

На правах рукописи



Шитов Евгений Михайлович
ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ШУМОВОЙ
ДИАГНОСТИКИ ТЕРМОЭЛЕКТРОННЫХ КАТОДОВ
ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ

Специальность 05.27.02 – “Вакуумная и плазменная электроника”

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

РЯЗАНЬ – 2014

Работа выполнена на кафедре “Электронные приборы” федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»)

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор,
кафедра “Электронные приборы”
ФГБОУ ВПО “НИУ “МЭИ”

Воробьев Михаил Дмитриевич

Официальные оппоненты

доктор технических наук, профессор, заместитель
генерального директора
ООО “Базовые технологии вакуумных
приборов”, г. Москва

Масленников Олег Юрьевич

доктор технических наук, старший научный
сотрудник, нач. отдела Федерального
государственного унитарного предприятия
"Всероссийский электротехнический институт им.
В.И. Ленина" (ФГУП ВЭИ), Москва.

Щербаков Александр Владимирович

Ведущая организация

Открытое акционерное общество
«Плутон», г. Москва

Защита состоится 03 марта 2015г. в 11 ч.00 мин. на заседании
диссертационного Совета Д 212.211.03 Рязанского государственного
радиотехнического университета по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д.
59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГРТУ, а также на сайте ФГБОУ
ВПО "РГРТУ" <http://www.rsreu.ru>

Автореферат разослан ____ 2015года.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.211.03 д.ф.-м.н., проф.

Чиркин М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Современные электровакуумные приборы (ЭВП) представлены широким спектром видов и модификаций. Часто сочетание частотных, мощностных и других параметров делают их применение экономически целесообразнее применения полупроводниковых приборов. В некоторых случаях использование ЭВП является единственным возможным вариантом выбора элементной базы благодаря стойкости к радиационному излучению, электромагнитным импульсным помехам и возможности работать в широком диапазоне температур.

В основе большинства ЭВП лежит катодно-подогревательный узел с термоэлектронным катодом. Его параметры во многом определяют качество и срок службы прибора в целом. Эмиссионные свойства термокатада связаны с состоянием эмитирующей поверхности. Наличие на ней дефектов приводит к преждевременному выходу из строя катода или параметрическому отказу ЭВП. Поэтому востребованными являются методы и оборудование для оперативного контроля, способные дать количественную оценку дефектам эмитирующей поверхности.

Существующие методы оперативной диагностики термокатодов связаны, как правило, с измерениями токовых характеристик, не позволяющих обнаружить влияние участков эмитирующей поверхности с малыми плотностями тока эмиссии. Такие участки подобно дефектам в полупроводниковых структурах можно рассматривать как дефекты эмитирующей поверхности, способные в своей динамике развиваться, множиться и приводить к деградации эмиссионных свойств катодов в целом. В этой связи представляется перспективным использование для диагностики катодов шумовых параметров, высокая чувствительность которых для полупроводниковых структур и приборов неоднократно была экспериментально доказана. Уровень шумов, создаваемых катодами, в отличие от полупроводниковых структур дополнительно определяется демпфирующим влиянием прикатодного электронного пространственного заряда. Вместе с тем, благодаря этому влиянию при измерении шумов возникает возможность обнаружить слабоэмитирующие участки, для которых воздействие создаваемого ими пространственного заряда на уровень шума минимально.

Реализация, развитие и совершенствование диагностических методов неразрывно связаны с исследованием их эффективности (информативности) и созданием для этого специализированного диагностического оборудования, ориентированного на работу с относительно большим количеством объектов и потому обладающего максимально высоким уровнем автоматизации процедуры измерений.

Степень разработанности темы исследования

Способы и средства диагностики и оперативного контроля качества современных эффективных термокатодов преимущественно основаны на определении их эмиссионных характеристик. Известно лишь небольшое число работ, посвященных использованию создаваемыми катодами флуктуационных шумов для диагностики, однако практического подтверждения эффективности и достоверности этих методик не представлено. Оборудование для измерения шумов в диагностических целях, как правило, узкоспециализировано и предназначено для контроля шумовых параметров готовых приборов и устройств.

Диссертационная работа нацелена на формирование и исследование эффективности диагностических шумовых параметров термокатодов на стадии, предшествующей производству готовых приборов, а также создание оперативных способов их определения.

Цель диссертации

Цель диссертации состояла в создании автоматизированного программно-аппаратного комплекса с модулями импульсного и шумового зондирования для оперативной диагностики термокатодов, а также в формировании и исследовании эффективности шумовых диагностических параметров.

Задачи

1. Спроектировать и изготовить модуль импульсного зондирования для оценки эмиссионных свойств и отбраковки непригодных к шумовому зондированию катодов, предусмотрев возможности изменения параметров зондирования при адаптации модуля к катодам различных типов и экспериментальным диодам различных конструкций.
2. Обеспечить высокий уровень автоматизации импульсного зондирования и архивирование результатов измерений.
3. Исследовать с помощью изготовленного модуля возможности реализации известных методик оценки эмиссионных свойств катодов.
4. Спроектировать и изготовить модуль шумового зондирования для измерения шумовых характеристик катодов, согласно физической модели отражающих существование на эмитирующей поверхности катодов слабоэмитирующих участков.
5. Обеспечить высокий уровень автоматизации шумового зондирования, архивирование результатов измерений, необходимую помехозащищенность, возможность адаптации к катодам различных типов и экспериментальным диодам различных конструкций.
6. Исследовать условия определения шумовых характеристик и параметров и их информативность.
7. Разработать программное обеспечение, необходимое для формирования системы информативных шумовых характеристик и параметров.

Научная новизна работы

1. Создан диагностический программно-аппаратный комплекс на базе модулей шумового и импульсного зондирования, а также серийной универсальной системы сбора данных *National Instruments*, позволяющий в автоматизированном режиме определять параметры для оценки качества термоэлектронных катодов.

2. Разработана и реализована методика определения диагностических шумовых параметров на основе измерения характеристик дробовой компоненты шума в режиме глубокого пространственного заряда.

3. Путем комплексных исследований шумовых и эмиссионных характеристик с использованием созданного программно-аппаратного комплекса, а также в результате испытаний термокатодов на наработку показана информативность разработанных шумовых диагностических параметров при прогнозировании долговечности термокатодов.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Исследована и подтверждена эффективность для диагностики термокатодов модели, связывающей шумовые характеристики с наличием на эмитирующей поверхности дефектных слабоэмитирующих участков.

2. Найдены условия для определения и формирования информативных шумовых диагностических параметров.

3. Разработан программно-аппаратный комплекс на основе модуля измерения шумов термокатодов, модуля импульсного зондирования и серийной универсальной системы сбора данных *National Instruments* с высоким уровнем автоматизации измерений, способный обеспечить оперативную диагностику термокатодов.

4. В среде *LabVIEW* создано программное обеспечение для управления режимом проведения шумовых и импульсных измерений, позволяющее измерять шумовые и эмиссионные параметры термокатодов при различных режимах работы. Использование серийной универсальной системы сбора данных *National Instruments* и модульный принцип построения комплекса обеспечивают возможность модернизации и изменения параметров комплекса при нахождении различных информативных шумовых параметров для различных конструкций термокатодов.

5. Разработана и реализована методика определения информативных шумовых параметров, применимых для прогнозирования долговечности термокатодов.

Объекты и методы исследований

Объектами исследования являлись металлопористые термокатоды (МПК) на основе *W-Re* губки, пропитанной содержащим *Ba* активным веществом и с нанесенной на поверхность тонкой пленкой *Os*. Катоды помещались в экспериментальные диоды с повышенными требованиями к жесткости

крепления электродов. Конструкция диодов максимально приближена к плоскому диоду для обеспечения однородного электрического поля у поверхности катода. Площадь эмитирующей поверхности катода составляет 1..2 мм².

Исследования проводились посредством измерения дробовой компоненты шума, создаваемой катодами, в зависимости от отбираемого с катода тока и приложенного к диоду напряжения, а также характеристик импульсного тока на различных этапах длительной наработки катодов с отбором эмиссионного тока.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Впервые показано, что повышение эффективности оценки качества термоэлектронных катодов может быть достигнуто путем определения зависимости дробовой компоненты шума от отбираемого тока и анодного напряжения при работе экспериментальных диодов в режиме глубокого пространственного заряда с последующим расчетом шумовых параметров.

2. Разработанный, спроектированный и изготовленный диагностический программно-аппаратный комплекс на основе модулей шумового и импульсного зондирования, а также серийной универсальной системы сбора данных *National Instruments*, вместе с разработанным программным обеспечением позволяет в автоматизированном режиме получать оперативную информацию о качестве термоэлектронных катодов посредством комплексных измерений импульсных и шумовых характеристик.

3. Результаты экспериментальных исследований связи шумовых параметров со степенью деградации эмиссионных свойств термокатодов после длительной наработки являются основой для прогнозирования деградации термокатодов из той же партии по результатам оперативной шумовой диагностики без проведения наработки.

Обоснованность научных положений подтверждается результатами всесторонних испытаний разработанного диагностического оборудования и результатами исследования информативности предложенных диагностических шумовых параметров.

Достоверность полученных результатов подтверждена их согласованием при использовании различных методов измерений шумов, а также высокой степенью корреляции исходных значений диагностических шумовых параметров с деградацией термокатодов по эмиссии после длительной наработки.

Личный вклад автора

Разработан и сконструирован программно-аппаратный комплекс для шумовой диагностики термокатодов на основе модуля измерения шумов термокатодов, модуля импульсного зондирования и серийной универсальной системы сбора данных *National Instruments*, создано программное обеспечение, необходимое для проведения измерений и обработки результатов. Проведены

исследования, в результате которых определены параметры шумового и импульсного зондирования, необходимые для диагностики металлопористых термокатодов. Проведены комплексные исследования шумовых и эмиссионных характеристик термокатодов с использованием созданного программно-аппаратного комплекса, в результате которых была установлена корреляция шумовых диагностических параметров и снижения эмиссионных свойств в результате длительной наработки. Автором предложена методика прогнозирования спада эмиссионных свойств катодов после длительной наработки по результатам шумового зондирования.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных и общероссийских конференциях:

1. Конференция “Российские корпорации, вузы и научные организации: проблемы и перспективы сотрудничества в инновационной сфере” международного форума “Технологии в машиностроении 2012”, г. Жуковский 2012;

2. 44-й Международный научно - методический семинар Флуктуационные и деградационные процессы в полупроводниковых приборах. Секция "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах", МНТОРЭС им. А.С.Попова, Москва, 2013;

2. 45-й Международный научно - методический семинар Флуктуационные и деградационные процессы в полупроводниковых приборах. Секция "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах", МНТОРЭС им. А.С.Попова, Москва, 2014;

4. 18-я международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика” Секция “Электронные приборы”, Москва, 2012г;

5. 19-я международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика” Секция “Электронные приборы”, Москва, 2013;

6. 20-я международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика”, Секция “Электронные приборы”, Москва, 2014;

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, материал изложен на 132 страницах, иллюстрирован 78 рисунками, 5 таблицами, список цитируемых источников насчитывает 129 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи работы, показаны научная новизна и

практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 проводится анализ литературных источников, в результате которого определяются основные представления о природе возникновения токовых шумов, создаваемых термоэлектронными катодами в ЭВП, и об их связях с состоянием эмитирующей поверхности и прилегающих слоев. Шумы содержат две составляющие – дробовую с частотно-независимой спектральной характеристикой и фликкерную со спектральной характеристикой вида $1/f$ (рис.1).

Частота f_0 , до которой фликкерная компонента преобладает, составляет десятки - сотни кГц и возрастает по мере увеличения токовой нагрузки на катод. Природа возникновения шумовых компонент различна, хотя обе отражают состояние эмитирующей поверхности. Для практического использования в диагностике предпочтительней представляется дробовая



компонента по следующим причинам. Во-первых, согласно существующей физической модели, эмиссионная неоднородность катода оказывает значительное влияние на уровень шумов из-за влияния прикатодного пространственного заряда. Слабоэмитирующие участки, работающие в режиме насыщения, вносят значительный вклад в шум, что на основе теоремы Шоттки позволяет оценивать отбираемый с них ток I :

$$S_i = 2eI, \quad (1)$$

где e – заряд электрона.

Во-вторых, измерение дробового шума сопряжено с меньшими техническими проблемами по сравнению с фликкер-шумом из-за того, что на более высоких частотах в меньшей степени сказываются акустические помехи.

В настоящее время существует большое разнообразие измерительных систем, предназначенных для измерения шумов различных электронных компонентов. Большое распространение получили автоматизированные системы для определения коэффициента шума электронных компонентов в диапазонах частот от 30 МГц до 20 ГГц. Отдельные конструкции позволяют измерять коэффициент шума ЛБВ на частотах до сотен ГГц. Однако сведения об аппаратуре, специально разработанной для измерения шумов непосредственно термокатодов, начиная с 50х годов XX в., ограничены, несмотря на то, что технология производства термокатодов различных типов и модификаций постоянно совершенствовалась. Исследования взаимосвязи

деградационных характеристик полупроводниковых приборов и шумов, ими создаваемых, привели к формированию методик контроля качества и надежности. В то же время поиск информативных параметров и формирование методик диагностики ЭВП осложнялись необходимостью изготовления партий специальных экспериментальных образцов с термокатодами, что требует больших материальных и временных затрат, чем производство экспериментальных образцов с полупроводниковыми структурами. Экспериментальные подтверждения эффективности таких методик либо отсутствует, либо носит неполный характер. Совершенствование элементной базы привело к созданию высокочувствительных автоматизированных устройств для измерения шумов, но для исследования термокатодов они нашли весьма ограниченное применение. Кроме того, большинство из этих устройств не применимы для оперативного контроля больших партий катодов в условиях серийного производства из-за длительного времени измерения либо узкого диапазона допустимых входных параметров измерительных систем. Таким образом, известные немногочисленные способы диагностики катодов по шумам не получили широкого распространения из-за технических сложностей измерений, отсутствия оборудования и трудностей автоматизации процесса диагностики в условиях серийного производства.

Помимо измерений проблему для шумовой диагностики представляет формирование информативных параметров, то есть таких, которые в максимальной степени отражали бы степень эмиссионной неоднородности катодов и могли бы служить для оценки их качества. Известен способ формирования шумовых параметров на основе измерения зависимостей уровня создаваемых катодами дробовых шумов от отбираемого тока или приложенного к экспериментальному диоду анодного напряжения (соответственно ампер-шумовых АШХ и вольт-шумовых ВШХ характеристик). Пример такой характеристики для металлопористых катодов показан на рис.2, анализ отклонений хода которой вместе с вольт-амперной характеристикой позволяет определить функцию распределения площадей слабоэмитирующих участков по плотностям токов эмиссии:

$$F = \frac{dS}{dj_s} = \frac{dI_{ш}}{dj_s} \frac{1}{j_s}, \quad (2)$$

где шумовой ток $I_{ш} = S_i/2e$, и на основании (2) вычислить параметр «эффективная шумовая площадь» $S_{ш}(j_{s1}, j_{s2})$ в диапазоне плотностей токов эмиссии слабоэмитирующих участков $j_{s1} \dots j_{s2}$.

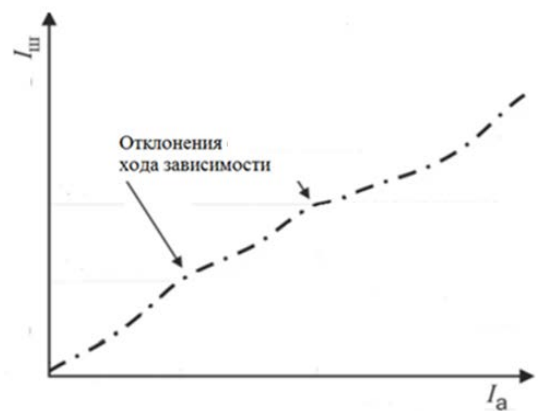


Рис.2 Ампер-шумовая характеристика (АШХ)

Вместе с тем, подтверждение эффективности предложенного способа формирования шумовых параметров отсутствует. Препятствием для этого является сложность его осуществления, требующая для получения необходимой статистики наличия автоматизированного оборудования, способного обеспечить оперативное получение, обработку шумовых характеристик и определение шумовых параметров. Информация о разработках подобного диагностического оборудования для термокатодов с использованием современной элементной базы и компьютерных технологий практически полностью отсутствует.

Одним из обязательных условий при измерении шумов является эмиссионная стабильность катодов, недостаточность которой может либо затруднить проведение измерений, либо сделать их невозможными. Поэтому шумовой диагностике должна предшествовать более короткая по длительности диагностика на основе импульсного зондирования, позволяющая выявить грубые эмиссионные дефекты. Широко известны методы импульсного зондирования, однако отсутствие серийно выпускаемого автоматизированного оборудования для их реализации ограничивает оперативность диагностики.

С учетом результатов анализа литературных источников задачами диссертационной работы являются следующие:

- Спроектировать и изготовить модуль импульсного зондирования катодов для оценки их эмиссионных свойств, предусмотрев возможности изменения параметров зондирования при адаптации модуля к катодам различных типов и экспериментальным диодам различных конструкций.
- Обеспечить высокий уровень автоматизации зондирования и архивирование результатов измерений.
- Исследовать с помощью изготовленного модуля возможности реализации известных методик оценки эмиссионных свойств катодов.
- Спроектировать и изготовить модуль шумового зондирования для измерения шумовых характеристик катодов, согласно физической модели отражающих существование на эмитирующей поверхности катодов слабоэмитирующих участков.
- Обеспечить высокий уровень автоматизации шумового зондирования, архивирование результатов измерений, необходимую помехозащищенность, возможность адаптации к катодам различных типов и экспериментальным диодам различных конструкций.
- Разработать программное обеспечение для обработки измеренных шумовых характеристик и формирования на их основе шумовых параметров.
- Исследовать информативность шумовых параметров, включая прогнозирование деградации эмиссионных свойств катодов в процессе длительной работы

В главе 2 рассматриваются вопросы создания автоматизированного оборудования для оперативного определения эмиссионных характеристик термокатодов с помощью импульсного зондирования, предшествующих шумовому зондированию. При проектировании предусмотрена возможность изменения длительности прямоугольных зондирующих импульсов в пределах 1..30 мкс независимо от амплитуды с частотой следования 5..50 имп/с. Максимальные необходимые амплитуды напряжений и токов импульсов, исходя из конструкции экспериментальных диодов и площади эмитирующей поверхности катодов, составляют соответственно 1200 В и 2А. Предусмотрена также возможность изменения этих величин в сторону как увеличения, так и уменьшения при адаптации оборудования к экспериментальным диодам и катодам с другими размерами.

Оборудование спроектировано и изготовлено в виде отдельного модуля – модуля импульсного зондирования (МИЗ), встраиваемого в универсальное серийное оборудование для научных исследований - систему сбора данных *National Instruments ELVIS*. МИЗ и система сбора данных расширяют функциональные возможности серийного оборудования и вместе образуют самостоятельный диагностический измерительный комплекс, структурная схема которого приведена на рис.3.

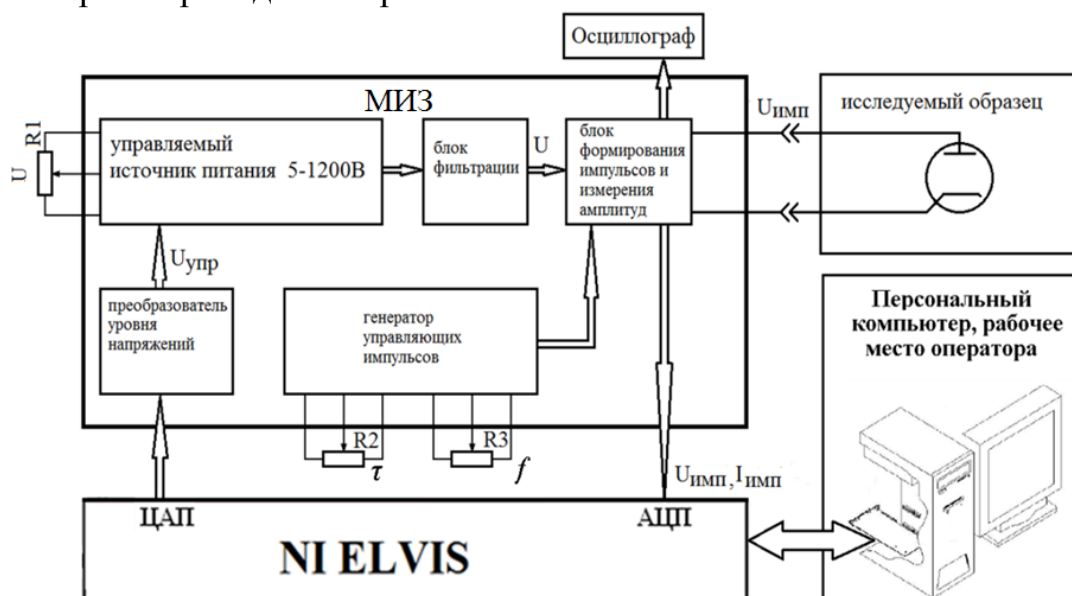


Рис. 3 Структурная схема диагностического комплекса для импульсного зондирования

В управляемом источнике питания формируется постоянное напряжение 5..1200В в соответствии с уровнем управляющего напряжения, поступающего от ЦАП *NI ELVIS*, задаваемого, в свою очередь, программным обеспечением. Для расширения функциональных возможностей *NI ELVIS* введен преобразователь уровня управляющего напряжения. Зондирующие импульсы создаются в блоке формирования путем коммутации источника питания и

экспериментального образца на время, определяемое длительностью разрешающего сигнала от генератора управляющих импульсов. Длительность и частота следования зондирующих импульсов задаются пользователем с помощью переменных резисторов R2 и R3. Для подавления пульсаций напряжения источника 5..1200 В предусмотрен блок фильтрации.

Управление процессом измерений, обработка, отображение и архивирование результатов проводятся при помощи управляющей программы, специально созданной в среде *LabVIEW*. Кроме того, предусмотрен автономный режим работы МИЗ, при котором управление амплитудой импульсов осуществляется с помощью переменного резистора R1.

При разработке МИЗ особое внимание обращено на снижение влияния искажений формы и амплитуды импульсов тока, возникающих вследствие паразитных реактивностей в цепях экспериментального диода. Искажения приводят к погрешностям при определении амплитуды и возрастают с увеличением амплитуды и уменьшением длительности импульсов за счет переходных процессов. Снижение погрешностей достигается благодаря использованию цифровой обработки результатов импульсного зондирования с применением алгоритма подавления искажений. Помимо автоматизации измерений, это позволяет измерять амплитуду прямоугольных импульсов длительностью 1..30 мкс с помощью АЦП с частотой дискретизации менее 250кГц, что делает возможным использование МИЗ совместно с широким спектром доступных систем сбора данных *National Instruments*.

Приведены результаты исследований экспериментальных диодов для выбора оптимальных значений параметров импульсного зондирования – длительности импульсов и частоты следования (соответственно 10 мкс и 10 имп/с).

Для управления процессом импульсного зондирования разработан интерфейс пользователя (рис.4). Интерфейс позволяет управлять режимом измерения импульсных ВАХ, являющихся основным источником информации для определения эмиссионных параметров. Измеряемая ВАХ выводится на экран по мере ее снятия в режиме реального времени. Общее время измерения при этом в зависимости от диапазона напряжений может составлять 1..5 мин. При помощи выводимой в нижнем окне зависимости дифференциального сопротивления от анодного напряжения контролируется переход к режиму насыщения. Результаты импульсного зондирования используются для оперативного определения эмиссионных свойств по широко распространенным методикам. В качестве примера в виде отдельного программного блока реализован метод Мирама. Относительно малое время измерения импульсных ВАХ, сопоставимое с временем выхода катода в рабочий режим (порядка нескольких минут), в сочетании с автоматизацией измерений делает возможным применение модуля при оперативном экспресс-контроле эмиссионных характеристик большого числа катодов.

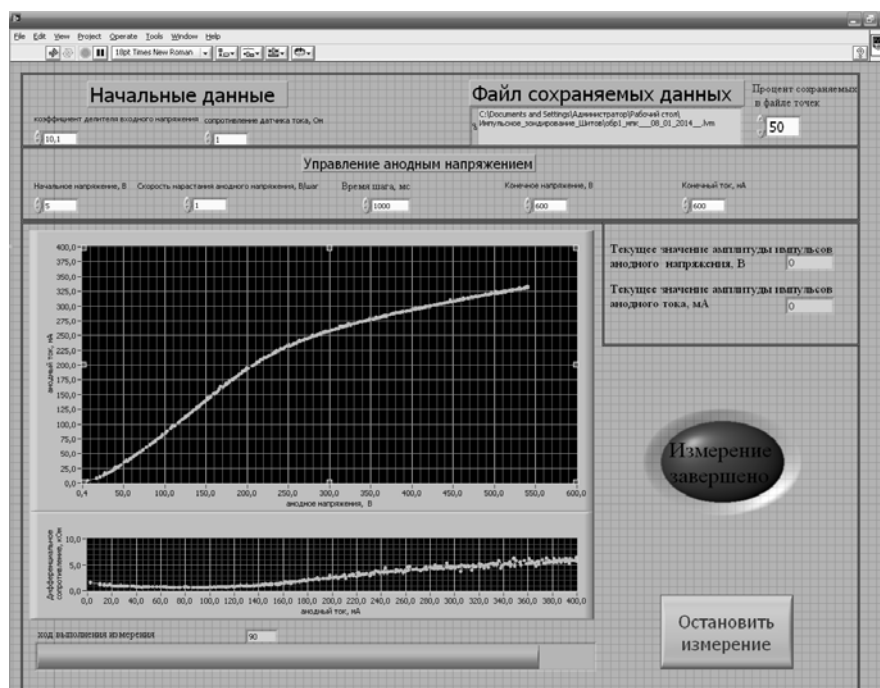


Рис. 4 Интерфейс пользователя для импульсного зондирования

Прошедшие предварительный отбор по результатам импульсного зондирования катоды в экспериментальных диодах имели значения эффективной работы выхода в пределах 1,85...1,9 эВ при $T=1270..1290$ К

Глава 3 посвящена вопросам создания оборудования для шумового зондирования катодов в автоматическом режиме, ориентированного на получение большого объема экспериментальных результатов с целью всестороннего анализа шумовых характеристик, формирования шумовых параметров и оценки эффективности их использования.

В соответствии с принятой за основу шумовой моделью неоднородного по эмиссии катода для выполнения шумового зондирования необходимо создать измерительное оборудование, способное обеспечить получение шумовых характеристик экспериментальных диодов – АШХ и ВШХ. Из наиболее распространенных методов шумовых измерений выбран метод прямого измерения с учетом меньших технических трудностей при автоматизации измерений. Основой модуля шумового зондирования является малошумящий усилитель с использованием операционного усилителя *LT1028* во входном каскаде.

Ввиду того, что результатом измерений шума является спектральная плотность S_i или пропорциональный ей шумовой ток $I_{ш}$, величины которых связаны с дифференциальным сопротивлением экспериментального диода $R_{диф}$, при автоматизации измерений шумовых характеристик возникает проблема совмещения измерения шумов и $R_{диф}$. Исследования, проведенные для экспериментальных диодов, показали, что для частоты измерения шумов

(1МГц) значения $R_{\text{диф}}$ с незначительными отклонениями могут быть найдены из статической ВАХ, измерения которой неизбежно связаны с получением ВШХ. При адаптации измерительного оборудования к катодам и экспериментальным диодам с другими размерами и конструкцией проведение подобных исследований должно либо подтвердить правомерность указанного определения $R_{\text{диф}}$, либо привести к внесению поправок в управляющую программу. Совместно с системой сбора данных *National Instruments ELVIS* модуль шумового зондирования образует измерительный комплекс (рис.5).

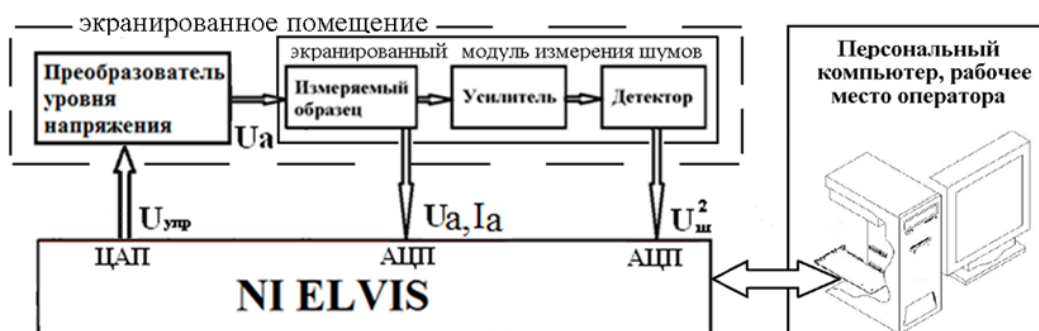


Рис. 5 Структурная схема измерительного комплекса для шумового зондирования

Как и при импульсном зондировании, управление процессом измерений, обработка, отображение и архивирование результатов проводятся при помощи управляющей программы, специально созданной в среде *LabVIEW* (рис.6).

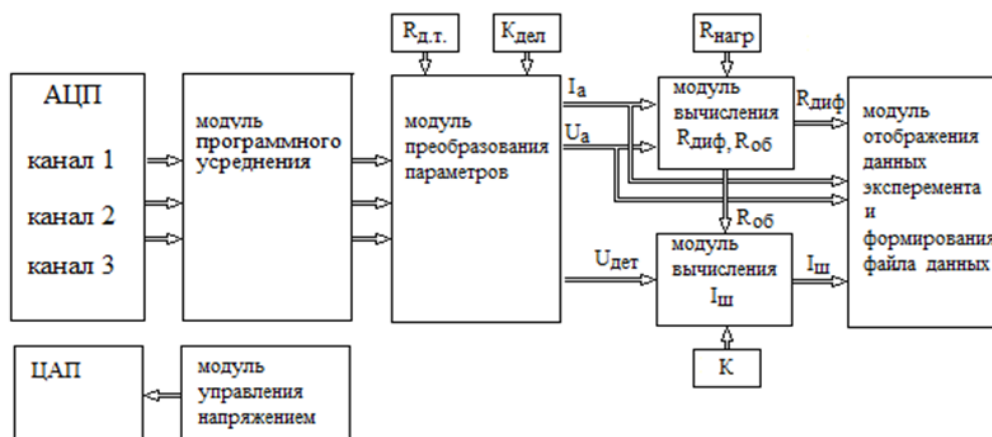


Рис.6 Структура управляющей программы для шумового зондирования

Оператором задается режим измерения. Управляющая программа формирует данные, передаваемые на платформу *NI ELVIS*, в соответствии с которыми изменяется напряжение на ЦАП. Напряжение с ЦАП поступает на преобразователь уровня напряжений, задающий анодное напряжение U_a на исследуемом образце. Сигналы, содержащие информацию о величинах U_a и I_a ,

подаются на 1-й и 2-й каналы АЦП *NI ELVIS*. Шум, создаваемый катодом экспериментального диода, поступает в резонансный усилитель, настроенный на частоту измерения (1МГц), а затем на детектор, после чего - на 3-й канал АЦП. После усреднения данные поступают на вход модуля преобразования параметров, где рассчитываются U_a и I_a . Далее по результатам измерения токов и напряжений в соседних точках ВАХ определяется $R_{\text{диф}}$ и с учетом сопротивления нагрузки $R_{\text{нагр}}$ в анодной цепи экспериментального диода - $I_{\text{ш}}$. Построение характеристик, определяемых в процессе шумового зондирования – $U_a(I_a)$, $R_{\text{диф}}(I_a)$, $I_{\text{ш}}(I_a)$ – производится в режиме реального времени и отображается на экране монитора. Одновременно происходит архивирование результатов для последующего использования при расчетах шумовых параметров. Для адаптации измерительного комплекса к катодам и экспериментальным диодам с различными размерами и различными токовыми характеристиками предусмотрена возможность изменения ряда параметров в измерительной системе – сопротивлений датчика тока $R_{\text{дт}}$, нагрузки $R_{\text{нагр}}$, чувствительности детектора K и коэффициента деления $K_{\text{дел}}$ анодного напряжения U_a при значительных изменениях диапазона U_a .

Погрешность при измерениях шума δ зависит от его уровня; при $I_{\text{ш}} < 10$ мкА $\delta > 10\%$, а при $I_{\text{ш}} > 50$ мкА δ становится ниже 5 %. Максимальный уровень измеряемого шума составляет $I_{\text{ш}} = 2$ мА. Анодное напряжение при измерениях может изменяться в пределах 0..50В. Максимальный измеряемый анодный ток составляет 50мА. Пределы измерения могут быть изменены в процессе адаптации к другим типам катодов и экспериментальных диодов посредством изменения $R_{\text{дт}}$, $R_{\text{нагр}}$, K и $K_{\text{дел}}$.

Важнейшей проблемой при измерениях шумов является обеспечение необходимой помехозащищенности. При разработке оборудования для шумового зондирования экспериментальных диодов используется многократная фильтрация питающих цепей наиболее чувствительных к помехам блоков и узлов. Система экранирования предусматривает как локальное экранирование объекта (экспериментального диода), так и общее экранирование путем размещения всего оборудования внутри экрана вместе с оператором. Особую значимость приобретает помехозащищенность при соединении модуля шумового зондирования с *NI ELVIS* из-за образования гальванической связи управляющего ЦАП с модулем. С целью устранения этой паразитной связи в преобразователе предусмотрена гальваническая развязка на базе изолирующего усилителя *ISO124* и мощного операционного усилителя *OPA547*. Интерфейс пользователя для шумового зондирования показан на рис.7. Отображены поля для ввода данных, необходимых для работы управляющей программы и определяющих режим измерения, а также поля, предназначенные для отображения графиков $U_a(I_a)$, $R_{\text{диф}}(I_a)$, $I_{\text{ш}}(I_a)$.

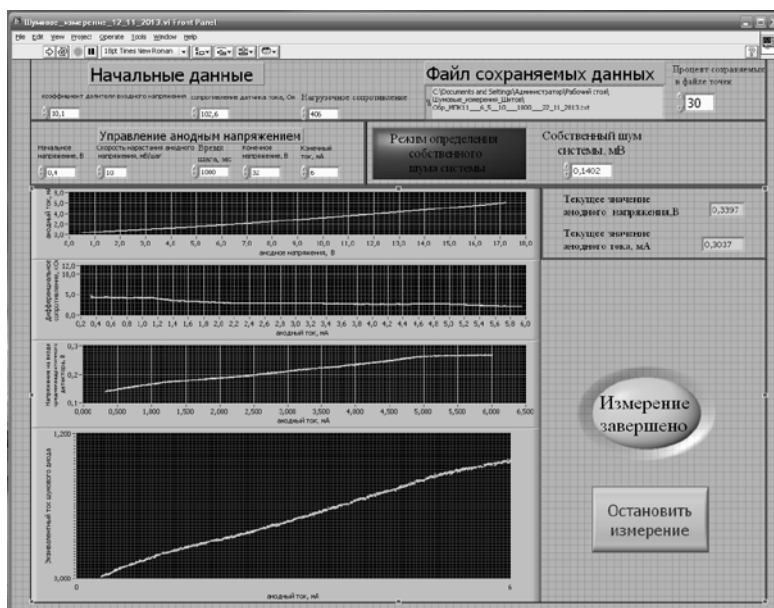


Рис.7 Интерфейс пользователя для шумового зондирования экспериментальных диодов

Перед запуском автоматического процесса измерения шумовой характеристики измерительный комплекс проводит самокалибровку. Измеряется уровень собственного шума измерительной системы при нулевом анодном напряжении, его среднее значение за 10 секунд учитывается при расчете каждой точки измеряемых шумовых характеристик.

Управляющая программа обеспечивает защиту от превышения тока и напряжения. При достижении заданного пользователем максимального значения анодного напряжения 0..50В, либо при достижении заданного пользователем максимального значения тока (до 30мА) система автоматически завершает измерения и плавно снижает анодное напряжение до нулевого уровня. Обеспечена возможность сохранения полученных результатов эксперимента в виде текстового файла.

В процессе испытаний разработанного оборудования обнаружена зависимость уровня измеряемого шума от скорости нарастания U_a . Установлено, что этот эффект не связан с катодом и экспериментальным диодом, а причиной являются собственные шумы входного каскада усилителя, изменяющиеся под действием токов перезарядки входной емкости. Эффект пропадает через несколько секунд после снижения скорости нарастания U_a до нуля. Его влияние нельзя учесть при обработке результатов, но можно задавать такую скорость нарастания напряжения, при которой этот эффект не приведет к заметному росту погрешности. В результате проведенных экспериментов определена оптимальная скорость нарастания, составляющая 6..15 мВ/с.

В главе 4 проводится анализ результатов комплексного импульсного и шумового зондирования катодов в экспериментальных диодах, на основании которого определяются шумовые характеристики и параметры для диагностики катодов.

Измерительный комплекс с модулем для шумового зондирования позволяет в реальном времени получать шумовые характеристики (рис.8), которые согласно физической модели содержат информацию об эмитирующей поверхности катода, однако непосредственное практическое их использование для диагностики затруднительно. Необходимо сначала исследовать характеристики, получаемые при различных режимах зондирования, провести их сравнительный анализ и обработку с целью определения параметров для диагностики. Для выполнения этих задач разработана многофункциональная программа обработки результатов шумового зондирования. Алгоритм программы включает считывание, обработку и сравнительный анализ результатов измерения шумовых характеристик, вычисление функции распределения слабоэмиттирующих участков F по плотностям тока эмиссии $F(j_s)$, а также вычисления параметра $S_{ш}$ в различных диапазонах j_s .

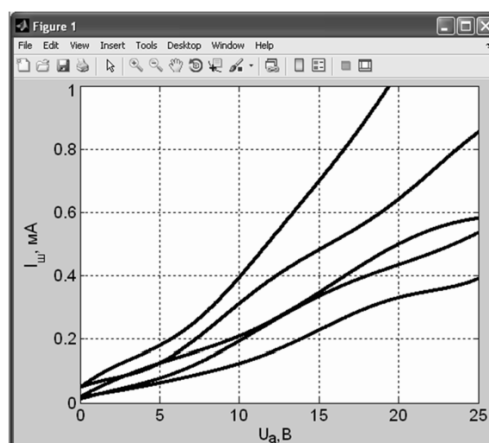


Рис.8 Вольт-шумовые характеристики экспериментальных диодов с МПК

Эффективность использования шумовых параметров для диагностики катодов оценивалась по результатам нахождения корреляционной связи между параметрами и степенью ускоренной деградации катодов после длительной наработки. Для этого перед началом испытаний производилась оценка эмиссионных свойств катодов с использованием модуля импульсного зондирования, а также вычисление различными способами значений $S_{ш}$. Ускорение деградации достигалось благодаря повышенной температуре катодов, длительность наработки ограничивалась временем, необходимым для достижения наихудшими катодами спада по эмиссии не менее, чем на 50%. Степень спада β определялась как отношение импульсных токов при максимальном анодном напряжении экспериментальных диодов соответственно после и до начала испытаний. Результаты проведенного корреляционного анализа $S_{ш}$ и β указывают на заметную связь этих параметров, причем степень связи зависит от диапазонов j_s , использованных при определении $S_{ш}$. Наилучший результат показан на рис.9, которому соответствует коэффициент корреляции более 0,8.

Установленная корреляционная связь подтверждает информативность шумовых характеристик и параметров для прогнозирования β катодов в процессе длительной наработки, что является основой для создания рабочих методик прогнозирования без испытаний на наработку.

Предложена последовательность проведения такого прогнозирования по обучающей выборке из большой партии однотипных катодов. Найденный доверительный интервал для оценки β по $S_{ш}$ составляет, например, для экспериментального диода с $S_{ш}(j_s=0,03..0,05 \text{ A/cm}^2) = 0,00449$ с надежностью 90%

$$\beta=0.739\pm0.219.$$

Установлено, что использование корреляционных связей, найденных по результатам более длительных испытаний на наработку, должно приводить к более достоверному прогнозированию деградации.

Заключение

Способы и средства оперативной диагностики больших партий современных эффективных термокатодов преимущественно основаны на определении их эмиссионных характеристик, и известно лишь небольшое число попыток связать их с флуктуационными шумами, создаваемыми катодами. Вместе с тем практическая диагностика по шумовым характеристикам нашла достаточно широкое применение для полупроводниковых активных элементов и структур, позволяя, в частности, оценивать содержание и характер дефектов, ведущих к сокращению времени безотказной работы. С учетом потенциально более высокой информативности шумов при диагностике диссертационная работа нацелена на формирование и исследование эффективности диагностических шумовых параметров, а также создание оперативных способов их определения.

Объектом изучения были однотипные металлопористые термокатоды с Os покрытием, помещенные в специально изготавливаемые экспериментальные приборы с диодной конструкцией.

Согласно поставленным в работе задачам был спроектирован и изготовлен на современной элементной базе автоматизированный диагностический комплекс на основе модуля импульсного зондирования и серийной универсальной системы сбора данных *National Instruments*. Это обеспечило возможность оперативного исследования условий проведения неразрушающего зондирования и измерения эмиссионных характеристик,

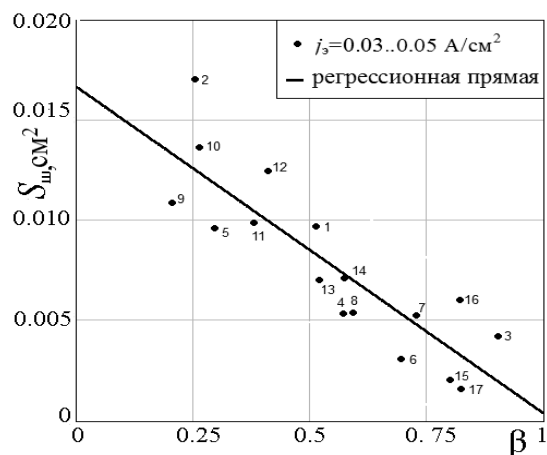


Рис.9 Корреляционная диаграмма параметров $S_{ш}(j_s=0,03..0,05 \text{ A/cm}^2)$ и β

предшествующих определению шумовых параметров и степени их информативности. Предусмотрена возможность модернизации комплекса и изменения его параметров при использовании для катодов и экспериментальных диодов различных типов и конструкций.

Из двух компонентов шумов – фликкерной и дробовой – предпочтение для диагностики отдано дробовой, учитывая существование физической модели, связывающей шумовые характеристики со слабоэмитирующими участками на эмитирующей поверхности, а также меньшие технические трудности при создании диагностического оборудования. Исходя из анализа шумовых характеристик катодов, найдены условия шумового зондирования, необходимые для формирования шумовых параметров – полосы частот и диапазона отбираемых токов, и разработана система автоматизированных измерений шумов на основе модуля шумового зондирования и серийной универсальной системы сбора данных *National Instruments*, включая управляющую компьютерную программу. Предусмотрена возможность изменения его параметров для адаптации к катодам различных типов и различным конструкциям экспериментальных диодов.

Создана многофункциональная программа обработки результатов шумового зондирования для нахождения шумовых характеристик и параметров – вольт-шумовой характеристики, функции распределения слабоэмитирующих участков по эмитирующей поверхности катодов, а также «эффективной шумовой площади». Установлена значимая корреляционная связь (с коэффициентом корреляции более 0,8) параметра «эффективная шумовая площадь» со степенью уменьшения импульсного эмиссионного тока после длительной работы, что служит основанием проведения диагностики катодов по результатам шумового зондирования.

Разработанное оборудование позволяет расширять возможности диагностики путем формирования новых шумовых характеристик и параметров, отличных от рассмотренных в работе, с последующим исследованием их информативности.

Полученные в работе результаты служат дополнительным подтверждением одного из главных выводов, сделанных по результатам анализа литературных источников – шумы, создаваемые термокатадами, должны являться неотъемлемой характеристикой качества как катодно-подогревательного узла, так и электровакуумного прибора в целом.

Список работ, опубликованный автором по теме диссертации

Основное содержание диссертации отражено в 3 печатных работах, включенных в перечень ВАК, и 4 тезисах конференций:

1. Воробьев М.Д., Омельченко А.О., Чубаров В.В., Шитов Е.М., Юдаев Д.Н. Разработка автоматизированного диагностического комплекса для термокатодов мощных электровакуумных приборов// Вестник Московского энергетического института, 2011, № 3. – С. 69 – 74

2. Воробьев М.Д., Чирков М.Н., Чубаров В.В., Шитов Е.М., Акимов П.И. Шумовые методы оценки эмиссионной однородности термокатодов для электровакуумных СВЧ-приборов// Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России, 2012, № 4. – С. 40 – 45

3. Смирнов В.А., Акимов П.И., Мельничук Г.В., Фрейдович И.А., Чудин В.Г., Воробьев М.Д., Чирков М.Н., Шитов Е.М., Чубаров В.В., Саблин Д.М., Макаров А.П., Пугнин В.И., Шинцова В.В., Юнаков А.Н. Применение плазменно-напыленных металлопористых катодов в мощных ЭВП и прогнозирование их долговечности в номинальных и форсированных режимах// Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России, 2012, № 4. – С. 36 – 40

4 М.Д. Воробьев, М.Н. Чирков, Е.М. Шитов Комплексная методика оценки эмиссионной однородности термокатодов// Тезисы конференции 44го Международного научно - методического семинара Флуктуационные и деградационные процессы в полупроводниковых приборах, Москва, НИУ «МЭИ», 2013. – С. 92 – 97

5. М.Д. Воробьев, М.Н. Чирков, Е.М. Шитов Оценка параметров дефектов термокатодов с использованием системы сбора данных NI ELVIS// Тезисы конференции 45го Международного научно - методического семинара Флуктуационные и деградационные процессы в полупроводниковых приборах, Москва, МЭИ 2014. – С. 53 – 58

6. Чубаров В. В., Шитов Е. М. Комплексная методика оценки качества эмиссионной поверхности термокатодов// тезисы восемнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, НИУ «МЭИ», 2012. – Т.1. – С. 229 – 230

7. Шитов Е.М. Прямой метод измерения дробового шума, создаваемого неоднородным термоэлектронным катодом// тезисы девятнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва НИУ «МЭИ», 2013. –Т.1.– С. 207

8. Шитов Е.М. Измерительная система для автоматизированного определения шумовых параметров термокатодов// Тезисы двадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва НИУ «МЭИ», 2014. – Т.1.– С. 195

Подписано в печать

Зак.

Тир.

П. л.

Полиграфический Центр ФГБОУ ВПО “НИУ “МЭИ”

Красноказарменная ул., д. 13