

О возможности построения сканирующих рентгеновских литографов

В.К. Егоров¹, Е.В. Егоров¹

¹ ИПТМ РАН, ул. Академика Осипьяна, 6, Черноголовка, Мос. Обл. Россия 142432

Центральной задачей литографической технологии является развитие сканирующей литографии, позволяющей получать прямое изображение без использования масок [1]. Параметры материала, соответствующие линиям изображения, должны иметь существенные отличия от его параметров в фоновых позициях. Такое различие может быть создано за счет локальных фазовых превращений, например, за счет воздействия фотонного, электронного или ионного ионизирующего излучения. В зависимости от типа применяемого излучения различаются и типы литографических установок [2]. Установки, предназначенные для сканирующей литографии, предполагают наличие системы формирования потока ионизирующего излучения, 2х координатного подложечного столика и блока компьютерного управления, позволяющего варьировать интенсивность и позиционирование ионизирующего потока. Наиболее подходящими для построения сканирующих литографов являются электронные радиационные потоки [3]. В практическом плане сканирующая электронная литография позволяет получать изображение и приготовить шаблоны (или маски) с разрешением на уровне 10 нм. Ионные пучки, вследствие обладания зарядом, так же как потоки электронные, отлично управляются внешними полями и, при использовании в сканирующей литографии демонстрируют более высокую разрешающую способность [2], но вследствие повышенной стоимости используется реже электронной. Сканирующая рентгеновская литография в настоящее время практически отсутствует [4]. При этом основные трудности связаны с наличием ограниченных методов управления рентгеновскими потоками и проблемой формирования рентгеновских пучков наноразмерного диапазона. Проблема управления параметрами рентгеновских потоков к настоящему времени частично решена, поскольку имеет место быть серийное производство рентгеновских трубок, имеющих возможность модуляции выходного радиационного потока с частотой 910 МГц для любых анодов, начиная с Вe ($\lambda_0=11.4$ нм) [5]. К сожалению, варьировать пространственным распределением интенсивности в формируемых потоках конструкция этих источников не позволяет. В тоже время проблема формирования пучков характеристического рентгеновского излучения наноразмерного сечения квадратной формы в настоящее время успешно решена [6]. Путем использования плоских рентгеновских волноводно-резонансных структур специальной конструкции. В процессе исследования

рентгено-транспортной эффективности плоских протяженных щелевых зазоров было установлено, что они способны формировать рентгеновские пучки наноразмерной ширины [7]. Простейшей структурой, формирующей такие потоки, является плоский рентгеновский волновод-резонатор (ПРВР), комплектирующейся парой плоских полированных кварцевых рефлекторов, располагающихся на расстоянии, не превышающим половины длины когерентности предполагаемого к использованию рентгеновского излучения. Для работы с излучением $\text{MoK}\alpha\beta$ это расстояние не должно превышать 110 нм. Обычно в работе с этим излучением высота формируемого пучка составляет 10 мм, а ширина – 100 нм. Его угловая расходимость по горизонтали равняется 0.04° . При использовании составного волновода-резонатора, представляющего два последовательно установленных ПРВР в скрещенной геометрии оказалось возможным получить рентгеновский пучок квадратного сечения 100×100 нм² с интегральной интенсивностью $2\cdot 10^5$ фотон/сек при его угловой расходимости около 0.1° в условиях использования рентгеновской трубки БСВ-21 (Mo) в режиме $U=25$ кВ, $I=10$ мА. Радиационная плотность в пучке составила $4\cdot 10^{15}$ фотон/см²сек. Такой поток в резисте плотностью 1.5 г/см³ на толщине 10 мкм выделяет мощность около 5 мВт/см². Такая мощность вполне допустима для попыток разработки рентгеновского сканирующего литографа, однако он будет уступать электронным по производительности, поскольку фактором сканирования в этом случае будут механические возможности подложечного столика. В докладе обсуждается оригинальная составная конструкция и результаты ее экспериментального тестирования.

1. К.А. Валиев. Физика субмикронной литографии. М.: Наука, ГРФМЛ, 1990. 528 с.
2. H.J. Levinson, W.H. Arnold. Handbook of Microlithography, Micromashing and Microfabrication. V.1, London: Bellingham SPIE Press, 1997. P. 1-138.
3. R.W. Hawkes, E.Kasper. Principles of Electronic Optics: Wave Optics. London: Academic Press, 2012. 752 p.
4. H.I. Smith, M.L. Schattenberg. Why bother with X-ray Lithography. London: Bellingham SPIE Press. V.1671, 1992. P. 282-298.
5. <https://melz-elt.ru/> (08.06.2026)
6. V.K. Egorov, E.V. Egorov. Russian Microelectronics, v.54(8), 2025, P. 1283-1291.
7. Е.В. Егоров, В.К. Егоров. Явление волноводно-резонансного распространения радиационных потоков (явление радиационной сверхтекучести) и некоторые аспекты его проявления в реальности. М.: Физматлит, 2025. 326 с.