

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.382.333.3-022.532-032.3

Жамойть  
Александр Евгеньевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ВАКУУМНЫХ ТРИОДОВ ИЗ КРЕМНИЕВЫХ И УГЛЕРОДНЫХ  
НАНОТРУБОК**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
магистерской диссертации на соискание степени  
магистра технических наук

по специальности 1-39 80 02 «Радиотехника, в том числе системы и  
устройства радионавигации радиолокации и телевидения»

Научный руководитель  
канд. физ. мат. наук, доцент  
ДАНИЛЮК Александр Леонидович

Минск 2020

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развивается такое направление в электронике как вакуумная микроэлектроника. Широко исследуются возможности создания источников колебаний миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов и создание активных устройств, функционирующих в СВЧ диапазоне на частотах порядка  $10^{11} - 10^{12}$  Гц.

На сегодняшний момент наиболее часто используются приборы на основе термоэлектронной эмиссии. Однако они обладают рядом недостатков, таких как громоздкость, низкий КПД, большая масса, инерционность и большие габариты. Наиболее характерные преимущества автоэмиссионных катодов:

- высокая монохроматичность энергии электронов пучка;
- способность функционировать на частотах порядка  $10^{12}$  Гц;
- отсутствие источника накала, т.е. постоянная готовность к работе;
- большие по величине плотности токов эмиссии, что необходимо для создания приборов СВЧ большой мощности на основе острийных катодов;
- малые размеры катодов;
- малый разброс скоростей автоэлектронов, что приводит к значительному уменьшению шумов;
- радиационная стойкость;
- экспоненциально высокая крутизна вольт-амперных характеристик;
- безинерционность.

Совокупность данных достоинств открывает перспективы создания автоэмиссионных устройств, которые могут найти широкое применение в различных областях электроники. Наиболее перспективными направлениями на текущий момент считаются автоэмиссионные дисплеи, создание памяти с пикосекундным временем доступа для электронно-вычислительной техники, сверхбыстрые компьютеры нового поколения, электронно-зондовые системы, СВЧ диоды, генераторы и усилители СВЧ-колебаний, работающие на частотах до  $10^{12}$  Гц.

На сегодняшний день создан ряд успешно функционирующих прототипов микроэлектронных устройств, использующих явление автоэмиссии. Спектр подобных устройств достаточно широк – от средств визуального отображения информации до миниатюрных СВЧ приборов и генераторов излучения терагерцового диапазона. Существуют также прототипы логических миниатюрных устройств, использующих явление электронной эмиссии, тактильных сенсоров, электронно-лучевых приборов и т.д.

Технология изготовления, используемых в таких микроприборах эмиттеров, в настоящее время стремится к совместимости со стандартными технологическими процессами, которые используются в производстве интегральных схем, что позволяет интегрировать массивы эмиттеров с управляющей электроникой и, таким образом, получать законченные миниатюрные электронные компоненты, предназначенные для функционирования в составе компактных автоэмиссионных дисплеев или вакуумных СВЧ приборов нового поколения.

Однако существуют явления, ограничивающие применение автоэлектронной эмиссии. Основными из них являются: малая плотность токов, нестабильность тока эмиссии, обусловленная изменением геометрии катода вследствие непрерывной обратной ионной бомбардировки, адсорбцией и десорбцией молекул остаточных газов. Высокое тепловыделение, как следствие высокой плотности мощности. Все это приводит к недолговечности устройств вакуумной микроэлектроники и препятствующих широкому внедрению автоэмиссионных приборов.

Существует несколько способов решения данных проблем. Для того чтобы уменьшить влияние обратной ионной бомбардировки требуется улучшать вакуум в приборе, либо снижать анодное напряжение до такой величины, чтобы не происходила ионизация остаточного газа в приборе, либо выбрать материал катода, обладающего высокой радиационной стойкостью. В последние годы ведется поиск новых материалов и усовершенствование технологии получения острых катодов для длительной и стабильной работы приборов на их основе.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

В последние годы одним из новых и быстро развивающихся направлений в современной электронике является вакуумная микро- и нанoeлектроника. Широко исследуются возможности создания электронных компонентов, работающих в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне на основе полевых эмиссионных катодов. Развитие полевых эмиссионных приборов открывает перспективы создания устройств, способных найти широкое применение в различных областях электроники. В частности, это вакуумные интегральные микросхемы для микропроцессоров электронно-вычислительной техники, способных функционировать на частотах порядка  $10^{12}$  Гц. Это высокоскоростные системы передачи данных. Это память с пикосекундным временем доступа. Изучается возможность создания

приборов на основе полевых острых катодов с несколькими управляющими электродами, что делает актуальными схемотехнические решения, основанные на многоэлектродных электронных лампах.

Так же активно развивается вакуумная наноэлектроника, использующая наноструктуры с вакуумными промежутками. В таких наноструктурах применяются катоды с холодной эмиссией. Их преимущество заключается в отсутствии необходимости создавать вакуум путем откачки и нагревать катоды. К тому же в вакууме возможен перенос носителей заряда без существенного рассеяния и скорость переноса электронов существенно выше, чем в полупроводниках. Кроме того, вакуумные устройства более устойчивы, чем полупроводниковые приборы, к экстремальным условиям, например, для работы при повышенных температурах и воздействии различного рода излучений и радиации.

#### **Цель и задачи исследования.**

Целью диссертации является моделирование электрических характеристик вакуумных триодов.

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы следующие задачи:

- выполнить анализ эмиссионных свойств вертикально ориентированных углеродных нанотрубок;
- провести аналитические исследования квантовой интерференции в вакуумном нанотриоде;
- провести аналитические исследования твердотельного вакуумного планарного триода;
- выполнить моделирование электрических и статических характеристик вакуумного планарного триода.

**Объектом** исследования является твердотельный вакуумный планарный триод.

**Предметом** работы является методика моделирования электрических характеристик вакуумных триодов из кремниевых и углеродных нанотрубок.

#### **Область исследования.**

Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-39 80 02 «Радиотехника, в том числе системы и устройства радионавигации радиолокации и телевидения».

#### **Теоретическая и методологическая основа исследования**

Для получения результатов аналитических исследований рассматривалась конструкция вакуумного планарного нанотриода. Проводилось моделирование его статических характеристик. Расчеты

выполнялись в программном комплексе *MathCad*. Выполнен расчет анодных характеристик, крутизны и сопротивления предложенной конструкции вакуумного триода.

**Информационная база** исследования заключается в расчете электрических и статических характеристиках.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в построении зависимостей электрических характеристик от разности потенциалов анод-катод.

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

При приложении потенциалов в области  $V_g=5-11$  В,  $V_a=1-11$  В, значения тока в нанотриоде составляет 1-10 нА; для сеточной и анодной характеристик наблюдается монотонный рост тока с увеличением, как потенциала анода, так и потенциала сетки; величина крутизны лежит в области 0.5-4.5 нА/В и растет с ростом значений  $V_g$  и  $V_a$ . Значения внутреннего сопротивления составляет 2-27 ГОм, его величина падает с ростом значений  $V_g$  и  $V_a$ . Коэффициент усиления для данной конструкции составляет  $4\pm 0,003$ .

С помощью предложенной модели рассчитаны анодные и сеточные вольт-амперные характеристики твердотельной планарной вакуумной триодной структуры, из которых получены внутреннее сопротивление и крутизна. Величина крутизны составляет 1-10 мкА/В, значение коэффициента усиления составляет 0,26, а внутреннего сопротивления (10-50) кОм при изменении потенциала на управляющем электроде в пределах 0-20 В и анодного потенциала в пределах 15-25 В.

**Теоретическая значимость** диссертации заключается в том, что в ней предложены варианты моделирования и расчета электрических характеристик исходя из заданных параметров конструкции вакуумного триода.

**Практическая значимость** диссертации состоит в том, что на основе полученных результатов моделирования электрических характеристик был сделан вывод о специфике использования различных конструкций в радиотехнических цепях и схемах.

#### **Публикации**

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в одной опубликованной работе объемом 2,0 п.л.

#### **Структура и объем работы.**

Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и списка собственных публикаций соискателя.

Общий объем диссертации – 63 страницы. Работа содержит 36 рисунков. Библиографический список включает 54 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрены современные проблемы изготовления наноструктур с применением катодов с холодной эмиссией. Приведены наиболее характерные преимущества автоэмиссионных катодов.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об опубликованности результатов, а также, структура и объем диссертации.

В **первой главе** рассматриваются эмиссионные свойства вертикально ориентированных углеродных нанотрубок.

Во **второй главе** приведены основные области применения явления автоэлектронной эмиссии, а также проблемы при изготовлении приборов, использующие данный эффект.

В **третьей главе** рассматриваются основные свойства вакуумного нанотриода. Приведены основные модели описания работы триода и варианты конструкции.

В **четвертой главе** представлены результаты моделирования статических характеристик вакуумного нанотриода.

В **пятой главе** представлены результаты моделирования электрических характеристик твердотельного вакуумного планарного триода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе магистерской диссертации провел анализ статических и электрических параметров вакуумного триода. Проведенный анализ показал, что хорошая проводимость в сочетании с миниатюрными размерами делает нанотрубки уникальным источником автоэлектронной эмиссии. Использование нанотрубок в качестве автоэлектронных эмиттеров позволяет существенно улучшить рабочие характеристики приборов.

Результаты моделирования показали, что эмиссионные свойства УНТ проявляются при существенно более низких значениях приложенного напряжения по сравнению с традиционно используемыми автоэмиссионными катодами. Однако нанотрубки могут иметь различные электронные характеристики и в зависимости от структурных особенностей нанотрубки, могут вести себя как металл либо как полупроводник.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1] Жамойть А. Е. Статические характеристики вакуумного нанотриода // 56-я Научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск : БГУИР, 2020.

Библиотека БГУИР