального барьера Al/n-Si по сравнению с образцами, не подвергавшимися термообработке. Наименьшими токами утечки и наибольшей высотой потенциального барьера Al/n-Si обладали образцы, полученные с использованием ЖХТ в сочетании с термообработкой. В связи с этим в дальнейшем проводились исследования образцов, изготовленных с использованием операций жидкостного химического травления.

Исследованы три группы образцов, отличающихся режимами технологической операции травления перед проведением разгонки базовой примеси:

1. удаление боросиликатного стекла (БСС) из области базы до поверхности Si;
2. полное удаление БСС и слоя SiO<sub>2</sub> до 0,07 мкм (это толщина SiO<sub>2</sub>, выращенного в сухом кислороде, плотный качественный диэлектрик);
3. полное удаление БСС и SiO<sub>2</sub>.

На рисунке 6 представлены спектры токовой РСГУ для диодов Шоттки PtSi/n-Si (ТЯ-52) без отжига, отличающихся технологией формирования базовой области. Энергии активации ГУ E1-E5 составляли соответственно 0,26; 0,38; 0,50; 0,54, 0,60 эВ. Сводные данные по концентрации обнаруженных дефектов с ГУ приведены в таблице 3.

Установлено, что в диодах Шоттки PtSi/n-Si операции полного удаления окисла, либо стравливания до остатка 0,07 мкм, в сочетании с отжигом при

температуре 900°C в течение 1 часа в атмосфере азота являются предпочтительнее удаления слоя БСС перед операцией разгонки примесей при проведении базовой диффузии, т.к. в результате снижается интегральная концентрация ГЦ, а обратные токи в ДШ уменьшаются с 1,5 до 0,2 мкА при величине обратного напряжения 10 В.

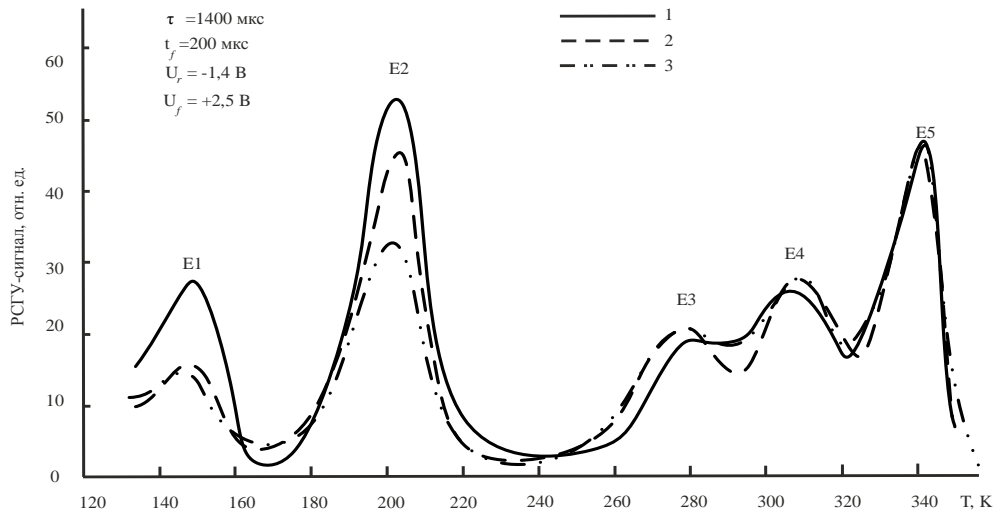


Рисунок 6 - Спектры токовой РСГУ ДШ на основе PtSi/n-Si, полученные при  $\tau = 1,4$  мс: сплошная линия соответствует 1-й группе образцов, штриховая – 2-й и штрихпунктирная - 3-й

Таблица 3 - Параметры ГУ при разных режимах формирования базы в диодах Шоттки на основе PtSi/n-Si

ГУ	Энергия активации $\Delta E_i$ , эВ	Концентрация ГЦ, см <sup>-3</sup> (номер образца)					
		(1), без отжига	(1), отжиг	(2), без отжига	(2), отжиг	(3), без отжига	(3), отжиг
E1	0,26	$1,5 \cdot 10^{12}$	$1,4 \cdot 10^{12}$	$8,8 \cdot 10^{11}$	$8,8 \cdot 10^{11}$	$7,9 \cdot 10^{11}$	$7,9 \cdot 10^{11}$
E2	0,38	$3,2 \cdot 10^{12}$	$3,1 \cdot 10^{12}$	$2,2 \cdot 10^{12}$	$2,0 \cdot 10^{12}$	$1,6 \cdot 10^{12}$	$1,5 \cdot 10^{12}$
E3	0,50	$3,6 \cdot 10^{11}$	$3,3 \cdot 10^{11}$	$4,0 \cdot 10^{11}$	$3,9 \cdot 10^{11}$	$4,3 \cdot 10^{11}$	$3,9 \cdot 10^{11}$
E4	0,54	$7,1 \cdot 10^{11}$	$6,2 \cdot 10^{11}$	$7,9 \cdot 10^{11}$	$6,5 \cdot 10^{11}$	$8,1 \cdot 10^{11}$	$6,6 \cdot 10^{11}$
E5	0,60	$1,8 \cdot 10^{12}$	-	$2,2 \cdot 10^{12}$	-	$1,9 \cdot 10^{12}$	-

Для выявления влияния ГЦ на коэффициент передачи по току проведены исследования параметров глубоких уровней в базовой области п-р-п-транзистора с различной технологией жидкостного химического травления диэлектрика при проведении двухстадийной базовой диффузии. В качестве объекта исследований был выбран эмиттерный переход. В процессе регистрации РСГУ-спектров напряжение на эмиттерном п-р-переходе транзистора изменяли от прямого смещения  $V_f = +0,3$  В, обеспечивающего инжекцию электронов из эмиттера в базу, до обратного смещения  $V_r = -1,5$  В. Сводные данные по концентрации обнаруженных дефектов с ГУ приведены в таблице 4.



Таблица 4 – Концентрации глубоких центров в транзисторной структуре тестовой ячейки ТЯ-52

Нобр	Технология базы	Концентрация глубоких центров $Nt, \text{см}^{-3}$				
		E1 ( $\Delta E_t=0,30$ эВ)	E2 ( $\Delta E_t=0,41$ эВ)	E3 ( $\Delta E_t=0,44$ эВ)	E4 ( $\Delta E_t=0,55$ эВ)	Суммарная $Nt, \text{см}^{-3}$
1	БСС	$1,2 \cdot 10^{12}$	$1,8 \cdot 10^{12}$	$2,9 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{11}$	$6,4 \cdot 10^{12}$
2	0,07 мкм SiO <sub>2</sub>	$1,1 \cdot 10^{12}$	—	—	$5,3 \cdot 10^{11}$	$1,6 \cdot 10^{12}$
3	SiO <sub>2</sub>	—	—	—	$5,1 \cdot 10^{11}$	$5,1 \cdot 10^{11}$

Выявлена тенденция к снижению концентрации ГУ E1 (Cr) и E2 (Fe) в тестовых n-p-n-транзисторах при замене операции стравливания БСС полным удалением окисла. В образцах со стравленным БСС на спектрах РСГУ наблюдались 4 глубоких уровня: E1; E2; E3; E4 с энергетической локализацией в запрещенной зоне Si ( $E_C-E_t$ ) 0,30; 0,41; 0,44; 0,55 эВ соответственно. ГУ E3 образован атомами Pt или их комплексами с кислородом, попавшими в Si в процессе формирования барьерного контакта PtSi/Si. ГУ E4 связан с дефектами упаковки и по своим параметрам близок к ГУ E5, наблюдаемому в тестовых диодах Шоттки. Удаление окисла до пленки толщиной 0,07 мкм приводило к исчезновению ГУ E2 и E3; при полном удалении слоя SiO<sub>2</sub> ГУ E1 также исчезал. Таким образом, при частичном или полном удалении слоя SiO<sub>2</sub> суммарная концентрация ГЦ в базе транзисторной структуры снижалась в 4 и 12,5 раз соответственно. Экспериментально установлено, что в результате замены технологической операции снятия слоя БСС или удаления БСС вместе со слоем SiO<sub>2</sub> до толщины 0,07 мкм операцией полного удаления окисла наблюдалось увеличение коэффициента усиления по току  $\beta$  n-p-n-транзисторов с 40 до 68.

Установлена взаимосвязь между технологическими операциями изготовления базы в планарной технологии ИМС с изоляцией обратно смещенным p-n-переходом и спектром глубоких уровней, образованных дефектами в базе диодных структур Шоттки и n-p-n-транзисторах. Показано, что в случае использования жидкостного травления наименьшая суммарная концентрация ГЦ в диодах Шоттки Al/n-Si, PtSi/n-Si и кремниевых n-p-n-транзисторах наблюдалась при полном удалении маскирующего слоя SiO<sub>2</sub> и слоя боросиликатного стекла. В диодных структурах с наименьшей суммарной концентрацией ГЦ наблюдался наименьший обратный ток утечки, а в n-p-n-транзисторах – увеличение коэффициента усиления тока базы в схеме с общим эмиттером в 1,5 раза.

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований в технологическом процессе изготовления ИМС на кремниевых планарно-эпитаксиальных структурах выявлены наиболее проблемные операции с точки зрения дефектообразования: окисление, диффузия, травление и термический отжиг.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования глубоких уровней в Al/a-Si:H и НІТ-структуре, предназначенной для создания

солнечного элемента (СЭ). В экспериментах с барьерными структурами Al/a-Si:H/TCO/Al были использованы пленки a-Si:H, полученные разложением смеси силана с водородом в плазме тлеющего разряда низкочастотным (55 кГц) методом. Образцы изготовлены в Ярославском филиале Физико-технологического института Российской академии наук (ФТИ РАН, г. Ярославль) на установке “*Mini Goupyl*” (Франция) (частота возбуждающего генератора 55 кГц, мощность разряда 200 Вт, время осаждения 12 мин, расход SiH<sub>4</sub> 200 см<sup>3</sup>/мин). Исследуемые структуры отличались различными технологическими режимами изготовления. В таблице 5 указаны значения температуры подложки –  $T_s$ , давления в камере –  $P$ , толщина пленки a-Si:H –  $D_{пл}$ , скорость осаждения –  $V_{ос}$ .

Изучение электрофизических свойств образцов осуществлялось методами вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных (ВФХ) характеристик. На основании асимметрии формы вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик сделан вывод о наличии в структурах Al/a-Si:H/TCO/Al двух потенциальных барьеров, образующих два встречно включенных диода. Определена высота потенциального барьера, которая составила 0,7-0,8 эВ из анализа ВАХ и 0,8-0,9 эВ из анализа ВФХ.

Для определения концентрации и энергии активации ГУ в щели подвижности были проведены исследования барьерных структур Al/a-Si:H/TCO/Al методом токовой РСГУ с компенсацией тока сквозной проводимости. Измерения проводились в диапазоне температур 280 – 400 К при скорости нагрева образца 1 К/мин и амплитуде опустошающего импульса -3 В.

Из спектров токовой РСГУ экспериментально обнаружено, что для структуры Al/a-Si:H/TCO/Al в щели подвижности аморфного гидрогенизированного кремния присутствуют два глубоких уровня с энергиями активации 0,49 эВ и 0,8 эВ. Концентрации глубоких уровней  $N_t$ , вычисленные по данным РСГУ-спектра, различались в зависимости от температуры подложки  $T_s$ . Рассчитанные параметры ГУ были сопоставлены с данными о плотности локализованных состояний, полученными с помощью модифицированного времяпролетного метода ( $g_{ВП}$ ) и метода измерения поверхностного потенциала на краевом склоне барьерной структуры ( $g_{ПП}$ ) (таблица 5).

Таблица 5 – Сравнительные значения плотности локализованных состояний и концентрации носителей на ГУ в структурах Al/a-Si:H/TCO/Al при различных технологических режимах

№ обр.	$T_s$ , °С	$P$ , Па	$D_{пл}$ , нм	$V_{ос}$ , Å/с	$g_{ВП}$ , см <sup>-3</sup> ·эВ <sup>-1</sup>	$g_{ПП}$ , см <sup>-3</sup> ·эВ <sup>-1</sup>	$N_t$ , см <sup>-3</sup>
1	40	132	663	9,2	$4,32 \cdot 10^{16}$	$8,83 \cdot 10^{16}$	$3,0 \cdot 10^{16}$
2	100	157	678	9,4	$1,20 \cdot 10^{17}$	$1,74 \cdot 10^{17}$	$4,8 \cdot 10^{16}$
3	175	189	652	9,1	$1,40 \cdot 10^{17}$	$1,61 \cdot 10^{17}$	$3,2 \cdot 10^{16}$
4	250	220	710	9,9	$2,38 \cdot 10^{16}$	$5,38 \cdot 10^{16}$	$1,2 \cdot 10^{16}$
5	325	252	717	10,0	$3,34 \cdot 10^{16}$	$3,87 \cdot 10^{16}$	$3,4 \cdot 10^{16}$

Некоторое различие в количественных характеристиках плотности локализованных состояний связаны с влиянием поверхности и поверхностных состояний (как в методе измерения поверхностного потенциала) и вкладом оптически активных локализованных состояний (как в модифицированном времяпролетном методе). Из анализа экспериментальных данных следует, что при температуре подложки 250°C плотность локализованных состояний и концентрация глубоких центров минимальны. Таким образом, для получения пленок a-Si:H приборного качества данный режим можно считать наиболее предпочтительным.

Для исследования глубоких уровней в НИТ-структурах использовались солнечные элементы, изготовленные в ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А. Ф. Иоффе», Санкт-Петербург, Россия. Структура НИТ образца представлена на рисунке 7.

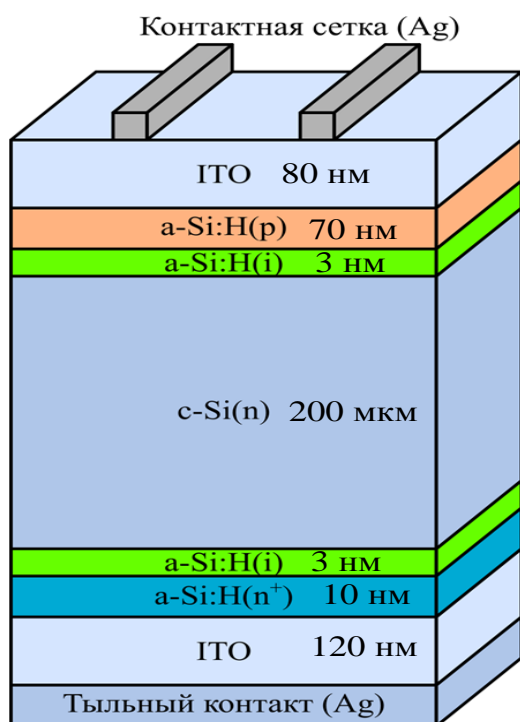


Рисунок 7 - Схематичное изображение НИТ структуры в разрезе (а); толщины слоев НИТ-структуры (б)

Экспериментально установлено, что в гетероструктурах Ag/ITO/a-Si:H(p)/a-Si:H(i)/c-Si(n)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n<sup>+</sup>)/ITO/Ag (НИТ) вольт-амперная характеристика имела диодный вид. Определена высота потенциального барьера равная 0,6-0,7 эВ на интерфейсе a-Si:H(p)/a-Si:H(i)/c-Si(n) по экстраполяциям прямой ветви ВАХ и зависимости  $1/C^2$  на ось напряжения.

Для определения концентрации и энергии ионизации ГУ в щели подвижности аморфного гидрогенизированного кремния и запрещенной зоне кристаллического кремния были проведены исследования барьерных НИТ-структур методом токовой РСГУ. Измерения проводились в диапазоне температур 100 – 400 К при скорости нагрева образца 1 К/мин и амплитуде напряжения опустошающего импульса 1 В. Полученный РСГУ спектр представлен на рисунке 8.

На РСГУ-спектрах НИТ-структур был обнаружен ГУ с энергией активации

$E_i=0,52$  эВ и концентрацией  $1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Проведен анализ экспериментального РСГУ-спектра НИТ-структуры и сравнение его со спектрами РСГУ для барьерных структур на основе c-Si и a-Si:H. Установлено, что ГУ характеризуется концентрацией, близкой по величине к значениям, полученным для барьерных структур на основе a-Si:H и на пять порядков превышающей концентрации ГУ в c-Si. При этом формы РСГУ-спектров ("уширенный" пик) были аналогичны формам спектров, полученным для барьерных структур Al/a-Si:H/TCO/Al.

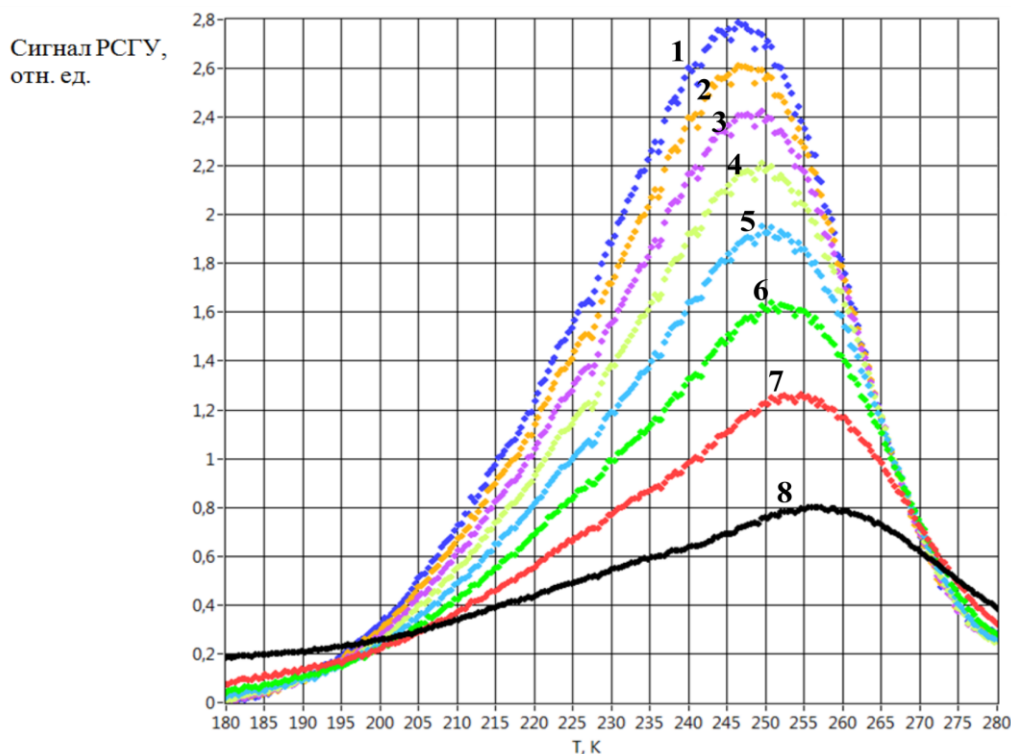


Рисунок 8 – РСГУ-спектры НИТ- структуры, соответствующие разным постоянным времени настройки дискриминаторов: 1 – 282, 2 – 258, 3 – 234, 4 – 209, 5 – 182, 6 – 154, 7 – 124, 8 – 91 мкс

Таким образом, условия проведения эксперимента и полученные экспериментальные результаты позволили сделать вывод, что дефекты, создающие обнаруженный ГУ, локализованы в слое  $a\text{-Si:H}(p)$ . Дефекты проявили себя как рекомбинационные центры, уменьшающие время жизни неосновных носителей заряда.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан способ компенсации аддитивной составляющей релаксационного сигнала в РСГУ-спектрометре, который заключается в измерении постоянной составляющей переходного релаксационного процесса на выходе преобразователя ток-напряжение и вычитании ее через звено обратной связи из входного сигнала. Полученный сигнал усиливается и обрабатывается для получения параметров ГУ.

2. Предложен и запатентован способ определения энергии ионизации глубоких уровней в полупроводниковой барьерной структуре по измерению двух сигналов релаксации тока или емкости при фиксированной характеристической температуре, что уменьшает время диагностики в 3-4 раза и позволяет использовать его при экспресс-анализе параметров глубоких центров.

3. Выведены математические соотношения, позволяющие определять энергию ионизации глубокого уровня по разности максимумов РСГУ-пигов при различных амплитудах импульсов напряжения опустошения глубокого

уровня и фиксированной температуре. В общепринятых соотношениях энергия ионизации ГУ определяется по РСГУ-пикам, полученным при разных температурах и фиксированном напряжении опустошения.

4. Разработан макет установки релаксационной спектроскопии глубоких уровней с адаптивной компенсацией токов сквозной проводимости, позволяющий измерять минимальную концентрацию ГЦ на уровне  $10^9 \text{ см}^{-3}$  в барьерных структурах с токами утечки до 1 мА. Проведена оценка погрешности определения энергии ионизации ГУ, которая составляет не более  $2kT$ .

5. Создана база данных по параметрам глубоких центров в полупроводниковых структурах на основе Si, GaAs, InP, позволяющая ускорить процесс идентификации глубоких уровней сравнением результатов экспериментов с базой данных.

6. Установлена взаимосвязь между технологическими операциями изготовления базы n-p-n-транзистора в планарной технологии ИМС с изоляцией обратно смещенным p-n-переходом и спектром глубоких уровней, образовавшихся в процессе разгонки акцепторной примеси. Экспериментально показано, что в случае использования жидкостного травления наименьшая суммарная концентрация ГЦ в диодах Шоттки Al/n-Si, PtSi/n-Si и кремниевых n-p-n-транзисторах соответствовала случаю полного удаления маскирующего слоя  $\text{SiO}_2$  и слоя боросиликатного стекла при вскрытии окон для проведения базовой диффузии. Дiodные структуры с низкой суммарной концентрацией ГЦ имели минимальный обратный ток утечки.

7. Использование метода релаксационной спектроскопии глубоких уровней с адаптивной компенсацией токов сквозной проводимости позволило выявить в технологическом процессе изготовления ИС на кремниевых планарно-эпитаксиальных структурах наиболее проблемные операции с точки зрения дефектообразования: окисление, диффузия, травление и термический отжиг. Предложено использовать этот метод для диагностики ГЦ после проведения указанных технологических операций.

8. Экспериментально установлено из измерений спектров РСГУ НИТ-структур Ag/ITO/a-Si:H(p)/a-Si:H(i)/c-Si(n)/a-Si:H(i)/a-Si:H(n<sup>+</sup>)/ITO/Ag, что ГУ с энергией активации 0,52 эВ и концентрацией  $1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  локализован в щели подвижности a-Si:H(p) и является центром рекомбинации носителей заряда.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, индексированных в базах данных Web of Science и Scopus:

1. The Measurement of Electric Field Distribution in the Barrier Structures Based on Disordered Semiconductors / N.V. Vishnyakov, S.P. Vikhrov, V.V. Gudzev et al. // Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics. - 2014. - Vol. 9. P. 773-777.

2. Measuring Complex for Analysis of Recombination Deep Traps in Semiconductor Solar Cells / V.G. Litvinov, N.V. Vishnjakov, V.V. Gudzev et al. // IEEE International Conference on Industrial Technology. - 2015. - P. 1071–1074.

### **Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Гудзев В.В. Глубокие уровни в диодах Шоттки на основе силицида платины / В.В. Гудзев, В.Г. Литвинов, М.В. Зубков, А.Я. Клочков // Вестник РГРТУ. - 2008. - №3. Вып. 25. - С. 76-79.

2. Гудзев В.В. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней микро- и наноструктур / В.Г. Литвинов, В.В. Гудзев, О.А. Милованова, Н.Б. Рыбин // Вестник РГРТУ. - 2009. - № 4. Вып. 30. - С. 62-70.

3. Гудзев В.В. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней и ее применение для исследования полупроводниковых структур микро- и наноэлектроники / В.Г. Литвинов, В.В. Гудзев, О.А. Милованова, Н.Б. Рыбин // Датчики и системы. - 2009. - № 9. - С.71-78.

4. Гудзев В.В. Активационно-дрейфовая модель П.Т. Орешкина — основа изучения параметров глубоких центров в барьерных структурах / В.В. Гудзев, Т.А. Холомина, М.В. Зубков, С.А. Кострюков // Приложение к журналу Вестник РГРТУ. 2009. № 4. С. 34–39.

5. Гудзев В.В. Исследование контактных явлений в барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников / А.П. Авачёв, Н.В. Вишняков, Гудзев В.В. и др. // Приложение к журналу «Вестник РГРТУ», - 2009. - № 4. Вып.30. - С. 46-52.

6. Гудзев В.В. Исследование диодных структур на основе Si и a-Si:H методом токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней в режимах эмиссии и захвата / Н.В. Гришанкина, В.Г. Литвинов, В.В. Гудзев, Н.Б. Рыбин // Вестник РГРТУ - 2011. - № 3. Вып. 37. - С. 72-80.

7. Гудзев В.В. Способ определения энергии ионизации равномерно распределенных дефектов с глубокими уровнями в полупроводниковых барьерных структурах с неоднородным легированием базы / В.В. Гудзев, М.В. Зубков, Д.С. Кусакин, В.Г. Литвинов // Вестник РГРТУ – 2015. - №2. Вып. 52. - С. 163-168.

### **Охранные документы:**

Пат. 2431216 РФ. Способ определения энергии ионизации глубоких уровней в полупроводниковых барьерных структурах и устройство для его осуществления / Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев, В.Г. Литвинов, М.В. Зубков // Бюл. – 2011 - № 28

### **Прочие публикации:**

1. Автоматизированный измерительно-аналитический комплекс токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней / В.Г. Литвинов, В.В. Гудзев, М.В. Зубков и др. // Рязанский ЦНТИ, информационный листок о НТР – Рязань, 2002. - № 61-081-02. - 4с.

2. Гудзев В.В. Исследование процессов эмиссии и захвата носителей заряда в p-i-n структуре a-Si:H методом токовой DLTS / В.Г. Литвинов, В.В. Гудзев, Н.В. Гришанкина, Н.Б. Рыбин // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сб. тр. VII международной конференции. - Санкт-Петербург, 2010. - С. 237-238.

3. Литвинов В.Г. Практические аспекты применения релаксационной спектроскопии глубоких уровней для характеристики полупроводниковых наноструктур / В.Г. Литвинов, Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев и др. // Опто-,

наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: сб. тр. X международной конференции. - Ульяновск, 2008. - С. 207.

4. Гудзев В.В. Практические аспекты применения метода DLTS для исследования электронных локализованных состояний в неупорядоченных полупроводниках. Аморфные и микрокристаллические полупроводники / В.Г. Литвинов, В.Г. Мишустин, В.В. Гудзев и др. // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сб. тр. VI международной конференции. - Санкт-Петербург, 2008. - С. 164-165.

5. Gudzev V.V. The ionization energy determination of deep level defects in inhomogeneous doped semiconductor barrier structures / V.V. Gudzev, M.V. Zubkov, V.G. Litvinov, A.D. Maslov. Telecommunication, Electronics and Informatics: 5-th international conference ICTEI 2015, Chisinau, 2015. P. 176-178.

6. Гудзев В.В. Разработка преобразователя ток-напряжение с компенсацией постоянной составляющей тока для спектрометра РРСГУ / В.В. Гудзев, С.С. Балаганский // Современные проблемы наноэлектроники, нанотехнологий, микро- и наносистем: сб. тр. школы молодых ученых. - Ульяновск, 2010. - С. 51-52.

7. Гудзев В.В. Токовая релаксационная спектроскопия глубоких уровней с компенсацией токов утечки / В.В. Гудзев, С.С. Балаганский, М.В. Зубков, В.Г. Литвинов // Инновации в науке, производстве и образовании: сб. тр. науч.-практ. конф. / отв. ред. К.Н. Гаврилов, В.А. Степанов. - Ряз. гос. ун-т им. С.А. Есенина. Рязань, 2011. - С. 49-52.

8. Гудзев В.В. Автоматизированный измерительно-аналитический комплекс релаксационной спектроскопии глубоких уровней с базой данных / В.В. Гудзев, М.В. Зубков, В.Г. Литвинов // Межвуз. сб. научных трудов «Электроника». - Рязань, 2009. - С. 73-83.

9. Гудзев В.В. Спектр глубоких уровней в диодах Шоттки с различной технологией формирования контактов / В.В. Гудзев, М.В. Зубков, А.Я. Клочков // Межвуз. сб. научных трудов. Физика полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства. - Рязань: РГРТА, 1999. - С. 22-24.

10. Гудзев В.В. Глубокие уровни в диодах Шоттки на основе силицида платины / В.В. Гудзев, М.В. Зубков, А.Я. Клочков // Электронная техника, сер. 3 «Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства». - Рязань: РГРТА, 2002. - С. 154-155.

11. Орешкин П.Т. Диагностика производства полупроводниковых приборов и интегральных схем по глубоким центрам / П.Т. Орешкин, М.В. Зубков, В.В. Гудзев и др. // Актуальные проблемы фундаментальных наук: сб. тр. международной научно-тех. конф. Москва: МГТУ им. Баумана, 1991. - Т.4. - С. 97.

12. Гудзев В.В. Спектр глубоких уровней в n-p-n-транзисторе на основе кремния / В.В. Гудзев, М.В. Зубков // Сборник межвуз. научн. трудов Микроэлектроника. - Рязань: РГРТА, 2003. - С. 14-19.

Г у д з е в Валерий Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛУБОКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ  
В БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО  
И АМОРФНОГО ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОГО КРЕМНИЯ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 16.10.2015 Формат бумаги 60×84 1/16.  
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз.  
Рязанский государственный радиотехнический университет  
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.