

*На правах рукописи*

**Кострюков Сергей Анатольевич**

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ  
НА ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА  
В БАРЬЕРАХ ШОТТКИ**

01.04.10 – физика полупроводников

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**Рязань – 2007**

Работа выполнена на кафедре биомедицинской и полупроводниковой электроники ГОУВПО “Рязанский государственный радиотехнический университет”

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Холомина Татьяна Андреевна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Мирошникова Ирина Николаевна,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент Трубицын Андрей Афанасьевич

Ведущая организация: ОАО НПП “Сапфир”, г.Москва

Защита диссертации состоится “29” мая 2007 в зале заседаний Ученого совета (ауд. 235) в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 ГОУВПО “Рязанский государственный радиотехнический университет” по адресу: 390005, г. Рязань, ул Гагарина , д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО “Рязанский государственный радиотехнический университет”.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2007 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.211.03  
доктор технических наук, профессор

Б.И. Колотилин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ.** Большинство элементов современной твердотельной электроники представляет собой барьерные структуры. Поэтому одной из наиболее важных прикладных проблем физики полупроводников является повышение воспроизводимости и стабильности параметров полупроводниковых барьерных структур. Указанное может быть достигнуто принятием целого комплекса мер, реализованных как в разработке теоретических основ работы приборов, так и в технологии их изготовления путём применения научно обоснованных конструктивно-технологических решений и достоверных методов контроля параметров материалов и приборов.

Дефекты структуры, обусловленные примесными атомами, могут создавать энергетические уровни, локализованные в запрещённой зоне полупроводника. Такие уровни, отстоящие на несколько  $kT$  ( $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура) от краёв разрешённых зон, называют глубокими (ГУ). Глубокие уровни придают полупроводникам полезные или, чаще, нежелательные свойства. Это обуславливает важность как контроля параметров электрически активных центров, так и понимания физической сущности их проявления.

В большинстве случаев глубокие центры (ГЦ), создаваемые несовершенством структуры полупроводника, прямо или косвенно приводят к деградации параметров полупроводниковых приборов. Наблюдаются “мягкие” обратные вольт-амперные характеристики, как следствие, понижение пробивных напряжений, генерация шума - всё это приводит к снижению процента выхода годных приборов. Но наибольшие неприятности приносит долговременная деградация параметров прибора. Множество работ направлено на выявление (предсказание) скорости деградации и, как следствие, - прогнозирование отказа прибора. Многие прогнозы строятся на основе изучения шумовых параметров приборов.

Ряд исследователей полагает, что шумовые характеристики являются одним из наиболее информативных источников сведений о протекающих в структуре физических процессах. Важным преимуществом таких измерений является неразрушающий контроль качества приборов.

Шумовые характеристики приборов определяют порог чувствительности практически всех измерительных датчиков и систем. Популярными на сегодняшний день беспроводные системы связи являются ярким примером реализации научных изысканий, основной целью которых являлось снижение уровня шума в канале передачи данных. Поэтому изучение физических механизмов генерации шума и роли в этом глубоких уровней является актуальной задачей.

Изучению параметров ГУ методом спектроскопии низкочастотного (НЧ) шума посвящено очень большое число работ. Анализ состояния проблемы свидетельствует о том, что ряд вопросов, касающихся физических механизмов процессов, протекающих в полупроводниковых приборах с ГУ,

остаётся открытым. В частности, не ясна зависимость спектральной плотности мощности (СПМ) НЧ шума от обратного смещения. Актуальность такого вопроса очевидна, поскольку, с одной стороны, часть полупроводниковых приборов функционирует при обратном смещении, а с другой - спектроскопия НЧ шума является тонким экспериментальным методом, позволяющим выяснить физическую природу релаксационных процессов в барьерных структурах.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** – развитие активационно-дрейфовой модели генерации НЧ шума в физических барьерных слоях путём учёта влияния эффекта понижения энергии ионизации ГЦ под действием сильного электрического поля, а также методики спектроскопии НЧ шума для проведения экспериментальных исследований и расширения возможностей диагностики элементов интегральных схем.

Поставленная цель достигается решением следующих задач.

- Анализ состояния проблемы и тенденций развития математических и физических моделей, описывающих механизмы формирования НЧ шума.

- Выявление зависимости СПМ НЧ шума от обратного смещения в диодах Шоттки на основе кремния и арсенида галлия.

- Подтверждение определяющей роли ГУ в механизме генерации шумовой составляющей обратного тока диодов Шоттки, а также форме функциональной зависимости мощности шума от величины обратного смещения.

- Разработка модели, описывающей зависимость СПМ НЧ шума от обратного смещения, и сравнение результатов моделирования с опубликованными в литературе и экспериментальными данными.

- Разработка и построение автоматизированной установки для измерения СПМ НЧ шума полупроводниковых структур и управляющего программного обеспечения.

**ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** В качестве экспериментальных образцов применены мощные диоды Шоттки на кремнии n-типа проводимости и детекторы рентгеновского излучения на основе арсенида галлия.

Предварительная настройка и калибровка установки измерения спектров НЧ шума проводилась на сплавном диоде Д220 с заведомо высокой концентрацией примеси золота ( $n_t = 2.1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ), имеющей энергию ионизации соответствующего ГУ  $\Delta W_t = 0,54 \text{ эВ}$ , путём сравнения экспериментальных данных с результатами, полученными методом РСГУ.

Исследования параметров глубоких центров (энергии ионизации  $\Delta E_t$  и концентрации  $N_t$ ) проводились методом токовой нестационарной спектроскопии глубоких уровней и спектроскопии низкочастотного шума. Концентрация мелкой примеси в образцах контролировалась путём измерения вольт-фарадных характеристик.

Для изучения физических процессов в барьерных структурах широко применялись методы численного математического моделирования на ПЭВМ.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Физическая модель генерации НЧ шума в полупроводниковых барьерных структурах, позволяет учесть уменьшение энергии ионизации ГЦ под действием электрического поля напряжённостью более  $10^4$  В/см.

2. Уточненное соотношение для расчета энергии ионизации ГУ по частоте точки “излома” на частотной зависимости СПМ НЧ шума позволяет повысить точность определения значения энергии ионизации ГУ на 20%.

3. Концентрация ГЦ барьерных структур на основе кремния и арсенида галлия оценивается по напряжению, соответствующему точке перегиба на вольт-шумовой характеристике; при уменьшении концентрации ГЦ точка перегиба смещается в сторону больших значений напряжения обратного смещения.

4. Уровень спектральной плотности мощности низкочастотного шума интегральных детекторов заряженных частиц на основе собственного арсенида галлия определяется глубоким центром хрома ( $\Delta W_t = 0,64 \pm 0,02$  эВ), обнаруженным методом спектроскопии НЧ шума, а также РСГУ.

## НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

1. Впервые предложено учитывать эффект Френкеля, т.е. понижение высоты барьера потенциальной энергии кулоновского поля атома под действием внешнего электрического поля напряжённостью более  $10^4$  В/см. в активационно-дрейфовой модели формирования НЧ шума в физических барьерных слоях

2. Предложено объяснять изменение временных параметров процесса генерации НЧ шума в барьерных структурах от величины обратного смещения действием электрического поля на активационный и дрейфовый компоненты процесса релаксации заряда посредством учёта изменения энергии ионизации ГЦ в совокупности с ростом времени дрейфа носителей заряда.

3. Впервые показано, что в точке перегиба зависимости СПМ НЧ шума от напряжения обратного смещения происходит изменение отношения количества достигших базы к общему числу активированных с глубоких центров носителей заряда.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Уточнено соотношение для расчета энергии ионизации ГУ по частоте точки “излома” на частотной зависимости СПМ НЧ шума, позволяющее повысить точность определения значения энергии ионизации ГУ на 20%.

2. Разработана методика определения частоты перегиба, основанная на выявлении максимального угла между аппроксимирующими зависимость прямыми и позволяющая автоматизировать процесс измерения энергии

ионизации ГУ по частотной зависимости СПМ НЧ шума, что даёт возможность проводить измерение энергии ионизации ГУ в реальном времени в условиях производства.

3. Экспериментально показано, что для повышения чувствительности интегральных детекторов заряженных частиц и рентгеновского излучения на основе собственного арсенида галлия необходимо уменьшать концентрацию примесей в  $i$  – области барьерных структур. В частности, показано, что присутствие примеси хрома в структуре повышает мощность шума детектора и приводит к снижению его чувствительности.

4. Разработана портативная автоматизированная установка для измерения НЧ шума барьерных структур, основанная на получении спектра сигнала методом преобразования Фурье, позволяющая проводить анализ технологии изготовления приборов путём сравнения образцов по уровню шума, вычислять энергию ионизации ГУ по частотным зависимостям СПМ шума, измерять зависимости СПМ НЧ шума барьерных структур при изменении напряжения электрического смещения и температуры.

5. Разработано программное обеспечение для созданной автоматизированной экспериментальной установки, оригинальность которого подтверждена авторским свидетельством.

Материалы диссертации вошли в методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине “Методы исследования полупроводниковых структур” и используются при подготовке инженерных кадров по специальности “Микроэлектроника и твердотельная электроника”

**ДОСТОВЕРНОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ** подтверждается непротиворечивостью полученных результатов основным положениям физики полупроводников; сопоставлением экспериментальных данных с предложенными автором моделями; совпадением значений исследованных параметров, полученных на одних и тех же образцах, разными методами.

**АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ.** Результаты работы обсуждались на 30, 31, 33, 34, 35 международных научно-методических семинарах “Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах”; Москва, МНТОРЭС им А.С.Попова; МЭИ, 2001-2006 гг., VII международной конференции “Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы” (Владимир, 2005 г.), 14-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции “Микроэлектроника и информатика - 2007”, Москва, МИЭТ (ТУ), 2007, а также на ежегодных научно-технических конференциях Рязанского государственного радиотехнического университета.

**СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложений. Объём диссертации – 134 страницы машинописного текста, включая 2 таблицы, 47 рисунков, 2 приложения и список литературы из 93 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, определены цель и основные задачи, раскрыты научная новизна и практическая значимость результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен обзор литературы, содержащей результаты исследований влияния обратного смещения на параметры низкочастотного шума барьерных структур. Рассмотрены основные теории и гипотезы, лежащие в основе существующих моделей генерации низкочастотного шума.

В ряде работ, опубликованных в научно-технической литературе, приведены экспериментальные результаты, свидетельствующие о зависимости параметров НЧ шума и нестационарной (релаксационной) спектроскопии глубоких уровней в физических барьерных слоях, содержащих ГЦ, от приложенного электрического напряжения обратного смещения. Между тем, вопрос о природе влияния напряжения обратного смещения на процессы формирования НЧ шума в полупроводниковых барьерных структурах остается открытым.

Модель генерационно-рекомбинационного шума Ч.Т. Са и др., основанная на принципе детального равновесия, справедливом для термодинамически равновесного состояния, не может объяснить зависимость спектральной плотности мощности НЧ шума от приложенного внешнего смещения.

Исходные положения моделей ряда других авторов, представляют собой модификации основ модели Ч.Т. Са и не меняют ее исходных предпосылок, т.е. состоят в применении принципа детального равновесия к термодинамически неравновесным объектам. В ряде работ получено несоответствие экспериментальных результатов с модельными, высказаны критические замечания и сделан вывод о том, что степень расхождения результатов определяется степенью отклонения условий эксперимента от равновесных.

Активационно-дрейфовая модель, предложенная в работах П.Т.Орешкина и др., основана на предположении о том, что процесс генерации НЧ шума в физических барьерных слоях обусловлен флуктуациями генерации и последующего дрейфа в поле ОПЗ носителей заряда, активированных с ГЦ. Зависимость СПМ шума от величины приложенного к барьерной структуре обратного смещения  $U$  является одним из основных положений активационно-дрейфовой модели. Рост СПМ низкочастотного шума при увеличении обратного смещения на барьерной структуре обусловлен ростом вероятности пролета активированных с ГЦ носителей заряда сквозь ОПЗ в электронейтральную область барьерной структуры. Однако вопрос о характере функциональной зависимости спектральной плотности мощности от величины напряжения обратного смещения оставался невыясненным.

Анализ опубликованных экспериментальных результатов показал, что частотные зависимости спектральной плотности мощности низкочастотного шума  $S(f)$  для различных барьерных структур (диодов

Шоттки, несимметричных  $p$ - $n$ -переходов и полевых транзисторов) качественно схожи и в общем случае характеризуются наличием ряда точек перегиба (изменения наклона) кривых. Характеристические точки на оси абсцисс  $f_{bi}$ , при которых происходит изменение наклона зависимостей  $S(f)$ , называют также частотами среза, излома или перегиба. Характеристические частоты соответствуют совпадению времени релаксации процесса  $\tau$ , ответственного за генерацию НЧ шума, с постоянной времени измерительного сигнала:

$$\omega_b \tau = 1, \quad (1)$$

где  $\omega_b = 2\pi f_b$  – круговая частота.

Определение энергии ионизации глубоких центров  $\Delta W_i$  методом спектроскопии НЧ шума осуществляется путем задания модельной функции изменения  $\tau(T)$ , например, по закону Больцмана:

$$\tau = \tau_0 \exp(\Delta W_i / kT). \quad (2)$$

Условию (2) соответствуют также максимумы температурных зависимостей СПМ НЧ-шума, измеренных для разных барьерных структур при фиксированных частотах. Температурные зависимости СПМ избыточного шума для барьерных слоев диодов Шоттки, несимметричных  $p$ - $n$ -переходов и полевых транзисторов, имеют качественно сходный характер.

Установлено, что в опубликованных в научно-технической литературе работах авторы очень редко указывают способ определения частоты «среза», что ставит под сомнение достоверность определения энергии ионизации глубоких центров в ряде работ и обуславливает необходимость разработки такой методики.

**Вторая глава** посвящена развитию активационно-дрейфовой модели генерации НЧ шума в барьерных структурах, в которой учитывается эффект Френкеля и вводится функциональная зависимость отношения количества достигших базы структуры к количеству активированных с ГУ носителей заряда от напряжённости электрического поля в слое пространственного заряда.

Одной из возможных причин, вызывающих зависимость временных параметров релаксационных процессов от величины приложенного обратного смещения, является эффект Френкеля, состоящий в понижении эффективной высоты барьера, образованного кривой потенциальной энергии кулоновского поля атома, под действием сильного электрического поля. За счет этого уменьшается энергия, необходимая для ионизации атома.

Понижение высоты потенциального барьера  $\Delta W_p$  в зависимости от напряжённости электрического поля  $E$  барьера для носителей заряда выражается в виде

$$\Delta W_p = \frac{e\sqrt{eE}}{\sqrt{\pi\epsilon\epsilon_0}}. \quad (3)$$



Уменьшение энергии ионизации (3) вызывает изменение постоянной времени релаксации активационно-дрейфового процесса. В таком случае время релаксации записываем как

$$\tau_p = \frac{x}{v_{нас}} \exp\left(\frac{\Delta W_t - \Delta W_p}{kT}\right), \quad (4)$$

а (3) преобразуем к виду

$$\Delta W_p = \sqrt{\frac{e}{\pi \varepsilon \varepsilon_0} \sqrt{\frac{en_0}{2\varepsilon \varepsilon_0} (U_k - U)}}. \quad (5)$$

Расчеты и проведение модельных экспериментов показали, что определяющим фактором в понижении высоты потенциального барьера является концентрация мелкой легирующей примеси. Например, для концентрации, большей  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>, значение энергии понижения высоты потенциального барьера может достигать от 0,05 до 0,1 эВ в зависимости от напряжения смещения.

Изменение постоянной времени активационно-дрейфового процесса, учитывающее эффект Френкеля, вычисленное как

$$\frac{\tau}{\tau_p} = \exp\left(\frac{\Delta W_p}{kT}\right), \quad (6)$$

где  $\tau$  - постоянная времени активационно-дрейфового процесса без учёта эффекта Френкеля, показывает, что при средней напряжённости электрического поля в ОПЗ  $E = 1,21 \cdot 10^5$  В/см отношение  $\tau/\tau_p$  составляет 42 раза. Иными словами, при вычислении энергии ионизации по излому зависимости СПМ от частоты необходима коррекция результатов вычислений с учётом напряжённости поля. Значение  $\Delta W_t$  - энергии ионизации глубокого уровня при известном напряжении смещения следует находить как

$$\Delta W_t = kT \ln\left(\frac{1}{4\pi f_r \cdot \tau_m}\right) + \sqrt{\frac{e}{\pi \varepsilon \varepsilon_0} \sqrt{\frac{en_0}{2\varepsilon \varepsilon_0} (U_k - U)}}, \quad (7)$$

где  $f_r$  - частота излома на зависимости СПМ от частоты, наблюдаемая в эксперименте,  $U$ - напряжение смещения, при котором проводятся измерения СПМ. В более высокоомных образцах влияние эффекта Френкеля вносит меньшую погрешность в вычисление  $\Delta W_t$  по причине меньшего  $n_0$ . Можно предположить, что рассматриваемый эффект будет более ярко проявляться в приборах с высокой концентрацией легирующей примеси в базе, т.е. в мощных низковольтных диодных структурах. Эффект Френкеля является видимому не единственным механизмом активации носителей заряда с глубокого центра в сильных полях. Можно предположить наличие механизма лавинного умножения, влияние которого проявляется при напряжённостях  $10^5$ - $10^7$  В/м.

Для нахождения спектральной плотности мощности флуктуаций тока в исследуемой барьерной структуре, содержащей глубокие центры, используют выражение вида:

$$S_i(\omega) = \frac{2\bar{a}^2 V N_i f_i}{\pi} \int_0^d \frac{\tau(x)}{1 + \omega^2 \tau(x)^2} dx, \quad (8)$$

где  $\bar{a}^2$  - значение среднего квадрата амплитуды случайных импульсов тока,  $f_i$  - вероятность заполнения ГУ с концентрацией  $N_i$ ,  $f = 1 - f_i$ ,  $V$  - объём,  $\tau$  - постоянная времени релаксации. Если число генерируемых с ГУ носителей заряда, определяется соотношением  $n = N_i f_i$ , то  $S(\omega) \sim n$ . Т.е. СПМ шума определяется числом носителей заряда, генерируемых в заданных условиях с глубокого уровня.

При увеличении обратного смещения структуры в определённом интервале относительно слабых полей  $E_{cp}$  вклад коротких импульсов, т.е. импульсов с малым значением  $d_i$  уменьшается за счёт уменьшения числа  $n_i$ . Этот процесс сопровождается увеличением числа более долговременных импульсов. При достижении смещения, при котором  $U = U_{рез}$ , где  $U_{рез}$  - некоторое "резонансное" смещение, все непролётные составляющие спектра активационно-дрейфовых процессов (импульсов тока) переходят в пролётные, т.е. создаётся единый активационно-дрейфовый процесс<sup>\*)</sup>.

Таким образом, получаем, что СПМ на фиксированной частоте (в относительно малом диапазоне частот) определяется не столько количеством активированных с ГУ носителей заряда, сколько отношением достигших базы к общему количеству активированных. В свою очередь, отношение концентрации пролетевших в базу к общему количеству активированных носителей является функцией напряжённости поля (обратного смещения). Согласно активационно-дрейфовой модели эта функция имеет насыщение при смещениях выше некоторого  $U_{рез}$ . Соответственно (8) преобразуется к виду:

$$S_i(\omega) = \frac{2\bar{a}^2 V N_i f_i g(E)}{\pi} \int_0^d \frac{\tau(x)}{1 + \omega^2 \tau(x)^2} dx, \quad (9)$$

где,  $g(E)$  - функциональная зависимость количества достигших нейтральной части носителей заряда от напряжённости электрического поля.

В работе установлено, что наиболее близкую к экспериментальным зависимостям форму даёт подстановка в (9) функции вида  $g(E) = \left(1 + \exp\left(\frac{E - E_{cp}}{c}\right)\right)^{-1}$ . Полученная при этом форма зависимости СПМ шума от

напряжения смещения аппроксимируется двумя экспоненциальными участками с отличающимися показателями. При этом на вольт-шумовой характеристике выделяются экспоненциальный участок с показателем  $\alpha_1$ , экспоненциальный участок с показателем  $\alpha_2$  и значение напряжения, при котором наблюдается переход от первого участка к второму. По напряжению обратного смещения, соответствующему точке перегиба на ВШХ барьерных

<sup>\*)</sup> Орешкин П.Т. Барьерные слои как резонаторы на глубоких центрах //Известия вузов СССР. Физика. 1990. № 11. С. 21-25.

структур, можно оценить концентрацию ГЦ в идентичных по конструкции барьерных структурах.

**Третья глава** посвящена разработке методики измерения энергии ионизации ГЦ по точке перегиба («излому») частотной зависимости СПМ НЧ шума, а также разработке аппаратуры, реализующей эту методику. Преимуществом спектроскопии НЧ шума как метода изучения параметров ГЦ в барьерных структурах является квазистационарность условий проведения измерений, что позволяет исключить погрешности, связанные с переходными (динамическими) процессами.

Применение цифровой техники для анализа характеристик НЧ шума является в настоящее время наиболее перспективным. Большинство настроек переносится в область программирования, что значительно упрощает эксплуатацию измерительной установки. Кроме того, цифровая техника даёт практически неограниченные возможности в сфере обработки и форме представления экспериментальных результатов. Однако, как и вся цифровая техника, ЭВМ является источником электромагнитного излучения широком спектре частот. Поэтому встаёт вопрос об уменьшении влияния помех, создаваемых ЭВМ, на результаты измерений шумовых параметров приборов. Один из вариантов решений рассмотрен автором диссертации в работах [1-3], где предложен способ минимизации помех путём устранения гальванической связи между чувствительными цепями установки и ЭВМ. Функциональная схема разработанной установки представлена на рисунке 1.

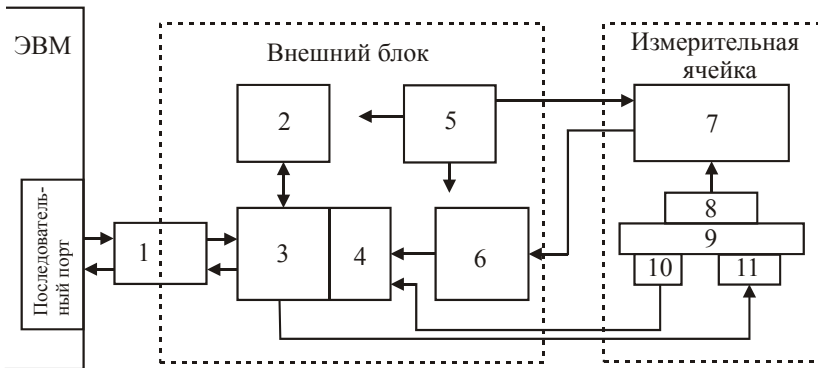


Рисунок 1- Функциональная схема установки: 1-гальваническая развязка, 2-память (ОЗУ), 3-контроллер, 4-аналого-цифровой преобразователь, 5-источник питания, 6-буферный усилитель, 7-маломощный усилитель, 8-образец, 9-держатель образца, 10-датчик температуры, 11-нагреватель

В состав измерительного комплекса входит ЭВМ типа IBM PC и внешний блок, обеспечивающий аналоговую обработку и преобразование в цифровую форму входного сигнала. ЭВМ и внешний блок связаны между собой через стандартный последовательный (USART) порт.

Сигнал, поступающий с образца, усиливается, преобразуется в цифровую форму и сохраняется в буферной памяти. Таким образом, формируется выборка исследуемого сигнала. По команде с ЭВМ выборка передаётся в компьютер для математической обработки. Функциональные и конструктивные особенности разработанной автором диссертации установки опубликованы в [2, 5, 6].

После поступления выборки исследуемого сигнала (в нашем случае НЧ шума) в ЭВМ производится её математическая обработка, заключающаяся в вычислении спектральной плотности мощности входного сигнала как Фурье-преобразования от его автокорреляционной функции.

Оригинальность разработанного автором диссертации программного обеспечения подтверждена свидетельством о регистрации программного продукта №5740 от 21 февраля 2006 г.

Вычисление спектральной плотности мощности с помощью процедур, использующих дискретное преобразование Фурье (ДПФ), эффективно в вычислительном отношении и обеспечивает получение приемлемых результатов для большого класса задач. Однако процедуры вычисления ДПФ вносят искажения в результирующий спектр сигнала. Одним из способов уменьшения вносимых искажений является оптимальный выбор весовой функции окна. Анализ искажений, вносимых в спектральные зависимости плотности мощности НЧ шума при использовании весовых функций типа прямоугольного или треугольного окна, окна Хэннинга и окна  $\cos^3(x)$ , показал, что последняя из перечисленных весовых функций является наиболее простой в программной реализации и обеспечивающей минимальные искажения сигнала (необходимый спад боковых лепестков). Результаты проведенных автором модельных экспериментов и расчетов опубликованы в [5].

Для экспериментальных спектров НЧ шума обычно необходимо сглаживание. Автором диссертации разработана методика, совмещающая в единой программе процедуры сглаживания и поиска точки изменения наклона спектральной кривой. Методика совмещения процедур состоит в разработке алгоритма и программы аппроксимации зависимости СПМ от частоты в двойных логарифмических координатах кусочно–линейной функцией. При этом критерием поиска частоты излома является максимальное значение угла между аппроксимирующими прямыми.

Проверка эффективности предложенного способа была проведена на основе представлений активационно-дрейфовой модели генерации НЧ шума. Для этого был синтезирован спектр шума барьерной структуры, содержащей два ГУ: с  $\Delta W_{11} = 0,49$  эВ и  $\Delta W_{12} = 0,60$  эВ. Модельный спектр НЧ шума барьера Шоттки с сопротивлением базы образца  $\rho = 1,12 \cdot 10^{16}$  Ом·см при комнатной температуре  $T = 300$  К представлен кривой 1 рисунка 2. ГУ с энергией ионизации  $\Delta W_{12}$  введён для имитации физических представлений о спектре вида  $1/f^\gamma$  как суперпозиции лоренцианов от нескольких глубоких центров. Соответствующий этому ГУ лоренциан представлен кривой 3 на рисунке 2. Подобный спектр соответствует реально наблюдаемому в

экспериментах кривым. Шумовая составляющая вносилась в исходные данные искусственно с помощью генератора случайных чисел с нормальным распределением.

На рисунке 3 представлена зависимость угла между аппроксимирующими отрезками от выбора частоты, соответствующей точке пересечения отрезков. Максимум функции, представленной на рисунке 3, расположен на частоте 650 Гц, что позволяет получить, согласно (3),(8) значение энергии ионизации  $\Delta W_t = 0,50$  эВ, которое совпадает с исходным заданным значением  $\Delta W_{t1} = 0,49$  эВ с точностью до кТ.

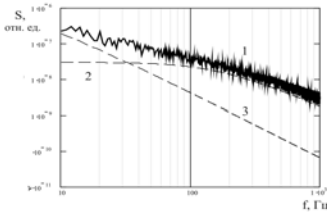


Рисунок 2 - Модельный спектр НЧ шума барьера Шоттки на кремнии (1) и составляющие его лоренцианы (2,3)

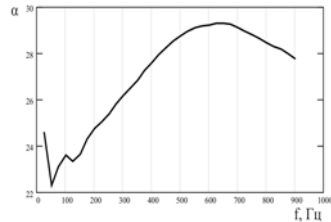


Рисунок 3 - Зависимость угла между аппроксимирующими отрезками от положения точки их пересечения

Разработанная и реализованная методика отличается простотой и универсальностью относительно формы представления входных данных, которыми могут быть результаты, полученные при помощи измерительной установки или оцифрованные графические зависимости из литературных источников. При относительной простоте реализации этот способ позволяет исключить субъективную составляющую погрешности, поскольку работает на таких конкретных математических критериях как значения минимального среднеквадратического отклонения и максимума функции. Результаты настоящего раздела опубликованы в работе [5].

**Четвёртая глава** посвящена экспериментальному исследованию шумовых характеристик детекторов заряженных частиц на основе арсенида галлия и мощных диодов Шоттки.

Полуизолирующий арсенид галлия (i-GaAs) – перспективный материал для создания координатных детекторов заряженных частиц и рентгеновского излучения, поскольку обладает большей по сравнению с кремнием радиационной стойкостью и чувствительностью к рентгеновскому излучению (вследствие большей атомной массы), а также возможностью создания на подложках из i-GaAs монолитно-интегрированных устройств, включающих детектор и быстродействующую схему обработки сигналов. Проблемы, возникающие при практической реализации детекторов, связаны с наличием высокого уровня собственных избыточных шумов.

Тестовые барьерные структуры были изготовлены на предприятиях Москвы и Брянска. Задачей исследования было изучение особенностей шумовых характеристик образцов.

В результате проведенных исследований было обнаружено, что СПМ НЧ шума детекторов заряженных частиц и рентгеновского излучения, изготовленных по одинаковой технологии на разных предприятиях, различалась на 2 – 3 порядка величины (рисунок 4). Форма спектра НЧ шума группы образцов №2 свидетельствовала о присутствии в них определенной концентрации глубоких центров. Для вычисления энергии ионизации этого уровня были проведены измерения зависимости СПМ НЧ шума от температуры образца. Измерения проводились в диапазоне температур от 28 до 97 °С. По частотам, соответствующим точкам изменения наклона спектральных кривых, была построена зависимость времени релаксации от обратной температуры (прямая Аррениуса). Зависимость Аррениуса для образца группы № 2 приведена на рисунке 5. Значение энергии ионизации исследуемого глубокого уровня составило  $W_i = 0,62 \pm 0,05$  эВ, что соответствует энергии ионизации акцепторного уровня хрома в арсениде галлия.

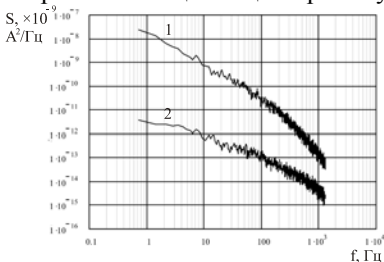


Рисунок 4 - Зависимости СПМ НЧ шума от частоты для образца группы №2- кривая 1 и № 3 – кривая 2

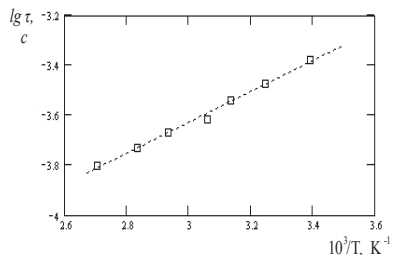


Рисунок 5 - Зависимость времени релаксации от обратной температуры (прямая Аррениуса) для образца группы №2

На спектре НЧ шума для образцов группы №3 (рисунок 4, кривая 2) наблюдаются изломы, но, по-видимому, сигнал от исследуемого ГУ при температурах выше 30° С маскируется иными источниками шума.

Для проверки результатов, полученных методом спектроскопии НЧ шума, образцы исследовались методом РСГУ. В структурах №2 обнаружено несколько глубоких центров; в диапазоне температур 300-370 К зарегистрирован ГУ с энергией ионизации  $\Delta W_{i1} = 0,64 \pm 0,02$  эВ.

Полученное совпадение результатов измерения энергии ионизации ГУ методами спектроскопии НЧ шума и РСГУ доказывает достоверность результатов, полученных методом спектроскопии НЧ шума с помощью разработанной и созданной установки, способа выделения точки изменения наклона аппроксимирующих спектр прямых, а также методики расчета энергии ионизации в соответствии с модельными представлениями, обоснованными автором в главе 2.

Анализ результатов исследования вольт-шумовых характеристик детекторов заряженных частиц (рисунок 6) свидетельствует о том, что зависимость СПМ от напряжения обратного смещения наиболее точно аппроксимируется двумя экспоненциальными зависимостями, что соответствует изложенным выше модельным представлениям, основанным

на предположении об экспоненциальной зависимости количества достигших базы носителей заряда от напряжённости поля

Для изучения зависимости параметров барьерных структур от особенностей их шумовых характеристик проведены исследования ВШХ мощных диодов Шоттки на кремнии. На экспериментальных ВШХ наблюдались аналогичные рассмотренным для характеристик детекторов на основе арсенида галлия участки, описываемые экспоненциальными зависимостями вида  $S \sim e^{\alpha U}$ , смещёнными друг относительно друга по оси напряжений. Коэффициент  $\alpha$  изменялся в диапазоне от 0,07 до 0,5.

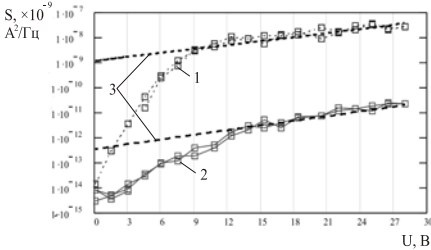


Рисунок 6 - Зависимости СПМ шума от напряжения обратного смещения для детекторов заряженных частиц. Образцы №2 – кривая 1, №3 – 2. Аппроксимация экспоненциальной зависимостью представлена прямыми 3

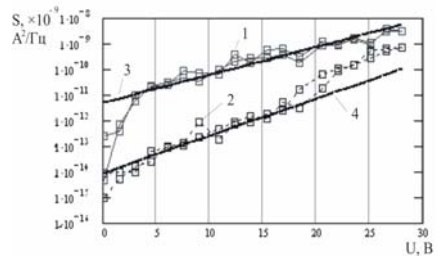


Рисунок 7 - Зависимости СПМ шума от напряжения обратного смещения для диодов Шоттки. Аппроксимация экспоненциальной зависимостью представлена прямыми 3 и 4

Проведенные исследования позволяют сделать следующее заключение. Наличие определённой концентрации глубоких центров в образце приводит к тому, что форма ВШХ изменяется таким образом, что на ней можно выделить два участка, аппроксимируемые зависимостями вида  $S \sim e^{\alpha U}$ , отличающимися коэффициентами  $\alpha$  и смещёнными друг относительно друга по оси напряжений. Особенно чётко это проявлялось на высокоомных структурах Ga/In-As (рисунок 6, кривые 1, 2). Кроме того, структуры с большей концентрацией ГЦ имели большую плотность мощности НЧ шума независимо от величины удельного сопротивления образца. Такое различие в уровне сигналов в ряде случаев не позволило выделить начальный участок ВШХ в кремниевых диодах Шоттки с малой концентрацией ГЦ (рисунок 7, кривая 2), однако в аналогичных структурах с большей концентрацией ГЦ начальный участок ВШХ выделялся более явно (рисунок 7, кривая 1). Такие формы зависимостей СПМ НЧ шума от напряжения качественно совпадают с предсказанными в главе 2, что подтверждает высказанные там же предположения.

Наличие точки, в которой происходит смена коэффициента  $\alpha$ , объясняется следующим образом. Увеличение напряжённости поля приводит к тому, что увеличивается часть достигших нейтральной области носителей заряда, это приводит к увеличению амплитуды шумовой составляющей обратного тока структуры. В то же время увеличение напряжённости электрического поля приводит к понижению потенциального барьера для валентного электрона атома ГЦ, что, в свою очередь, вызывает рост

количества активированных с ГУ носителей. Одновременное действие электрического поля как на дрейфовую, так и на генерационную составляющие приводит к резкому росту числа носителей, достигших области базы и давших вклад в общий шумовой ток.

Переход к более “пологой” зависимости (меньшему значению  $\alpha$ ) происходит за счёт исключения одного из компонентов механизма формирования импульсов тока. Происходит “насыщение” или истощение количества активированных с ГУ носителей заряда, в то время как все активированные носители достигают области базы структуры. Роль мелкой примеси заключается в формировании напряжённости поля в слое ОПЗ. Концентрация глубокой примеси отвечает за “начало истощения” потока активированных носителей заряда. Следовательно, положение точки “излома” (точки изменения коэффициента  $\alpha$  на ВШХ) будет определяться соотношением концентраций «мелкой» и «глубокой» примесей. Чем больше концентрация мелкой примеси, тем выше напряжённость поля при одном и том же приложенном напряжении, следовательно при меньших значениях напряжения обратного смещения вклад носителей с ГУ в шумовую составляющую обратного тока становится значительным. Указанное подтверждено экспериментально наличием очень малого начального участка зависимости спектральной плотности мощности НЧ шума от напряжения в мощных кремниевых диодах Шоттки, где концентрация мелкой примеси была значительной.

Таким образом, элементы развития физической модели генерации НЧ шума в барьерных структурах и модельные представления, объясняющие ВШХ, предложенные автором и подтвержденные экспериментально, являются основой проведения практического экспресс-анализа барьерной структуры на наличие глубоких центров по форме низкочастотной вольт-шумовой характеристики.

**Заключение** содержит следующие результаты и выводы.

1. Впервые применены представления эффекта Френкеля, т.е. понижение энергии ионизации ГЦ под действием электрического поля напряжённостью более  $10^4$  В/см к физической модели генерации НЧ шума в барьерных структурах, содержащих ГЦ. Показано, что указанный эффект вызывает сдвиг по частоте точки “излома” на частотной зависимости спектральной плотности мощности НЧ шума, на основании чего обоснована необходимость коррекции значения энергии ионизации глубокого уровня, найденной по “излому” частотной зависимости СПМ НЧ шума с учётом величины напряжения обратного смещения, при котором проводилось измерение.

2. Проведено дальнейшее развитие физической модели генерации НЧ шума в полупроводниковых барьерных структурах, состоящее во введении экспоненциальной зависимости отношения количества достигших базы структуры к количеству активированных с ГУ носителей заряда от напряжённости электрического поля, что приводит к формированию



прямолинейных участков на вольт-шумовых характеристиках  $\ln(S) = f(U)$  на фиксированной частоте.

3. Установлена взаимосвязь формы вольт-шумовой характеристики (ВШХ) диодов Шоттки в виде двух функций вида  $S \sim e^{\alpha U}$  (где  $S$  – значение спектральной плотности мощности шума,  $U$  – напряжение обратного смещения;  $\alpha$  – коэффициент), смещенных друг относительно друга по оси напряжений, с наличием электрически активных центров в барьерной структуре.

4. Разработана и создана автоматизированная установка, позволяющая измерять СПМ НЧ шума с чувствительностью: на частоте 1 Гц – 100 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ , на частоте 100 Гц – 20 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ . В отличие от прототипов установка позволяет анализировать спектр НЧ-шума в диапазоне 0.1 – 1000 Гц одновременно. Оригинальность разработанного автором программного обеспечения подтверждена свидетельством о регистрации программного продукта № 5740 от 21.02.06.

5 Разработана и реализована методика автоматизированного поиска и выявления точки изменения наклона отрезков, аппроксимирующих спектры НЧ шума. Разработанный способ основан на поиске максимального значения угла между аппроксимирующими спектр отрезками и совмещает операции сглаживания и поиска точки перегиба в единой процедуре.

6. Проведены комплексные экспериментальные исследования и установлено, что уровень спектральной плотности мощности избыточного шума интегральных детекторов заряженных частиц и рентгеновского излучения на основе собственного арсенида галлия определяются глубоким уровнем хрома с энергией ионизации  $\Delta W_{\text{I}} = 0,64 \pm 0,02$  эВ, найденной методами РСГУ и спектроскопии НЧ шума.

#### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

1. Кострюков С.А. Малошумящий усилитель для исследования НЧ шума. // Физика полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства. Межвузовский сборник научных трудов. Рязань: РГРТА, 2001. С. 45- 47.
2. Кострюков С.А. Автоматизированная установка для измерения СПМ низкочастотных шумов. //Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: Материалы междунар. науч.-методич. семинара. – М.:МНТРОЭС им. А.С. Попова, МЭИ, 2003. С. 23-25.
3. Кострюков С.А. Повышение помехоустойчивости установки для измерения параметров НЧ-шума. //Физика полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства. Межвузовский сборник научных трудов. Рязань: РГРТА, 2003. С. 27- 29.
4. Кострюков С.А. Автоматизированное определение энергии ионизации глубоких центров по спектрам низкочастотного шума. // Физика

- полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства. Межвузовский сборник научных трудов. Рязань: РГРТА, 2004. С. 13- 16.
5. Кострюков С.А. Выделение частоты перегиба кривой спектральной плотности мощности НЧ-шума. // Физика полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства. Межвузовский сборник научных трудов. Рязань: РГРТА, 2005. С. 31- 34.
  6. Кострюков С.А., Холомина Т.А., Дубовиков А.В. Влияние электрического поля на спектры НЧ-шума барьерных структур //Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: Материалы междунар. науч.-методич. семинара. – М.: МНТРОЭС им. А.С. Попова, МЭИ, 2005. С. 45-51.
  7. Кострюков С.А., Холомина Т.А. Особенности анализа сигналов низкочастотного шума методом дискретного преобразования Фурье. //Измерительная техника. 2005. № 12. С. 47-50.
  8. Кострюков С.А. Установка шумовой спектроскопии глубоких уровней. //Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: Труды VII международной конференции . – Ульяновск: УлГУ, 2005. С. 68-69.
  9. Кострюков С.А. Влияние распределения вероятности генерации носителей в области пространственного заряда барьерной структуры на процессы формирования НЧ-шума. // Физика полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства. Межвузовский сборник научных трудов. Рязань: РГРТА, 2006. С. 9- 17.
  10. Кострюков С.А., Холомина Т.А. Программное обеспечение НЧ шумовой спектроскопии глубоких уровней. //Известия вузов. Электроника. №4. 2006. С. 36-43.
  11. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки “Вычисление спектральной плотности мощности низкочастотных шумов” № 5740 от 21.02.2006.
  12. Кострюков С.А., Холомина Т.А. Анализ влияния электрического поля на параметры НЧ шума барьерных структур. //Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: Материалы междунар. науч.-методич. семинара. – М.: МНТРОЭС им. А.С. Попова, МЭИ, 2007. С. 92-97.
  13. Кострюков С.А., Родин М.С. Исследование параметров глубоких ловушечных центров в детекторах заряженных частиц и рентгеновского излучения на основе Al/i-GaAs. //Материалы 14-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции “Микроэлектроника и информатика - 2007”, Москва, МИЭТ (ТУ), 2007. С. 45-48.

**Кострюков Сергей Анатольевич**

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ  
НА ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА  
В БАРЬЕРАХ ШОТТКИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 20.04.2007. Формат бумаги 60x84 1/16.  
Бумага ксероксная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.  
Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.  
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.