

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

УДК 621.315.5

Кукуть
Юрий Михайлович

Планарно-торцевые полевые эмиссионные структуры для приборов и
устройств вакуумной микро- и нанoeлектроники

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-41 80 01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Научный руководитель
академик НАН РБ,
д-р.техн.наук, профессор
Лабунов Владимир Архипович

Минск 2019

Работа выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:	Лабунов Владимир Архипович, академик, доктор технических наук, профессор кафедры микро- и наноэлектроники, зав. НИЛ 4.6 «Интегрированные микро- и наносистемы» НИЧ «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Рецензент:	Хмыль Александр Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры электронной техники и технологии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «24» июня 2019 г. года в 9⁰⁰ часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г.Минск, ул. П. Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 114, тел.: 293-89-92, e-mail: kafme@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

В области вакуумной электроники наиболее часто применяются приборы, которые основаны на термоэлектронной эмиссии. Такие приборы имеют ряд недостатков: большие размеры и масса прибора, затраты энергии на накал термоэмиссионного катода, низкий КПД.

Альтернативой могут послужить приборы, основанные на явлении полевой эмиссии. Преимуществом таких приборов является отсутствие накала катодов, что, в свою очередь, позволяет использовать прибор незамедлительно; возможность миниатюризации.

В совокупности, все эти преимущества дают огромные перспективы использования приборов на основе полевой эмиссии в различных областях микро- и нанoeлектроники, таких как: электронно-зондовая микроскопия, полевая эмиссионная микроскопия, устройства СВЧ, микро- и наносенсоры, электронно-лучевые приборы.

Однако у полевой эмиссии есть недостатки. Ионная бомбардировка катода, сопутствующая процессу работы прибора вследствие не идеальности вакуума, с течением времени приводит к разрушению катода. Адсорбции и десорбции молекул остаточных газов приводят к изменению работы выхода материала. Эти эффекты снижают стабильность эмиссии.

В данный момент одной из главных задач является уменьшение влияния этих негативных эффектов.

Одним из вариантов решений является поиск материала и конструкции катода, который позволит увеличить стабильность эмиссионного тока и стойкость катода перед разрушающими эффектами. В данном направлении остается актуальным поиск топологий и структур на основе планарной технологии производства интегральных схем, обеспечивающей максимальные плотности эмиссионного тока при минимально возможных рабочих напряжениях.

В данной работе предложено несколько вариантов конструкций полевых эмиссионных структур.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трех глав и заключения, а также библиографического списка. Общий объем диссертации – 48 страниц. Работа содержит 1 таблицу, 38 рисунков. Библиографический список включает 43 наименования.

Цель диссертационной работы: Создание планарно-торцевых полевых эмиссионных структур различных конфигураций и исследование их эмиссионных характеристик.

Для достижения цели работы были поставлены следующие *задачи*:

- разработка топологии полевых эмиссионных структур;
- оптимизация топологии полевых эмиссионных структур;
- изготовление планарно-торцевых полевых эмиссионных структур;
- создание зондовой установки для измерения вольт-амперных характеристик полевых эмиссионных структур;
- измерение вольт-амперных характеристик полевых эмиссионных структур;
- анализ эмиссионных свойств планарно-торцевых полевых эмиссионных структур.

Объектом исследования являются планарно-торцевые полевые эмиссионные структуры.

Предметом исследования являются эмиссионные свойства планарно-торцевых полевых эмиссионных структур.

Основным *положением*, выносимым на защиту является:

Получены эмиссионные токи планарно-торцевых полевых эмиссионных структур: 70 мкА при $U=250$ В для острых структур, напряжение пробоя 260 В; 180 мкА при $U=350$ В для лезвийных структур использующих в качестве эмиссионного слоя молибден, напряжение пробоя 370 В; 400 мкА при $U=350$ В для лезвийных структур с дополнительным слоем графена, напряжение пробоя 370 В.

Личный вклад автора состоит в разработке технологии, изготовлении экспериментальных образцов и их исследовании. В ходе работы автор принимал участие в обсуждении полученных результатов, а также докладывался на отечественных конференциях

По материалам диссертации опубликовано и подготовлено к публикации 2 тезиса в сборниках докладов конференций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, а также, структура и объем диссертации.

Во **введении** рассмотрены перспективы исследований в области полевой эмиссии, определены основные проблемы и направления работы и представлено обоснование актуальности темы диссертации.

Первая глава представляет собой литературный обзор по теме диссертации. В нем изложена теория полевой эмиссии и продемонстрированы эмиссионные свойства структур и материалов, которые используют в полевой эмиссии.

Изложенный выше анализ литературных данных показал, что на сегодняшний день разработано и создано множество вариантов полевых эмиссионных структур. Однако ни одна из конструкций не может полностью удовлетворить требования для приборов и устройств вакуумной микро- и наноэлектроники. Нестабильность и недолговечность существующих полевых структур вызвана разрушающим действием ионной бомбардировки, интенсивной в высоковольтных электронных устройствах, работающих в техническом вакууме и разогревом эмиттеров при больших плотностях тока.

На основании изученных материалов было принято решение объединить несколько существующих конструкций для получения простой в производстве и воспроизводимой по эмиссионным параметрам структуры, которая обеспечит максимальные плотности эмиссионного тока при минимальных достижимых рабочих напряжениях.

Во **второй главе** изложена технология изготовления планарно-торцевых полевых эмиссионных структур.

Для получения готовых к использованию планарно-торцевых полевых эмиссионных структур были проведены следующие этапы:

- фотолитография;
- формирование электродов и изоляционной канавки;
- синтез и перенос графена;
- пережигание висящего над канавкой графена.

Этап фотолитографии являлся основополагающим, так как на данном этапе задается внешний вид эмитирующей поверхности (острия или лезвия) и расстояние катод-анод.

После формирования электродов с помощью плазмохимического травления и изоляционной канавки с помощью жидкостного селективного травления, полученная топологическая структура (острийная или лезвийная) пригодна для исследования эмиссионных характеристик, однако эмиссионные свойства данной структуры могут быть улучшены путем добавления дополнительных слоев состоящих из материалов, которые будут обладать улучшенными по сравнению с молибденом характеристиками (работа выхода, тугоплавкость, теплопроводность). В качестве материала зарекомендовали себя алатропные формы углерода: графит, углеродные нанотрубки и наиболее перспективной графен.

Образцы графена были синтезированы методом ХПО при атмосферном давлении.

Для переноса ХПО-графена на целевую подложку использовалась стандартная схема без использования полимера.

При переносе графен находится не только на молибдене, но и в области изолирующей канавки. Нахождение графена в данной области приводит к короткому замыканию между электродами. Для исследования эмиссионных свойств его требуется убрать.

Пережигание висящего графена проводилось в вакуумной камере с остаточным давлением $2,5 \cdot 10^{-4}$ Па. Пережигание проводилось с использованием блока питания Б5-78/6 при напряжении питания $U=25$ В и токе $I=2$ А.

Было разработано и создано три типа планарно-торцевых полевых эмиссионных структур:

1. Планарно-торцевые полевые острийные структуры. Радиус кривизны острия равен 50 нм;
2. Планарно-торцевые полевые лезвийные структуры.
3. Планарно-торцевые полевые лезвийные структуры с дополнительным слоем графена.

В **третьей главе** исследовались эмиссионные характеристики полученных ранее структур.

Вольт-амперная характеристика острийных эмиссионных структур схожа с лезвийными структурами, однако острийные структуры имеют меньшее пробивное напряжение: 260 В против 370 В у острийных структур.

Из-за сложности создания и требовательности к литографическому оборудованию, было невозможно добиться воспроизводимости однородных острий на большой площади. Упрощение конструкции и переход к лезвийным структурам позволил увеличить ток в 2,6 раза (с 70 до 180 мкА) из-за увеличения пробивного напряжения до 370 В.

Добавление слоя графена на лезвийные структуры позволило получить ток $I=400$ мкА при напряжении $U=350$ В. Ток 2,2 раза больше чем для лезвийных структур.

Во время эмиссии разрушение кромки электродов показывает существование зон локального перегрева, что и приводит к деградации структуры (рисунок 3.8). Таким образом, одним из возможных механизмов разрушения полевых эмиссионных катодов является разрушение вследствие тепловых перегрузок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были изготовлены и исследованы эмиссионные свойства трех типов структур: планарно-торцевые полевые острейные эмиссионные структуры, планарно-торцевые полевые лезвийные эмиссионные структуры, планарно-торцевые полевые лезвийные эмиссионные структуры с дополнительным слоем графена.

Были получены эмиссионные токи для структур:

- для острейных структур ток равен 70 мкА при напряжении 250 В;
- для лезвийных структур ток равен 180 мкА при напряжении 350 В;
- для лезвийных структур с дополнительным слоем графена ток равен 400 мкА при напряжении 350 В.

Было установлено, что во время эмиссии катоды разрушаются, одним из возможных механизмов разрушения полевых эмиссионных катодов является разрушение вследствие тепловых перегрузок.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1-А.] Кукуть, Ю. М. Метод получения субмикронных элементов в технологии лазерной бесшаблонной литографии / Ю. М. Кукуть // Радиотехника и электроника: материалы 54-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 23 — 27 апреля 2018 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. — Минск, 2018. — С. 153.

[2-А.] Кукуть, Ю. М. Исследование эмиссионных характеристик планарно-торцевых полевых структур / Ю. М. Кукуть // Радиотехника и электроника: материалы 55-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22 - 26 апреля 2019 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. — Минск, 2019. — С. 147.