



- разработка (актуализация) методов испытаний изделий МСТ;
- разработка предложений в программно-плановые документы Минобороны России и других федеральных органов исполнительной власти по созданию прорывных технических решений, инновационных технологий, образцов специальной техники, нормативных документов в части изделий МСТ и МЭМС.

Авторами проведен анализ проблематики применения отечественных микроэлектромеханических изделий в специализированных системах.

***Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ при выполнении проекта 16-19-00177 «Исследование и разработка интеллектуальных МЭМС-датчиков с функциями самокалибровки и автоматизированных испытательных комплексов»***

#### ***Литература***

1. Shalimov A., Timoshenkov S., Korobova N., Golovinskiy M., Timoshenkov A., Zuev E., Berezueva S., Kosolapov A. Comb structure analysis of the capacitive sensitive element in MEMS — accelerometer, Proceedings SPIE. Int. Soc. for Opt. Eng. January 2015, 9467, 94672W.
2. Belousov E., Kruglov Y., Timoshenkov A. Current Driver for MEMS Angular Sensor. 2015 Internet Technologies and Applications (ITA) Proceedings of the Sixth International Conference (ITA 15), pp. 349–351.

УДК 537.533.2

### **Вакуумный МЭМС-триод с кремниевым лезвийным автоэмиссионным катодом**

Грязнева Т. А.<sup>\*1</sup>, Демин Г. Д.<sup>2</sup>, Махиборода М. А.<sup>3</sup>, Дюжев Н. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

<sup>3</sup> ООО «Сенсор Микрон»

\* [gryazneva@ntc-nmst.ru](mailto:gryazneva@ntc-nmst.ru)

**Ключевые слова:** автоэмиссия, МЭМС, катод, вакуумная микроэлектроника.

#### ***Введение***

В настоящее время активно развивается новое направление — вакуумная микро- и нанoeлектроника [1, 2]. Основной идеей разработок является создание миниатюрных устройств, в основе работы которых лежит явление автоэлектронной эмиссии. Важно отметить, что появилась возможность создания сверхминиатюрных аналогов электровакуумных приборов. Несмотря на многочисленные теоретические и экспериментальные исследования на тему формирования автоэмиссионных катодов,

в настоящее время еще актуальной остается проблема создания стабильных катодов, способных обеспечивать высокие плотности эмиссионного тока. Основная трудность заключается в технологических особенностях применяемых материалов и сложностях воспроизведения геометрии структур. Основными достижениями по решению данных проблем являются совершенствование электровакуумных технологий и переход к приборам со сверхмалыми размерами, при этом межэлектродные расстояния имеют величины порядка нескольких микрометров, а радиусы кривизны эмитирующих острий или лезвий составляют 50–100 нм.

В работе проведено экспериментальное исследование автоэмиссионного лезвийного катода, изготовленного при помощи технологии фокусированного ионного пучка. Преимущество структуры вертикального типа состоит в малой емкости между электродами (как правило, меньшей, чем в латеральных структурах) за счет большей высоты эмиттера [1]. Лезвийный характер эмиттера позволяет значительно увеличить рабочую поверхность по сравнению с точечными источниками (структурами типа Спиндта [3]).

Используемая в эксперименте триодная конструкция позволяет эффективно управлять потоком электронов, эмитируемых из катода. Благодаря выбору лезвийного типа автокатода становится возможным получение высоких значений автоэмиссионного тока вследствие увеличения площади эмитирующей поверхности.

#### ***Методика эксперимента***

Целью исследования являлось изучение процессов возбуждения автоэлектронной эмиссии, управления эмиссионным током, а также исследования вопросов стабильности и долговечности данного типа эмиттеров.

План исследования автоэмиссионных катодов состоял из следующих пунктов:

1. Измерение геометрических параметров, выполненное с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ).
2. Проведение электрофизических измерений параметров автоэлектронной эмиссии во время работы образцов автоэмиссионных катодов.
3. Анализ характера изменений геометрических параметров на основании полученных ранее геометрических параметров.

#### ***Эксперимент***

Для отработки методики эксперимента были изготовлены тестовые образцы лезвийного автоэмиссионного катода. Процедура заострения выполнялась на двулучевой системе Quanta 3D FEG. Она представляет собой растровый электронный микроскоп компании FEI, оснащенный ионной колонной и двумя системами подачи газа (GIS).



Технология фокусированного ионного пучка (FIB), реализованная в данном приборе, позволяет проводить селективное ионное травление образца. При помощи программных функций можно задать любую необходимую форму травления на плоскости и задавать параметры наблюдения за процессом ионного травления в электронной колонне. Технология FIB позволяет формировать поперечные срезы на образце для исследования его структуры и наблюдения отдельных слоев в срезе.

В качестве изначального материала использовалась прямоугольная кремниевая балка размерами  $30 \times 100 \times 2$  мкм, закрепленная на основании. Образец устанавливался под наклоном  $60^\circ$  к ионной колонне, прецизионное ионное травление проводилось послойно, короткими итерациями (cleaning cross section) по всей ширине балки для гарантированного отслоения материала. Режим травления — 30 кэВ, ток и размер пучка регулировались поэтапно. В результате была получена структура катода в форме лезвия.

На рис. 1 показаны РЭМ-изображения сформированного лезвийного катода.

Для проведения исследований автоэлектронной эмиссии был создан стенд. В частности, стенд должен обеспечивать возможность проведения исследований тестовых образцов автоэмиссионного катода в целях определения такой их основной технической характеристики, как плотность эмиссионного тока. Для визуализации процесса было принято решение в качестве анода использовать катодолюминесцентный экран, что позволило точно знать, с какой области кристалла наблюдается автоэлектронная эмиссия. Экран был установлен горизонтально на фторопластовой подставке с круглым отверстием, вырезанным по диаметру люминофорного слоя. Подставка с экраном закреплена при помощи винта к боковой поверхности фторопластового столика. К нижней стороне столика крепится зонд с установленным на нем катодным кристаллом таким образом, что игла зонда оказывается точно под экраном. Далее при помощи микрометрического винта на зонде выставляется зазор между катодным кристаллом и люминофорной поверхностью экрана.

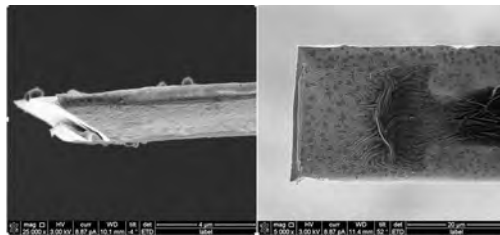


Рис. 1. РЭМ-изображения катода

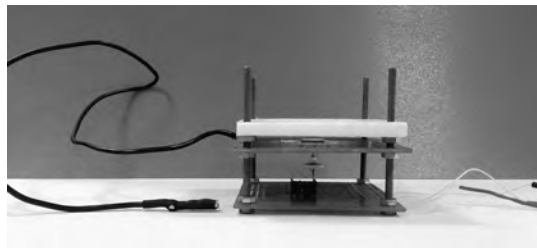


Рис. 2. Экспериментальная оснастка

Столик с установленными на нем электродами помещается в вакуумную камеру. Для соединения с электрическими герметическими выводами вакуумной камеры применялись провода МГТФ с фторопластовой изоляцией. Анодный провод припаивался оловянным припоем к внешнему контактному кольцу экрана, катодный провод прижимался одним из конструктивных винтов зонда. В вакуумной камере столик с электродами располагался таким образом, чтобы экран находился точно под иллюминатором в верхней стенке камеры, поскольку это дает возможность визуального наблюдения эффекта свечения на экране.

При проведении исследований использовалась специальная программа FlukeView Forms, позволяющая передавать данные с измерителя на компьютер и представлять результаты в виде таблицы или графика с помощью двух стандартных неизменяемых форм. В ходе испытаний на стенде для исследования тестовых образцов полевого нанокатода фиксировались следующие характеристики: катодно-сеточная вольт-амперная характеристика (ВАХ) и временная зависимость катодного тока эмиссии.

При проведении исследований в режиме статического отбора тока в триодной конфигурации на сетку и экран подавались постоянные напряжения от двух перестраиваемых источников высокого напряжения.

Минимальный уровень тока, регистрируемый в цепи, составил 2,8 мкА. Максимальные значения катодного тока, которые удалось зафиксировать, находились в районе 25–27 мкА. При этом среднее значение составило около 11,6 мкА, что соответствует плотности тока около  $6,5 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$ .

Катодная вольт-амперная характеристика (ВАХ), полученная на стенде, показана на рис. 3. Зависимость тока от напряжения имеет типичный экспоненциальный характер. Полученная экспериментальная линейная зависимость в настоящее время рассматривается как качественное подтверждение того, что исследуемой структуре присущ механизм автоэлектронной эмиссии [4].

На рис. 4 приведена типичная зависимость эмиссионного тока от времени работы катода.

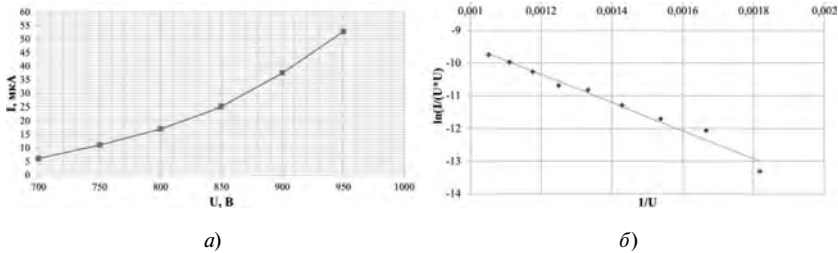


Рис. 3. а) ВАХ; б) ВАХ, построенная в координатах Фаулера – Нордгейма

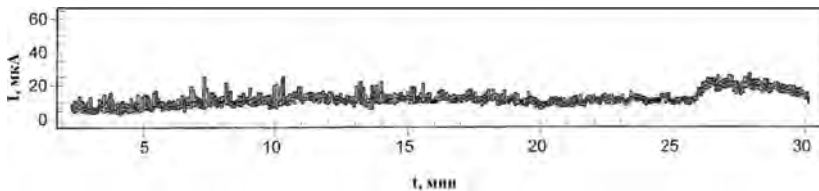


Рис. 4. Долговременная зависимость тока полевой эмиссии от времени

### Выводы

Разработана методика и создан стенд для проведения электрофизических измерений параметров автоэлектронной эмиссии. Проведены измерения автоэмиссионных характеристик тестовых образцов лезвийных автоэмиссионных катодов.

*Работа выполнена на оборудовании ЦКП «МСТ и ЭКБ» при поддержке Минобрнауки РФ, соглашение № 14.578.21.0188 (RFMEFI57816X0188)*

### Литература

1. Zhu W. Vacuum Microelectronics. — N.Y.: Wiley-Interscience, 2001. — 396 p.
2. Brodie I. Keynote address to the First International Vacuum Microelectronics Conference, June 1988: Pathways to vacuum microelectronic // IEEE Trans. Electron. Dev. 1989. V. 36, № 11. P. 2637–2640.
3. 4. The electron beam microdisplay of the high resolution based on field emission cathode unit. Djuzhev N.A., Makhboroda M.A., Gudkova S.A., Skvortsov V.E. // SID Conference Record of the International Display Research Conference. Sponsors: Russian Foundation of Basic Research, Russian Academy of Science, Eur. Off. Aerospace K and B of US AirForce, Society for Information Display, Russian JSC ChipExpo. 2007. С. 321–322.
4. Фурсей Г.Н. Автоэлектронная эмиссия // Соровский образовательный журнал. — 2000. — Т. 6. — № 8. — С. 96–103.