

# **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

# Эффективность генерации характеристического излучения Ве-содержащих мишеней

С.А. Гарахин<sup>1</sup>, А.Я. Лопатин<sup>1</sup>, М.С. Михайленко<sup>1</sup>, А.Е. Пестов<sup>1,\*</sup>, Р.С. Плешков<sup>1</sup>,  
Н.И. Чхало<sup>1</sup>, Н.Н. Салащенко<sup>1</sup>, Г.Д. Дёмин<sup>2</sup>, Н.А. Дюжев<sup>2</sup>, М.А. Махиборода<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 607680.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498, г. Зеленоград, Россия

\*aepestov@ipm.sci-nnov.ru

Экспериментально изучены тонкопленочные мишени для «прострельной» рентгеновской трубки ЭУФ диапазона длин волн на основе Ве. Изучались: однокомпонентная мишень (бериллиевая пленка толщиной 100 и 300 нм), а также многослойная двухкомпонентная мишень (структура Zr/Ве, общая толщина 200 нм, толщины индивидуальных пленок: 1.  $d_{Zr}=2.5$  нм,  $d_{Ве}=2.5$  нм; 2.  $d_{Zr}=1.25$  нм,  $d_{Ве}=3.75$  нм, число пар слоев  $N=20$ ). Максимальный коэффициент конверсии энергии электронов в энергию характеристической линии Ве  $K\alpha$  ( $\lambda=11.4$  нм) в телесный угол  $4\pi$  был получен для пленки Ве толщиной  $d_{Ве} = 100$  нм и энергии электронов  $E_e = 2,25$  кэВ и составил  $CE=1,1 \times 10^{-4}$ , при этом пленка выдержала длительные тепловые нагрузки при плотности мощности на мишени порядка  $0,5$  Вт/см<sup>2</sup>, что согласно оценке соответствует температуре не менее  $450^\circ\text{C}$ .

## Введение

Проекционная фотолиитография (ПФ) является ключевой технологией микро(нано)электроники, которая определяет предельные топологические нормы микросхем. Наиболее сложными и дорогостоящими элементами инфраструктуры ПФ являются маски. Набор масок только при производстве одного чипа может стоить до нескольких миллионов долларов. Поэтому из-за высокой стоимости оборудования, дороговизны масок, сложной и дорогостоящей инфраструктуры ПФ становится конкурентоспособной только при массовом производстве, в то время как рынок мелко- и средне-серийного производства оказывается не охвачен. Поэтому крайне актуальным является поиск новых инструментов для нанолитографии. В [1] нами предложен новый подход – безмасочная рентгеновская литография на основе интегральной схемы микрофокусных рентгеновских трубок с «прострельной» тонкопленочной мишенью (МФРТ). В этом подходе источник рентгеновского излучения и маска совмещены в одном устройстве, что существенно упрощает рентгенооптическую схему. В [2] приводится оценка ожидаемой производительности нанолитографа. В данной работе проводится изучение эффективности излучения рентгеновской трубки с бериллиевой мишенью в «прострельной» геометрии и приводятся результаты измерений коэффициента конверсии (CE) энергии электронов в характеристическую линию Ве  $K\alpha$  ( $\lambda=11.4$  нм).

## Результаты

Измерения проводились на приборе [3], рентгенооптическая схема которого представлена на рис. 1.

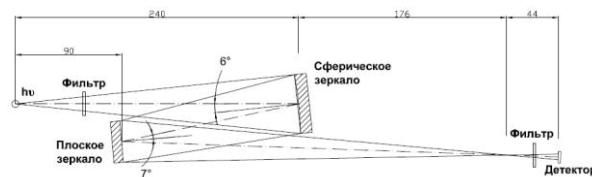


Рис. 1. Рентгенооптическая схема стенда измерения интенсивности излучения МФРТ

Спектральная зависимость пропускания зеркал монохроматора и сравнение ее с линией бериллия представлена на рис.2. Спектральная полоса пропускания монохроматора составляет  $\Delta\lambda_m=0,28$  от интеграла под кривой излучения характеристической линии бериллия.

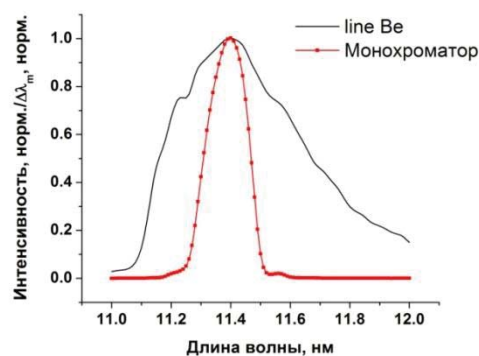


Рис. 2. (символы) спектральная полоса пропускания монохроматора; (сплошная) Ве  $K\alpha$  ( $\lambda=11,4$  нм) линия

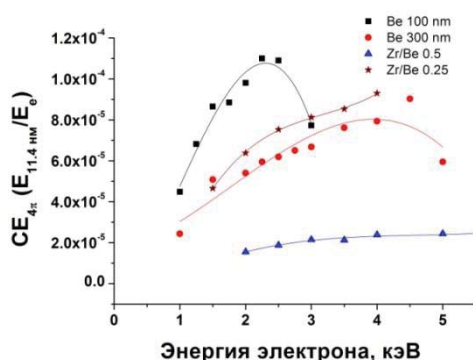
Исследовались тонкопленочные мишени двух типов: однокомпонентная мишень (Ве, толщина  $d=100$  и  $300$  нм) и многослойная двухкомпонентная мишень (Zr/Ве, общая толщина  $d=200$  нм, толщины индивидуальных пленок: 1.  $d_{Zr}=2.5$  нм,  $d_{Be}=2.5$  нм; 2.  $d_{Zr}=1.25$  нм,  $d_{Be}=3.75$  нм, число пар слоев  $N=20$ ). Выбор циркония в качестве пары для основного излучающего материала (Ве) обусловлен несколькими причинами. Первое, цирконий – один из самых прозрачных (мнимая часть диэлектрической проницаемости мала) в окрестности длины волны  $\lambda=11,4$  нм [4]. Второе, пленки на основе циркония обладают хорошей пластичностью и высокой термической стойкостью [5]. Расчет коэффициента конверсии энергии электронного пучка в энергию характеристической линии *Ве К $\alpha$*  ( $\lambda=11,4$  нм) в телесный угол  $4\pi$  осуществлялся по формуле.

$$CE_{2\pi} = \frac{P_{ph}}{P_e} \cdot \frac{4\pi}{\Omega_m}, \quad (\text{ф1})$$

где  $P_{ph}$  – мощность фотонов, вылетевших из мишени в телесный угол монохроматора  $\Omega_m=3,4 \times 10^{-2}$  страд;  $P_e$  – мощность электронного пучка.

$$P_{ph} = \frac{I_d}{S_d \cdot T_d \cdot T_m \cdot R_m}, \quad (\text{ф2})$$

где  $I_d$  – ток детектора и  $S_d[\lambda = 11,4 \text{ нм}] = 0,229 \text{ A/Bm}$  – чувствительность детектора [6];  $T_m$  и  $T_d$  – коэффициенты пропускания фильтров, на входе монохроматора и детектора;  $R_m$  – спектральная полоса пропускания монохроматора. Зависимости СЕ в телесный угол  $4\pi$  для тонкопленочных «протрельных» мишеней из Ве и Zr/Ве представлены на рис.3.



**Рис. 3.** СЕ в *Ве К $\alpha$*  ( $\lambda=11,4$  нм) и телесный угол  $4\pi$  для Ве мишеней ( $d=100$ , и  $300$  нм) и многослойной структуры Zr/Ве ( $d=200$ ,  $\beta=0,5$  и  $\beta=0,25$ )

Максимальное значение СЕ для пленки толщиной  $d=100$  нм и  $U_e=2,25$  кВ в излучение *Ве К $\alpha$*  линии

( $\lambda=11,4$  нм) в  $\Omega=4\pi$ , составил  $CE=1,1 \times 10^{-4}$ , что по оценке [1] должно обеспечить производительность 0.1 пластина диаметром 300 мм/час.

Изучение тепловой стойкости тонкопленочных мишеней производилась путем определения предельной тепловой нагрузки, которая не приводит к механическому разрушению. Мощность, переданная мишени – произведение энергии электронов на ток, протекающий через резистор, замыкающий мишень на “землю”.

**Таблица 1.** Предельная плотность мощности.

Материал	Ве 100	Ве 300	Zr/Be ( $\beta=0.5$ )	Zr/Be ( $\beta=0.25$ )
$J_{\text{предел}}, \text{Вт/см}^2$	0.56	3.0	9.4	10.7
$T_{\text{предел}}, \text{°C}$	490	900	1280	1330

Представленные данные показывают, что с ростом толщины пленки происходит рост предельной плотности мощности, которую может выдержать мишень. Добавление в структуру пластифицирующую прослойку из Zr позволяет поднять это значение почти на порядок. Предельная температура практически во всех случаях превышает  $500^\circ\text{C}$  (рабочая температура мишени чипа МФРТ не будет превышать  $200^\circ\text{C}$  за счет теплоотвода через чип на систему активного охлаждения).

Таким образом, в работе показано, что Ве-пленка толщиной 100 нм может быть использована в качестве «протрельной» мишени для чипа МФРТ будущего безмасочного нанолитографа.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП МСТИЭЖБ, при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Соглашения № 14.578.21.0250 (RFMEFI57817X0250).

## Литература

1. Н.А. Дюжев, Г.Д. Демин, Т.А. Грязнева *и др.* // КСФ ФИАН, №12, с.56-63 (2017).
2. Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало, Н.А. Дюжев // Поверхность, №10, с.10-20 (2018).
3. М.С. Бибишкин, И.Г. Забродин, И.А. Каськов *и др.* // Известия РАН. Сер.физ., 68(4) с.560–564 (2004).
4. [http://henke.lbl.gov/optical\\_constants/](http://henke.lbl.gov/optical_constants/)
5. M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, S.A. Gusev *et al.* // Proc. SPIE, 7025, 702502 (2008).
6. П.Н. Аруев, М.М. Барышева, Б.Я. Бер *и др.* // Квантовая Электроника, 42(10), 943 (2012).