

РЕНТГЕНОВСКИЙ МИКРОСКОП НА БАЗЕ КОМПЛЕКСА АССИМЕТРИЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ-МОНОХРОМАТОРОВ

А.С. Геранин

Московский Государственный Институт Электроники и Математики;

Институт Кристаллографии РАН

E-mail to: LexaSuperPuper@mail.ru

The x-ray microscope allows receive the image of object increased in 20 time, due to reflection from two asymmetrical crystals. The optimum choice parameters of a crystal and length of a wave of falling radiation allows reach the micron sanction with use usual x-ray sources.

Развитие рентгеновских методов измерения является одним из наиболее перспективных направлений. Длина волны рентгеновского излучения на три порядка меньше длины волны видимого света, что позволяет рентгеновскому лучу проникать сквозь оптически непрозрачные предметы. Кроме того, некоторые оптические методы ограничены длиной волны видимого света, и не могут использоваться при изучении более мелких особенностей исследуемого объекта. Вследствие чего, требуется переход на более короткие длины волн, в частности рентгеновский диапазон длин волн.

Например, в биологии часто возникают задачи исследования объектов, размеры которых меньше длины волны видимого света, но больше длины волны рентгеновского излучения. Примерами объектов диагностики для рентгеновской микроскопии являются как живые организмы: клетки, биологические ткани, так и объекты, не принадлежащие живому миру: тонкие плёнки, капилляры, потоки жидкостей и газов в трубах. Можно отметить, что существуют и другие методы исследования объектов с таким разрешением, однако данные методы предъявляют достаточно высокие требования к исследуемым образцам. В частности исследование биологических объектов с помощью электронной микроскопии невозможно, поскольку данный метод предполагает нахождение исследуемого образца (живой биологический объект, насыщенный влагой) в вакууме, кроме того, существуют жёсткие ограничения по толщине образца, выполнение которых – затруднительно или даже невозможно. Поэтому требуются приборы, способные обеспечить высокое разрешение, и снизить требования, предъявляемые к объектам исследования.

Жесткое рентгеновское излучение обладает большой проникающей способностью, его использование в эксперименте позволяет обойтись без вакуумирования установки. На сегодняшний день разработано множество рентгено – оптических схем для исследования различных материалов в различных областях науки и техники.

Зачастую, основным сдерживающим фактором, в практическом применении различных рентгеновских методов является сложность создания качественных рентгено – оптических приборов, способных увеличить, уменьшать, отражать (по аналогии с обычной оптикой). Предельное разрешение принципиально ограничено длиной волны используемого

излучения. Поэтому, на первый взгляд в рентгеновском диапазоне оно не может быть лучше 0,05 нм, если использовать жесткое рентгеновское излучение, или 0,3 нм, если использовать мягкое рентгеновское излучение. Реально достижимое в эксперименте разрешение определяется характеристиками применяемых оптических элементов.

Рентгено – оптические приборы, в отличие от обычной оптики, стали разрабатываться и применяться сравнительно недавно. Важно отметить, что получение качественных рентгено – оптических приборов, отвечающих заданным параметрам, весьма сложная задача.

На сегодняшний день, уже разработаны оптические приборы способные увеличивать, уменьшать или отражать. Вот некоторые из них: многоэлементная преломляющая линза, асимметричный кристалл-монохроматор, Френелевские зонные пластины, зеркала полного внешнего отражения. Каждый из них обладает определёнными достоинствами и недостатками. Важно отметить, что изготовление зонных пластин или зеркал полного внешнего отражения для жесткого рентгеновского диапазона – технологически сложная задача, и требует больших затрат. Важное преимущество кристалла – монохроматора перед другими рентгено – оптическими приборами заключается в простоте технологии и сравнительно низкой стоимости изготовления.

Получение увеличенных изображений при помощи асимметричного кристалла. Остановимся сначала на асимметричном кристалле-монохроматоре. Данный оптический элемент широко используется в оптике рентгеновских лучей для формирования пучка. С его помощью можно либо уменьшить (в одном направлении) размер падающего на него пучка в несколько раз, либо расширить пучок (при выполнении для падающего пучка условия Брегга), существенно уменьшив при этом его угловую расходимость. Такой монохроматор представляет собой совершенный монокристалл, поверхность которого срезана под некоторым углом ψ к отражающим плоскостям. На рис. 1. схематично показано, как происходит расширение пучка при асимметричном отражении.

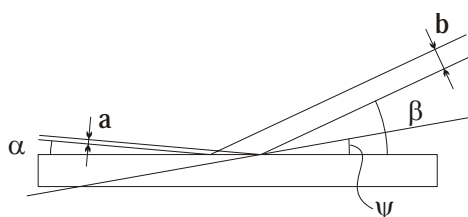


Рис.1 Появление увеличения при асимметричном отражении излучения от монокристалла.

Известно, что при асимметричном Брэгговском отражении происходит изменение линейных размеров отраженного пучка b по сравнению с падающим a . В рамках геометрической оптики их отношение определяется выражением

$$\frac{b}{a} = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \quad (1)$$

где α - угол падения, а β - отражения.

Оптимальный выбор параметров кристалла и длины волны падающего излучения позволяет получить микронное разрешение с использованием обычных рентгеновских трубок.

Используя отражение от двух ассиметричных кристаллов – монохроматоров можно расширить исходный рентгеновский луч в двух направлениях и получить двумерно увеличенное изображение.

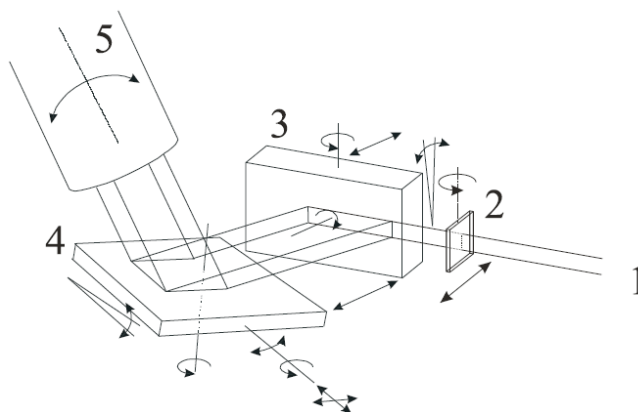


Рис. 2. Схема рентгеновского микроскопа, осуществляющего рентгеновское увеличение. 1- падающий пучок, 2- образец, 3 – первый кристалл, 4- второй кристалл, 5 – CCD- детектор

В качестве увеличивающего оптического элемента может быть использован монокристалл кремния с асимметричным отражением (111). Угол среза поверхности кристалла относительно отражающих кристаллографических плоскостей должен составлять $\psi=5.64^\circ$, что согласно формуле (1) обеспечивает увеличение (для $\text{MoK}\alpha_1$) ~ 20 (в одном направлении). Регистрация увеличенного изображения объекта может производиться на рентгеновскую пленку либо CCD- детектор, позволяющий проводить измерения в режиме реального времени.

Данный микроскоп может быть использован в лабораторных условиях в рентгеновской микротомографии для исследования биологических объектов.

Для реализации данной идеи была создана установка, позволяющая получить увеличенное изображение вдоль одной оси, с помощью одного кристалла – монохроматора.

Результаты проведенных рентгеновских экспериментов даны на рис.3. Полученное изображение медной сетки представляет систему штрихов, разделенных светлыми полосами.

Один штрих соответствует одному квадратному отверстию. С учетом того обстоятельства, что увеличение достигалось лишь в одном направлении, отношение длины и ширины штриха соответствует реальному увеличению и равно примерно 20, что соответствует теоретическому расчёту.

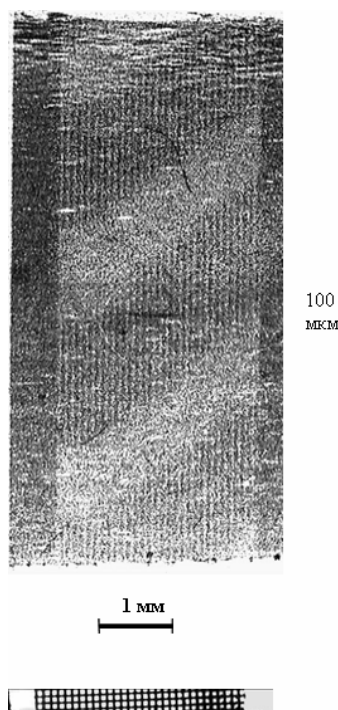


Рис. 3. Рентгеновская фотография тестового образца (медной сетки)

В дальнейшем планируется получить двумерное увеличенное изображение объекта, за счёт отражения от двух кристаллов – монохроматоров.

1. A. L. D. Kilcoyne, T. Tyliszczak, W. F. Steele, S. Fakra, P. Hitchcock, K. Franck, E. Anderson, B. Harteneck, E. G. Rightor, G. E. Mitchell, A. P. Hitchcock, L. Yang, T. Warwick and H. Ade, Interferometer-controlled scanning transmission X-ray microscopes at the Advanced Light Source, *J. Synchrotron Rad.* (2003). vol 10, pp. 125-136
2. McNulty, I.; Paterson, D.; Arko, J.; Erdmann, M.; Frigo, S. P.; Goetze, K.; Ilinski, P.; Krapf, N.; Mooney, T.; Retch, C. C.; Stampfl, A. P. J.; Vogt, S.; Wang, Y.; Xu, S. The 2-ID-B intermediate-energy scanning X-ray microscope at the APS, *Journal de Physique IV (Proceedings)*, Volume 104, Issue 2, March 2003, pp.11-15.
3. T. Beetz, M. Feser, H. Fleckenstein, B. Hornberger, C. Jacobsen, J. Kirz, M. Lerotic, E. Lima, M. Lu, D. Sayre, D. Shapiro, A. Stein, D. Tennant, and S. Wirick, "Soft x-ray microscopy at the NSLS," *Synchrotron Radiation News* 16, no. 3, pp. 11-15, (2003).
4. А.А. Постнов. Развитие методов рентгеновской микроскопии для изучения биологических и полимерных объектов. Диссертация. на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Москва (1999). 166 стр.
5. В.Е. Асадчиков, Б.В. Мchedlishvili, Ю.В. Пономарев, А.А. Постнов, Р.А. Сенин, Т.В. Цыганова Рентгеновская микроскопия с использованием асимметричного отражения от монокристалла. *Письма в ЖЭТФ*. т.73, вып.4, сс.205-209 (2001).