

УДК 621.385.833.2

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕРХВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА СВЭМ-1 ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ

**А. М. Филачев**

Государственный научный центр "Орион", Москва, Россия

**Б. Н. Васичев**

Московский институт электроники и математики (Технический университет), Москва, Россия

**И. С. Макарова, Л. Б. Розенфельд, Е. Е. Черно́ва-Столярова**

Государственное предприятие "НИИ электронной и ионной оптики", Москва, Россия

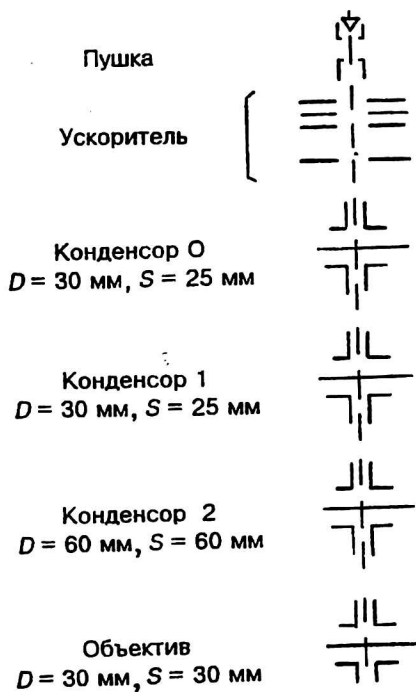
*Рассмотрена возможность применения СВЭМ-1 для внесения радиационных дефектов в исследуемые материалы. Проведен расчет режимов работы осветительной системы СВЭМ-1 (ускоряющее напряжение  $\leq 2$  МэВ). Рассмотрены два варианта воздействия на объект: облучение сфокусированным электронным пучком или облучение рентгеновским излучением, возбуждаемым этим электронным пучком. Показано, что в СВЭМ-1 можно получить плотность мощности дозы до  $2,5 \cdot 10^7$  Гр/(мм<sup>2</sup>·с). При этом удельная плотность мощности рентгеновского излучения, создаваемого электронным пучком, может достигать  $3,3 \cdot 10^6$  Вт/мм<sup>2</sup>.*

Известно, что при облучении материала ионизирующим излучением, например электронами или фотонами рентгеновского излучения, в нем зарождаются и развиваются радиационные дефекты. Эффективность образования радиационных дефектов зависит от типа излучения, плотности потока и его энергии. Для исследования влияния облучения ионизирующими излучениями на свойства материалов обычно используются потоки нейтронов или электронов или синхротронное излучение.

Целью настоящей работы является анализ возможности использования сверхвысоковольтного электронного микроскопа типа СВЭМ-1, работающего с ускоряющим напряжением до 2 МэВ, для внесения в различные материалы радиационных дефектов при дозированной локальной высокой плотности облучения пучками релятивистских электронов или рентгеновским излучением, а также для проведения электронно-микроскопического исследования облученных материалов *in situ*. При этом для формирования рентгеновского излучения в промежутке между осветительной системой и объектом может вводиться тонкий антикатод из материала с большим порядковым номером. Исследуемые образцы для облучения могут размещаться в различных местах осветительной системы (ОС) колонны СВЭМ-1, для чего режим работы ее основных электронно-оптических элементов изменяется по сравнению со штатным режимом работы электронного микроскопа. Поэтому был проведен расчет новых рабочих режимов работы ОС СВЭМ-1, обеспечивающих требуемую плотность потоков электронов, и упор новых электронно-оптических элементов, необходимых для модернизации микроскопа.

Осветитель сверхвысоковольтного электронного микроскопа СВЭМ-1 представляет собой электронно-оптическую систему (рисунки), включающую в себя сравнительно низковольтную электронную пушку, электростатический линейный ускоритель типа Кокрофта-Уолтона, в котором фокусирующим действием обладают в основном участки неоднородного ускоряющего поля на входе и выходе ускорительной трубки, а также систему из трех конденсорных линз. Ускорительная трубка линейного ускорителя СВЭМ-1 состоит из 105 ускоряющих про-

межутков, образованных кольцевыми электродами, расположенными на одинаковом расстоянии друг от друга (25 мм). При общем ускоряющем напряжении  $U = 2$  МВ разность потенциалов на каждом ускоряющем промежутке составляет около 20 кВ. Общая длина ускоряющей трубки составляет 2625 мм, что накладывает серьезные требования на условия транспортировки и ускорения электронного пучка. Эти условия зависят от реального распределения поля линейного ускорителя. Исходя из конструктивных данных рассчитано распределение поля вдоль всей ускоряющей трубки с учетом участков с неоднородным ускоряющим полем. Распределение поля на этих участках было смоделировано с помощью программы ELZOND, разработанной Г. В. Лебедевым и Н. А. Тимченко в Ленинградском институте аналитического приборостроения.



Принципиальная оптическая схема осветительной системы СВЭМ-1

Оптические характеристики ускорителя определялись при следующих параметрах:

длина ускоряющей трубки  $L_{\text{уск}} = 2625$  мм;

длина участка поля, выступающего за передний край ускорителя, равна 79 мм;

входной потенциал ускорителя  $U_{\text{вх}} = 20$  кВ;

ускоряющий потенциал (выходной)  $U = 2$  МВ;

шаг расчета поля  $H = 1$  мм;

кроссовер, сформированный пушкой, находится в точке начала неоднородного участка поля ускорителя.

В результате расчета определены основные электронно-оптические параметры ускорителя:

линейное (поперечное) увеличение  $M_{\text{л}} = 0,603$ ;

угловое увеличение  $M_{\text{угл}} = 0,0973$ ;

координата положения мнимого изображения кроссовера относительно начала ускоряющей трубки  $Z_{\text{из}} = -750,3$  мм;

коэффициент хроматической аберрации, отнесенный к плоскости объекта  $C_{xp} = 21,2$  мм;

коэффициент сферической аберрации третьего порядка, отнесенный к плоскости объекта  $C_{cf} = 299,3$  мм.

Численное моделирование оптической системы осуществлялось с двумя вариантами электронных пушек [2], основные характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры	Пушка 1	Пушка 2
Яркость $\beta$ , А/(мм <sup>3</sup> ·стерад)	123	500
Радиус кроссовера $r_0$ , мкм	200	40
Апертурный угол $\alpha$	$9 \cdot 10^{-5}$	$10^{-3}$
Ток пучка $I$ , мкА	40	40
Ускоряющее напряжение $U$ , кВ	60	60

Выше были приведены основные расчетные характеристики линейного ускорителя СВЭМ-1. Исходя из характеристик ускорителя и данных табл. 1 были рассчитаны параметры системы, состоящей из электронной пушки и линейного ускорителя (табл. 2), где ФИЭ — фиктивный источник электронов.

Таблица 2

Основные параметры	Пушка 1	Пушка 2
Радиус ФИЭ $r$ , мм	0,247	0,249
Яркость $\beta$ , А/(мм <sup>2</sup> ·стерад)	$3,58 \cdot 10^{-4}$	$1,45 \cdot 10^5$

Электронно-оптическая система (ЭОС) СВЭМ-1, формирующая освещающий пучок, состоит из трех конденсорных линз  $K_0, K_1, K_2$  и предполя объектива. Используя данные табл. 2, было проведено численное моделирование режимов возбуждения конденсорных линз с целью определения плотности тока пучка при различных вариантах размещения облучаемых объектов. Расчет производился по программам MIS и MAGPR на IBM — PC [3].

Сравнение полученных результатов показало, что наилучшим является вариант использования пушки 2 при размещении объекта в середине зазора конденсора  $K_2$ . Фокусировка релятивистского пучка электронов осуществляется конденсорами  $K_0$  и  $K_1$  (см. рисунок). Результаты расчета для этого варианта приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры	Гауссов диаметр зонда, мм		
	0,1	0,01	0,001
Фактический диаметр зонда $r$ , мм	0,124	0,0119	0,00129
Ток зонда, А	0,417	0,000824	0,0000021
Оптимальная плотность тока в зонде, А/мм <sup>2</sup>	34,4	7,4	1,59
Оптимальный апертурный угол	0,0054	0,0024	0,0012

Фактический радиус зонда рассчитывался по формуле

$$r = \sqrt{(0,5C_{cf}\alpha^3)^2 + \left(\alpha \frac{\Delta U}{U} C_{xp}\right)^2 + \left(1,22 \frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 + r_{гаусс}^2}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — апертурный угол пучка;

$\lambda$  — длина волны электрона;

$\Delta U/U$  — нестабильность источников питания;

$r_{гаусс}$  — радиус гауссовского изображения ФИЭ.

Анализ показывает, что для обеспечения прохождения пучка электронов через ускоритель и вакуумный лучепровод длиной 3500 мм без потерь тока апертура пучка не должна превышать 0,002 рад. Поэтому реальные значения величины тока оказываются несколько меньше значений тока, соответствующих оптимальным режимам (см. табл. 2).

Если расположить облучаемый объект в середине зазора конденсора  $K_2$ , то с помощью конденсоров  $K_1$  и  $K_0$  можно уменьшить изображение ФИЭ примерно в 315 раз. При помощи трех конденсорных линз при ускоряющем напряжении 2 МВ (при расположении облучаемого объекта в середине объектива) можно уменьшить размер ФИЭ примерно в 4600 раз. Получение зондов большего диаметра возможно с помощью расфокусировки пучка на объекте. При этом плотность тока в зонде будет уменьшаться, и при ее расчете используется величина тока, соответствующая этим апертурам.

В качестве источника радиационного воздействия на образец СВЭМ-1 может быть использован двояко: для воздействия на объект может быть использован либо пучок релятивистских электронов, либо рентгеновское излучение, возбуждаемое этим пучком в тонком антикатоде, изготовленном из материала с большим порядковым номером. При воздействии электронного пучка на мишень энергия пучка тратится в основном на ионизацию и радиационное излучение. Причем, при некоторой энергии электронов, называемой "критической", ионизационные и радиационные потери примерно равны между собой. Эта энергия определяется следующим образом [4]:

$$E_{\text{крит}} = 1600 \frac{m_0 c^2}{Z} \quad (2)$$

Как следует из формулы (2), с увеличением порядкового номера элемента, из которого изготовлена мишень, значение критической энергии понижается. При максимальной энергии пучка в СВЭМ-1 критическая энергия не достигается, и практически вся энергия тратится на ионизацию. Поэтому при облучении объекта электронным пучком, если толщина объекта превышает длину пробега электронов данной энергии, предельная доза ионизирующего излучения определяется энергией, введенной в образец.

При преобразовании энергии электронного пучка в рентгеновское излучение интенсивность тормозного рентгеновского излучения определяется следующим выражением:

$$I_{\text{торм}} = 0,44 \cdot 10^{-6} U^2 Z i, \quad (3)$$

где  $U$  — ускоряющее напряжение электронного пучка, кВ;

$i$  — ток электронного пучка, А.

Мощность электронного пучка  $P$  будет

$$P = Ui,$$

следовательно, коэффициент полезного действия  $\eta$  составит

$$\eta = \frac{kU^2 i}{Ui} = 0,44 \cdot 10^{-6} UZ. \quad (4)$$

В отличие от тормозного излучения характеристическое рентгеновское излучение возникает только тогда, когда энергия электронов достигает значения, определенного для каждой серии. При этом все линии серии возникают одновременно. Длины волн характеристического излучения определяются только материалом, из которого сделана мишень.

Как показали эксперименты [4], интенсивность характеристического излучения по порядку величины равна интенсивности тормозного излучения. Таким образом, суммарную интенсивность рентгеновского излучения можно оценить с помощью формулы:

$$I = I_{\text{торм}} + I_{\text{характ}} = 2I_{\text{торм}} = 0,88 \cdot 10^{-6} UP. \quad (5)$$

С учетом возможностей высоковольтного источника СВЭМ-1 и данных электронно-оптических расчетов были просчитаны возможности использования СВЭМ-1 в качестве источника ионизирующего излучения, обеспечивающего сверхвысокую локальность облучения.

Были рассмотрены два варианта воздействия на объект: облучение сфокусированным электронным пучком или облучение рентгеновским излучением, возбуждаемым этим электронным пучком.

В результате численного моделирования, расчетов и анализа получены следующие результаты:

в случае, когда заряд ионизирующего излучения не играет роли, электронное облучение позволяет ввести в образец большую дозу за меньший период времени. При использовании в качестве ионизирующего фактора пучка релятивистских электронов мощность дозы может достигать 200 Гр/с. Использование электронного пучка позволяет обеспечить высокую локальность облучения, что допускает облучение критических точек образца. Достижимая плотность облучения не может быть реализована никакими другими средствами и может достигать  $2,5 \cdot 10^7$  Гр/(с · мм<sup>2</sup>);

максимальная мощность рентгеновского излучения при энергии электронов до 2 МэВ для элементов с атомным номером  $Z$ , изменяющимся от 5 до 74, увеличивается от 1,94 до 28,72 Вт. При этом удельная плотность мощности рентгеновского излучения, создаваемого электронным пучком, при использовании вольфрамового антикатаода может достигать  $3,3 \cdot 10^6$  Вт/мм<sup>2</sup>. Возможно также использование СВЭМ-1 в качестве микрофокусного источника жесткого рентгеновского излучения для формирования теневых рентгеновских изображений с разрешением менее микрона, а также для целей рентгеноструктурного анализа. Варьируя материалы мишени, ускоряющее напряжение и ток пучка релятивистских электронов, можно изменять в широких пределах как дозу, так и жесткость излучения.

Таким образом, методом численного моделирования найдены оптимальные режимы работы ЭОС, определены места в колонне СВЭМ-1, где можно располагать образцы для наиболее эффективного радиационного воздействия при изменении режимов работы элементов ЭОС. Проведены расчеты возбуждения рентгеновского излучения на мишенях с  $Z = 5-74$  при различных режимах работы СВЭМ-1. После внесения соответствующих изменений СВЭМ-1 может быть использован как высокоэффективная испытательная база для исследования радиационного воздействия дозированного релятивистского электронного пучка и рентгеновского излучения на испытываемые материалы и изделия электронной техники. Показано, что могут быть реализованы режимы облучения с мощностью дозы  $2,5 \cdot 10^7$  Гр/(с · мм<sup>2</sup>), с удельной мощностью рентгеновского излучения  $3,3 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> и локальностью облучения менее 1 мкм, недоступными другим методам. При этом благодаря фокусировке первичного электронного пучка плотность облучения может варьироваться в широких пределах путем изменения режима возбуждения линз.

Возможности визуального контроля, фотографирования и контроля физических свойств другими аналитическими средствами образца в процессе облучения

делают этот инструмент (СВЭМ-1) уникальным. Это позволяет не только изучать сам процесс радиационного воздействия, но и создавать материалы с заданными физическими свойствами методом электронно-стимулированной диффузии примеси или в ускоренном темпе определять радиационную стойкость как материалов, так и изделий электронной техники.

#### Л и т е р а т у р а

1. Электростатические генераторы // Сб. статей / Под редакцией А. К. Вальтера. — М.: Изд-во главного управления по использованию атомной энергии при Сов. Мин. СССР, 1959. — 250 с.
2. Лейзеганг Э. Электронная микроскопия. М. ИЛ, 1960. — 190 с.
3. Стоянов П. А., Макарова И. С., Супрун Н. Н., Шигапов Р. А. // ОМП. 1987. № 6. С. 45—47.
4. Хараджа Ф. Н. Общий курс рентгенотехники. М. — Л. Госэнергоиздат. 1956.

## ANALYSIS OF HIGH-VOLTAGE ELECTRON MICROSCOPE СВЭМ-1 POSSIBILITY FOR THE MATERIAL RADIATION STABILITY STUDY

*A. M. Filachev*

State Scientific Centre "Orion", Moscow, Russia

*B. N. Vasichev*

Moscow Institute for Electronics and Mathematics (Technical University), Moscow, Russia

*I. S. Makarova, L. B. Rozenfeld, E. E. Chernova-Stoljarova*

Institute for Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

*Possibility of using СВЭМ-1 for a inserting of radlation defects in investigating materials was considered. Parameters of illuminating system СВЭМ-1 (accelerating voltage  $\leq 2$  МэВ) was calculated. Considered two variants of influence on the object: irradiation by the focused electron beam or irradiation by x-ray radlation, agttated by this electron beam. Shown that in СВЭМ-1 possible get density of power of dose to  $2,5 \cdot 10^7$  Gr/(mm<sup>2</sup>·s). Herewith specific density of power of x-ray radlating, created by the electron beam, can reach  $3,3 \cdot 10^6$  W/mm<sup>2</sup>.*