



РЕНТГЕНОВСКИЙ ИСТОЧНИК, ИЗГОТОВЛЕННЫЙ ПО МЭМС-ТЕХНОЛОГИИ

THE X-RAY SOURCE BASED ON MEMS-TECHNOLOGY

УДК 621.386

ДЮЖЕВ НИКОЛАЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

djuzhev@unicm.ru

DJUZHEV NIKOLAY A.

djuzhev@unicm.ru

МАХИБОРОДА МАКСИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ

m.makhiboroda@gmail.com

MAKHIBORODA MAXIM A.

m.makhiboroda@gmail.com

ПРЕОБРАЖЕНСКИЙ РОМАН ЮРЬЕВИЧ

cogtepsum@gmail.com

PREOBRAZHENSKY ROMAN YU.

cogtepsum@gmail.com

ДЕМИН ГЛЕБ ДМИТРИЕВИЧ

glebmitrich@yandex.ru

DEMIN GLEB D.

glebmitrich@yandex.ru

ГУСЕВ ЕВГЕНИЙ ЭДУАРДОВИЧ

bubbledouble@mail.ru

GUSEV EVGENEY E.

bubbledouble@mail.ru

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»
НТЦ «НМСТ» МИЭТ

National Research University of Electronic Technology
“NMST” STC MIET

Предложена концептуальная модель источника рентгеновского излучения на основе автоэмиссионного катода. Методами численного моделирования показано, что предложенная конструкция способна генерировать ток эмиссии существенной величины, позволяет получить малое фокусное пятно на мишени. Определены параметры мишеней, обеспечивающие наибольшую интенсивность рентгеновского излучения.

Ключевые слова: рентгеновский источник; автоэлектронная эмиссия; микроэлектромеханические системы; компьютерное моделирование.

The paper proposes a concept of an X-ray source based on field emission cathode and shot target combined with an X-ray window. It is shown by numeric simulation that the device is capable of generating a sufficient emission current, providing a small electron beam focus spot and high resolution. Additionally, optimal target characteristics have been obtained to ensure maximal X-ray emission intensity. The silicon membrane ability to be used as an X-ray transparent window has been shown.

Keywords: X-ray source; field emission; microelectromechanical systems; computer modeling.

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. Источники рентгеновского излучения могут найти применение как в передовом аналитическом оборудовании, так и в технологии создания наноструктур и новых материалов.

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 меньшее энергопотребление, лучшее быстродействие и меньшее время подготовки к работе, более широкий температурный диапазон и общую миниатюризацию. Однако в контексте рентгеновских

источников, пожалуй, 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, работающий совместно с электронно-оптической системой и обеспечивающий фокусное пятно субмикронных размеров, так и массив таких эмиттеров, позволяющий достичь высоких суммарных значений катодного тока.

Еще одним шагом к миниатюризации рентгеновского источника является использование прострельной мишени, совмещенной с выходным рентгеновским окном. Такая мишень конструктивно состоит из тонкопленочного металлического анода, в котором под воздействием электронного пучка формируется рентгеновское излучение. Пленка нанесена на внутреннюю поверхность окна из прозрачного для рентгена материала, обеспечивающего вывод излучения из прибора. В настоящее время основным материалом для изготовления рентгеновских окон являются бериллиевые пластины толщиной около 150 мкм. Однако высокая стоимость и низкая технологичность процесса изготовления

бериллиевых рентгеновских окон побуждают к поиску альтернативных вариантов. Такой альтернативой может стать прострельная мишень, сформированная на кремниевой мембране с использованием технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС).

В настоящей работе представлена концепция рентгеновского источника, состоящего из массива автоэмиссионных катодных узлов, который отделен вакуумным зазором от тонкопленочной металлической прострельной мишени, сформированной на кремниевой мембране и выполняющей функцию рентгеновского окна. Разработаны математические модели наноразмерного катода, тонкопленочной прострельной мишени и кремниевого рентгеновского окна. Проведено моделирование с использованием программного пакета междисциплинарного анализа COMSOL Multiphysics [2] и получены результаты, важные для дальнейшего развития этой перспективной разработки.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РЕНТГЕНОВСКОГО ИСТОЧНИКА

В предлагаемой концепции рентгеновского источника роль катода выполняет массив автоэлектронных эмиттеров острейного типа с радиусом закругления при вершине порядка нескольких нанометров. Общий для всего массива управляющий электрод изготовлен в виде тонкой металлической пленки с самосовмещенными отверстиями напротив каждого эмиттера. Управляющий электрод изолирован от катодов диэлектрическим слоем. Подобный массив автоэмиссионных узлов технологически реализуем на основе кремния с использованием технологии МЭМС. Рентгеновское окно представляет собой квадратную кремниевую мембрану, сформированную на пластине методом анизотропного травления, длина стороны 2 мм. В качестве прострельной мишени использована пленка металла, нанесенная на внутреннюю поверхность мембраны. Схематически предлагаемая модель изображена на рис. 1.

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАНОКАТОДА

Одним из основных элементов рентгеновского источника является нанокатод, изготовленный в форме иглы с радиусом закругления острия 10 нм. Важнейшим требованием к нанокатоду является достаточная величина тока эмиссии, генерируемого под действием внешнего электрического поля. Кроме того, линейные размеры и конфигурация нанокатода должны обеспечивать возможность формирования массива таких структур в целях увеличения суммарного тока эмиссии в устройстве (в качестве целевого значения принята величина 75 мкА). Также важными характеристиками нанокатода являются характер траекторий эмитированных электронов и диаметр результирующего электронного пучка. Эти параметры устройства сильно зависят от конфигурации электрического поля именно в области острия нанокатода.

Напряжения, приложенные к системе, варьируются следующим образом: разность потенциалов на вытягивающем электроде изменяется в пределах 100–150 В, на прострельной мишени — в пределах 0–40 кВ. Моделирование распределения электрического поля в системе проводилось с использованием программного пакета междисциплинарного анализа COMSOL Multiphysics [2]. Моделирование показало, что заметный ток возникает при напряжении на вытягивающем электроде 100 В, а при 150 В достигает значений порядка 90 нА. Следовательно, для обеспечения суммарного тока эмиссии 75 мкА необходим массив из примерно 850 нанокатодов.

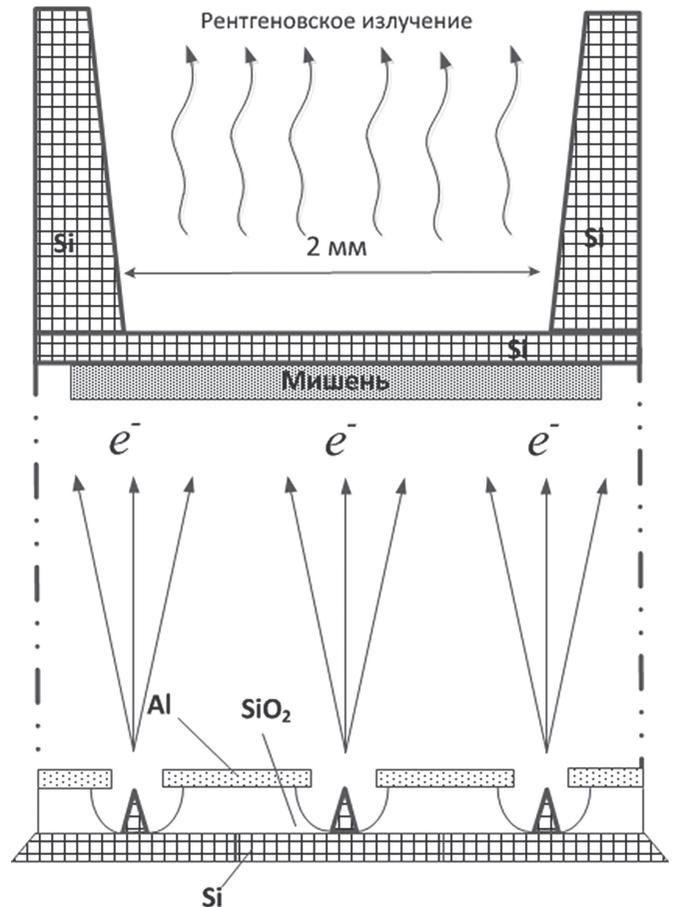


Рис. 1. Концептуальная модель рентгеновского источника, изготовленного по технологии МЭМС

Расчет траекторий эмитированных электронов также проводили с использованием пакета COMSOL Multiphysics. Плотность начального распределения частиц по поверхности катода задается пропорционально плотности тока эмиссии, рассчитанной выше. Радиус пятна электронов, попавших на анодную мишень из массива эмиттеров, составил приблизительно 300 мкм.

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОСТРЕЛЬНОЙ МИШЕНИ

Прострельная мишень рентгеновского узла состоит из металлической пленки, служащей генератором излучения, и прозрачной для рентгена кремниевой мембраны, на которой закреплена мишень. Кремниевая мембрана должна выдерживать разность давлений минимум 1 атм. Соответственно, необходимо определить толщины металлических пленок, необходимые для генерации излучения с обратной стороны мишени, и толщину кремниевой мембраны, обеспечивающую ее прозрачность для рентгена и высокую механическую прочность.

В качестве материала мишени были выбраны W ($Z = 74$) и Mo ($Z = 42$). Методом Монте-Карло с использованием программы Win X-Ray [3] были рассчитаны траектории электронов, проникающих в материал мишени, при энергии пучка, равной 40 кэВ. При этой энергии W генерирует излучение с переходами $L\alpha$, $L\beta_1$, $L\beta_2$, $L\gamma$, $M\alpha$, а Mo — излучение $K\alpha_1$, $K\alpha_2$, $K\beta_1$, $K\beta_2$, $L\alpha$, $L\beta_1$, $L\beta_2$, $L\gamma$. Также с помощью программы Win X-Ray были вычислены значения характеристической интенсивности $\phi(\rho z)$ для различных толщин пленок мишени.



Было определено, что кремниевая мембрана толщиной 1 мкм обеспечивает не только достаточную прозрачность для рентгеновского излучения, генерируемого мишенями практически всех типов, но и необходимую механическую прочность. Из [4] следует, что значение коэффициента прозрачности более 0,5 для кремниевой мембраны толщиной 1 мкм сохраняется в диапазоне длин волн рентгеновского излучения до 1,6 нм.

ВЫВОДЫ

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

- представленная концепция рентгеновского источника, состоящего из массива автоэмиссионных катодных узлов, который отделен вакуумным зазором от тонкопленочной металлической прострельной мишени, сформированной на кремниевой мембране и выполняющей функцию рентгеновского окна;
- разработанные математические модели наноразмерного катода, тонкопленочной прострельной мишени и кремниевого рентгеновского окна;
- уровень тока эмиссии 75 мкА достигается при использовании массива из 850 нанокатодов. При этом напряжение на управляющем электроде не превышает 150 В, а диаметр фокусного пятна на мишени, расположенной на расстоянии 5 мм, — не более 500 мкм;
- кремниевая мембрана толщиной 1 мкм является прозрачной для рентгеновского излучения в диапазоне длин волн до 1,6 нм и обеспечивает достаточную механическую прочность при перепаде давлений порядка 2 атм.

Представленная концептуальная модель является существенно упрощенной и не учитывает ряд важных физических процессов, прежде всего разогрев мишени и отвод тепла мембраной. В то же время именно использование автоэмиссионных

катодов открывает возможность работы рентгеновского источника в импульсном режиме, что в комбинации с малым размером фокусного пятна нивелирует процесс разогрева мишени, делая его не столь критичным. Тем не менее при дальнейшем развитии модели будет уделено внимание расчету тепловых процессов как в области автокатодов, так и в области рентгеновского окна. Еще одним направлением усовершенствования концепции станет внедрение электронной оптики для фокусировки и управления электронным пучком.

Комбинация автоэмиссионного катода как источника узкого электронного пучка, электронной оптики и прострельной мишени, совмещенной с кремниевым рентгеновским окном, открывает возможность создания нового класса приборов — сканирующих, а также мультиспектральных микрофокусных рентгеновских источников.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП МСТИ ЭКБ МИЭТ при поддержке Минобрнауки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (ГК № 14.578.21.0001, уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57814X0001)

ЛИТЕРАТУРА

1. Фурсей Г. Н. Автоэлектронная эмиссия // Соросовский образовательный журн. — 2000. — Т. 6. — № 11. — С. 96.
2. URL: <http://www.comsol.com/>.
3. Demers H., Horny P., Gauvin R., Lifshin E. Microscopy and Microanalysis, 2002. — V. 8 (S02). — P. 1498.
4. Van Bokhoven J. A., Lamberti C. X-Ray Absorption and X-Ray Emission Spectroscopy: Theory and Applications // John Wiley & Sons. — 2016. — P. 109.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



НАНОКОМПОЗИТЫ В РЕНТГЕНОВСКОЙ ТЕХНИКЕ

Алексеев С. В., Таубин М. Л.,
Ясколко А. А.

М: ТЕХНОСФЕРА, 2014. — 204 с.
ISBN 978-5-94836-379-0

Цена 1090 руб.

В книге рассмотрены физические принципы генерации рентгеновского излучения при взаимодействии пучка электронов с поверхностью металла. Обсуждается принципиальная возможность снижения температуры эксплуатации рентгеновских систем путем использования углеродных нанотрубок для эмиттеров и повышения эксплуатационных характеристик рентгеновских трубок с помощью использования моно- и наноструктурных материалов. Представлено математическое моделирование структурной стабильности наноматериалов с использованием методов механики сплошной среды. Затронуты технологические аспекты получения наноструктурных материалов применительно к условиям работы рентгеновских трубок. Даны практические рекомендации по изменению конструктивной схемы существующих рентгеновских источников за счет использования наноматериалов. Содержание монографии представляет несомненный интерес для специалистов в приграничной области между нанотехнологией и рентгеновской техникой. Студенты, аспиранты и преподаватели соответствующих дисциплин могут воспользоваться конкретными научными результатами, а также методическим подходом при решении практических задач.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ (495) 234-0110; 📠 (495) 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru