

Электронная микроскопия с атомной фокусировкой.

А. Г. Резикийн

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

тел: (812) 490-37-63, эл. почта: aram_rn@mail.ru

В работах [1–15] была предложена и разрабатывалась концепция атомной линзы в корпускулярной оптике. Суть её заключается в формировании тонких кроссоверов при фокусировке корпускулярных пучков на различных системах атомного и наномасштабов, простейшей из которых является атом. Для электронов, в частности, в работах [1] и [6] показано теоретически, что в качестве линзы, способной сфокусировать пучок электронов в область с поперечным сечением в десятки пикометров в диаметре, могут выступать одиночные тяжелые атомы. Экспериментальным подтверждением этого явилось получение разрешения 0.06 нм в работе [2] при использовании электронного микроскопа с разрешением, не выше 0.34 нм, по одной из схем, рассмотренных в [6].

Методы, основанные на концепции атомной линзы, могут иметь приложения во многих областях науки и техники, в том числе в микроскопии. Однако, при конкретной реализации возникают трудности. Например, способ использования одиночного атома в качестве конечной линзы, дающей изображение в схеме просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ), не годится, т.к. при этом слишком велики aberrации [1]. Можно было бы использовать одиночный атом в качестве фокусатора в схеме ПРЭМ, но одиночные атомы очень трудно локализовать. Эти трудности удаётся обойти использованием цепочки, или рядов атомов в кристалле в качестве фокусирующих элементов в схеме ПРЭМ.

При освещении кристалла электронным пучком с диаметром, превосходящим расстояние между соседними рядами атомов в фокусирующем кристалле, на выходе из кристалла образуется решетка пиков интенсивности малых диаметров, порядка десятков пикометра. Максимальная интенсивность в кроссовере, соответствующем конкретной цепочке атомов, наблюдается на расстояниях порядка десятых долей нанометра от последнего атома ряда. Это малые расстояния и при сканировании исследуемый образец очень сложно перемещать на таких расстояниях от кристалла, ввиду неровности поверхности образца. В зависимости от степени гладкости для каждого образца требуется определённая степень удалённости от кристалла. В работе [5] предложен метод Фурье плоскостей, который позволяет обойти выше изложенные трудности.

В работе [15] было предложено использовать метод, позволяющий «распутать» наложение изображений, то есть восстановить изображение образца в случае его сканирования решёткой пиков. Это операция деконволюции, которая, вообще говоря, математически позволяет точно восстановить изображение образца из детектируемого сигнала с помощью аппаратной функции — функции распределе-

ния интенсивности пучка сканирующего образец (если не приходится вводить регуляризацию из-за некорректности задачи). Однако если учесть шумы, присутствующие в любом реальном эксперименте, то изображение не удаётся точно восстановить — оно оказывается искажённым.

В данной работе исследованы влияния шумов на качество визуализации образца при использовании модифицированной схемы ПРЭМ (в которой кристалл располагается вблизи задней фокальной плоскости объективной линзы и действует как дополнительный фокусирующий элемент) с применением операции деконволюции для восстановления изображения.

Литература

1. Valery V. Smirnov. Atomic focusers. *J. Phys. D : Appl. Phys.* , 1998, Vol. 31, N. 13, P. 1548-1555.
2. J. M. Cowley. Electron holography with atomic focusers. *Phys. Rev. Letters*, 2000, Vol. 84, N. 16, P. 3618-3621.
3. V. V. Smirnov and J. M. Cowley. In-line electron holography with an atomic focuser source. *Phys. Rev. B*, 2002, Vol. 65, N. 6, 064109(9).
4. J. M. Cowley and J. B. Hudis. Atomic-focuser imaging by graphite crystals in carbon nano-shells. *Microscopy & Microanalysis*, 2000, 6, P. 429-436..
5. R. E. Dunin-Borkowski and J. M. Cowley. Simulations for imaging with atomic focusers. *Acta Cryst.* 1999, A55, P. 119-126.
6. J. M. Cowley, J. C. H. Spence, Valery V. Smirnov. The enhancement of electron microscope resolution by use of atomic focusers. *Ultramicroscopy*. 1997, Vol. 68, N. 2, P. 135-148.
7. В. В. Смирнов. Фокусировка атомных и молекулярных пучков в электрических полях некоторых конфигураций. *ЖТФ*, 2001, Т. 71. Вып. 7, С. 92-97
8. A. A. Mityureva, V. V. Smirnov, O. A. Vorobiev. A nanohole as an atomic lens for atoms and molecules. *J. Phys. D* 2001, Vol. 34, N. 13, P. L65-L69
9. В. В. Смирнов, О. А. Воробьев, А. А. Митюрева, Т. Е. Примагина. Корпускулярная голография с фокусировкой источника на атомной линзе. *Вестник СПбГУ, Сер. 4*, 2003., Вып. 3 (№ 20), С. 23-36.
10. В. В. Смирнов, О. А. Воробьев, А. А. Митюрева, Т. Е. Примагина. Теоретическое изучение атомной голографии с фокусировкой источника на основе атомно-размерного эффекта в атомной линзе. *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2003, № 2, С. 3-7.
11. Michael Sanchez and J. M. Cowley. The imaging properties of atomic focusers. *Ultramicroscopy*. 1998, Vol. 72, P. 214-222.
12. J. M. Cowley, R. E. Dunin-Borkowski and Michele Hayward. The contrast of images formed by atomic focusers. *Ultramicroscopy*. 1998, V. 72, P. 223-232.
13. J. M. Cowley, N. Ooi and R. E. Dunin-Borkowski. Moire patterns in electron microscopy with atomic focuser crystals. *Acta Cryst.* 1999, A55, P. 533-542.
14. J. M. Cowley. Atomic-focuser imaging in electron nanodiffraction from carbon nano-shells. *Ultramicroscopy*, 2000, Vol. 81, N. 2, P. 47-55.
15. А. Г. Резилян, В. В. Смирнов. Возможности реконструкции образа при сканировании решёткой фокусов атомных линз от электронного пучка. *Журн. Тех. Физ.*, 2005, Т. 75, В. 10, С. 99-103