

PACS numbers: 37.25.+k, 81.15.Hi, 81.15.Jj, 81.16.Nd, 81.16.Rf, 85.65.+h

## Способ создания микролинз диаметром менее 50 нм для нанолитографии методами атомной проекционной оптики

А. А. Кузин, А. В. Заблоцкий, А. С. Батурин, Д. А. Лапшин\*,  
П. Н. Мелентьев\*, В. И. Балыкин\*

*Московский физико-технический институт,  
Институтский переулок, 9,  
141700 Долгопрудный, Московская область, Россия*  
*\*Институт спектроскопии РАН,  
ул. Физическая, 5,  
142190 Троицк, Московская область, Россия*

В данной статье предлагается способ создания массива микролинз, предназначенных для атомной проекционной нанолитографии, на мембране  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной порядка 40 нм. На мембрану напыляется проводящая пленка толщиной порядка 30 нм, предотвращающая зарядку, что необходимо для устранения эффективного уширения пучка. Затем сфокусированным ионным пучком прожигаются отверстия. После чего полученные отверстия «заращаются» до нужного диаметра за счет индуцированного электронным пучком осаждения углеродосодержащих соединений из остаточных газов камеры. Минимальный полученный диаметр атомной микролинзы составил 20 нм.

У даній статті пропонується спосіб створення масиву мікролінз, призначених для атомової проєкційної нанолітографії, на мембрані  $\text{Si}_3\text{N}_4$  товщиною порядку 40 нм. На мембрану напорошується провідна плівка товщиною порядку 30 нм, яка запобігає заряджанню, що необхідно для усунення ефективного розширення жмута. Потім сфокусованим йонним жмутом пропалюються отвори. Після чого одержані отвори «зарощуються» до потрібного діаметра за рахунок індукованого електронним жмутом осадження вуглецевмісних сполук із залишкових газів камери. Мінімальний одержаний діаметер атомової мікролінзи склав 20 нм.

The method is suggested for fabrication of the array of microlenses on  $\text{Si}_3\text{N}_4$  membrane with the thickness of 40 nm, which are intended for atomic projective nanolithography. Conductive film with the thickness of 30 nm, which prevents substrate charging, is deposited on the membrane. Such a charging results in a beam widening. Then a focused ion beam burns orifices. After that, orifices are overgrown to a required diameter by electron-beam-assisted

deposition of carbon-bearing compounds from residual camera gases. The minimal diameter of the obtained microlenses is 20 nm.

**Ключевые слова:** нанолитография, атомная оптика, фокусированный ионный пучок, индуцированное электронным пучком осаждение.

(Получено 23 ноября 2007 г.)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Создание отверстий диаметром 10–50 нм и менее в тонких пленках и мембранах является востребованной задачей практического применения нанотехнологий как в области биологии и медицины [1], так и для производства структур нанoeлектроники, спинтроники и т.д. В настоящее время структуры с размерами элементов менее 50 нм и количеством более чем  $10^6$  идентичных элементов производятся в основном методами оптической литографии и наноиmprинтинга. Однако подобные методы с указанной производительностью являются довольно дорогими и недоступными широкому кругу исследователей.

Альтернативный подход состоит в использовании атомной проекционной нанолитографии. Метод основан на фокусировке атомных пучков массивом атомных микролинз. Простейшая схема атомной нанолитографии основана на применении идеи оптической «камеры-обскуры» (рис. 1).

В атомной «камере-обскуре» пучок атомов пропускается через металлическую маску, формируя таким образом «светящийся объект» заданной геометрии с характерными размерами  $Z = 20\text{--}200$  мкм. Атомы, прошедшие через маску, поступают на мембрану, отстоящую от маски на расстоянии  $L = 5$  см, содержащую большое количество (порядка  $10^6$ ) отверстий диаметром 20–200 нм. Каждое из отверстий является «камерой-обскурой», формирующей на поверхности подложки

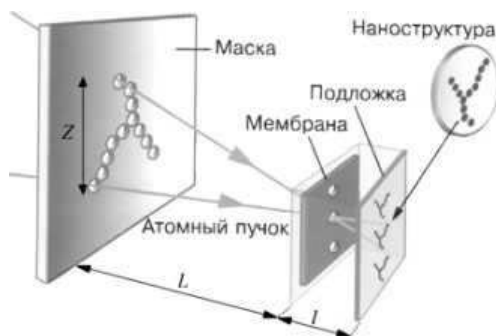


Рис. 1. Схема атомной проекционной нанолитографии.

(находящейся на расстоянии  $l = 5$  мкм) своё индивидуальное изображение «светящегося объекта», уменьшенное в  $10^4$  раз. В результате на подложке формируется массив идентичных маске наноструктур.

В реальной практике критической величиной, определяющей разрешение нанолитографии, является диаметр микролинз, фокусирующих атомный пучок. Для достижения размера создаваемых структур менее 50 нм микролинзы также должны иметь диаметр менее 50 нм.

Такие микролинзы возможно создавать с помощью ускорителя элементарных частиц в результате образование треков разогнанного пучка ионов криптона с пленкой полиэтилентерефталата толщиной 5 мкм [2]. Однако такой способ обладает рядом недостатков: принципиальная невозможность контролировать расположение микролинз; длинный канал трека в пленке, который приводит к падению интенсивности проходящего пучка нейтральных атомов при нанолитографии из-за оседания на стенках и в итоге к «забиванию» канала.

## 2. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД

Для создания массива микролинз в работе используется нанотехнологический комплекс Quanta 3D Dual Beam (FEI Co.), сочетающий в себе растровый электронный микроскоп и управляемый фокусированный ионный пучок. В качестве мембраны была выбрана пленка  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной порядка 40 нм.

В процессе работы выяснилось, что зарядка нитридной пленки производит эффективное уширение пучка ионов, которое приводит к увеличению диаметра прожигаемых отверстий или к полной невозможности ионного травления. Для снятия заряда наносилась пленка толщиной порядка 30 нм из проводящего металла (нержавеющая сталь), которая была заземлена.

Чтобы отследить момент прожигания мембраны, к проводящей подложке под мембраной был подключен пикоамперметр (рис. 2). В момент создания сквозного отверстия происходит скачкообразное изменение величины тока, поглощенного подложкой, что служит сигналом к остановке ионного травления.

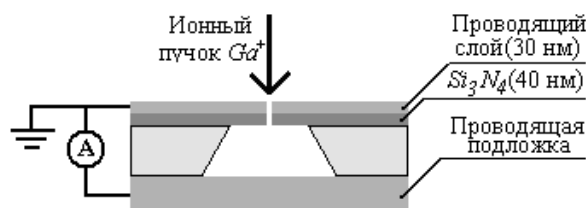


Рис. 2. Создание отверстий в тонкой пленке.

При токе ионного пучка 10 пА и энергии 30 кэВ были получены отверстия диаметром 70–100 нм (рис. 3).

Для получения отверстий менее 50 нм было предложено «заращивать» имеющиеся отверстия за счет индуцированного электронным пучком осаждения углеродосодержащих соединений из остаточных газов рабочей камеры микроскопа [3]. Скорость «заращивания» пропорциональна току вторичной эмиссии электронов, поэтому для электронного пучка задается энергия 2 кэВ, так как это значение энергии обеспечило оптимальную скорость заращивания в данной работе. При этом удалось достичь размеров микролинз порядка 20 нм (рис. 4).

Таким образом, предлагаемый способ создания массива микро-

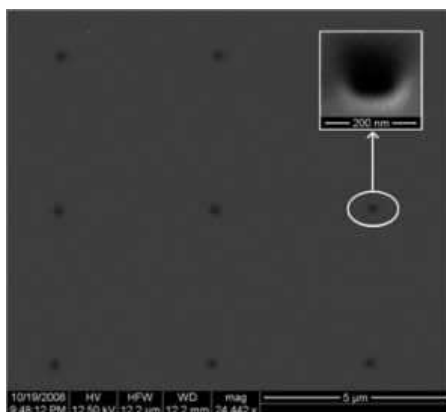


Рис. 3. Отверстия, полученные путем ионной резки.

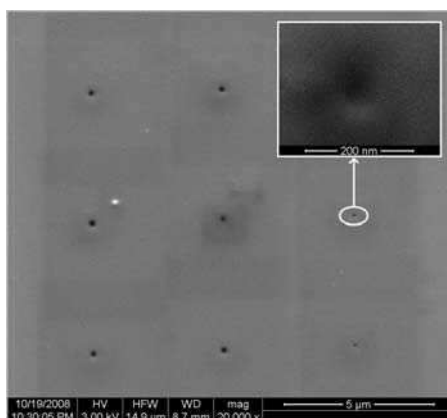


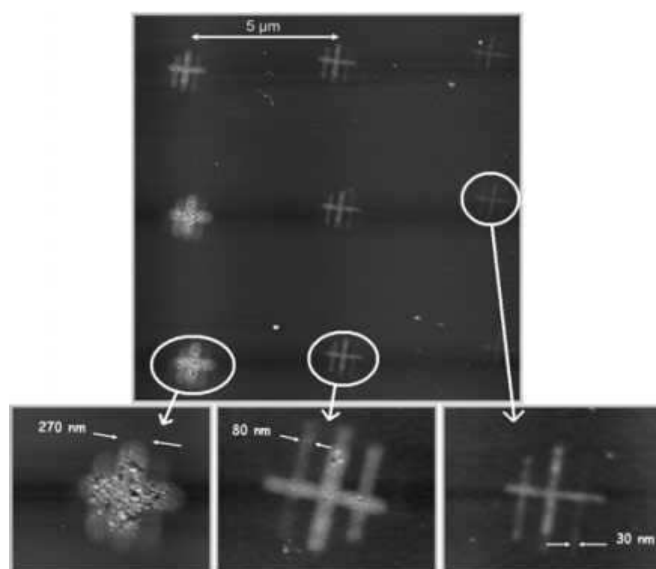
Рис. 4. Отверстия после заращивания за счет осаждения, индуцированного электронным пучком.

линз для нанолитографии состоит из трех этапов: (1) напыление проводящей пленки; (2) вытравливание отверстий минимально возможного диаметра ионным пучком; (3) «заращивание» отверстий до нужного диаметра за счет индуцированного электронным пучком осаждения пленки.

Для автоматизации процесса создания большого массива микролинз можно использовать штатное программное обеспечение электронно-лучевой литографии и ионного травления. Для этого необходимо при ионном травлении задать желаемое количество шаблонов круглой формы с диаметром, равным диаметру ионного пучка. Параметры экспозиции при ионном травлении подбираются для прожигания пленки насквозь. Травление можно прекращать автоматически в момент регистрации резкого увеличения показаний амперметра (рис. 2), измеряющего ток, поглощенный подложкой. Исходя из размеров получившихся отверстий, подбирают дозу экспозиции электронного пучка для «заращивания» отверстий до требуемого диаметра. Область сканирования электронным пучком должна иметь квадратную форму с длиной грани, как минимум в три раза превышающей диаметр отверстия.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Варьируя параметры ионного травления и дозу экспозиции элек-



**Рис. 5.** Наноструктура из атомов In на поверхности Si, полученная средствами атомной проекционной нанолитографии.

тронного пучка, удалось получить отверстия с диаметром от 20 нм до 200 нм. При использовании данных микролинз в атомной проекционной нанолитографии получены структуры с характерным размером от 30 нм до 270 нм (рис. 5).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 08-02-00871-а, № 08-02-00653-а, № 08-02-12045 и Роснауки (Государственный контракт 02.552.11.7033).

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J. Zhou and G. Yang, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, **7**, No. 4: 19 (2006).
2. V. I. Balykin, P. A. Borisov, V. S. Letokhov, P. N. Melent'ev, S. N. Rudnev, A. P. Cherkun, A. P. Akimenko, P. Yu. Apel', and V. A. Skuratov, *JETP Letters*, **84**, No. 8: 466 (2006).