

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

**Труды XIII Международного
симпозиума**

11–14 марта 2019 г., Нижний Новгород

Том 1

Секции 1, 2, 4, 5

Нижний Новгород
Издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского
2019

Разработка микрофокусных рентгеновских трубок с использованием кремниевых автоэмиссионных катодных узлов, изготовленных методами МЭМС-технологии

Н.А. Дюжев¹, Г.Д. Демин^{1,*}, Н.И. Чхало^{2,§}, Н.Н. Салащенко², Н.А. Филиппов¹, С.Ю. Коротков¹, П.Ю. Глаголев¹, М.А. Махиборода¹

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ», пл. Шокина, 1, Москва, Зеленоград, 124498.

² Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

*demin@ntc-nmst.ru, §chkhalo@ipm.sci-nnov.ru

В настоящей работе обсуждается возможность реализации микрофокусных рентгеновских трубок с использованием кремниевых автоэмиссионных катодных узлов (АКУ) на базе МЭМС технологии. Проведен технологический цикл разработки элементов матрицы кремниевых АКУ. Построена физико-математическая модель полевой эмиссии с наноразмерного полупроводникового катода с учётом его разогрева проникающим электрическим полем, на основе которой предложена схема управления матрицей АКУ. Рассчитан характерный размер электронного пятна на тонкопленочной прострельной мишени в зависимости от параметров АКУ, и проведена последующая оптимизация материалов рентгенопрозрачной мембраны. Полученные результаты могут быть использованы при создании литографических систем нового поколения.

Введение

В настоящее время в различных областях науки и техники остро ощущается необходимость в миниатюрных рентгеновских источниках с низким энергопотреблением, возможностью сканирования рентгеновским лучом и вариациями частоты излучения, а также малым временем подготовки к работе. Подобные источники рентгеновского излучения востребованы для целого спектра практических применений, таких как медицинская техника, оборудование для рентгенофлуоресцентного анализа, системы безопасности и противодействия терроризму. В практических приложениях очень привлекательно и перспективно использование в рентгеновских источниках автоэмиссионного катода в качестве альтернативы традиционному накальному эмиттеру. Прибор на основе холодного катода обеспечивает лучшее быстродействие, более широкий температурный диапазон и общую миниатюризацию. Однако в контексте рентгеновских источников, главным преимуществом наноразмерного автоэлектронного эмиттера является узкий электронный пучок, позволяющий при достаточной интенсивности получать малые фокусные пятна на мишени. В зависимости от конкретного применения, в качестве источника электронов может быть использован как одиночный автоэмиссионный катод, так и массив таких эмиттеров, позволяющий достичь высоких суммарных значений катодного тока [1].

Еще одним шагом к миниатюризации рентгеновского источника является использование прострельной мишени, совмещенной с выходным рентгеновским окном. Такая мишень конструктивно состоит из тонкопленочного металлического анода на кремниевой мембране, в котором под воздействием электронного пучка формируется рентгеновское излучение, и может быть реализована с использованием технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), что снижает себестоимость и повышает технологичность изготовления рентгеновских окон. Для задач рентгеновской литографии особенно привлекательной является идея создания массива микрофокусных рентгеновских трубок (МРТ) на основе матрицы автоэмиссионных катодных узлов, каждый из которых состоит из острейного кремниевого эмиттера, управляемого шиной сеточного электрода [2, 3]. Непосредственная практическая реализация такой концепции требует как серьезной технологической проработки конструкции матрицы АКУ на базе МЭМС технологии, так и электрической схемы управления по включению каждого элемента матрицы в качестве единичного пикселя для создания топологического рисунка. В данной работе описаны как теоретические, так и практические результаты, полученные нашей группой в направлении разработки микрофокусных рентгеновских трубок с применением МЭМС технологии формирования кремниевых АКУ.

Массив МРТ на основе матрицы АКУ

На рисунке 1 представлено схематическое изображение массива МРТ с применением матрицы из АКУ (МАК).

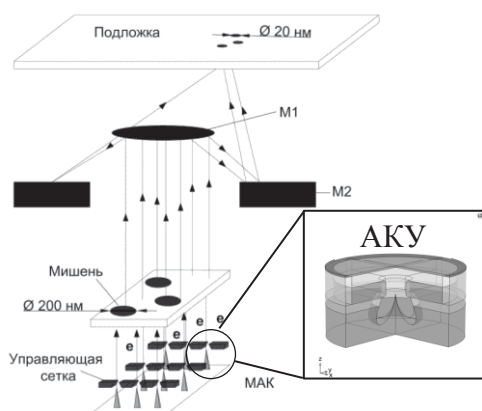


Рис. 1. Схематическое изображение массива МРТ на основе управляемой матрицы АКУ

Маршрут создания матрицы АКУ

На рисунке 2 приведены РЭМ фотографии полученных в результате технологических операций матрицы наноразмерных кремниевых острий с нанометровым радиусом скругления на вершине и АКУ на их основе с управляющей сеточной шиной.

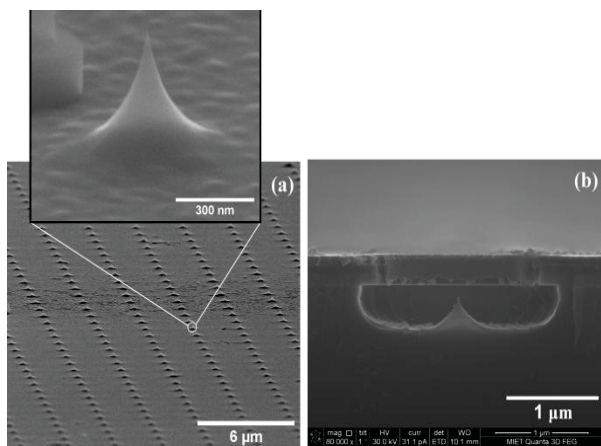


Рис. 2. РЭМ изображение (а) матрицы кремниевых автоэмиссионных катодов и (б) АКУ на их основе

Матрицы наноразмерных острийных автокатодов изготавливались следующим образом: легированные фосфором (КЭФ) кремниевые пластины с ориентацией (100) и диаметром 150 мм окислялись в кислороде с парами воды (толщина SiO_2 0.3 мкм), затем на них осаждался слой Si_3N_4 в качестве маски толщиной 0.1 мкм, после чего проводилась фотоли-

тография для формирования Т-образных столбиков в качестве заготовок для кремниевых нанострий. Профиль острия формировался с использованием плазмохимического травления в смеси SF_6 и O_2 с коэффициентом анизотропии 2.5. Процедура окисления катода проводилась в сухом кислороде, после чего SiO_2 стравливался вместе со слоем маски.

Схема управления матрицей АКУ

Была разработана схематическая и топологическая библиотеки элементов, необходимых для управления матрицей АКУ. Таблица 1 иллюстрирует схему переключения элемента i - j матрицы АКУ, где вариация напряжения на i -ой шинной сеточного электрода с 0 до 15 В включает отдельный i - j элемент АКУ в составе матрицы при напряжении на j -ой катодной шине 30 В, в то время как на остальных катодных шинах напряжение равно -30 В.

Таблица 1. Схема переключения состояния элементов матрицы АКУ (при напряжении на мишени 2кВ).

| Состояние i - j элемента матрицы АКУ | выкл | вкл |
|--|------|-----|
| Выбранная i -ая сеточная шина (В) | 0 | 15 |
| Выбранная j -ая катодная шина (В) | 30 | |
| Остальные сеточные шины (В) | 0 | |
| Остальные катодные шины (В) | 30 | -30 |

Характерный размер пятна на мишени составляет порядка 2 мкм для соответствующей технологии геометрии АКУ, а рентгенопрозрачная мембрана выбрана из слоев SiO_2 и Si_3N_4 , что обеспечивает ее хорошие механические и тепловые свойства.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект № 14.578.21.0250, RFMEFI57817X0250) с использованием оборудования ЦКП «МСТ и ЭКБ» МИЭТ.

Литература

- Guerrera S.A. and Akinwande A.I., *Nanotechnology*, V. 27, 295302 (2016).
- G.D. Demin *et al.* // *J. Vac. Sci. Technol. B*, V. 37 (2), in press (2019).
- Djuzhev N.A. *et al.*, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, V. 45, 1-5 (2018).