

Рис. 5. Принципиальная схема "колесной" мультипликации.

тельно только, чтобы в промежутке между импульсами предыдущее положение фокуса лазера смещалось относительно нового на расстояние в 1–2 мм — размер зоны временно "испорченной" разрядом поверхности. При частоте повторения  $10^4$  Гц это соответствует минимально необходимой линейной скорости вращения порядка  $10 \text{ м с}^{-1}$ . Эксперименты и расчеты показывают, что подобные системы способны выдерживать электрические мощности до 50 кВт, а возможно, и до 100 кВт.

Дальнейшее развитие идея "непрерывной мультипликации" получила в струйном варианте источника. В качестве электродов предложено использовать две струи жидкого металла или сплава с невысокой температурой плавления, вытекающие с большой скоростью из металлических сопел. Насосы поддерживают в системе давление жидкого металла в несколько десятков атмосфер, что заставляет струи двигаться со скоростями в несколько десятков метров в секунду, обеспечивая тем самым охлаждение сопел и отвод тепла.

К струям приложено напряжение, и разряд между ними возникает при фокусировке лазерного излучения на одной из них (рис. 6). Струи не только уносят тепло, выделяющееся в разряде, но и эффективно охлаждают ближайшие к разряду металлические элементы — сопла. Струи попадают в теплообменник и после охлаждения возвращаются с помощью насосов в систему. Ресурс мощности такого технического решения 200 кВт.

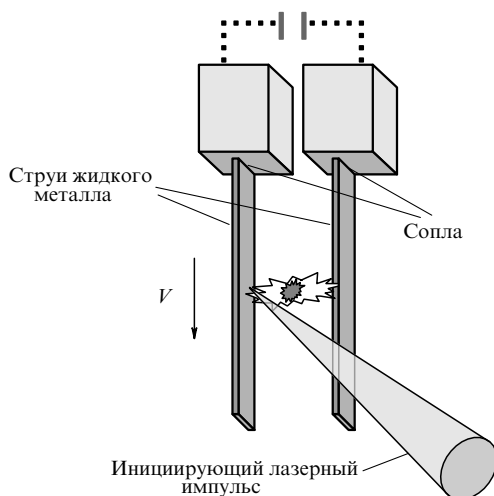


Рис. 6. Схематическое изображение "струйного" источника EUV-излучения.

Выше мы описали некоторые подходы к решению двух проблем — увеличения мощности излучения (тепловой нагрузки) и повышения стабильности дозы излучения. За рамками доклада остались такие важные аспекты создания литографической машины, как время жизни электродов и элементов оптики, в первую очередь коллектора излучения. Последняя проблема непосредственно связана с физикой источника излучения, так как возникает в результате корпускулярных потоков (атомы, ионы, капли материала электродов) из области разряда, так называемых "debris".

Демонстрационный (так называемый "альфа-тул") EUV-литографический аппарат уже создан и осваивается индустрией. Но его основные параметры еще в десять и более раз хуже параметров, соответствующих HVM-требованиям. Индустрия дает исследователям сравнительно короткий срок в два года для преодоления этой пропасти.

## Список литературы

1. Banine V, Moors R *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37** 3207 (2004)
2. Churilov S S, Ryabtsev A N *Phys. Scripta* **73** 614 (2006)
3. Koshelev K N, Pereira N R *J. Appl. Phys.* **69** R21 (1991)
4. Antsiferov P S et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **22** 1073 (1989)
5. Koshelev K N et al., in *EUV Sources for Lithography* (Ed. V Bakshi) (Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2006) p. 175
6. Borisov V M et al., in *EUV Sources for Lithography* (Ed. V Bakshi) (Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2006) p. 477

PACS numbers: **81.07. – b**, **81.16. – c**, 81.16.Ta

## Атомно-проекционная параллельная фабрикация наноструктур

В.И. Балыкин

### 1. Введение

Существуют два принципиально разных подхода к развитию нанотехнологии. Эти подходы условно принято называть технологиями "сверху – вниз" и "снизу – вверх". Подход сверху – вниз основан на уменьшении размеров физических тел вплоть до получения объектов с нанометрическими параметрами. Например, полупроводниковые приборы микроэлектроники создаются с помощью метода оптической литографии, в котором заготовка подвергается обработке лазерным лучом и минимальный размер элементов создаваемой схемы определяется длиной волны лазерного излучения. Отметим, что стандартная оптическая литография имеет дифракционный предел разрешения порядка 65 нм. Существуют несколько других подходов в технологии сверху – вниз, каждый из которых обладает как достоинствами, так и недостатками: литография пучков заряженных частиц имеет проблемы, связанные с серийным производством структур и значительной ролью кулоновского отталкивания; самоорганизующаяся фабрикация все еще требует лучшего понимания физических процессов.

Технология снизу – вверх заключается в том, что создаваемый нанообъект "собирается" из индивидуальных атомов, молекул, биологических клеток и т.п. На возможность и перспективность такого подхода впервые указал Ричард Фейнман [1] в выступлении на ежегодном собрании Американского физического общества в 1959 г. Практическая реализация технологии снизу – вверх стала

возможной с развитием техники зондовой микроскопии, позволившей не только наблюдать нанообъекты с атомным разрешением, но и манипулировать единичными атомами и молекулами. Впервые это удалось сделать сотрудникам лаборатории ИБМ, которые сумели выложить на поверхности монокристалла никеля название своей фирмы (IBM) из 35 атомов ксенона [2]. Такая техника открывает много возможностей для манипуляции на уровне отдельных атомов и молекул, однако методы, основанные на использовании сканирующих зондов, вообще говоря, обладают низкой производительностью и высокой стоимостью.

Создание наноструктур размером порядка 10 нм является сложной технологической задачей, имеющей как практическое, так и фундаментальное значение, поскольку такие структуры образуют мост между классическим и квантово-механическим миром.

## 2. Атомная оптика и атомная нанооптика

Альтернативным подходом для нанотехнологии по принципу снизу – вверх является *атомная оптика*. Атомная оптика представляет собой оптику материальных частиц (наряду с электронной, ионной и нейтронной оптикой) и занимается проблемами формирования ансамблей и пучков нейтральных атомов, управления ими, а также вопросами их применения. Термин *атомная оптика* аналогичен терминам *световая оптика* или *оптика фотонов*. Атомная оптика построена на трех главных методах, первый из которых основан на взаимодействии атомов с веществом, второй — на взаимодействии атомов, имеющих магнитный или электрический дипольный момент со статическим электрическим или магнитным полем и третий — на резонансном (или квазирезонансном) взаимодействии между атомом и оптическим полем.

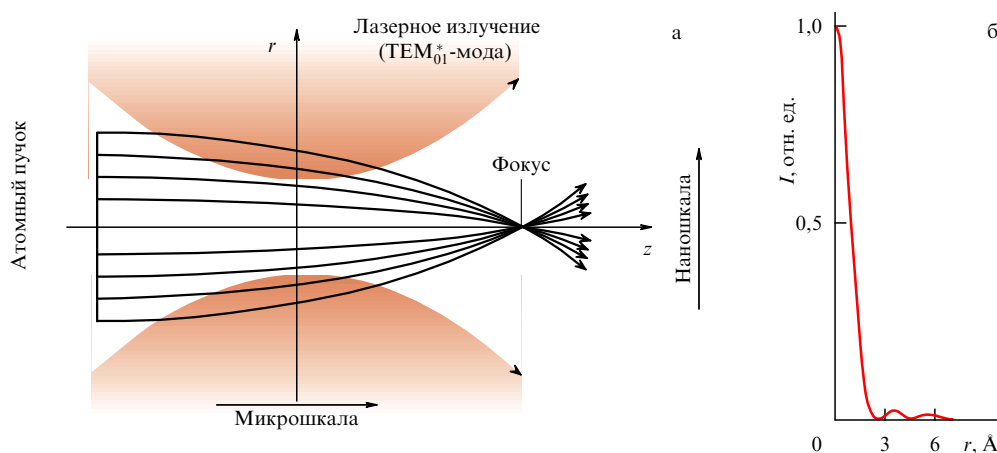
В результате интенсивного развития за последние 10–15 лет атомная оптика стала важной областью атомной, молекулярной и оптической физики, дающей вклад в различные технологии [3–10]. Одним из важных направлений атомной оптики является разработка основных элементов, подобных известным элементам обычной световой оптики, таких как атомные линзы, зеркала, расщепители пучков, интерферометры, и при-

менение этих элементов в практических приборах. В частности, одно из многих применений атомно-оптических элементов — *атомная литография* — представляет значительный интерес для микро- и нанофабрикации материальных структур. В атомной литографии внутренние и (или) внешние степени свободы индивидуальных атомов контролируются с нанометровой точностью внешними электромагнитными полями, что позволяет создавать структуры на поверхности. Благодаря тому, что в этом методе используются нейтральные атомы, он обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами. Прежде всего, в данном методе весьма малым является фундаментальный предел пространственного разрешения, накладываемый дифракцией, поскольку атомы имеют относительно большие массы и соответственно малые де-бройлевские длины волн. Кроме того, при использовании нейтральных атомов отсутствуют кулоновские силы отталкивания. Наконец, манипулирование атомами может быть реализовано параллельно, что позволяет проводить одновременную обработку относительно больших поверхностей. Впервые на возможность осаждения атомов на поверхность с атомарной точностью с помощью методов атомной оптики было указано в работах Балыкина и Летохова [11, 12].

Рассмотрим основные методы фабрикации наноструктур в атомной оптике.

### 2.1. Атомная фабрикация наноструктур на основе бегущих и стоячих световых волн

В последние годы сделан ряд предложений и выполнены эксперименты по нанофабрикации атомных структур сфокусированными атомными пучками с помощью бегущих и стоячих световых волн [11–26]. В целом, можно указать две основные идеи фокусировки атомов лазерным светом бегущих и стоячих световых волн. Одной из них является фокусировка атомов *одиночным лазерным пучком*, впервые реализованная с использованием пучка атомов натрия [13, 14] и гауссова лазерного луча, который играл роль атомной линзы. Данный метод был распространен на другие атомы и лазерные лучи с иной конфигурацией, включая так называемые пустотелые лучи [11, 12, 15, 16]. На рисунке 1а показана схема фокусировки атомов в область размером порядка не-



**Рис. 1.** (а) Фокусировка атомов в ангстремную область с помощью лазерной моды  $TEM_{01}^*$ . (б) Распределение плотности атомов с шириной порядка 1 Å в фокальной плоскости атомной линзы.

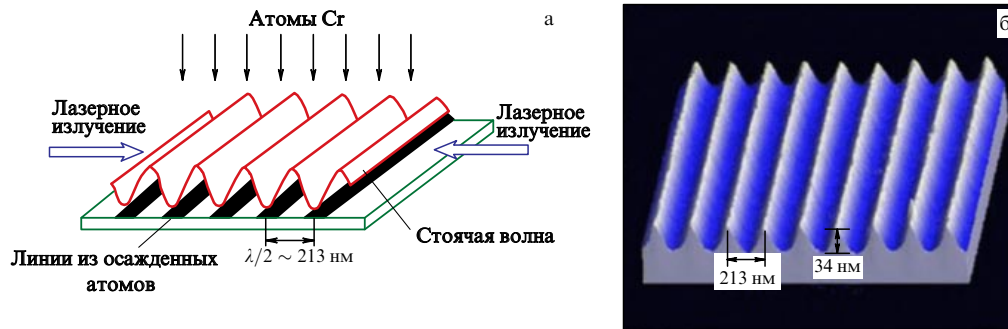


Рис. 2. (а) Схема фокусировки атомов стоячей световой волной. (б) Напыленные полосы атомов хрома с субмикронными ширинами.

скольких ангстрем с помощью лазерной моды  $TEM_{01}^*$ . При распространении атомов внутри пустотелого лазерного луча происходит их фокусировка под действием градиентной силы светового давления. Распределение плотности атомов (рис. 16) в фокальной плоскости такой атомной линзы имеет ширину порядка одного ангстрема, т.е. сравнимую с размером атома [11, 12].

Другая идея построения наноструктур состоит в фокусировке атомов стоячей волной лазерного излучения [17–26], что представляет особенный интерес для создания периодических субмикронных структур. Первая демонстрация напыления атомных структур стоячей световой волной была осуществлена с атомами натрия [17]. McClelland с соавторами напылили полосы атомов хрома с субмикронной шириной [21]. На рисунке 2а приведена схема фокусировки атомов стоячей световой волной, а на рис. 2б показаны напыленные полосы атомов хрома, ширина которых существенно меньше длины волны излучения.

## 2.2. Атомная фабрикация наноструктур на основе лазерных нанополей

Атомная оптика на основе бегущих и стоячих лазерных полей имеет ряд ограничений как принципиального, так и технического характера, обусловленных пространственной "нелокализovanностью" лазерных световых полей. Нелокализovanность лазерного светового поля приводит к нелокализovanности элементов атомной оптики. Следствием этого является несовершенство элементов атомной оптики: aberrации атомных линз, низкая эффективность дифракции атомных волн, ограничения на контраст интерференционных полос в атомных интерферометрах и т.д.

Из общих физических соображений ясно, что для построения элементов атомной оптики, в частности атомной линзы, предпочтительным является использование пространственно локализованных потенциалов взаимодействия атома с полем. Сейчас известно только три типа лазерных полей, достаточно хорошо локализованных в пространстве: а) поверхностная световая волна, которая появляется при полном внутреннем отражении света (одномерная локализация света); б) световое поле, возникающее при дифракции света на структурах, меньших длины волны света (двумерная локализация света); в) световое поле, локализованное в частично открытых волноводах, — "фотонная точка" и "фотонная дырка" (трехмерная локализация света). Два последних типа лазерных нанополей нашли применение в атомной литографии.

### 2.2.1. Атомная линза на основе отверстия Бете (Bethe hole).

Наиболее известный пример двумерной локализации света — это апертура Бете: отверстие в тонком проводящем экране с диаметром, меньшим длины волны излучения [27–30]. Возможность применения такого нанолокализованного поля для задач фокусировки атомных пучков исследовалась в работах [31–34]. Показано [32–35], что набор ближнеполевых микролинз может быть использован для создания микро- и наноструктур на поверхностях.

Схема одиночной ближнеполевой атомной линзы приведена на рис. 3а. Лазерный свет падает на проводящий экран с отверстием, имеющим диаметр, меньший длины волны света. Поле на верхней стороне экрана состоит из бегущей волны и ближнеполевой компоненты. Последняя обладает следующими замечательными особенностями: 1) величина ближнеполевой компоненты в непосредственной близости от отверстия имеет порядок величины падающего поля, 2) ближнеполевая компонента затухает вне экрана на характерной длине порядка размера отверстия, 3) ближнеполевая компонента обладает аксиальной симметрией в плоскости, параллельной экрану, а ее величина изменяется приблизительно как квадрат расстояния от оси отверстия. Точное формальное решение задачи дифракции плоской волны на круглой апертуре в бесконечно тонкой металлической плоскости получено в работах [27–30]. На рисунке 3б показано распределение светового поля в ближней зоне.

Анализ ближнеполевой атомной фокусировки показал [32–35], что эффективная фокусировка может быть достигнута для относительно медленного атомного пучка. При высокой скорости атомов малое время взаимодействия атома с полем ограничивает эффект воздействия поля на атом, а при малой скорости атомов дифракция ограничивает размер атомного пучка в фокусе. Минимальный размер пятна в фокусе определяется рядом факторов, включающих: 1) сферические aberrации; 2) хроматические aberrации; 3) дифракцию атомов на апертуре; 4) конечную расходимость падающего атомного пучка; 5) взаимодействие атомов между собой при достаточно высокой плотности; 6) спонтанное излучение. Размер фокального пятна с учетом вышеприведенных факторов составляет 0,1 оптической длины волны.

### 2.2.2. Атомная линза на основе "фотонной точки" и "фотонной дырки".

Существенным недостатком поля, которое локализовано вблизи одиночного отверстия,

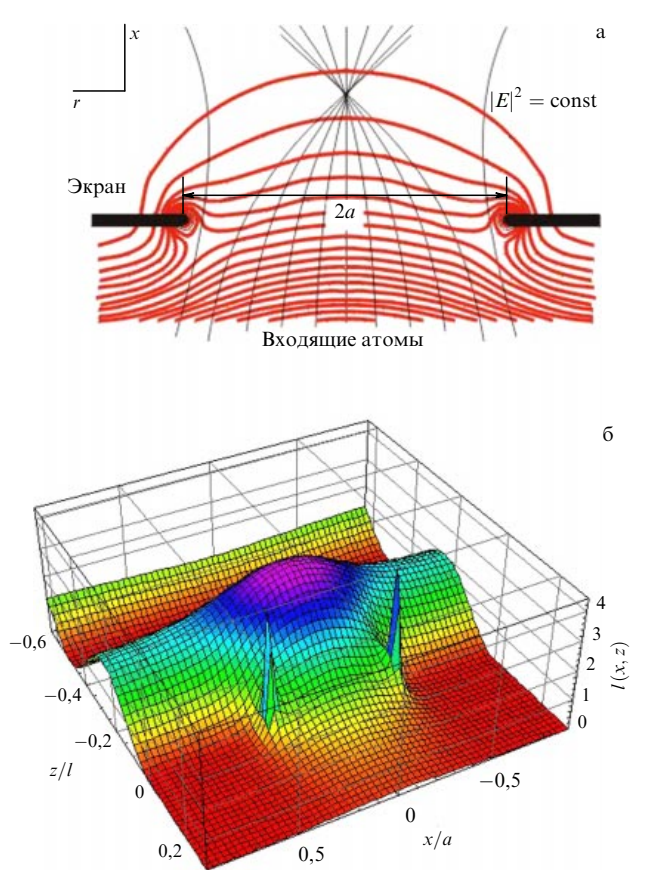


Рис. 3. (а) Атомная линза на основе дифракции света на отверстии Бете. (б) Распределение интенсивности светового поля в ближней зоне при дифракции света на отверстии Бете.

используемого в качестве атомной микролинзы, является тот факт, что такое поле неразрывно связано с полем сопутствующей стоячей волны. При движении атома в этой области возможны процессы спонтанного распада, которые обычно являются нежелательными в задачах атомной литографии. Нами были исследованы новые типы пространственно локализованных лазерных световых полей с характерным пространственным размером, лежащим в нанометровом диапазоне, которые свободны от указанного недостатка [34, 36].

Схема получения такого пространственно локализованного светового нанополя изображена на рис. 4а. Два плоских проводящих экрана с расстоянием между ними порядка или меньшим длины волны света, образуют плоский двумерный волновод для вводимого в него сбоку лазерного излучения. Как известно, для волновода, состоящего из двух параллельных идеально проводящих плоскостей, существуют решения уравнений Максвелла, допускающие распространение излучения в волноводе при сколь угодно малой его толщине  $d$ , в том числе существенно меньшей длины волны излучения.

Если в проводящих экранах имеются два малых соосных отверстия с радиусом  $a$ , существенно меньшим длины волны вводимого излучения,  $a \ll \lambda$ , то излучение практически не выходит через эти отверстия, но вблизи каждого из них излучение, распространяющееся вдоль волновода, окажется сильно модифицированным. Фактически, вблизи отверстий происходит уменьшение поля в области с характерным пространственным размером

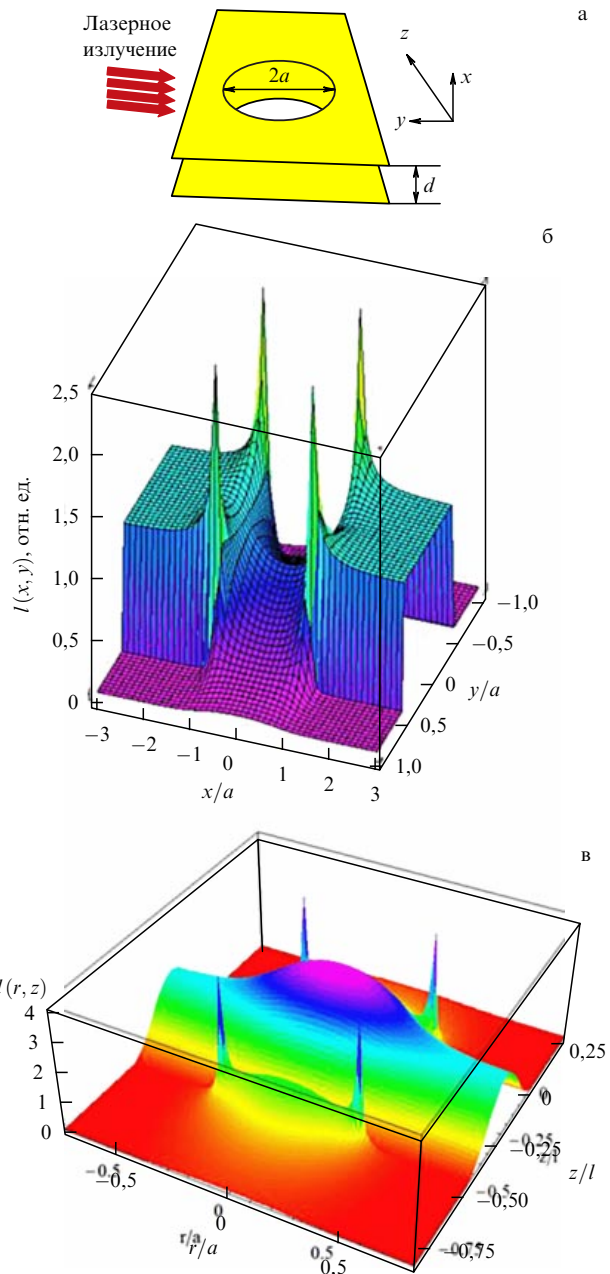


Рис. 4. Трехмерная нанолокализация света. (а) Схема получения пространственно-локализованного светового нанополя: два проводящих экрана с расстоянием  $d$  между их плоскостями порядка или меньшим длины волны света образуют плоский двумерный волновод для вводимого в него сбоку лазерного излучения. (б) Распределение плотности энергии электрического поля "фотонной дырки". (в) Распределение плотности энергии электрического поля "фотонной точки".

порядка диаметра отверстия, т.е. существенно меньшим длины волны излучения. Объем такой области  $V \ll \lambda^3$ . Модификация поля вблизи отверстий зависит от поляризации лазерного поля внутри волновода. Распределение плотности энергии для излучения с вектором электрического поля, перпендикулярным плоскости волновода, показано на рис. 4б. Такого рода модификацию поля назвали "фотонной дыркой" [34]. Видно, что в окрестности отверстий образуется "фотонная дырка" с характерными размерами, определяемыми размерами отверстий и толщиной волновода.

На рисунке 4в показано распределение интенсивности поля вблизи отверстия плоского волновода и внутри волновода в случае, когда вектор электрического поля лазерного излучения параллелен плоскости волновода, толщина волновода равна половине длины волны, а радиус отверстия  $a = \lambda/2$ . Как видно из рисунка, поле спадает достаточно быстро вне волновода в направлении, перпендикулярном плоскости волновода, и имеет максимум в середине волновода, т.е. образуется "фотонная точка". Характерный объем такой "фотонной точки" также меньше  $\lambda^3$ . Острые пики интенсивности поля вблизи края апертуры обусловлены предположением о бесконечной проводимости стенок волновода. Важно отметить, что величина максимума вдвое превышает величину максимума в случае одного отверстия. Это обстоятельство, обусловленное конструктивной интерференцией полей, рассеянных отверстиями, позволяет использовать поля меньшие, чем в случае одиночного отверстия.

"Фотонная точка" и "фотонная дырка" могут использоваться для фокусировки атомных пучков градиентной силой, которая пропорциональна интенсивности электрического поля [34, 36]. Атом при положительной расстройке частоты лазерного излучения относительно частоты излучения атома выталкивается в область более слабых полей, а при отрицательной втягивается в область более сильных полей.

### 2.3. Атомная наноперьевая литография

Наноперьевая литография — это способ построения произвольных структур на поверхности, аналогичный нанесению на бумагу чернильных линий с помощью перьевой ручки. Для проведения таких линий в наномасштабе необходима наноручка. В первых наноручках (разработанных в Нортвестернском университете, США) в качестве пера использовались зонды атомного силового микроскопа. В таком методе нанолитографии резервуар атомов-чернил находится на кончике сканирующего зонда, который, передвигаясь по поверхности, оставляет за собой линии, имеющие атомный размер. Серьезным недостатком метода является большая длительность процесса создания наноструктур.

Атомное перо [37] представляет собой нанометровое отверстие в экране, на который падает атомный пучок. Атомы, прошедшие через наноотверстие, создают на поверхности за экраном нанопятно. Перемещение наноотверстия позволяет создавать наноструктуры произвольного профиля. Число отверстий может быть очень большим ( $\sim 10^7$ ), что дает возможность осуществлять параллельную нанофабрикацию атомов. На рисунке 5 показана одна из наноструктур, созданная с помощью атомного нанопера из атомов Сг [37]. Ширина этих наноструктур на полувысоте составляет 170 нм.

### 2.4. Атомная камера-обскура с нанометровым разрешением

Несмотря на многочисленность предложений по фокусировке атомных пучков лазерным излучением, данная проблема с экспериментальной точки зрения остается сложной. Основная трудность заключается в создании потенциала взаимодействия атома с электромагнитным полем, который по свойствам был бы близким к "идеальной" линзе для атомов.

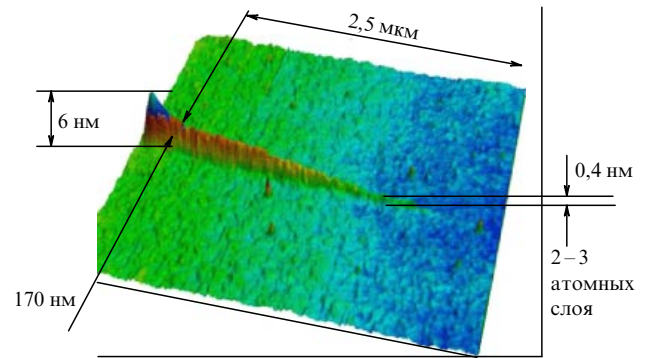


Рис. 5. Наноструктура из атомов Сг в виде полосы с переменной высотой, созданная атомным нанопером. Ширина наноструктуры 170 нм [36].

Нами [38] впервые экспериментально реализован иной подход к проблеме фокусировки и построения изображения в атомной оптике, основанный на хорошо известной идее камеры-обскуры, используемой как в световой оптике, так и в современной экспериментальной физике в тех случаях, когда создание фокусирующего потенциала затруднительно [39]. В оптике камера-обскуры — это камера без линзы. Формирующее изображение свет проходит через отверстие, которое должно быть достаточно малым для получения четкого изображения.

Принципиальная схема эксперимента с атомной камерой-обскурой показана на рис. 6. Пучок атомов, который пропускается через набор отверстий в металлической маске, формирует, по аналогии с оптикой, "светящийся объект" с заданной геометрией. Атомы, прошедшие через отверстия в маске, распространяясь в вакууме по прямолинейным траекториям, подобно световым лучам, попадают на тонкую пленку с большим количеством отверстий конической формы, размещенную на расстоянии  $L$  от маски. Каждое отверстие пленки является для атомов камерой-обскурой, формирующей индивидуальное изображение объекта на поверхности подложки, находящейся на малом расстоянии  $l$  за пленкой. В такой геометрии на подложке создается набор уменьшенных примерно в  $m = L/l$  раз изображений объекта, образованных напыленными на поверхность атомами. В эксперименте формирующий объект металлическая маска помещалась в непосредственной близости от атомного источника. В качестве тонкой пленки с

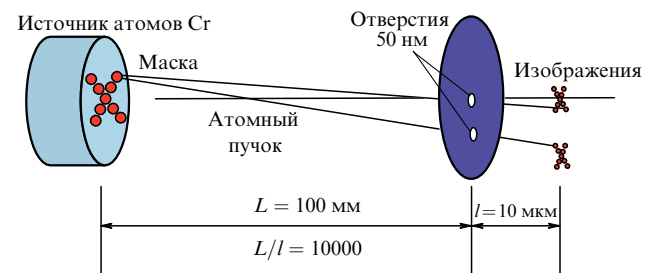


Рис. 6. Схема атомной камеры-обскуры. Пучок атомов Сг, пропускаемый через набор отверстий в металлической маске, формирует "светящийся объект" заданной геометрии. Атомы, проходя через отверстия в маске и распространяясь по прямолинейным траекториям в вакууме, попадают на тонкую пленку с отверстиями. Каждое отверстие пленки является для атомов камерой-обскурой, формирующей инвертированное изображение объекта на подложке.

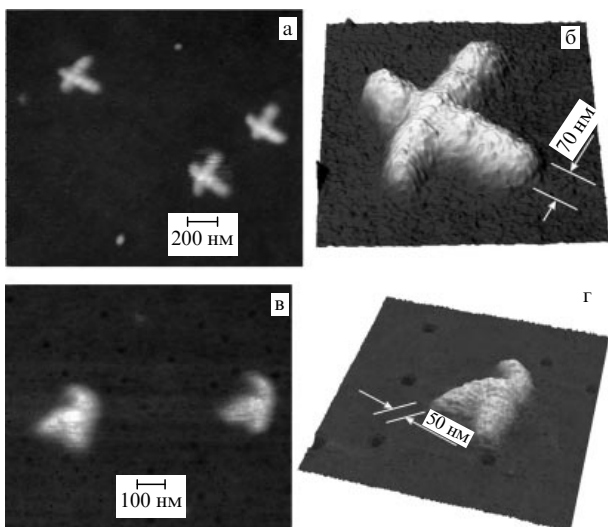
отверстиями использовалась трековая мембрана с асимметричной структурой [40], имеющая толщину 5 мкм и диаметр отверстий  $d = 20 - 1000$  нм.

В рассматриваемом эксперименте каждая из камер-обскур создает в плоскости поверхности подложки "точку" изображения радиусом  $a = (d/2)(1 + 1/m)$ . Приближение геометрической атомной оптики реализуется при следующем ограничении дифракционного размера для атомов с длиной волны де Бройля  $\lambda_{dB}$ :  $1,22 (\lambda_{dB}/d) l \ll \ll d(1 + 1/m)$ . В таком случае изображение, являясь инвертированной копией объекта, уменьшенной в  $m$  раз, имеет разрешение порядка  $d$ , что позволяет создавать структуры нанометрового размера.

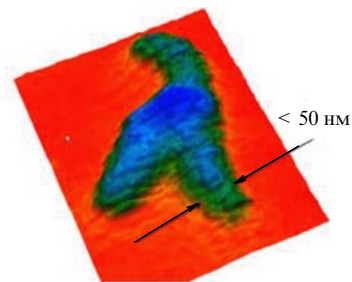
В эксперименте средняя скорость атомов Сг в пучке составляла примерно  $900 \text{ м с}^{-1}$ , что соответствует длине волны де Бройля  $\lambda_{dB} = 0,08 \text{ \AA}$ . При такой длине волны дифракцией атомов в атомной камере-обскуре можно пренебречь.

На рисунке 7а,б представлены наноструктуры из атомов Сг на поверхности стекла, полученные с помощью атомной камеры-обскуры и "маски-объекта" в виде креста. Показаны участки подложки площадью  $2 \times 2 \text{ мкм}$  (рис. 7а) и  $800 \times 800 \text{ нм}$  (рис. 7б). Наноструктуры исследовались с помощью сканирующего атомно-силового микроскопа. Наряду с почти полностью сформированными изображениями креста, на рисунке видны также структуры с изображением только его части. Это происходит вследствие частичного блокирования атомов, формирующих изображения креста, что обусловлено непараллельностью осей различных отверстий трековой мембраны.

На рисунке 7б приведено детальное, наиболее полное изображение одного из крестов. Ширина наноструктур по основанию составляет примерно 110 нм, что соответствует прямолинейному прохождению атомов пучка через отверстия камер-обскур и определяется суммой их входного диаметра  $d = 50 \text{ нм}$  и диаметра изображения отверстия  $d_0 = 0,5 \text{ мм}/8000 = 62 \text{ нм}$ . Ширина на полувысоте составляет 70 нм.



**Рис. 7.** Наноструктуры атомов Сг на поверхности стекла, полученные с помощью атомной камеры-обскуры и маски-объекта в виде креста: площадь участков подложки (а)  $2 \times 2 \text{ мкм}$ , (б)  $800 \times 800 \text{ нм}$ . Наноструктуры атомов Сг для маски-объекта в виде буквы  $\lambda$ : площадь участков подложки (в)  $1 \times 1 \text{ мкм}$ , (г)  $500 \times 500 \text{ нм}$ .



**Рис. 8.** Наноструктура из атомов Сг в виде буквы лямбда, являющейся символом Института спектроскопии РАН.

На рисунке 7в, г представлены результаты эксперимента с использованием маски в форме греческой буквы лямбда. Размеры этой маски меньше, чем маски типа "крест", что привело к увеличению доли полных, неинвертированных изображений. Как видно из рисунка, ширина образованных наноструктур на полувысоте составляет 50 нм.

Рисунок 8 показывает наноструктуру из атомов Сг в виде буквы лямбда, являющейся символом Института спектроскопии РАН.

### 3. Заключение

Исследованы подходы к нанотехнологии по принципу снизу–вверх, в которых создаваемый нанобъект "собирается" из индивидуальных атомов, молекул, биологических клеток и т.п. Возможность реализации технологии снизу–вверх появилась с развитием техники зондовой микроскопии. Однако с практической точки зрения методы, основанные на использовании сканирующих зондов, мало привлекательны, поскольку обладают низкой производительностью и высокой стоимостью. Альтернативным методом для нанотехнологии по принципу снизу–вверх является атомная оптика. В этом методе внутренние или внешние степени свободы индивидуальных атомов контролируются с нанометровой точностью лазерными полями, что позволяет создавать на поверхности структуры с нанометровой точностью.

### Список литературы

1. Feynman R, <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>
2. Eigler D M, Schweizer E K *Nature* **344** 534 (1990)
3. Berggren K K et al. *Science* **269** 1255 (1995)
4. Rempe G, Schleich W (Eds) *Appl. Phys. B* **60** (2–3, Special Issue) 129 (1995)
5. Balykin V I, Letokhov V S *Atom Optics with Laser Light* (Laser Sciences and Technology, Vol. 18) (Chur: Harward Acad. Publ., 1995)
6. Arimondo E, Bachor H -A (Eds) *Quantum Semiclass. Opt.* **8** (3, Special Issue) 495 (1996)
7. Meystre P *Atom Optics* (Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics, Vol. 33) (New York: AIP Press/Springer, 2001)
8. Meschede D, Mlynek J (Eds.) *Appl. Phys. B* **70** (5, Special Issue) (2000)
9. McClelland J J "Nanofabrication via atom optics", in *Handbook of Nanostructured Materials and Technology* (Ed. H Nalwa) Vol. 1 (Cambridge: Academic Press, 1999)
10. Balykin V I, Klimov V V, Letokhov V S "Atom nano-optics", in *Handbook of Theoretical and Computational Nanotechnology* (Eds M Rieth, W Schommers) Vol. 7 (Amsterdam: Elsevier, 2006) p. 1
11. Balykin V I, Letokhov V S *Opt. Commun.* **64** 151 (1987)
12. Балькин В И, Летохов В С *ЖЭТФ* **94** 140 (1988)

13. Bjorkholm J E et al. *Phys. Rev. Lett.* **41** 1361 (1978)
14. Bjorkholm J E et al. *Opt. Lett.* **5** 111 (1980)
15. Gallatin G M, Gould P L *J. Opt. Soc. Am. B* **8** 502 (1991)
16. McClelland J J, Scheinfein M R *J. Opt. Soc. Am. B* **8** 1974 (1991)
17. Prentiss M et al. *Appl. Phys. Lett.* **60** 1027 (1992)
18. Cohen J L, Dubetsky B, Berman P R *Phys. Rev. A* **60** 4886 (1999)
19. Sleator T et al. *Appl. Phys. B* **54** 375 (1992)
20. Timp G et al. *Phys. Rev. Lett.* **69** 1636 (1992)
21. McClelland J J et al. *Science* **262** 877 (1993)
22. McGowan R W, Giltner D M, Lee S A *Opt. Lett.* **20** 2535 (1995)
23. Gupta R et al. *Phys. Rev. Lett.* **76** 4689 (1996)
24. Celotta R J et al. *J. Appl. Phys.* **79** 6079 (1996)
25. Drodofsky U et al. *Microelectron. Eng.* **30** 383 (1996)
26. Mützel M, Haubrich D, Meschede D *Appl. Phys. B* **70** 689 (2000)
27. Bethe H A *Phys. Rev.* **66** 163 (1944)
28. Meixner J, Andrejewski W *Ann. Phys. (Leipzig)* **59** 3318 (1950)
29. Nomura Y, Katsura S *J. Phys. Soc. Jpn.* **10** 285 (1955)
30. Levitan Y J. *Appl. Phys.* **60** 1577 (1986)
31. Klimov V V, Letokhov V S *Opt. Commun.* **106** 151 (1994)
32. Balykin V I, Klimov V P, Letokhov V S *J. Phys. II (France)* **4** 1981 (1994)
33. Балькин В И, Климов В В, Летохов В С *Письма в ЖЭТФ* **59** 219 (1994)
34. Балькин В И, Климов В В, Летохов В С *Письма в ЖЭТФ* **78** 11 (2003)
35. Balykin V, Klimov V, Letokhov V *Opt. & Photon. News* **16** (3) 44 (2005)
36. Балькин В И, Миногин В Г, Руднев С Н *ЖЭТФ* **130** 784 (2006)
37. Балькин В И и др. *ЖЭТФ* (в печати)
38. Балькин В И и др. *Письма ЖЭТФ* **84** 544 (2006)
39. Li Y T et al. *Phys. Rev. E* **69** 036405 (2004)
40. Apel P Yu et al. *Nucl. Instrum. Meth. B* **209** 329 (2003)

PACS numbers: 61.46.Fg, **85.85.+j**, 87.80.Mj

## Свойства и нанотехнологические применения нанотрубок

Ю.Е. Лозовик, А.М. Попов

### 1. Введение

В последнее десятилетие достигнут значительный прогресс в развитии наномеханики. В частности, продемонстрирована возможность манипуляции объектами нанометрового размера [1], рассмотрены принципиальные схемы наномеханических систем (НЭМС), в которых может быть реализовано управляемое движение нанообъектов [2]. Поиск нанообъектов, которые могут использоваться в качестве подвижных элементов НЭМС, является сейчас весьма актуальной задачей. Возможность произвольного [3, 4], контролируемого с помощью атомно-силового микроскопа [5, 6] относительного движения слоев в многослойных углеродных нанотрубках [7] и экстраординарные упругие свойства слоев углеродных нанотрубок [8–12] делают перспективным использование слоев углеродных нанотрубок в качестве элементов НЭМС. Предложен ряд наномеханизмов, основанных на относительном скольжении или вращении слоев нанотрубки: наноподшипник [13], наношестеренка [14], нанопереключател [15], нанореле [16, 17], гигагерцевый осциллятор [18, 19] и броуновский наномотор [20, 21]. Уникальные электронные свойства углеродных нанотрубок [22] находят применение в таких экспериментально реализованных электронных наноструктурах, как нанотранзисторы [23], нанодиоды [24], наномодулятор тока [25] и др. Более того, недавно соз-

даны наномоторы, основанные на относительном вращении слоев углеродных нанотрубок [26, 27]. В указанных нанорезисторе, нанореле и наномоторе слои нанотрубки являются одновременно и подвижными элементами НЭМС, и элементами электрической цепи. Недавно к этому ряду применений углеродных нанотрубок в НЭМС добавилось новое уникальное и перспективное применение, а именно было показано, что двухслойная нанотрубка (ДУНТ) может представлять собой пару с эффективной "винтовой резьбой" [28–32]. В связи с этим были предложены принципиальные схемы НЭМС, основанных на углеродных нанотрубках, устройство которых включает в себя пару "наноболт – нагоайка": "нанодрель" для нанолокальной модификации поверхности [28–30, 32] и наноактуатор, в котором сила, направленная вдоль оси нанотрубки, преобразуется в относительное вращение ее слоев [17, 32, 33]. Согласно расчетам проводимость нанотрубки существенно изменяется при незначительном (на несколько долей ангстрема) относительном смещении ее слоев вдоль оси нанотрубки [34–36] или при относительном повороте слоев [37]. Это свойство нанотрубок мы предложили использовать в таких НЭМС, как переменный нанорезистор [28–30], нанодатчик натяжения [38] и электромеханический нанотермометр [17, 39].

Углеродные нанотрубки весьма перспективны для применения в НЭМС, основанных не только на относительном движении слоев нанотрубок, но и на изгибе нанотрубок. Среди таких НЭМС прежде всего следует отметить наноосцилляторы, в которых измерение частоты поперечных колебаний нанотрубки используется для измерения свойств системы. Так, например, по данным измерения частоты колебаний нанотрубки, закрепленной с одного конца, определена масса наночастицы и даже отдельной молекулы, находящихся на другом конце нанотрубки [11]; осуществлено наноустройство, в котором посредством измерения частоты колебаний нанотрубки, закрепленной с обоих концов, можно измерить силу, действующую на нанотрубку, с точностью  $5 \times 10^{-18}$  Н [40]. Кроме того, изготовлены нанопинцет, в котором захват наночастиц и манипуляция ими осуществляется с помощью изгиба концов двух нанотрубок электростатическими силами [41, 42] и ячейка памяти из двух пересекающихся нанотрубок [43].

Данный доклад посвящен НЭМС, основанным на углеродных нанотрубках с подвижными слоями. В разделе 2 описаны структура и свойства нанотрубок. В разделе 3 рассмотрены взаимодействие и относительное движение слоев нанотрубок. В разделе 4 обсуждаются способы управления движением слоев нанотрубок и режимы работы НЭМС. Раздел 5 посвящен принципиальным схемам и принципам работы НЭМС, основанных на углеродных нанотрубках. Наконец, в разделе 6 рассмотрено развитие методов нанотехнологии, которые могут использоваться для изготовления НЭМС на основе углеродных нанотрубок.

## 2. Структура и свойства нанотрубок

### 2.1. Структура однослойных нанотрубок

Однослойную углеродную нанотрубку (ОУНТ) можно представить как свернутую одиночную плоскость графита (графен). Структура ОУНТ определяется парой