УДК 539.21, 535.317.61-34, 548.732 <u>Серебренников Д.А.¹</u>, Дудчик Ю.И.², Баранников А.А.¹, Климова Н.Б.¹, Снигирев А.А.¹

РЕНТГЕНОВСКАЯ МИКРОСКОПИЯ НА БАЗЕ ПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ ОПТИКИ И МИКРОФОКУСНОГО ЛАБОРАТОРНОГО ИСТОЧНИКА

¹Балтийский федеральный университет имени Канта.

Калининград, Российская Федерация. dserebrennikov@innopark.kantiana.ru ²Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» Белорусского государственного университета. Минск, Республика Беларусь. dudchik@bsu.by

Описан рентгеновский микроскоп, содержащий в себе преломляющие рентгеновские линзы из бериллия и эпоксидной смолы, а также микрофокусный лабораторный источник рентгеновского излучения Excillum MetalJet на базе анода из жидкого галлия. Приведены изображения медных сеток 2000 lines/inch.

Рентгеновская микроскопия является мощным исследовательским инструментом и позволяет получать информацию даже о внутренней структуре объекта в силу высокой глубины проникновения рентгеновского излучения. Концепция рентгеновского микроскопа подразумевает использование высокопроизводительной фокусирующей оптики. Большинство работ находят зонные пластинки Френеля оптимальным решением с точки зрения фокусирующего элемента [1,2]. Альтернативой является Составная Преломляющая Рентгеновская Линза (СПРЛ), состоящая из нескольких единичных двояковогнутых элементов [3]. Геометрический ход лучей в СПРЛ представлен на рис. 1.



Рисунок 1 – Геометрический ход лучей в классической СПРЛ (а), адиабатически фокусирующей СПРЛ (b), двухлинзовой системе (c).

Как можно видеть из рис. 1(а) каждый элемент в СПРЛ поступательно преломляет падающее излучение на границе раздела двух сред, однако эффективная площадь каждого последующего элемента сокращается. С целью повысить производительность СПРЛ целесообразно разработать адиабатически фокусирующую СПРЛ, где каждый последующий элемент имеет меньшую апертуру и радиус кривизны параболы, рис. 1(b). Тем не менее, процесс изготовления подобной линзы выглядит крайне затруднительным, кроме того, энергетический диапазон линзы строго ограничен. Ввиду этого перспективной выглядит конфигурация с двумя СПРЛ, где первая линза используется в качестве конденсора, а вторая в качестве объектива, рис. 1(с). В данной работе продемонстрирована возможность рентгеновской микроскопии в двухлинзовым исполнении на лабораторном микрофокусном рентгеновском источнике Metajet. Уникальностью данного источника является технология формирования рентгеновского излучения, в рамках которой в качестве анода используется струя из жидкого галлий-индиевого сплава. Данная технология позволяет получить рекордную яркость рентгеновско-го излучения по сравнению с традиционными рентгеновскими трубками ~ 10^{11} фотонов/ (с*мрад²*мм²*ширину линии галлия K_{a1}). Энергия характеристических фотонов Ка-серии Ga составляет 9.25 кэВ. Имеется возможность варьировать параметры источника, а именно рабочее напряжение, размер источника в вертикальной и горизонтальной плоскостях, мощность.

В схеме используются два типа СПРЛ: бериллиевые линзы, а также разработанные в НИИПФП им.А.Н.Севченко БГУ эпоксидные линзы. Бериллиевые линзы обладают следующими параметрами: число единичных элементов – 29, радиус кривизны параболы – 50 мкм, геометрическая апертура – 480 мкм, профиль – параболический, фокусное расстояние (29 элементов) – 21.68 см. Линзы из эпоксидной смолы обладают следующими параметрами: число единичных элементов – 50 мкм, геометрическая апертура – 184, радиус линзы – 50 мкм, геометрическая апертура – 100 мкм, профиль – сферический, фокусное расстояние (184 элемента) – 4.65 см. Стоит отметить, что рентгеновский микроскоп может быть реализован в различных конфигурациях, в зависимости от типа микроскопа. Так возможна реализация, как сканирующего микроскопа, так и полнопольного микроскопа. Одна из возможных конфигураций приведена на рис. 2.



Рисунок 2 – Макет рентгеновского микроскопа.

Микроскоп состоит последовательно из следующих элементов: микрофокусный источник рентгеновского излучения Excillum MetalJet, конденсор, исследуемый образец, объектив, цифровая рентгеновская камера Photonic Science с размером пикселя 6.5 мкм.

В качестве исследуемых объектов использовались медные сетки различных периодов – 65 мкм и 13 мкм, толщина линии в последнем случае составляет приблизительно 3-4 мкм.

Изображения сеток, полученные в различных конфигурациях рентгеновского микроскопа, приведены на рис. 3.



Рисунок 3 – Изображение медной сетки: (a) с периодом 65 мкм, Ве СПРЛ используется в качестве объектива; (b) с периодом 13 мкм, СПРЛ из эпоксидной смолы используется в качестве объектива.

Из рисунка 3 видно, что в центре каждого изображения имеется паразитное пятно, вызванное предположительно тормозным излучением. Учитывая относительно небольшую апертуру СПРЛ, изготовленной из эпоксидной смолы, данный паразитный эффект оказывает значительное влияние на изображения, полученные при использовании данной линзы в качестве объектива (рис. 3b). При использовании Ве СПРЛ в качестве объектива эффект оказывается менее критичным (рис. 3a).

Необходимо отметить, что в схеме сканирующей микроскопии, двухлинзовая система позволяет получить сфокусированный пучок гораздо большей интенсивности. С целью экспериментального доказательства данного факта, были проведены измерения интегральной интенсивности в схемах с конденсором и без. Измеренное значение интенсивности в схеме с одной линзой (без конденсора) составило 4227 отн. ед., при установке конденсора при том же времени экспозиции интенсивность увеличилась до 13635 отн. ед., таким образом, интенсивность выросла практически в 3 раза.

Данная работа поддержана Министерством Образования РФ, а также российскобелорусским грантом РФФИ и БРФФИ (проект Ф16Р-070, проекты №.14.У26.31.0002 and 16-52-00212).

Список литературы

- 1. A. Bosak, I. Snigireva, K. Napolskii, A. Snigirev, Advanced Materials 22 (2010) 3256.
- 2. C. Fella, A. Balles, W. Wiest, S. Zabler, R. Hanke, AIP Conf. Proc. 1696 (2016) 020025.
- 3. C. Seim, J. Baumann, H. Legall et al., Proc. Of Spie, 8678, 867808-1 (2012).