

На правах рукописи

**Фролов Илья Владимирович**

**СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ МАЛОСИГНАЛЬНЫХ  
И ШУМОВЫХ ПАРАМЕТРОВ  
СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ  
ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ДИАГНОСТИКИ ИХ КАЧЕСТВА**

Специальность: 05.11.01 – Приборы и методы измерения по видам  
измерения (электрические измерения)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ульяновск – 2014

Работа выполнена на базовой кафедре «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» Ульяновского государственного технического университета

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент  
**Сергеев Вячеслав Андреевич**

Официальные оппоненты:

**Кувшинов Алексей Алексеевич,**  
доктор технических наук, доцент,  
Тольяттинский государственный университет,  
кафедра «Электроснабжение и электротехника»,  
профессор

**Новиков Сергей Геннадьевич,**  
кандидат технических наук,  
Ульяновский государственный университет,  
кафедра радиофизики и электроники,  
доцент

Ведущая организация – **ОАО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения», г. Ульяновск**

Защита состоится **«18» июня 2014 г. в 15 часов 00 минут** на заседании диссертационного совета Д 212.277.01 при Ульяновском государственном техническом университете по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32 (ауд. 211, Главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ульяновского государственного технического университета. Также диссертация и автореферат размещены в Internet на сайте УлГТУ - <http://www.ulstu.ru/>

Автореферат разослан «18» апреля 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор

Смирнов Виталий Иванович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Гетеропереходные светоизлучающие диоды (СИД) – твердотельные источники излучения, широко применяемые в настоящее время в различных областях техники. Светотехнические и электрические характеристики СИД в основном определяются физическими свойствами гетероструктуры, а стабильность характеристик СИД в процессе эксплуатации зависит от качества изготовления светодиодов. Для целей диагностики и неразрушающего контроля качества СИД широко используются электрические методы, основанные на измерении малосигнальных и шумовых параметров.

Физические процессы в гетероструктурах обуславливают существенную нелинейность электрических характеристик СИД, степень которой сильно зависит от топологии и качества гетероструктуры и может значительно отличаться от образца к образцу. Поэтому стандартные методы и средства измерения малосигнальных и шумовых параметров обычных гомопереходных полупроводниковых диодов применительно к гетеропереходным СИД требуют уточнения и развития в части выбора формы, частоты и амплитуды тестового сигнала.

Методы емкостной и импедансной (адмиттансной) спектроскопии, применяемые для диагностики качества полупроводниковых приборов различных классов, развиты в работах Л. С. Бермана, Я. А. Фетодова, Ф. И. Маняхина, В. Ю. Кнеллера, Л. П. Боровских, Ю. А. Гольдберга, В. В. Бруса, В. И. Зубкова и др.

В работах М. Е. Левинштейна, Н. М. Шмидт, А. Л. Закгейма, А. В. Белякова, А. В. Якимова, V. Palenskis показано, что мощным инструментом диагностики качества СИД является фликкер-шумовая спектроскопия, которая позволяет выявлять дефекты СИД, связанные с нарушением контактов, неоднородностью гетероперехода, локализацией тока и т. д. по характеристикам низкочастотного (НЧ) шума тока накачки СИД.

Вместе с тем, существующие измерители RLC не адаптированы к измерению параметров существенно нелинейных элементов, а измерители НЧ шума не производятся промышленностью и разрабатываются в лабораториях для конкретных исследовательских задач.

Следует отметить, что срок службы современных СИД составляет несколько десятков тысяч часов, и для регистрации малых изменений параметров СИД в процессе эксплуатации или испытаний при исследовании процессов деградации СИД необходимо снижать погрешность методов и средств измерения путем оптимального выбора амплитуды и частоты тестового сигнала, расширения диапазона напряжений смещения, повышения чувствительности.

**Цель работы** – расширение функциональных возможностей и повышение точности измерения малосигнальных и шумовых параметров гетеропереходных светодиодов методами импедансной, емкостной и шумовой спектроскопии для задач диагностики их качества.

Поставленная цель достигается решением **следующих задач:**

1. Анализ зависимости погрешности измерения малосигнальных параметров СИД, обусловленной нелинейностью их эквивалентной схемы, от уровня тестового сигнала при использовании различных типов детекторов напряжения, опреде-

ление оптимальной амплитуды тестового сигнала с учетом влияния аддитивного шума измерительных цепей.

2. Анализ погрешностей определения малосигнальных параметров СИД методом импедансной спектроскопии в зависимости от выбора частоты тестового сигнала, разработка алгоритма и программы определения оптимальных частот тестового сигнала методами компьютерного моделирования измерительных процессов.

3. Разработка способов и средств измерения малосигнальных параметров гетеропереходных СИД, снижающих погрешности, обусловленные нелинейностью эквивалентной схемы СИД и в частности тепловым разогревом активной области СИД под действием тестового сигнала.

4. Разработка автоматизированных средств измерения вероятностных характеристик флуктуаций тока накачки СИД, позволяющих исследовать характер НЧ шума СИД.

5. Проведение выборочных ускоренных испытаний СИД, установление закономерностей изменения малосигнальных и шумовых параметров СИД в процессе испытаний и связи этих изменений с механизмами деградации СИД.

**Методы исследований.** При выполнении работы использовались методы теории погрешностей, теории радиотехнических цепей и сигналов, методы спектрального анализа, физики полупроводниковых приборов. При разработке программного обеспечения использовался язык программирования Pascal. Обработка результатов эксперимента осуществлялась с использованием стандартных программ MS Office и оригинальных программ, разработанных в среде Lazarus.

#### **Научная новизна работы.**

1. Впервые рассмотрены ограничения на величину тестового сигнала при измерении малосигнальных параметров нелинейных двухполосников (ДП). Получены зависимости относительных погрешностей измерения дифференциального сопротивления и емкости нелинейного ДП от амплитуды тестового гармонического сигнала при использовании различного типа детекторов напряжения. Показано, что:

– при наличии аддитивных шумов в измерительной цепи существует оптимальное значение амплитуды тестового сигнала, при котором суммарная относительная погрешность измерения принимает минимальное значение;

– при измерении дифференциального сопротивления и диффузионной емкости полупроводникового диода наибольшая точность достигается при использовании детектора средневыпрямленного значения, а относительная погрешность измерения барьерной емкости диода с резким переходом одинакова для всех рассмотренных типов детекторов.

2. Разработан алгоритм определения набора оптимальных частот тестового сигнала, минимизирующего погрешность косвенного измерения параметров многоэлементных ДП с известной эквивалентной схемой методом импедансной спектроскопии, заключающийся в многократном компьютерном моделировании процесса измерения модуля и фазы импеданса ДП с учетом случайных аддитивных погрешностей и определении параметров ДП по известным функциональным зависимостям на заданном множестве наборов частот тестового сигнала. Показано, что отклонение одной из частот от оптимального значения на 20 % приводит к возрастанию суммы относительных погрешностей в среднем на 15 %.

3. Разработаны способы измерения дифференциального сопротивления и сопротивления базы полупроводникового диода с применением АИМ-сигнала, уменьшающие погрешность измерения за счет снижения нелинейности, вызванной тепловым разогревом диода постоянным током в рабочей точке.

4. Разработан способ измерения импеданса двухполюсника с использованием широкополосного тестового шумового сигнала, позволяющий сократить время сканирования импеданса ДП по частоте при сохранении приемлемой точности измерения.

5. Установлено, что снижение квантовой эффективности СИД в процессе ускоренных испытаний коррелирует со сдвигом профиля концентрации примеси, причем более сильной деградации подвержены СИД, расположенные по краям распределения СИД по уровню шума при высокой плотности тока накачки.

#### **Практическая значимость работы.**

1. Разработанные способы и средства измерения малосигнальных и шумовых параметров гетеропереходных светодиодов могут быть использованы на входном или выходном контроле предприятий-изготовителей светодиодов и светодиодной продукции.

2. Способ измерения импеданса двухполюсников с использованием шумового тестового сигнала может быть использован разработчиками и производителями измерителей иммитанса для повышения быстродействия приборов.

3. Алгоритм определения набора частот тестового сигнала позволяет разработчикам измерителей RLC повысить точность измерения параметров многоэлементных двухполюсников.

4. Выявленные закономерности изменения малосигнальных и шумовых параметров гетеропереходных светодиодов в процессе испытаний могут быть полезны разработчикам СИД.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Расчетные формулы для оценки относительных погрешностей измерения дифференциального сопротивления и емкости нелинейного двухполюсника от амплитуды тестового гармонического сигнала при использовании различных типов детекторов напряжения и наличии аддитивного шума в измерительной цепи.

2. Алгоритм определения набора частот тестового сигнала при измерении параметров многоэлементных двухполюсников, оптимальных с точки зрения минимизации суммы случайных погрешностей измерения.

3. Способы измерения сопротивления базы и дифференциального сопротивления полупроводникового диода с применением АИМ-сигнала, снижающие погрешность, вызванную тепловым разогревом активной области под действием тестового сигнала.

4. Способ измерения параметров элементов многоэлементных нерезонансных двухполюсников шумовым тестовым сигналом.

5. Результаты ускоренных выборочных испытаний коммерческих гетеропереходных светодиодов и связи деградации с малосигнальными и шумовыми параметрами светодиодов.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на школе-семинаре «Актуальные проблемы физической и функцио-

нальной электроники» (г.Ульяновск, 2010 – 2013 гг.), Всероссийской конференции молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (г.Саратов, 2011 – 2013 гг.), Всероссийской НПК «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем» (г.Ульяновск, 2009, 2011, 2013 гг.), 9-м конкурсе научных работ им. И. Анисимкина (г.Москва, ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, 2012 г.), Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (г.Москва, 2013 г.), международной НТК «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC-2013) (г. Москва, 2013 г.).

#### **Реализация и внедрение результатов работы.**

Результаты диссертационной работы использованы в Ульяновском филиале Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук при проведении исследований по тематическому плану НИР и в учебном процессе на радиотехническом факультете Ульяновского государственного технического университета при проведении занятий по дисциплинам «Метрология и радиоизмерения» и «Шумы электронных устройств».

Результаты работы использованы также при выполнении проекта «Разработка неразрушающих методов и средств контроля качества гетеропереходных светоизлучающих диодов по шумовым характеристикам» (в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (соглашение 14.132.21.1708 с Минобрнауки РФ) и проекта №14145 по программе У.М.Н.И.К. «Измеритель параметров нелинейных эквивалентных схем полупроводниковых приборов».

**Личный вклад автора.** Основные результаты диссертационной работы, включая расчеты погрешностей измерения параметров нелинейных двухполюсников, разработку и компьютерную реализацию алгоритма расчета набора оптимальных частот тестового сигнала, макетирование экспериментальных установок, проведение ускоренных испытаний светодиодов получены автором лично. Обсуждение и интерпретация экспериментальных результатов проводились при его непосредственном участии. В работе [3] автором произведен расчет параметров теплоэлектрической схемы светодиода с использованием оригинальной программы расчета параметров двухполюсников.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 39 работ, в том числе 10 работ в изданиях из перечня ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 149 наименований, трех приложений. Общий объем диссертации составляет 169 страниц, включая 22 таблицы и 68 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна результатов работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации рассмотрены методы и средства измерения параметров эквивалентных схем полупроводниковых приборов, выявлены недостатки методов и средств измерения малосигнальных и шумовых параметров гетеропереходных СИД, определены требования к измерительной аппаратуре.

Известно, что малосигнальная эквивалентная схема замещения СИД (далее эквивалентная схема) на частотах до десятков мегагерц, при которых можно пренебречь индуктивностью выводов, без учета емкости корпуса может быть представлена схемой, состоящей из сопротивления перехода  $R_{p-n}$ , диффузионной  $C_{диф}$  и барьерной  $C_{бар}$  емкостей, последовательного сопротивления (сопротивления базы)  $r_s$  и параллельного сопротивления  $r_p$ , которое характеризует дополнительные каналы, возникающие в  $p-n$  переходе вследствие его разрушения или появления дефектов на поверхности кристалла и приводящие к утечке тока вдоль перехода (рис. 1).

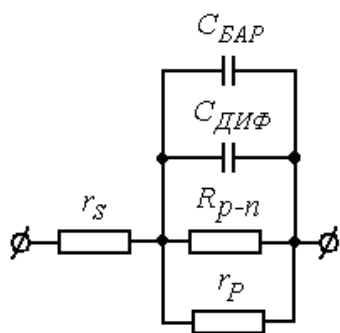


Рис. 1. Малосигнальная эквивалентная схема светодиода

где  $m$  – коэффициент неидеальности вольт-амперной характеристики (ВАХ);  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $q$  – элементарный заряд;  $I$  – ток диода;  $I_{ОБР}$  – ток насыщения;  $S$  – площадь перехода;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $N_a$  и  $N_d$  – концентрация акцепторной и донорной примеси соответственно;  $U$  – напряжение, приложенное к переходу;  $\varphi_K$  – контактная разность потенциалов;  $\tau$  – времени жизни неосновных носителей заряда.

Электрические характеристики обычных гомопереходных диодов достаточно точно соответствуют теоретическим характеристикам идеального  $p-n$  перехода, для которых известна степень нелинейности, и для измерения их параметров используются стандартизированные методы. Согласно ГОСТ 18986.14–85 «Диоды полупроводниковые. Методы измерения дифференциального и динамического сопротивлений» при измерении дифференциального сопротивления амплитуда переменного тока на диоде не должна превышать 10% от величины постоянного тока. Согласно ГОСТ 18986.4–73 «Диоды полупроводниковые. Методы измерения емкости» среднеквадратическое значение переменного напряжения на диоде при измерении емкости должно удовлетворять условию:  $U_{СКЗ} \leq 0,07(U_0 + \varphi_K)$ . При этом зависимостей, устанавливающих связь между погрешностью измерения, обусловленной нелинейностью параметров диода, и амплитудой тестового сигнала, в литературе не приводится.

Выражения для дифференциального сопротивления, барьерной (для резкого перехода) и диффузионной емкостей диода соответственно имеют вид:

$$R_D = R_{p-n} + r_s = \frac{mkT}{q(I + I_{ОБР})} + r_s, \quad (1)$$

$$C_B = S \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 q N_a N_d}{2(N_a + N_d)(U + \varphi_K)}}, \quad (2)$$

$$C_{диф} = \frac{q}{mkT} \tau (I + I_{ОБР}) = \frac{q\tau}{mkT} I_{ОБР} \exp\left(\frac{U}{m\varphi_T}\right), \quad (3)$$

Гетеропереходные СИД являются существенно нелинейными элементами, причем нелинейность характеристик СИД может проявляться неизвестным образом. Очевидно, что повышение точности измерения параметров нелинейной эквивалентной схемы СИД может быть достигнуто за счет уменьшения уровня тестового сигнала. Однако наличие аддитивного шума в измерительной цепи (шума усилителя, шума квантования и т.д.) ограничивает уровень тестового сигнала снизу.

Для измерения параметров прямо смещенных СИД применяются методы импедансной спектроскопии, для измерения параметров обратно смещенных СИД – методы емкостной спектроскопии. В работах В.Ю. Кнеллера, Л.П. Боровских, J. Ноја, G.Lentka показано, что для многоэлементного двухполюсника существует набор оптимальных частот тестового сигнала, при измерении импеданса на которых случайная погрешность определения параметров двухполюсника методом импедансной спектроскопии принимает минимальное значение. Однако практические методики выбора частот тестового сигнала при измерении малосигнальных параметров СИД отсутствуют.

Недостатками стандартных измерителей импеданса (измерителей RLC) является довольно большой уровень тестового сигнала (порядка 50 мВ), ограниченный диапазон напряжения смещения, фиксированные частоты тестового сигнала. Тогда как для измерения параметров гетеропереходных СИД с учетом их существенной нелинейности необходим малый уровень тестового сигнала; малый шаг изменения напряжения смещения; широкий диапазон напряжений смещения, высокая разрешающая способность, высокая точность измерения, стабильность.

Кроме диагностики по малосигнальным параметрам в настоящее время активно развиваются методы диагностики качества СИД по параметрам низкочастотного (НЧ) шума. Особенностью измерения НЧ шума СИД является то, что при рабочих токах СИД в сотни миллиампер дифференциальное сопротивление СИД составляет единицы или доли Ом, что затрудняет обеспечение чувствительности измерения. Кроме того, известные измерители НЧ шума не позволяют определять распределения выбросов НЧ шума по амплитуде и длительности и другие вероятностные характеристики, которые несут информацию об особенностях физических процессов в гетероструктурах СИД.

**Во второй главе** диссертации представлены способы повышения точности измерения параметров нелинейной эквивалентной схемы гетеропереходных светодиодов методами импедансной спектроскопии.

Проведен анализ погрешностей, возникающих при измерении дифференциального сопротивления нелинейного двухполюсника (НДП) методом вольтметра-амперметра при использовании различных типов преобразователей переменного напряжения в постоянное. Принцип измерения дифференциального сопротивления полупроводникового диода заключается в задании постоянного тока  $I_0$  через диод, подаче на диод переменного тока  $\Delta I(t) = I_m \sin \omega t$ , преобразовании переменного напряжения на диоде  $\Delta U$  в постоянное детектором определенного типа и измерении постоянного напряжения вольтметром постоянного тока.

Путем разложения ВАХ НДП вида  $U = F(I)$  в ряд Тейлора  $\Delta U = R_{д} \Delta I + a(\Delta I)^2 + b(\Delta I)^3 + \dots$ , где коэффициенты  $a$  и  $b$  для произвольного НДП



выражаются формулами:  $a = \frac{1}{2} \frac{d^2 F(I)}{dI^2} \Big|_{I=I_0}$ ,  $b = \frac{1}{6} \frac{d^3 F(I)}{dI^3} \Big|_{I=I_0}$ , а для диода:  $a = -R_D^2 / (2m\varphi_T)$ ,

$b = R_D^3 / (3(m\varphi_T)^2)$ , и последующего математического преобразования получены общие выражения для оценки относительных погрешностей измерения дифференциального сопротивления НДП и, конкретно, полупроводникового диода от амплитуды тестового гармонического сигнала при использовании различного типа преобразователей переменного напряжения в постоянное (табл. 1).

Таблица 1 – Выражения для различных типов преобразователей напряжения при измерении дифференциального сопротивления

Тип преобразователя напряжения (детектора)	Сигнал на выходе детектора	Относительная систематическая погрешность измерения дифференциального сопротивления НДП	Относительная систематическая погрешность измерения дифференциального сопротивления полупроводникового диода
Пиковый детектор с закрытым входом для положительной полуволны	$R_D I_m + \frac{1}{2} a I_m^2 + b I_m^3$	$\frac{b I_m^2}{R_D} + \frac{1}{2} \frac{a I_m}{R_D}$	$\frac{1}{3} \left( \frac{R_D I_m}{m\varphi_T} \right)^2 - \frac{1}{4} \frac{R_D I_m}{m\varphi_T}$
Пиковый детектор с закрытым входом для отрицательной полуволны	$-R_D I_m + \frac{1}{2} a I_m^2 - b I_m^3$	$\frac{b I_m^2}{R_D} - \frac{1}{2} \frac{a I_m}{R_D}$	$\frac{1}{3} \left( \frac{R_D I_m}{m\varphi_T} \right)^2 + \frac{1}{4} \frac{R_D I_m}{m\varphi_T}$
Детектор размаха	$2(R_D I_m + b I_m^3)$	$\frac{b I_m^2}{R_D}$	$\frac{1}{3} \left( \frac{R_D I_m}{m\varphi_T} \right)^2$
Преобразователь СВЗ	$\frac{2I_m}{\pi} \left( R_D + \frac{2}{3} b I_m^2 \right)$	$\frac{2}{3} \frac{b I_m^2}{R_D}$	$\frac{2}{9} \left( \frac{R_D I_m}{m\varphi_T} \right)^2$
Преобразователь СКЗ	$\frac{I_m R_D}{\sqrt{2}} \left( 1 + \frac{I_m^2}{4R_D^2} \left( 3R_D b + \frac{a^2}{2} \right) \right)$	$\frac{a^2 I_m^2}{8R_D^2} + \frac{3b I_m^2}{4R_D}$	$\frac{9}{32} \left( \frac{R_D I_m}{m\varphi_T} \right)^2$

Установлено, что наименьшая погрешность измерения дифференциального сопротивления НДП этим методом достигается при использовании в качестве детектора сигнала преобразователя средневыпрямленного значения (СВЗ).

Показано, что из-за влияния аддитивного шума  $U_{ш}$  электронных схем преобразователей измерительной цепи (шум квантования, собственный шум усилителя и т.д.) величина амплитуды тестового сигнала ограничена снизу и существует оптимальное значение амплитуды тестового сигнала, при котором суммарная погрешность измерения, вызванная нелинейностью двухполосника и аддитивными шумами, принимает минимальное значение.

При использовании преобразователя СВЗ максимальная суммарная относительная погрешность измерения дифференциального сопротивления НДП определяется выражением:

$$\Theta_{\Sigma}^{R_d}(I_m) = \Theta_{СВЗ} + \Theta_{Ш} = \frac{I}{R_d} \left( \frac{2}{3} b I_m^2 + \frac{\pi U_{Ш}}{2 I_m} \right) \quad (4)$$

и принимает минимальное значение при амплитуде сигнала:  $I_m^{opt} = \sqrt[3]{\frac{3\pi U_{Ш}}{8b}}$ .

Относительную погрешность квантования можно уменьшить путем усиления переменного сигнала до преобразования в  $K_{УС}$  раз. При этом относительная погрешность измерения, обусловленная нелинейностью, не изменится.

Графики теоретической зависимости (4) относительной погрешности измерения дифференциального сопротивления полупроводникового диода от амплитуды тестового сигнала представлены на рисунке 2. Теоретическая зависимость (4) подтверждена экспериментально на примере измерения  $R_d$  группы из пяти штук коммерческих светодиодов Vishay типа TLCR5800 (рис. 3). Измерение проведено в следующем режиме: величина постоянного тока  $I_0 = 1$  мА, частота тестового сигнала 120 Гц, диапазон амплитуд тестового сигнала 5 мкА...8 мА. В качестве вольтметра с преобразователем СВЗ использован нановольтметр Unipan 233 в широкополосном режиме с уровнем шума  $U_{Ш} = 4,4$  мкВ.

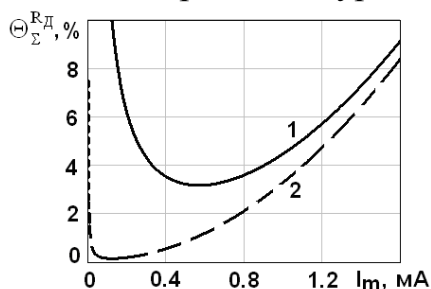


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности измерения дифференциального сопротивления полупроводникового диода от амплитуды тестового синусоидального тока при  $R_d = 10$  Ом,  $m = 1$ ,  $U_{Ш} = 76,3$  мкВ (16-разрядный АЦП с пределом 5 В): 1 – без усиления полезного сигнала; 2 – с усилением в  $K_{УС} = 100$  раз перед преобразователем СВЗ

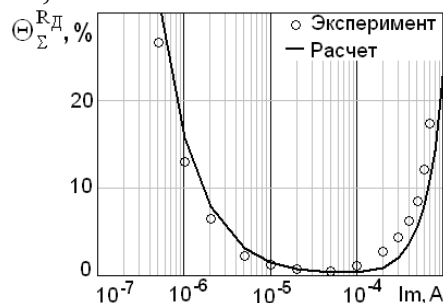


Рис. 3. Усредненная зависимость относительной погрешности измерения дифференциального сопротивления пяти светодиодов Vishay от амплитуды тестового синусоидального тока при  $I_0 = 1$  мА,  $f = 120$  Гц,  $U_{Ш} = 4,4$  мкВ

Таким образом, повышение точности измерения малосигнальных параметров гетеропереходных СИД методами импедансной спектроскопии может быть достигнуто путем оптимального выбора амплитуды тестового сигнала.

Как отмечалось выше, другим путем повышения точности определения малосигнальных параметров СИД методом импедансной спектроскопии является определение набора оптимальных частот тестового сигнала. Для реализации этой возможности разработан компьютерный алгоритм определения набора оптимальных частот многоэлементного ДП с заданной структурой. Суть алгоритма состоит в многократном компьютерном моделировании процесса измерения модуля и фазы импеданса ДП с заданными значениями параметров элементов с учетом случайных аддитивных погрешностей и определении параметров ДП из решения соответствующей системы уравнений, связывающей параметры ДП со значениями модуля и

фазы импеданса, на заданном множестве наборов частот тестового сигнала. Выбор оптимальных частот осуществляется путем сравнения значений параметров, полученных по результатам моделирования, с заданными значениями. Критерий оптимизации определяется задачей исследования объекта, и в качестве такового может быть выбран минимум суммы погрешностей определения всех параметров ДП или минимум погрешности определения заданного параметра. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 4.

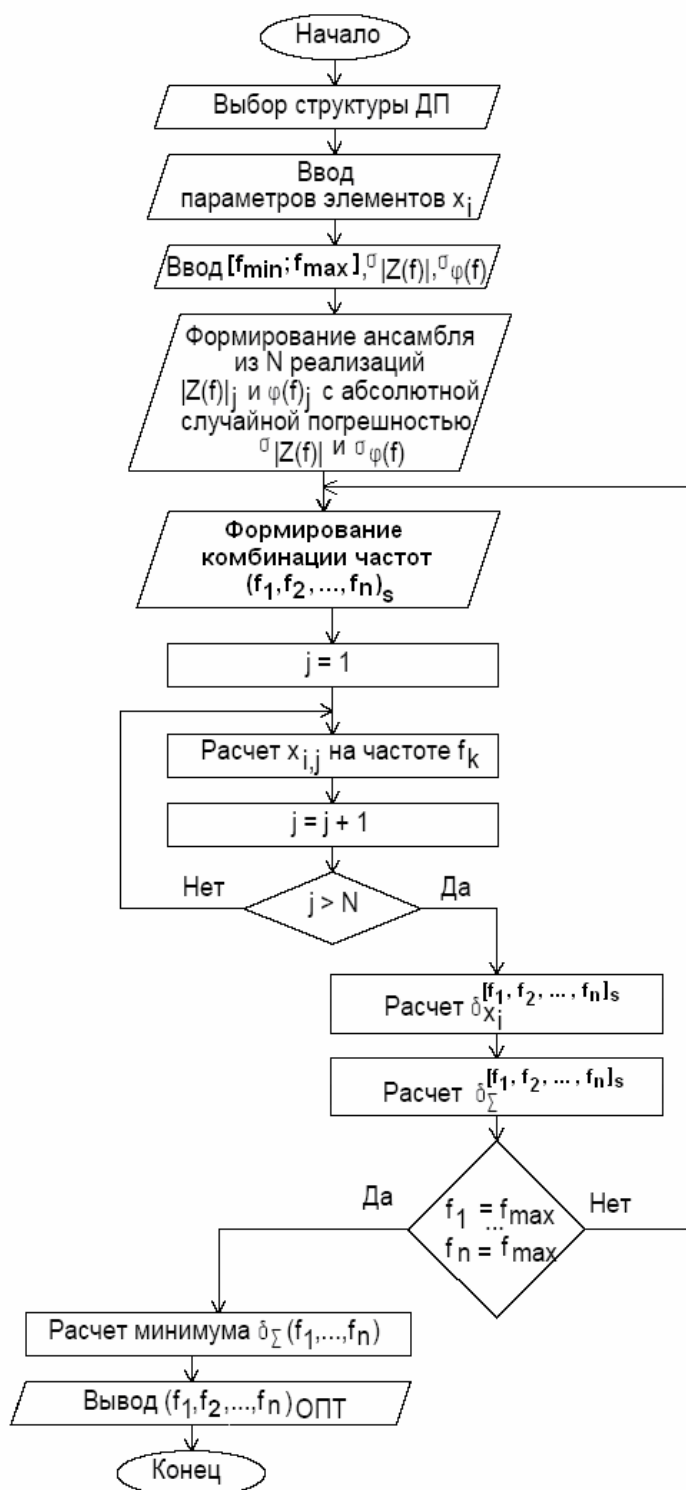


Рис. 4. Блок-схема алгоритма определения набора оптимальных частот тестового сигнала при косвенном измерении параметров  $n$ -элементного ДП

На первом шаге алгоритма задается структура  $n$ -элементного ДП, которая определяется набором элементов  $\{X_i\}$ , где  $1 \leq i \leq n$ , и схемой их соединения. Для заданной структуры ДП записывается аналитическое выражение, определяющее импеданс ДП:  $Z(f) = F(f, X_i)$  и задаются численные значения  $x_i$  параметров соответствующих элементов ДП. При исследовании реальных объектов ожидаемые численные значения параметров эквивалентной схемы ДП задаются, исходя из априорной информации об объекте.

Для моделирования погрешности измерения модуля и фазы импеданса ДП используется генератор случайных чисел. Параметры погрешности задаются в виде абсолютных значений среднеквадратического отклонения случайной погрешности измерения модуля  $\sigma_{|Z(f)|}$  и фазы  $\sigma_{\varphi(f)}$  импеданса  $Z(f)$  соответственно.

На следующем шаге формируется ансамбль из  $N$  реализаций частотных зависимостей модуля и фазы импеданса в заданном диапазоне частот. Моделирование случайной погрешности измерения  $|Z(f)|$  и  $\varphi(f)$  осуществляется путем суммирования значений  $|Z(f)|$  и  $\varphi(f)$  на каждой частоте и случайной величины с СКО  $\sigma_{|Z(f)|}$  и  $\sigma_{\varphi(f)}$  и нулевым средним значением соответственно.

Затем запускается внешний цикл, в котором осуществляется последовательный перебор частот из диапазона  $[f_{min}; f_{max}]$ . Поскольку число частот, на которых производится расчет параметров  $x_i$ , совпадает с числом  $n$  элементов ДП, то количество внешних циклов перебора частот тоже равно  $n$ .

Во внутреннем цикле для каждой  $s$ -й комбинации частот  $(f_1, f_2, \dots, f_n)_s$  производится расчет параметров  $x_i$  по соответствующим формулам для каждой  $j$ -й реализации ансамбля. При достижении счетчика числа реализаций  $j$  значения  $N$  производится вычисление среднего значения параметров  $x_i$  по ансамблю для заданной комбинации частот  $(f_1, f_2, \dots, f_n)_s$   $x_{iCP}^{(f_1, \dots, f_n)_s}$ , среднеквадратического отклонения случайной погрешности  $\sigma_{x_i}^{(f_1, \dots, f_n)_s}$ , относительной среднеквадратической случайной погрешности определения  $x_i$   $\delta_{x_i}^{(f_1, \dots, f_n)_s}$  и суммы относительных погрешностей определения параметров элементов ДП  $\delta_{\Sigma}^{(f_1, \dots, f_n)_s}$ .

На этом внутренний цикл завершается, задается следующая комбинация частот, и указанные вычисления повторяются. Внешний цикл заканчивается при условии, когда значения всех частот из набора достигнут максимального значения  $f_{max}$  из заданного диапазона частот. Затем формируется многомерный массив погрешностей  $\delta_{\Sigma}(f_1, \dots, f_n)$  и определяется набор  $(f_1, f_2, \dots, f_n)_{OPT}$  оптимальных частот, на которых функция  $\delta_{\Sigma}(f_1, \dots, f_n)$  принимает значение абсолютного минимума.

Адекватность разработанного алгоритма подтверждается совпадением результата моделирования с теоретическими зависимостями, полученными для двухэлементного RC двухполюсника с параллельной схемой замещения (рис.5).

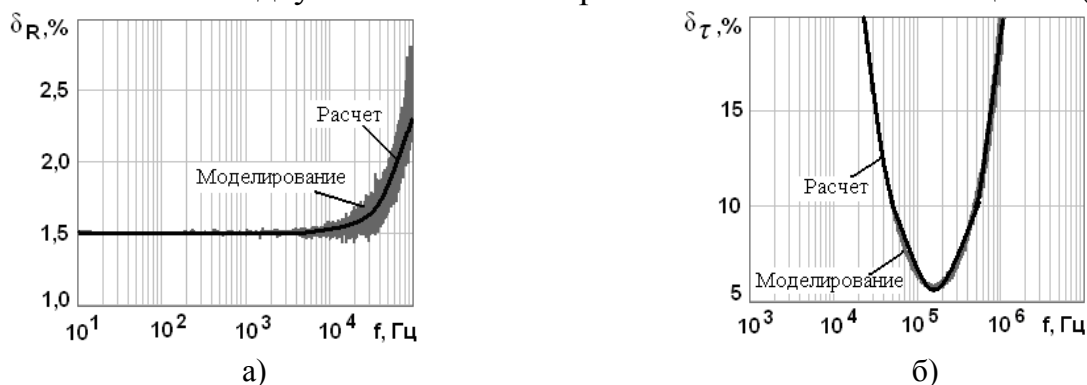


Рис. 5. Графики относительных среднеквадратических случайных погрешностей определения сопротивления  $R$  (а) и постоянной времени  $\tau$  (б) двухэлементного RC ДП с параллельной схемой соединения при  $R = 1$  кОм,  $C = 1$  нФ,  $\sigma_{|Z(f)|} = 15$  Ом,  $\sigma_{\varphi(f)} = 0,03$  рад.

Для уменьшения погрешности измерения малосигнальных параметров СИД стандартными методами, обусловленной тепловым разогревом диода в результате задания рабочей точки диода постоянным током, предложены способы измерения указанных параметров СИД с использованием импульсного тестового сигнала.

Способ измерения последовательного сопротивления базы полупроводникового диода состоит в том, что через диод пропускают прямой ток в виде трех последовательностей коротких прямоугольных импульсов с большой скважностью и амплитудой  $I_1, kI_1, 2kI_1$  (рис. 6), измеряют пиковое значение падений напряжения  $U_1, U_2, U_3$  на диоде, и последовательное сопротивление базы определя-

ют по соответствующей формуле. Длительность импульсов тока должна существенно превышать время нарастания напряжения для данного типа диодов. При скважности  $Q > 100$  приращение температуры перехода будет составлять доли кельвин во всем диапазоне рабочих токов; таким приращением температуры можно пренебречь и считать температуру  $p-n$  перехода одинаковой при любой амплитуде импульсов тока. Погрешность измерения, обусловленная разогревом диода, снижается в  $Q$  раз.

Способ измерения дифференциального сопротивления нелинейного ДП с температурозависимой ВАХ заключается в том, что на ДП подается последовательность коротких импульсов тока большой скважности с амплитудой, изменяющейся по гармоническому закону (рис. 7), измеряется амплитуда импульсов напряжения на ДП и рассчитывают дифференциальное сопротивление по соответствующей формуле.

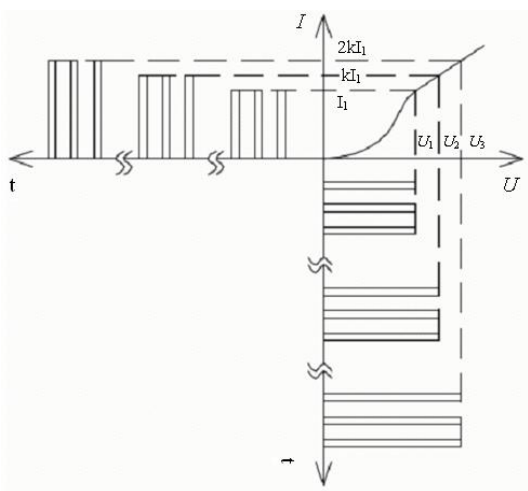


Рис. 6. Тестовые сигналы для измерения сопротивления базы диода

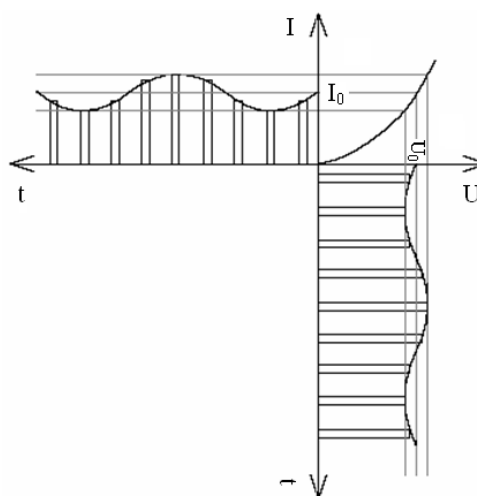


Рис. 7. Тестовые сигналы для измерения дифференциального сопротивления НДП с температурозависимой ВАХ

**В третьей главе** представлены способы и средства повышения точности определения малосигнальных параметров гетеропереходных светодиодов методами емкостной спектроскопии.

Проведен анализ погрешностей измерения диффузионной и барьерной емкостей диода, обусловленных нелинейной зависимостью от напряжения, при использовании различных преобразователей переменного напряжения в постоянное. Принцип измерения емкости полупроводникового диода согласно ГОСТ 18986.4–73, заключается в задании постоянного напряжения  $U_0$  на диоде, подаче на исследуемый диод переменного напряжения  $\Delta U(t) = U_m \sin \omega t$  и измерении тока через диод путем измерения напряжения на образцовом токосъемном резисторе  $R_{\text{ОБР}}$ . Выражения для сигнала на выходе детектора, относительной погрешности измерения диффузионной и барьерной емкостей диода при  $a = \left. \frac{dC(U)}{dU} \right|_{U_0}$  и  $b = \left. \frac{1}{2} \frac{d^2C(U)}{dU^2} \right|_{U_0}$  приведе-

ны в табл. 2.

Таблица 2 – Выражения для различных типов преобразователей напряжения при измерении емкости полупроводникового диода

Тип преобразователя напряжения (детектора)	Сигнал на выходе детектора	Относительная систематическая погрешность измерения барьерной емкости диода с резким переходом	Относительная систематическая погрешность измерения диффузионной емкости диода
Пиковый детектор для положительной полуволны	$R_{ОБР}U_m\omega C_0\left(1 + \frac{a^2U_m^2}{2C_0^2}\right)$	$\frac{1}{8}\frac{U_m^2}{(U_0 + \varphi_K)^2}$	$\frac{U_m^2}{2(m\varphi_T)^2}$
Пиковый детектор для отрицательной полуволны	$-R_{ОБР}U_m\omega C_0\left(1 + \frac{a^2U_m^2}{2C_0^2}\right)$	$\frac{1}{8}\frac{U_m^2}{(U_0 + \varphi_K)^2}$	$\frac{U_m^2}{2(m\varphi_T)^2}$
Детектор размаха	$2R_{ОБР}U_m\omega C_0\left(1 + \frac{a^2U_m^2}{2C_0^2}\right)$	$\frac{1}{8}\frac{U_m^2}{(U_0 + \varphi_K)^2}$	$\frac{U_m^2}{2(m\varphi_T)^2}$
Преобразователь СВЗ	$\frac{2R_{ОБР}U_m\omega C_0}{\pi}\left(1 + \frac{bU_m^2}{3C_0}\right)$	$\frac{1}{8}\frac{U_m^2}{(U_0 + \varphi_K)^2}$	$\frac{U_m^2}{6(m\varphi_T)^2}$
Преобразователь СКЗ	$\frac{R_{ОБР}U_m\omega C_0}{\sqrt{2}}\left(1 + \frac{a^2U_m^2}{8C_0^2} + \frac{bU_m^2}{4C_0}\right)$	$\frac{1}{8}\frac{U_m^2}{(U_0 + \varphi_K)^2}$	$\frac{U_m^2}{4(m\varphi_T)^2}$

Показано, что погрешность измерения емкости диода прямо пропорциональна квадрату амплитуды тестового сигнала. При этом погрешность измерения барьерной емкости диода с резким переходом не зависит от типа используемого детектора; погрешность измерения диффузионной емкости диода с резким переходом не зависит от выбора рабочей точки  $U_0$ , а погрешность измерения барьерной емкости обратно пропорциональна  $(U_0 + \varphi_K)^2$ . При измерении диффузионной емкости диода наименьшая погрешность обеспечивается использованием детектора СВЗ.

При наличии аддитивного шума  $U_{Ш}$  в измерительной цепи относительные погрешности измерения барьерной и диффузионной емкостей имеют минимумы (рис.8) при некоторой (оптимальной) амплитуде тестового сигнала.

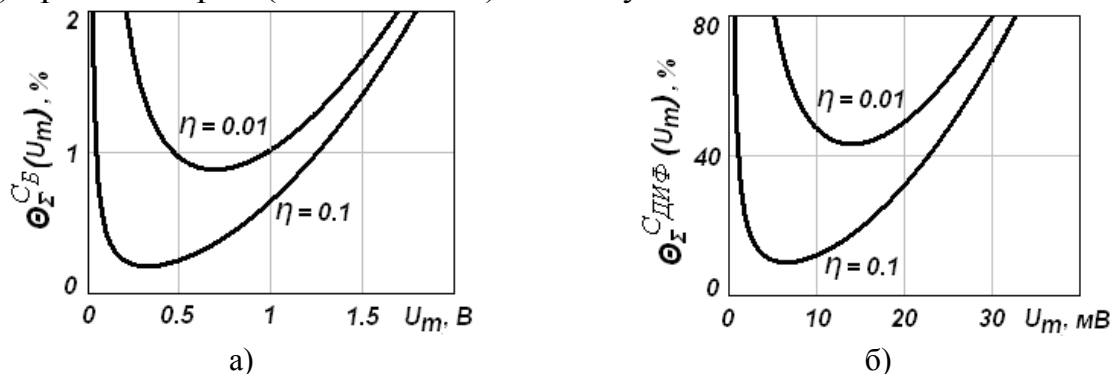


Рис. 8. Зависимости суммарной погрешности от амплитуды тестового сигнала при наличии аддитивного шума в измерительной цепи при измерении барьерной (а) и диффузионной (б) емкости полупроводникового диода с использованием детектора размаха при  $U_{Ш} = 76,3$  мкВ (16-разрядный АЦП с пределом 5 В),  $\varphi_K = 0,5$  В,  $U_0 = -5$  В,  $\eta = \omega C_0 R_{ОБР}$ .

Для измерения вольт-фарадных характеристик (ВФХ) гетеропереходных светодиодов разработана автоматизированная установка [8], в основе работы которой лежит принцип преобразования измеряемой емкости в частоту колебаний LC автогенератора. Преимуществами установки перед существующими измерителями ВФХ является низкий уровень тестового сигнала, регулируемый в пределах 0.1 – 5 мВ, высокая разрешающая способность по емкости  $10^{-14}$  Ф, минимальный шаг изменения напряжения смещения 12,2 мВ, широкий диапазон обратных напряжений смещения 0 – 50 В. Основные технические характеристики установки: диапазон измерения емкости от  $10^{-14}$  до  $5 \cdot 10^{-10}$  Ф; кратковременная относительная нестабильность частоты автогенератора  $5 \cdot 10^{-6}$ ; максимальная относительная долговременная нестабильность –  $1,5 \cdot 10^{-5}$ ; методическая погрешность измерения емкости не более 0,0038 %.

**В четвертой** главе представлены средства диагностики СИД по параметрам низкочастотного шума, способ и средство измерения малосигнальных параметров методом шумовой спектроскопии.

Для измерения вероятностных характеристик оптических и электрических низкочастотных (НЧ) шумов СИД разработан аппаратно-программный комплекс (АПК), структурная схема которого изображена на рис. 9. Кроме стандартных вероятностных характеристик НЧ шума, к которым относятся математическое ожидание, дисперсия, СКЗ, авто- и взаимная корреляционные функции, спектральная плотность, АПК позволяет строить функции распределения выбросов шумового сигнала по амплитуде и по длительности.

За счет использования многообмоточного трансформатора с перестраиваемым коэффициентом трансформации удалось добиться чувствительности измерения путем оптимального согласования дифференциального сопротивления исследуемого СИД с шумовым сопротивлением селективного нановольтметра Unipan 233 в широком диапазоне токов накачки СИД – 100 мкА – 300 мА.

АПК реализует два метода измерения вероятностных характеристик НЧ шума – метод дискретных выборок и метод удвоения. Метод дискретных выборок позволяет производить расчет вероятностных характеристик в автоматическом режиме. Метод удвоения мощности шума СИД от эталонного генератора шума Г2-37 предусматривает измерение спектральной плотности в селективном режиме с перестройкой селективного нановольтметра вручную. Преимуществом метода удвоения является более высокая чувствительность, поскольку метод дискретных выборок подразумевает анализ шумовой реализации в широкой полосе частот.

АПК состоит из регулируемого источника тока, трансформатора тока, селективного нановольтметра Unipan-233, генератора шума Г2-37, модуля сбора данных Е20-10, компьютера. АПК позволяет проводить измерения спектральной плотности шумового тока СИД в диапазоне  $10^{-21} \dots 10^{-16}$  А<sup>2</sup>/Гц в диапазоне частот 10 Гц...150 кГц и токов накачки СИД 0,1...300 мА.

Поскольку шумовая эквивалентная схема СИД имеет в составе элементы малосигнальной эквивалентной схемы, измерение малосигнальных параметров может быть осуществлено по параметрам НЧ шума. Однако погрешности измерения принимают большое значение из-за малости уровня собственного шума.

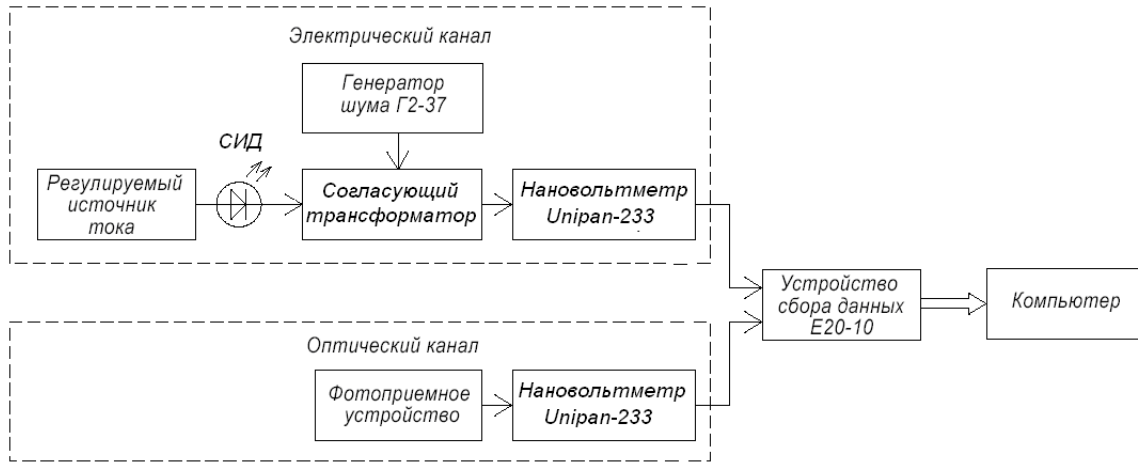


Рис. 9. Структурная схема аппаратно-программного комплекса для измерения вероятностных характеристик электрических и оптических шумов СИД

Для измерения параметров двухполюсников разработан способ, заключающийся в использовании в качестве тестового сигнала белый шум с равномерным спектром, задаваемый внешним генератором. По сравнению со стандартными измерителями импеданса, использующими гармонический тестовый сигнал и перестройку по частоте в диапазоне  $\Delta F$ , выигрыш по времени сканирования с использованием шумового тестового сигнала в случае фиксированного разрешения по частоте  $\Delta f$  составляет  $\Delta F / \Delta f$ .

Способ заключается в следующем. Шумовой сигнал  $U_{BX}(t)$ , подаваемый на двухполюсник, и выходной сигнал  $U_{ВЫХ}(t)$ , снимаемый с образцового резистора  $R_{ОБР}$ , одновременно по двум каналам подвергаются аналого-цифровому преобразованию и сохраняются в память компьютера в виде дискретной последовательности отсчетов  $U_{BX}(i\Delta t)$  и  $U_{ВЫХ}(i\Delta t)$ , где интервал  $\Delta t$  определяется частотой дискретизации:  $\Delta t = 1/F_{Д}$ . Записанные сигналы можно считать детерминированными, что дает возможность использовать спектральный метод анализа прохождения детерминированного сигнала через линейные цепи. Поскольку белый шум является стационарным эргодическим процессом, то ансамбль реализаций можно получить путем разбиения (в том числе, с перекрытием по времени) исходных последовательностей отсчетов на  $K$  последовательностей  $U_{BX}^m(i\Delta t)$  и  $U_{ВЫХ}^m(i\Delta t)$  ( $1 \leq m \leq K$ ), состоящих из  $N$  отсчетов. Применяя прямое Фурье-преобразование к каждой последовательности, получаем  $K$  комплексных спектральных плотностей входного и выходного сигналов:

$$S_{BX\_q}^m(j\omega) = \sum_{i=1}^N U_{BX}(i\Delta t) e^{-j\frac{2\pi qi}{N}} \quad (5); \quad S_{ВЫХ\_q}^m(j\omega) = \sum_{i=1}^N U_{ВЫХ}(i\Delta t) e^{-j\frac{2\pi qi}{N}} \quad (6), \quad 1 \leq q \leq K$$

Для каждой  $m$ -й реализации ансамбля рассчитывается импеданс ДП:

$$Z^m(j\omega) = \left( \frac{S_{BX\_q}^m(j\omega)}{S_{ВЫХ\_q}^m(j\omega)} - 1 \right) R_{ОБР} = \text{Re}(Z^m(j\omega)) + j\text{Im}(Z^m(j\omega)), \quad (7)$$

после чего вычисляются модуль и фаза импеданса:

$$|Z^m(\omega)| = \sqrt{(\text{Re}(Z^m(j\omega)))^2 + (\text{Im}(Z^m(j\omega)))^2}, \quad \varphi_{Z^m(\omega)} = \arctg[\text{Im}(Z^m(j\omega)) / \text{Re}(Z^m(j\omega))].$$



Затем проводится усреднение полученных характеристик по ансамблю:

$$|Z(\omega)| = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^K |Z^m(\omega)| \quad (8),$$

$$\varphi_{Z(\omega)} = \frac{1}{K} \sum_{m=1}^K \varphi_{Z^m(\omega)} \quad (9)$$

По измеренным частотным зависимостям модуля и фазы импеданса двухполюсника осуществляется определение оптимальных частот и расчет параметров элементов эквивалентной схемы.

Структурная схема установки, реализующей способ, изображена на рис. 10.

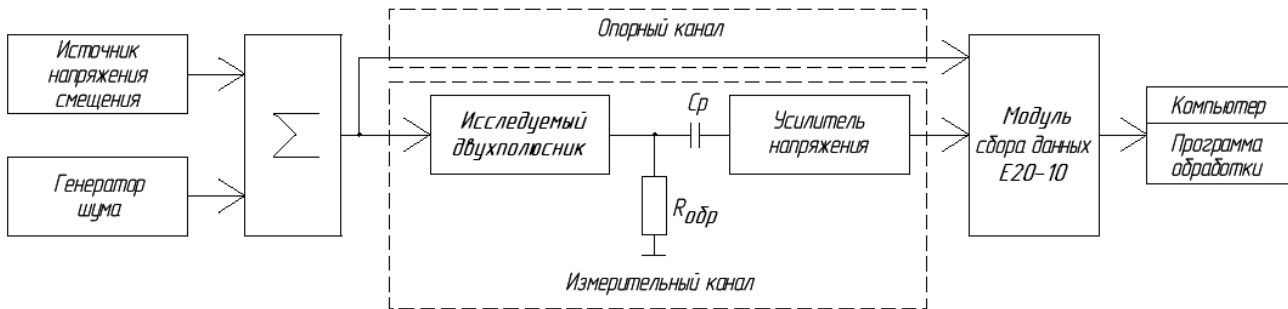


Рис. 10. Структурная схема установки для измерения частотных зависимостей модуля и фазы импеданса двухполюсника с применением шумового тестового сигнала

В установке задается режим работы ДП по постоянному току. Шумовой тестовый сигнал с выхода генератора шума подается на делитель, составленный из исследуемого ДП с импедансом  $Z$  и образцового резистора с сопротивлением  $R_{OBR}$ . Этот же сигнал поступает на первый канал модуля сбора данных E20-10. Напряжение, снимаемое с образцового резистора, проходит через усилитель и поступает на второй канал модуля сбора данных. Модуль сбора данных осуществляет аналого-цифровое преобразование сигналов с заданной частотой дискретизации  $F_D$  до 5 МГц на канал и пересылает цифровые отсчеты в компьютер.

Алгоритм апробирован на трехэлементном ДП со схемой, изображенной на рис.11, а, и следующими значениями параметров:  $R_1 = 272,2$  Ом,  $R_2 = 50,5$  Ом,  $C = 550$  нФ, полученными стандартным измерителем LCR AM-3001 фирмы АКТАКОМ с относительной погрешностью 0,1%. Экспериментальные и теоретические графики модуля и фазы импеданса ДП представлены на рис.11, б, в. Относительная разница результатов измерения параметров двухполюсника измерителем LCR AM-3001 и разработанной установкой:  $\delta_{R1} = 4,4\%$ ;  $\delta_{R2} = 0,4\%$ ;  $\delta_C = 1,5\%$ .

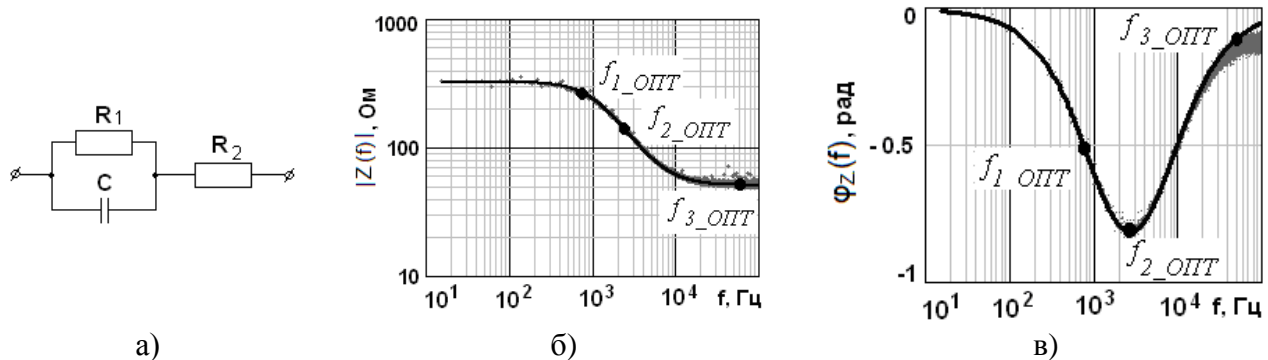


Рис. 11. Частотные зависимости модуля и фазы импеданса трехэлементного RC двухполюсника с параметрами  $R_1 = 272,2$  Ом,  $R_2 = 50,5$  Ом,  $C = 550$  нФ. Экспериментальные данные обозначены точками, теоретические зависимости – сплошной линией.

В пятой главе диссертации приведены результаты диагностики качества гетеропереходных светодиодов по шумовым и малосигнальным параметрам.

Исследование закономерностей изменения основных оптических, электрических и шумовых параметров СИД в процессе ускоренных испытаний под электрической и тепловой нагрузками и выяснение взаимосвязи между шумовыми параметрами и скоростью деградации светодиодов для прогнозирования их потенциальной надежности проводилось на группе из ста штук коммерческих СИД фирмы Vishay типа TLCR5800 с AlInGaP/GaAs двойной гетероструктурой. Испытаниям подвергались 85 СИД, а остальные 15 составили контрольную группу.

Испытания СИД проводились в течение 5000 часов. Питание СИД на испытательном стенде осуществлялось выпрямленным однополупериодным током частотой 50 Гц и максимальным значением плотности тока  $86 \text{ А/см}^2$ . Температура в термостате, в котором размещался испытательный стенд, составляла  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

В процессе испытаний контролировались характеристики: вольт-амперные, ватт-амперные (зависимость мощности излучения от тока накачки), вольт-фарадные, а также токовые и частотные характеристики НЧ шума тока накачки.

Эксперимент показал, что при плотностях тока более  $5 \text{ А/см}^2$  распределение исследованных СИД по уровню спектральной плотности шумового тока носит двухмодальный характер, который более четко проявляется при больших плотностях тока (рис. 12).

ВФХ измерялись в диапазоне обратных напряжений  $0...35 \text{ В}$ . На основе экспериментально полученных ВФХ  $C(U)$  рассчитывались профили распределения концентрации носителей заряда  $N(w)$  вдоль координаты  $w$  по стандартной формуле в предположении резкого перехода:

$$N(U) = \frac{C(U)^3}{\varepsilon\varepsilon_0 S^2 q} \left( \frac{dC(U)}{dU} \right)^{-1} \quad (10), \quad w(U) = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{C(U)} \quad (11)$$

Профили концентрации исследуемых светодиодов имеют два явно выраженных максимума, обусловленных наличием двойной гетероструктуры с квантовыми ямами (рис. 13). Площадь под пиками на графике профиля распределения концентрации прямо пропорциональна накопленному заряду в слоях структуры. Показано, что коэффициент корреляции между площадью под вторым пиком и уровнем НЧ шума на частоте  $1 \text{ кГц}$  при токе  $50 \text{ мА}$  составляет  $-0,7$ , причем в процессе испытаний корреляция сохраняется.

Эксперимент показал, что в процессе испытаний СИД наблюдается смещение графиков профиля распределения концентрации носителей заряда вследствие электромиграции примеси под действием протекающего тока и повышенной температуры. Процесс электромиграции сопровождается спадом мощности излучения СИД.

Среди контролируемой выборки выделилась группа из 16 СИД, мощность излучения которых в течение 3000 часов испытаний снизилась более чем на 7% относительно начального значения. Для этих СИД рассчитана вероятность попадания в каждый интервал гистограммы распределения СИД по уровню шума (заштрихованная область рис. 12).

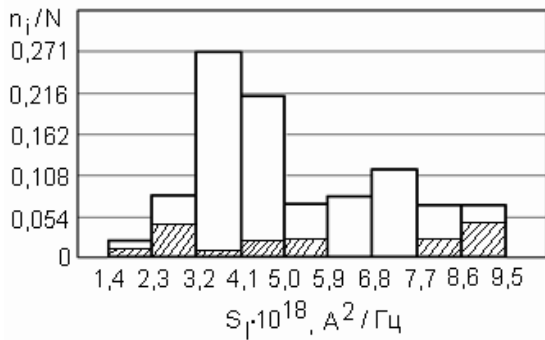


Рис. 12. Гистограмма распределения СИД по уровню НЧ шума, измеренного на частоте 1 кГц при плотности тока  $50 \text{ A}/\text{см}^2$  до испытаний. Штриховкой обозначена доля наиболее сильно продеградировавших в течение 3000 часов испытаний СИД

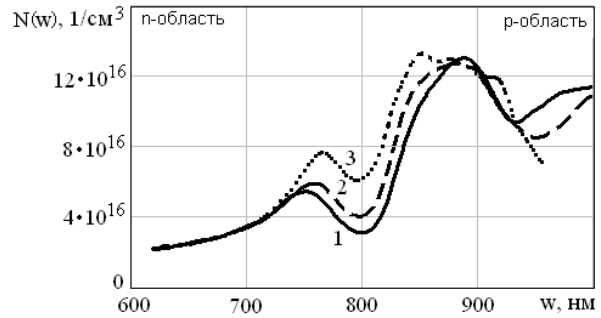


Рис. 13. Изменение профиля распределения концентрации носителей заряда в гетероструктуре в процессе испытаний: 1 – до испытаний; 2 – после 20 часов; 3 – после 3000 часов

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о том, что светодиоды, в большей степени подверженные деградации, находятся на краях распределения СИД по уровню шума. Кроме того, высока вероятность попадания потенциально ненадежных СИД в интервалы, лежащие на участке спада первой моды двухмодального распределения по уровню НЧ шума.

**В заключении** представлены основные результаты работы.

1. Получены зависимости погрешностей измерения дифференциального сопротивления, барьерной и диффузионной емкостей полупроводникового диода, обусловленных нелинейностью его эквивалентной схемы, от амплитуды тестового гармонического сигнала при использовании различных типов преобразователей переменного напряжения в постоянное. Впервые установлено, что: минимальная относительная погрешность измерения указанных параметров достигается при использовании в качестве детектора преобразователя средневывпрямленного значения; из-за влияния аддитивного шума в измерительной цепи на результат измерения амплитуда тестового сигнала имеет оптимальное значение, при которой относительная погрешность измерения малосигнальных параметров минимальна.

2. Для определения набора оптимальных частот, минимизирующего погрешности определения параметров многоэлементного двухполюсника с известной структурой методом импедансной спектроскопии, разработан алгоритм, состоящий в многократном компьютерном моделировании процесса измерения модуля и фазы импеданса ДП с учетом случайных аддитивных погрешностей и определении параметров ДП по известным функциональным зависимостям на заданном множестве наборов частот тестового сигнала. На примере двухэлементного РС ДП показано, что отклонение одной из частот от оптимального значения на 20 % приводит к возрастанию суммы относительных погрешностей в среднем на 15 %. При увеличении количества элементов ДП выбор частот тестового сигнала становится более критичным

3. Показано, что применение импульсного тестового сигнала при измерении малосигнальных параметров гетеропереходных светодиодов позволяет минимизировать составляющую погрешности, обусловленную тепловым

разогревом диода при измерении указанных параметров с заданием рабочей точки диода постоянным током. Разработаны оригинальные способы измерения сопротивления базы и дифференциального сопротивления полупроводникового диода с использованием амплитудно-импульсной модуляции тестового сигнала по линейному и гармоническому закону соответственно.

4. Разработана автоматизированная установка для измерения вольт-фарадных характеристик СИД с преобразованием емкости в частоту. По сравнению с существующими измерителями ВФХ в разработанной установке достигнуты: наименьшая амплитуда тестового сигнала (100 мкВ) и величина шага по напряжению смещения (12,2 мВ), более высокая разрешающая способность по емкости ( $10^{-14}$  Ф) и диапазон обратных напряжений смещения до  $-50$  В.

5. Разработан аппаратно-программный комплекс для измерения электрических и оптических шумов светодиодов. Предложена трансформаторная схема согласования шумового сопротивления нановольтметра Unipan 233 с сопротивлением СИД, обеспечивающая максимальную чувствительность измерения. Впервые показано, что распределение выбросов НЧ шума гетеропереходных СИД по уровню подчиняется нормальному закону, а распределение выбросов НЧ шума по длительности имеет пуассоновский характер.

6. Предложен способ измерения частотной зависимости импеданса ДП с применением широкополосного шумового тестового сигнала, который позволяет сократить время измерения параметров ДП по сравнению со стандартными измерителями импеданса, использующими гармонический тестовый сигнал с перестройкой по частоте в диапазоне  $\Delta F$  и шагом  $\Delta f$ , в  $\Delta F / \Delta f$  раз.

7. Проведены выборочные измерения малосигнальных и шумовых параметров серийных гетеропереходных СИД нескольких типов. Показано, что распределение СИД по уровню шума имеет двухмодальный характер, присущий и другим классам полупроводниковых изделий, а распределение СИД по малосигнальным параметрам определяет качество изготовления СИД.

8. Проведены ускоренные испытания коммерческих светодиодов Vishay типа TLCR5800 на основе AlInGaP/GaAs гетероструктуры с квантовыми ямами при повышенной токовой и температурной нагрузке. Установлено, что более быстрой деградации подвержены светодиоды не только с высоким, но и с низким уровнем НЧ шума. Установлено, что ВФХ гетеропереходных СИД имеет ярко выраженный нелинейный характер; в процессе испытаний происходит изменение формы ВФХ, что обусловлено изменением распределения концентрации носителей заряда в активной области гетероструктуры за счет электродиффузии; скорость электродиффузии коррелирует со скоростью снижения оптической мощности СИД в процессе испытаний.

### **Список опубликованных работ по теме диссертации**

#### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Сергеев, В. А. Вероятностные характеристики электрических шумов гетеропереходных светодиодов / В. А. Сергеев, И. В. Фролов, А. А. Широков, Ю. Н. Щербатюк // Известия вузов. Электроника. – 2010. – №5. – С. 15 – 21.

2. Sergeev, V. A. Probability Characteristics of Electrical Noise in Heterojunction Light-Emitting Diodes / V. A. Sergeev, I. V. Frolov, A. A. Shirokov, and Yu. N. Shcherbatyuk // Semiconductors. – 2011. – Vol. 45. – Issue 13. – P. 1670 – 1675.

3. Сергеев, В. А. Измерение теплового импеданса мощных светодиодов с применением широтно-импульсной модуляции мощности / В. А. Сергеев, В. И. Смирнов, А. А. Гавриков, И. В. Фролов // Известия вузов. Электроника. – 2012. – №3. – С. 64–68.

4. Сергеев, В. А. Аппаратно-программный комплекс для измерения вероятностных характеристик электрических и оптических шумов светоизлучающих диодов / В. А. Сергеев, А. А. Широков, И. В. Фролов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2012. – №11. – С. 43–45.

5. Сергеев, В. А. Связь снижения квантовой эффективности InGaN/GaN светодиодов при испытаниях с особенностями вольт-фарадных характеристик / В. А. Сергеев, И. В. Фролов, А. А. Широков // Нелинейный мир. – 2013. – №2. – С. 90 – 91.

6. Сергеев, В. А. Связь характеристик низкочастотного шума светодиодов с распределением концентрации примесей и плотности тока в гетероструктурах / В. А. Сергеев, И. В. Фролов, А. А. Широков, А. М. Низаметдинов // Нелинейный мир. – 2013. – №7. – С. 493 – 498.

7. Сергеев, В. А. Погрешность измерения дифференциального сопротивления нелинейных двухполюсников / В. А. Сергеев, И. В. Фролов // Измерительная техника. – 2013. – №12. – С. 45 – 49.

8. Сергеев, В. А. Автоматизированная установка для измерения вольт-фарадных характеристик гетеропереходных светодиодов с повышенным разрешением / В. А. Сергеев, И. В. Фролов, А. А. Широков // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – №1. – С. 137 – 138.

9. Sergeev, V. A. The Error When Measuring the Differential Resistance of Non-linear Two-Terminal Networks / V. A. Sergeev, I. V. Frolov // Measurement Techniques. – 2014. – Vol. 56. – No. 12. – P. 1421 – 1428.

10. Сергеев, В. А. Алгоритм определения набора оптимальных частот тестового сигнала при измерении параметров многоэлементных двухполюсников / В. А. Сергеев, И. В. Фролов // Автоматизация процессов управления. – 2014. – №1. – С. 31 – 37.

### **Основные публикации в других изданиях**

11. Сергеев, В. А. Аппаратно-программный комплекс для исследования шумовых процессов в светоизлучающих диодах / В. А. Сергеев, В. Н. Рогов, Ю. Н. Щербатюк, И. В. Фролов // Вестник УлГТУ. – 2009. – № 1. – С.43 – 46.

12. Сергеев, В. А. Измерение некоторых вероятностных характеристик низкочастотного шума полупроводниковых изделий дискретным методом / В. А. Сергеев, И. В. Фролов // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: Труды шестой всероссийской научно-практической конференции (с участием стран СНГ), г. Ульяновск, 22-23 сентября 2009 г. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – С. 288 – 291.

13. Сергеев, В. А. Исследование характеристик низкочастотного шума гетеропереходных светодиодов / В. А. Сергеев, И. В. Фролов // Радиоэлектроника,

электротехника и энергетика: Шестнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3 т. Т.1. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2010. – С. 291 – 293.

14. Фролов, И. В. Алгоритм определения параметров двухполюсников по частотным зависимостям модуля и фазы импеданса эквивалентной схемы / И. В. Фролов // Радиоэлектронная техника : межвузовский сборник научных трудов / под ред. В. А. Сергеева. – Ульяновск : УлГТУ, 2010. – С. 96 – 99.

15. Фролов, И. В. Исследование вероятностных характеристик шумов гетеропереходных светодиодов по дискретным выборкам / И. В. Фролов // Сборник конкурсных научно-исследовательских работ магистров, аспирантов и молодых ученых в области стратегического партнерства вузов и предприятий радиоэлектронного комплекса. – Санкт-Петербург: ЛЭТИ. – 2011. – С. 118 – 124.

16. Сергеев, В. А. Измеритель параметров нелинейных эквивалентных схем полупроводниковых приборов / В. А. Сергеев, А. А. Широков, И. В. Фролов // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: Труды седьмой всероссийской научно-практической конференции (с участием стран СНГ), г. Ульяновск, 22-23 сентября 2011 г. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – С. 211-213.

17. Сергеев, В. А. Автоматизированная установка для измерения вольт-фарадных характеристик светоизлучающих диодов / В. А. Сергеев, В. И. Смирнов, И. В. Фролов, А. А. Широков // Радиоэлектронная техника : межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В. А. Сергеева. – Ульяновск : УлГТУ. – 2011. – С. 96-99.

18. Фролов, И. В. Деградация голубых InGaN/SiC светодиодов / И. В. Фролов, В. А. Сергеев, А. А. Широков // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» : тез. докл. VI Всерос. конф. молодых ученых. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та. – 2011. – С. 68 – 69.

19. Сергеев, В. А. Диагностика деградации гетероструктур мощных InGaN/GaN светодиодов при испытаниях по вольт-фарадным характеристикам / В. А. Сергеев, И. В. Фролов, А. А. Широков, А. А. Вадова // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» : тез. докл. VII Всерос. конф. молодых ученых. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та. – 2012. – С. 129 – 130.

20. Фролов, И. В. Измерение параметров нелинейной эквивалентной схемы гетеропереходных светодиодов методом импедансной спектроскопии / И. В. Фролов // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» : тез. докл. VII Всерос. конф. молодых ученых. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та. – 2012. – С. 165 – 166.

21. Сергеев, В. А. Аналитический расчет и компьютерное моделирование погрешностей измерения параметров эквивалентных схем двухполюсников / В. А. Сергеев, И. В. Фролов // Радиоэлектронная техника : межвузовский сборник научных трудов / под ред. В. А. Сергеева. – Ульяновск : УлГТУ. – 2012. – С. 88–93.

22. Сергеев В. А. Выбор оптимальных частот при измерении параметров трехэлементного двухполюсника / В. А. Сергеев, И. В. Фролов // Радиоэлектронная техника : межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В. А. Сергеева. – Ульяновск : УлГТУ. – 2013. – С. 104 – 109.

23. Сергеев, В. А. Методика контроля качества гетеропереходных светодиодов по шумовым характеристикам // В. А. Сергеев, И. В. Фролов // Вузовская наука в современных условиях : сборник материалов 47-й научно-технической кон-

ференции (28 января – 2 февраля 2013 года). В 3 ч. Ч. 2. – Ульяновск : УлГТУ. – 2013. – С. 98 – 102.

24.Фролов, И. В. Низкочастотные шумы светодиодов InGaN/SiC // И. В. Фролов, А. А. Широков // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. Тезисы докладов 9-й Всероссийской конференции (13 – 15 июня 2013 года, Москва). – Санкт-Петербург. – 2013. – С. 139 – 140.

25.Фролов, И. В. Определение параметров рекомбинационных центров в InGaN/GaN светодиодах методом низкочастотной шумовой спектроскопии // И. В. Фролов, В. А. Сергеев, А. А. Широков // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» : тез. докл. VIII Всерос. конф. молодых ученых. – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та. – 2013. – С. 245 – 246.

26.Сергеев, В. А. Исследование процессов деградации светодиодов AlInGaP/GaAs и их взаимосвязи с параметрами низкочастотного шума / В. А. Сергеев, И. В. Фролов, А. А. Широков // Материалы Международной научно-технической конференции, 2 – 6 декабря 2013 г. INTERMATIC-2013.– М.: МИРЭА. – 2013. – Ч.3. – С. 30 – 33.

27.Сергеев, В. А. Измерение параметров схем замещения многоэлементных двухполюсников методом импедансной спектроскопии с применением шумового тестового сигнала / В.А. Сергеев, И.В. Фролов // Материалы Международной научно-технической конференции, 2 – 6 декабря 2013 г. INTERMATIC-2013.– М.: МИРЭА. – 2013. – Ч.3. – С. 72 – 75.

Фролов Илья Владимирович

Средства измерения малосигнальных и шумовых параметров светоизлучающих диодов  
для целей диагностики их качества

Автореферат

Подписано в печать XX.XX.2014. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 1,17.

Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_\_

Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, Северный Венец, 32.