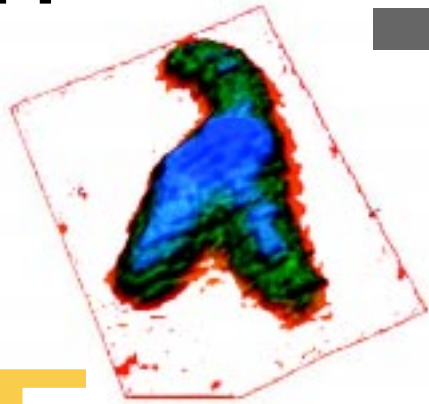


# Камера-обскура для нанотехнолога

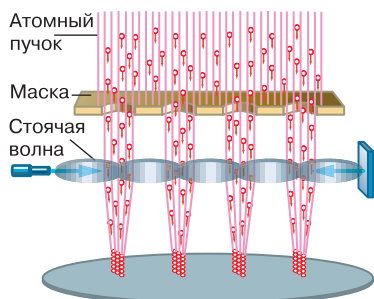
Кандидат  
физико-математических  
наук  
**С.М.Комаров**



**Е**сли вещество обладает волновыми свойствами, почему бы не воспользоваться этим обстоятельством и не создать для работы с ним устройства атомной оптики? Ответ на этот вопрос решили дать ученые из Института спектроскопии РАН во главе с профессором В.С.Летоховым. Причем замахнулись они, ни много ни мало, а на принципиально иной метод получения нанобъектов.

Эта история началась в 1988 году. Именно тогда в журнале «Письма в ЖЭТФ» вышла статья В.И.Балькина и В.С.Летохова из ИСАН, в которой они рассказывали, как с помощью лазерного луча можно сфокусировать пучок атомов.

«Существует два подхода к нанотехнологиям. Один — идти сверху вниз, то есть брать массивный материал и тем или иным способом отщеплять от него атомы, пока толщина линий остающегося рельефа не оказывается достаточно малой; в пределе — сравнима с межатомными расстояниями. Такой принцип работает во всей современной микроэлектронике. Альтернатива — движение снизу вверх,



**1**  
Проходя сквозь стоячую волну света, атомный пучок разбивается на полосы

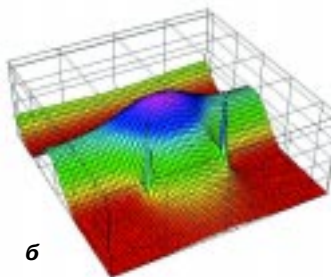
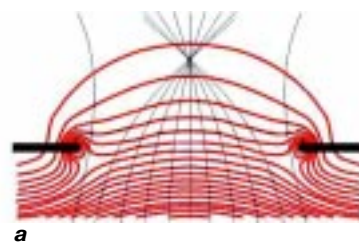
когда наноструктуру складывают из отдельных атомов, — рассказывает об основной идее этого исследования профессор В.И.Балькин. — Второй подход стал возможен после изобретения сканирующего туннельного микроскопа Гердом Биннингом и Хейнрихом Рорером (Нобелевская премия 1986 года) из лаборатории компании «IBM» в Цюрихе. С его помощью сотрудники доктора Дона Эглера из Калифорнийского научного центра «IBM» впервые выложили из атомов ксенона название своей компании. Это был очень красивый эксперимент, но выкладывать атомы вручную — скорее развлечение, чем технологический процесс. Совсем другое дело работать с пучком атомов. А для этого надо уметь его сфокусировать в точку диаметром в считанные ангстремы. К тому времени у нас был многолетний опыт работы по охлаждению атомов лазерным светом, и мы решили применить его, чтобы с помощью лазера сфокусировать атомный пучок должного диаметра. Расчет показал, что это вполне можно сделать».

Сфокусированный пучок атомов сильно отличается от бозе-эйнштейновского конденсата или атомного лазера, речь о которых идет в предыдущей статье. Помимо того что его интенсивность гораздо больше —  $10^7-10^{10}$  атомов в секунду — из трех компонент вектора скорости у них малы лишь две, направленные перпендикулярно пучку. А вдоль пучка скорости атомов велики. Вот на эти две компоненты скорости и нацелились ученые в надежде изменять их должным образом с помощью луча лазера. Одна из идей, которые приходили им в голову, была такова. Луч света можно сфокусировать с помощью линзы, то есть прозрачного объекта, в каждой точке поверхности которого свет преломляется по-своему. Луч лазера, как следует из работ по оптическим ловушкам, способен влиять на движение атомов. Если в разных участках луча это влияние будет неодинаковым, траектории атомов, прошедших сквозь него, тоже изменятся по-разному. Значит,

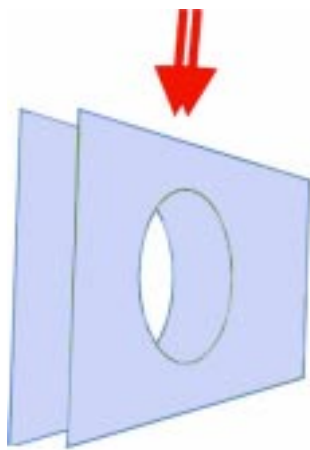
в такой системе с переменной интенсивностью лазерного света атомный пучок будет вести себя как в линзе.

Создать переменную интенсивность света не так уж и сложно, например это может быть стоячая волна, которая получается, когда лазерный луч отражается от зеркала и интерферирует сам с собой. Возникает череда максимумов и минимумов интенсивности света с периодом, равным половине его длины волны. Такую систему собрали (рис. 1), и оказалось, что атомный пучок действительно фокусируется: на подложке, куда в конце концов прилетали атомы, получалась система полосок с периодом, который соответствует периоду стоячей волны. Впоследствии эти эксперименты успешно повторили во многих лабораториях мира.

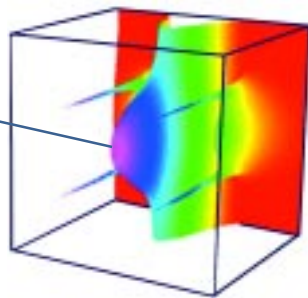
«Создание линзы из стоячей волны было большим успехом, однако через некоторое время появился вопрос: а много ли мы с ее помощью можем сделать? Как оказалось, немного, а именно структуры двух типов: полоски и точки; во втором случае нужно взять два перпендикуляр-



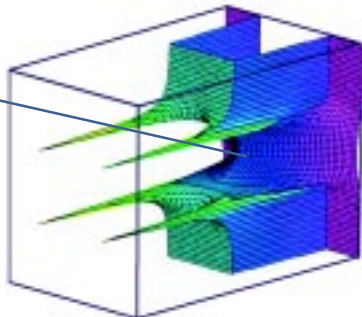
**2**  
Свет слегка «выгибается» сквозь малое отверстие (а), и в результате на стоячей волне перед отверстием возникает фотонная точка — область с повышенной интенсивностью света (б)



фотонная точки



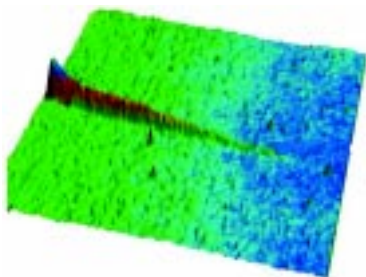
фотонная яма



3  
**В волноводе, образованном двумя пластинками с маленькими отверстиями, могут возникать как фотонные точки, так и фотонные дыры. Это зависит от того, как направлен вектор напряженности электрического поля волны — параллельно или перпендикулярно пластинкам**

ных лазерных луча. И этим все разнообразие исчерпывается. Даже расстояние между линиями менять не просто — оно всегда связано с длиной волны лазерного излучения. Тогда возникла идея создать линзу следующего поколения», — продолжает рассказ профессор Балыкин.

Она выглядит как дырочка диаметром в десяток нанометров, проделанная в фольге. Суть идеи состоит в том, что свет не способен пройти сквозь отверстие, диаметр которого много меньше длины волны; он отражается, формируя стоячую волну. Однако если приглядеться к деталям, то выяснится, что на самом деле следует говорить: «Он почти совсем не проходит». А именно — в районе дырочки свет, прежде чем отразиться, немного продавливается за противоположный край фольги. Расчет показывает (рис. 2), что при этом непосредственно перед дырочкой на гребне стоячей волны возникает бугорок — здесь концентрируется световое излучение. Если направить пучок атомов сквозь такую дырочку, то бугорок



4  
**Эту линию ученые из ИСАНА прочертили атомным пером. Изменяя его параметры, можно делать линии толщиной 50—200 нм и высотой от десяти до трех атомных слоев**

станет работать, подобно линзе для атомного пучка. Казалось бы, поставленная в 1988 году цель достигнута. Однако при внимательном взгляде на такую оптическую систему возникает вопрос — а где же ставить подложку, на которой станут осаждаться эти атомы? Если расположить ее в месте фокусировки, свет через подложку пройти не сможет! Тогда была найдена еще одна схема, которая, похоже, служит единственно возможной оптической линзой для атомных пучков. В ней тоже есть пластинка с дырочками, точнее, две пластинки, а свет распространяется не перпендикулярно им, а вдоль. Секрет в том, что расстояние между пластинками меньше длины волны света. В таких условиях луч света тоже слегка выпирает из дырочек, как будто это не световая волна, а густой бетонный раствор, который по изношенному шлангу закачивают в опалубку. Таким способом можно создать два типа линз (рис. 3). В одном случае в пространстве между дырочками возникает световой бугорок — повышение интенсивности света, во втором — световой тоннель, внутри которого интенсивность света мала. И тот и другой тип линз можно использовать для фокусировки атомных пучков. Более того, в первом случае система бугорков от разных дырочек может служить ловушкой для отдельных атомов, а это уже шаг к квантовым компьютерам.

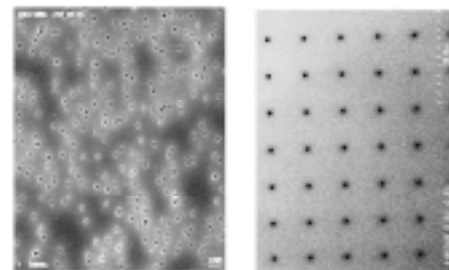
«Такая линза дает гораздо больше свободы при работе с атомным пучком, но, к сожалению, этот пучок требуется тщательно готовить. Расстояние, которое проходят атомы внутри



## ТЕХНОЛОГИИ

линзы, невелико, менее микрона. И за это время свет должен успеть изменить их траектории. Значит, атомы должны двигаться не очень быстро, а в перпендикулярных пучку направлениях их скорость должна быть совсем мала. Для этого требуется предварительно охладить пучок лазерным светом. Методика охлаждения отработана, но она все равно довольно сложна и пока не годится для применения в массовом производстве. Мы продолжаем эксперименты с такими линзами, однако основную перспективу видим в другой работе. Она связана с использованием трековых мембран», — говорит В.И.Балыкин.

В самом деле, зачем фокусировать атомный пучок, когда из широкого пучка с помощью маленькой дырочки можно вырезать узкий, диаметром в считанные нанометры луч? Конечно, через отверстие пройдет гораздо меньше атомов, но это можно компенсировать, увеличив мощность исход-



5  
**В Токийском университете для ученых из ИСАНА сделали пластинки из нитрида кремния с правильно расположенными дырками (а). К сожалению, эти пластинки дороги и хрупки, они легко гибнут в руках студентов, осваивающих методы управления атомными пучками. Трековые мембраны из Объединенного института ядерных исследований (б) менее красивы, но гораздо более надежны**

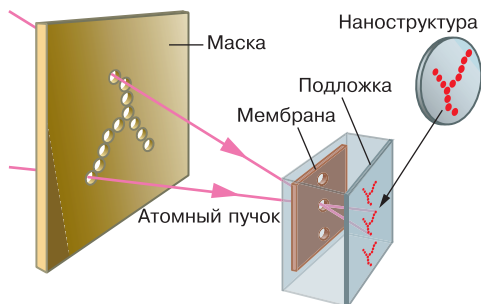
ного пучка. Если получившийся атомный луч перемещать, то он превратится в атомное перо, которым, как настоящим пером, можно на подложке рисовать заданные структуры нанометрового размера (рис. 4). А маленькие, диаметром в десяток нанометров, дырочки можно сделать двумя методами. Либо в металлической



пластине с помощью ионного травления (это дорогой метод), либо взяв полимерную трековую мембрану, которые с помощью ускорителя создают ученые в Дубне (рис. 5). Такие мембраны стоят недорого — их выпускают в массовом количестве, например для фильтров очистки воды «Барьер». Правда, в отличие от «ионных» трековые мембраны лишены порядка — отверстия в них расположе-

соотношения расстояний между объектом и дырочкой и между дырочкой и этой стенкой. Считается, что камеры-обскуры средневековые живописцы применяли для ускорения процесса: проецировали на холст изображения, которые потом обводили. Впоследствии эта камера превратилась в фотокамеру, только для увеличения количества света, проходящего внутрь нее, перед отверстием — диафрагмой фотоаппарата — стали устанавливать линзу.

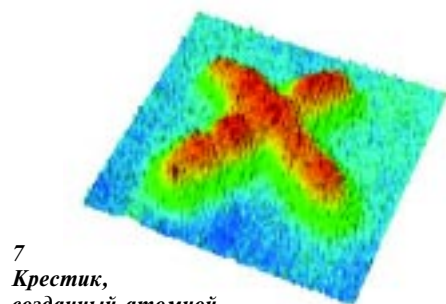
Вот этим старинным принципом и воспользовались ученые из ИСАН. В самом деле, если взять шаблон и поставить его в десяти сантиметрах от мембраны, а экран расположить в десяти микронах от ее обратной стороны, то коэффициент уменьшения составит 10 000 раз. То есть вполне макроскопический узор толщиной в десятую долю миллиметра даст линии шириной в десять нанометров. Если же пучок атомов, который проходит сквозь шаблон, будет не узконаправленным, а широкорасходящимся, то есть атомы станут вылетать из шаблона под разными углами (рис. 6), то он попадет во множество отверстий на трековой мембране и при



6 *Схема формирования изображения в атомной камере-обскуре*

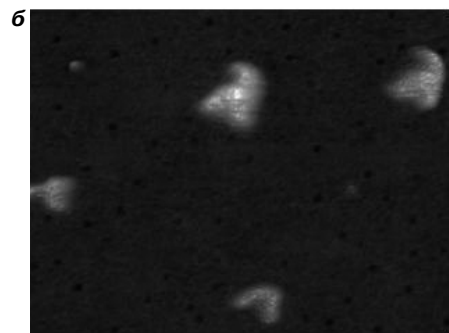
ны хаотически. В результате заранее нельзя предсказать, где именно атомное перо будет рисовать черту. Однако уже существуют способы изготовления трековых мембран с упорядоченным расположением отверстий.

Впрочем, атомное перо — отнюдь не главный шедевр лаборатории Балыкина, на эту роль может ныне претендовать атомная камера-обскура: с ее помощью можно получить одновременно десять миллионов идентичных элементов нанометрового узора. Оптическая камера-обскура — замечательное устройство с историей в многие сотни лет, а служит оно для того, чтобы получать уменьшенные изображения каких-то объектов. Ее конструкция чрезвычайно проста: большой ящик или целое помещение, в стенке которого проделана крохотная дырочка. Через нее от каждой точки объекта проходит лишь узкий луч света, причем он должен идти под определенным углом. В результате в соответствии с законами лучевой оптики на противоположной стенке камеры формируется изображение, размер которого зависит от



7 *Крестик, созданный атомной камерой-обскурой*

выходе из каждого сформирует свое изображение шаблона. Первые опыты поставили с изображением крестика и получили, что толщина линий не превышает 50 нанометров (рис. 7). Почему «не превышает» — потому что такова разрешающая способность имеющегося в лаборатории сканирующего атомно-силового микроскопа. Не исключено, что линии еще тоньше. Следующим объектом была бук-



8 *Шаблон (а) для изготовления буквы «лямбда» и полученные с его помощью изображения в атомной камере-обскуре (б)*

ва «лямбда» (рис. 8) — символ трицкого Института спектроскопии РАН.

«Конечно, не все идет так гладко, как нам хотелось бы, — говорит В.И. Балыкин. — Как оказалось, трековые мембраны очень толстые, длина пор в них исчисляется микронами. Проходя по такому длинному каналу, атомы пучка начинают взаимодействовать со стенками, и возникает расхождение пучков. Главное, правда, не в этом. Из-за толщины, а также потому, что каналы расположены под углом к поверхности мембраны, часть пучков попадает на стенки, и тогда пропадает кусок изображения. Однако это уже технические трудности. Мы же занимаемся фундаментальными исследованиями, нас интересует физика управления атомными пучками. И очень хорошо, что, изучая это явление, нам удастся получать результаты, которые могут пригодиться на практике. Я уверен, что метод одновременного получения миллионов одинаковых структур нанометрового размера с применением макроскопического шаблона найдет свое место среди технологий XXI века».





14-я международная выставка  
химической индустрии

# ХИМИЯ

**3-7 сентября**

[www.chemistry-expo.ru](http://www.chemistry-expo.ru)

**2007**



**ОРГАНИЗАТОР:**

**EXPOCENTR**

при содействии  
**ЗАО "Росхимнефть"**

**Центральный  
выставочный  
комплекс  
"ЭКСПОЦЕНТР"**

При поддержке  
- Министерства промышленности  
и энергетики РФ  
- Российского союза химиков

Экспоненты - более 900 фирм и  
организаций из 29 стран

ЦВК "Экспоцентр"  
123100, Россия, Москва,  
Краснопресненская наб., 14  
Тел.: (495) 255-37-99, 255-25-28  
Факс: (495) 205-60-55  
E-mail: [mir@expocentr.ru](mailto:mir@expocentr.ru)  
[chemica@expocentr.ru](mailto:chemica@expocentr.ru)  
[www.expocentr.ru](http://www.expocentr.ru)