

## Атомная “камера-обскура” с нанометровым разрешением

В. И. Балыкин, П. А. Борисов, В. С. Летохов, П. Н. Мелентьев, С. Н. Руднев, А. П. Черкун, А. П. Акименко<sup>+</sup>,  
П. Ю. Апель<sup>+</sup>, В. А. Скуратов<sup>+</sup>

Институт спектроскопии РАН, 142190 Троицк, Московская обл., Россия

<sup>+</sup>Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, Объединенный институт ядерных исследований  
141980 Дубна, Московская обл., Россия

Поступила в редакцию 21 сентября 2006 г.

Впервые экспериментально реализована атомная “камера-обскура” с нанометровым разрешением, позволившая создать на поверхности стекла массив из  $\sim 10^6$  идентичных наноструктур атомов Sr с характерными размерами наноструктуры менее 50 нм. Продемонстрировано создание наноструктур произвольной формы.

PACS: 03.75.Be, 81.16.–с

Наиболее эффективным методом контроля пространственного движения материальных частиц в экспериментальной физике является использование потенциалов взаимодействия с электромагнитными полями. Статические магнитные и электрические потенциалы взаимодействия используются в оптике заряженных частиц [1]. В сравнительно недавно возникшей оптике нейтральных атомных пучков [2, 3], помимо статических полей, используются разнообразные потенциалы взаимодействия атомов с лазерными и электромагнитными полями. В атомной оптике реализованы эффективные методы дифракции, интерференции, зеркального отражения атомов, а также с использованием диссипативных методов воздействия на движение атомов их глубокое охлаждение и локализация [4]. Наиболее трудной проблемой в атомной оптике оказалась задача фокусировки нейтральных атомов, которая перспективна для неразрушающего метода контроля и зондирования поверхности на атомно-молекулярном уровне, а также создания на поверхности атомных и молекулярных наноструктур.

Несмотря на существование многочисленных предложений по фокусировке атомных пучков [5–9], данная проблема является нерешенной в экспериментальном плане. Основная сложность заключается в создании потенциала взаимодействия атома с электромагнитным полем, который был бы по своим свойствам близким к “идеальной” линзе для атомов.

В настоящей работе экспериментально реализован иной подход к проблеме фокусировки и построения изображения в атомной оптике, основанный на хорошо известной идее “камеры-обскуры” в световой оптике и используемой также в современной экс-

периментальной физике в тех редких случаях, когда создание фокусирующего потенциала затруднительно [10]. Реализованная нами атомная “камера-обскура” (atomic pinhole camera) позволила создать на поверхности твердого тела массив идентичных наноструктур на поверхности с характерными размерами отдельной наноструктуры менее 50 нм.

В оптике “камера-обскуры” (pinhole camera) – камера без линзы. Формирующее изображение свет проходит через малое отверстие. Для получения достаточно ясного изображения апертура такой камеры должна быть отверстием малого диаметра. Из-за малой апертуры “камер-обскур” необходимы большие времена экспозиций по сравнению с традиционными камерами.

Принципиальная схема эксперимента с атомной “камерой-обскурой” показана на рис.1. Пучок атомов Sr пропускается через набор отверстий в металлической маске, формируя таким образом, по аналогии с оптикой, “светящийся объект” заданной геометрии. Атомы, прошедшие через отверстия в маске, распространяясь в вакууме по прямолинейным траекториям, подобно световым лучам, попадают на тонкую пленку (толщиной  $h = 5$  мкм), размещенную на расстоянии  $L = 90$  мм от маски с большим количеством ( $n \sim 3 \cdot 10^7$  см<sup>-2</sup>) отверстий конической формы (с входным диаметром  $d \cong 50$  нм и выходным  $D \sim 350$  нм). Каждое отверстие пленки является для атомов “камерой-обскурой”, формирующей свое индивидуальное изображение “объекта” на поверхности подложки, размещенной на расстоянии  $l = 5$  мкм за пленкой. В такой геометрии на подложке создается набор уменьшенных примерно в  $m = L/l = 8000$  раз изображений “объекта”, образованных напыленными на поверхность атомами Sr.

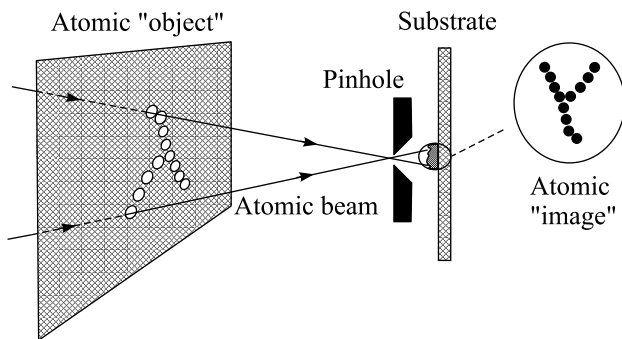


Рис.1. Схема атомной “камеры-обскуры”. Пучок атомов Sr пропускается через набор отверстий в металлической маске, формируя таким образом “светящийся объект” заданной геометрии. Атомы, прошедшие через отверстия в маске, распространяясь в вакууме по прямолинейным траекториям, подобно световым лучам, попадают на тонкую пленку с отверстиями. Каждое отверстие пленки является для атомов “камерой-обскурой”, формирующей инвертированное изображение “объекта” на поверхности подложки

Источником теплового пучка атомов Sr служила электротермическая атомная пушка с прямым нагревом испарителя. Остаточное давление в вакуумной камере составило около  $4 \cdot 10^{-6}$  торр. Испаритель был изготовлен из молибдена и имел внутренний диаметр 3.5 мм. При рабочей температуре пушки около  $1350^\circ\text{C}$  поток атомов Sr в плоскости пленки составил примерно  $10^{13}$  атомов/см<sup>2</sup>·с.

Формирующая “объект” металлическая маска располагалась в непосредственной близости от атомного источника. Маска изготовлена из танталовой фольги толщиной 50 мкм с набором отверстий, задающих форму “объекта”. В эксперименте использовались маски с двумя конфигурациями отверстий: 1) образующих фигуру “крест” из отверстий диаметром 0.5 мм и 2) маска “лямбда” – с отверстиями диаметром 250 мкм, формирующими букву  $\lambda$  (символ Института спектроскопии).

В качестве тонкой пленки с отверстиями мы использовали трековую мембрану асимметричной структуры [11, 12]. Исходным материалом для изготовления трековой мембраны являлась полиэтилентерефталатная (ПЭТФ) пленка Hostaphan RE5 (Hoechst AG) толщиной 5 мкм. Облучалась пленка пучком ускоренных ионов криптона с энергией 253 МэВ на ускорителе У-400 ЛЯР им. Г.Н. Флерова ОИЯИ. Далее облученную ионами пленку экспонировали ультрафиолетовым излучением с одной стороны, после чего проводили химическое травление в растворе 3М NaOH с добавлением 0.05% поверхностно-активного вещества Dowfax 2A1 при температуре  $70^\circ\text{C}$ . При-

менение поверхностно-активного вещества обеспечивало получение пор с резким сужением у поверхности, которая не была экспонирована ультрафиолетовым излучением [11, 12].

Для напыления использовались стеклянные подложки с шероховатостью поверхности не хуже 1 нм. Созданные в эксперименте структуры исследовались с помощью сканирующего атомно-силового микроскопа, разработанного в Институте спектроскопии [13]. Атомно-силовой микроскоп обеспечивал разрешение вдоль поверхности порядка 10 нм и разрешение высоты объектов на уровне 0.1 нм.

Коническая форма отверстий трековой мембраны была выбрана для увеличения угла зрения  $\alpha = 2 \arctg \frac{d+D}{2h} (\sim 4.5^\circ)$ . С одной стороны, это приводит к увеличению числа изображений “объекта”, определяемых количеством пропускающих атомный пучок “камер-обскур”  $N \approx \alpha^2 L^2 n (\sim 10^6)$  штук). С другой стороны, при больших углах зрения становится возможным создание изображений сложной геометрии, что характеризуется максимально допустимым количеством отверстий в маске,  $N_R = (l\alpha)^2/d^2$ . Последнее, вообще говоря, можно сделать большим за счет увеличения расстояния между “камерой обскурой” и подложкой. Однако это приведет к уменьшению высоты профиля создаваемых наноструктур при заданной экспозиции, а также к увеличению влияния дифракции атомов. Увеличение угла зрения  $\alpha$  позволяет также снизить требования к строгой параллельности осей отверстий в трековой мембране, определяемых технологией производства, а также к точности юстировки в эксперименте.

В описанной геометрии эксперимента каждая из “камер-обскур” создает в плоскости поверхности подложки точку изображения с тенью радиусом

$$a = \frac{dL+l}{2} = \frac{d}{2} \left( 1 + \frac{1}{m} \right).$$

Приближение геометрической атомной оптики реализуется при выполнении условия на дифракционное ограничение для атомов с длиной волны де-Бройля  $\lambda_{dB}$ :

$$1.22 \frac{\lambda_{dB}}{d} l \ll d \left( 1 + \frac{1}{m} \right), \quad (1)$$

при этом изображение является инвертированной копией “объекта” уменьшенного в  $m$  раз, и имеет разрешение порядка  $d \sim 50$  нм, что позволяет создавать в эксперименте структуры размером в нанометровом диапазоне. В эксперименте средняя скорость атомов в пучке составила  $\sim 900$  м/с, что соответствует длине волны де-Бройля  $\lambda_{dB} = 0.08 \text{ \AA}$ . Таким образом,



Рис.2. Наноструктуры атомов Sr на поверхности стекла, полученные с помощью атомной “камеры-обскуры” и “объекта” “крест”. Показаны участки подложки площадью  $2 \times 2$  мкм (а) и  $800 \times 800$  нм (b). Наноструктуры измерены с помощью атомно-силового микроскопа



Рис.3. Наноструктуры атомов Sr на поверхности стекла, полученные с помощью атомной “камеры-обскуры” и “объекта” “лямбда”. Показаны участки подложки площадью  $1 \times 1$  мкм (а) и  $500 \times 500$  нм (b). Наноструктуры измерены с помощью атомно-силового микроскопа

выполняется условие (1), и дифракцией атомов в эксперименте можно пренебречь.

На рис.2 и 3 представлены изображения нанообъектов, созданных в ходе эксперимента описываемым методом. Из рисунков видно, что в результате эксперимента на подложках образовались структуры, по форме идентичные соответствующей объектной маске. При этом высота профиля для каждой структуры была порядка  $10 \div 20$  нм при времени экспозиции 15 мин.

На рис.2а показан участок поверхности размером  $2 \times 2$  мкм, заполненный изображениями объекта “крест”. Наряду с почти полностью сформированными изображениями “креста” на рисунке видны также структуры с изображением только его части. Это происходит из-за частичного блокирования фор-

мирующих изображения креста атомов и обусловлено непараллельностью осей различных отверстий трековой мембраны. Геометрия наиболее полных “крестов” соответствует углу зрения “камеры-обскуры” примерно в  $2^\circ$ . Это значение несколько меньше ожидаемого и, по-видимому, объясняется отличием профиля отверстий трековой мембраны от идеального конуса.

На рис.2b показано детальное изображение одного из наиболее полных “крестов”. Как видно из рисунка, “крест” состоит из частично разрешенных наноструктур, являющихся изображениями отдельных отверстий объектной маски. Из расстояния между вершинами соседних наноструктур следует, что изображение уменьшено примерно в 8000 раз, что подтверждает приведенные выше оценки, а также при-

менимость геометрической атомной оптики (1). Ширина наноструктур по основанию составляет примерно 110 нм, что хорошо соответствует прямолинейному прохождению атомов пучка через отверстия “камер-обскур” и определяется суммой ее входного диаметра  $d = 50$  нм и диаметра изображения маски  $d_0 = 0.5 \text{ мм}/8000 = 62$  нм. Ширина на полувывоте составляет значение, равное 70 нм.

На рис.3 показаны результаты эксперимента с использованием маски “лямбда”. Размеры этой маски меньше, чем у маски “крест”, и соответствуют экспериментально измеренному углу зрения для использованных “камер-обскур”, что привело к увеличению доли полных, невиньетированных изображений. Как видно из рисунка, ширина образованных наноструктур на полувывоте составляет 50 нм и 70–80 нм по основанию, что меньше, чем в предыдущем случае, и объясняется меньшим диаметром отверстий в используемой маске.

*В заключение подведем итог.* В нашей работе предложен и реализован новый подход к построению изображений в атомной оптике, основанный на использовании хорошо известной в традиционной световой оптике “камеры-обскуры”. Разрешение в методе составило значение 50 нм. Экспериментально с атомами Sr было реализовано построение изображений одного объекта с использованием большого количества,  $\sim 10^6$ , “камер-обскур”. Такой подход позволил создать на поверхности стекла  $10^6$  одинаковых структур атомов Sr с характерным размером элементов структур около 50 нм. Достоинствами предложенного метода являются: 1) простота экспериментальной реализации, 2) высокое пространственное разрешение при отсутствии геометрических и хроматических аберраций, 3) возможность использования тепловых атомных и молекулярных пучков, 4) универсальность (отсутствие принципиальных ограничений при выборе сорта частиц), достаточно высокая производительность и возможность параллель-

ного создания большого количества одинаковых наноструктур. Вопросы предельного разрешения атомной “камеры-обскуры” будут рассмотрены в отдельной публикации.

Работа частично поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований # 05-02-16370-а, # 06-02-16301-а, # 06-08-01299-а, CRDF # RU-P1-2572-TR-04.

1. A. Septier, *Focusing of Charged Particles*, Academic, New York, 1967, Vols. I and II.
2. V. I. Balykin and V. S. Letokhov, *Sov. Usp. Fiz. Nauk.* **160**, 141 (1990); V. I. Balykin and V. S. Letokhov, *Atom optics with laser light*, Laser Science and Technology, Gordon & Breach, Vol. **18**, 1995.
3. P. Meystre, *Atom Optics*, Springer-Verlag, New York, 2001.
4. S. Chu, *Rev. Mod. Phys.* **70**, 685 (1998); C. Cohen-Tannoudji, *ibid.* **70**, 707 (1998); W. D. Phillips, *ibid.* **70**, 721 (1998).
5. V. I. Balykin and V. S. Letokhov, *Opt. Comm.* **64**, 151 (1987).
6. T. Sleator, T. Pfau, V. Balykin, and J. Mlynek, *Appl. Phys. B* **54**, 375 (1992).
7. J. J. McClelland, R. E. Scholten, E. C. Palm, and R. J. Celotta, *Science* **262**, 877 (1993).
8. V. Balykin, V. Klimov, and V. Letokhov, *J. Phys.* **4**, 1981 (1994); V. I. Balykin, V. S. Letokhov, and V. V. Klimov, *JETP Lett.* **59**, 896 (1994).
9. J. L. Cohen, B. Dubetsky, and P. R. Berman, *Phys. Rev. A* **60**, 4886 (1999).
10. Y. T. Li, J. Zhang, Z. M. Sheng et al., *Phys. Rev. E* **69**, 036405 (2004).
11. P. Yu. Apel, I. V. Blonskaya, O. L. Orelovitch et al., *Nucl. Instrum. Meth. B* **209**, 329 (2003).
12. Г. Н. Флеров, П. Ю. Апель, А. Ю. Дидык и др., *Атомная энергия* **67**, 274 (1989).
13. D. V. Serebryakov, A. P. Cherkun, B. A. Loyinov, and V. S. Letokhov, *Rev. Sci. Instr.* **73**, 1795 (2002).