

5;7;11

©1995

АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУР, СФОРМИРОВАННЫХ ИОННЫМИ И ЛАЗЕРНЫМИ ПУЧКАМИ

*А.А.Бугараев, В.С.Лобков, В.М.Яндуганов,
Е.А.Самарский, Н.В.Бердунов*

Использование атомно-силового микроскопа (АСМ) открывает новые возможности для исследования модификации поверхности лазерным или ионным облучением. АСМ, в отличие от сканирующих туннельных микроскопов (СТМ), позволяет получать трехмерное изображение поверхности как проводящих, так и непроводящих сред. При этом основным преимуществом АСМ по сравнению с другими микроскопами является получение с ангстремной точностью достоверных данных о высоте микрорельефа. В СТМ, например, эти данные часто существенно искажаются за счет неоднородного распределения по поверхности электронных свойств и работы выхода, на которые, в свою очередь, влияют адсорбаты, покрывающие при измерениях на воздухе как поверхность, так и иглу СТМ [1].

В настоящей работе впервые продемонстрированы возможности АСМ для исследования имплантированного стекла, на поверхности которого импульсным лазерным излучением сформирован микрорельеф. Исследуемый объект представляет интерес как среда для записи оптической информации.

Ранее нами было показано [2,3], что высокодозовая имплантация ионов металлов формирует в стекле слой толщиной до 60 нм с коэффициентом оптического поглощения имплантированного слоя до 10^5 см^{-1} в видимой и ближней УФ области спектра. Импульсным лазерным излучением можно испарить окрашенный имплантацией тонкий слой поверхности. При этом за счет локального изменения коэффициента поглощения (просветления стекла), коэффициента отражения и микрорельефа поверхности возможна голографическая или бинарная запись информации. В последнем случае, как известно, запись производится в виде отдельных битов путем локального лазерного испарения участков поверхности размером от 0.3 до 1 мкм в диаметре на глубину до 0.1 мкм. На этом принципе основана, в частности, запись информации на оптических дисках памяти [4].

С использованием АСМ можно ответить на два принципиальных вопроса, характеризующих имплантированные стекла как среду для оптической записи информации: какова реальная глубина испаряемого слоя и какова разрешающая способность такой среды. Глубину поглощающего слоя можно регулировать в пределах от 0.3 до 1 мкм, задавая нужную энергию для ускорения ионов в имплантаторе. Разрешающая способность обусловлена природой поглощающих свет центров. В исследуемых стеклах имплантированный слой содержит "захороненные" на глубину до 60 нм частицы металла размером от 5 до 100 нм, со средним расстоянием между ними порядка 100 нм [3]. Высокий коэффициент поглощения имплантированного слоя обусловлен поглощением света делокализованными электронами этих металлических частиц. Из-за конечного размера поглощающих частиц и их случайного распределения вдоль поверхности нагрев и испарение имплантированного слоя под действием света, вероятно, происходит неравномерно. Это может заметно понизить разрешающую способность такой регистрирующей среды.

В качестве образцов использовались оптически полированные кварцевые стекла марки КИ, имплантированные ионами железа с энергией 40 кэВ на ионно-лучевом ускорителе ИЛУ-3. Данные о спектрах оптического поглощения и природе центров поглощения опубликованы нами ранее в работах [2,3]. Лучом маломощного азотного лазера ЛГИ-21 (средняя мощность 4 мВт, длина волны 337 нм, частота импульсов до 100 Гц, длительность импульса 10 нс), сфокусированным до 40 мкм, на таких стеклах можно было формировать заданный рисунок. Проведенные нами оценки показали, что используемой плотности мощности лазерного излучения 4×10^7 Вт/см² достаточно для испарения окрашенного имплантацией поверхностного слоя стекла. За счет увеличения пропускания более чем на 50% полученные после испарения имплантированного слоя линии и отдельные точки хорошо наблюдались в оптический микроскоп.

Сфокусировать лазерный луч до 1 мкм технически довольно сложно, поэтому для оценки глубины испаряемого слоя и разрешающей способности среды на поверхности имплантированного стекла импульсным излучением рубинового лазера формировались голографические дифракционные решетки с периодом 0.9 мкм с использованием методики, описанной в [5]. В этом случае локальное испарение происходит в местах пучностей энергии, образованных интерференцией двух лазерных лучей. Для сравнения использовались дифракционные решетки, сформированные таким же методом на поверхности Si, аморфизованного имплантацией ионов Sb^+ , и исследовавшиеся ранее нами с помощью СТМ [5].

Измерения проводились с помощью атомно-силового микроскопа Р4-SPM, разработанного фирмой "Нанотехнология-МДТ" (г. Зеленоград). Вертикальное перемещение чувствительного зонда (кантиливера) в данном микроскопе регистрируется по отклонению отраженного от зонда света, что позволяет получать разрешение до 0.1 нм. Образец крепится на трубчатом трехкоординатном пьезосканере, который обеспечивает горизонтальное сканирование образца

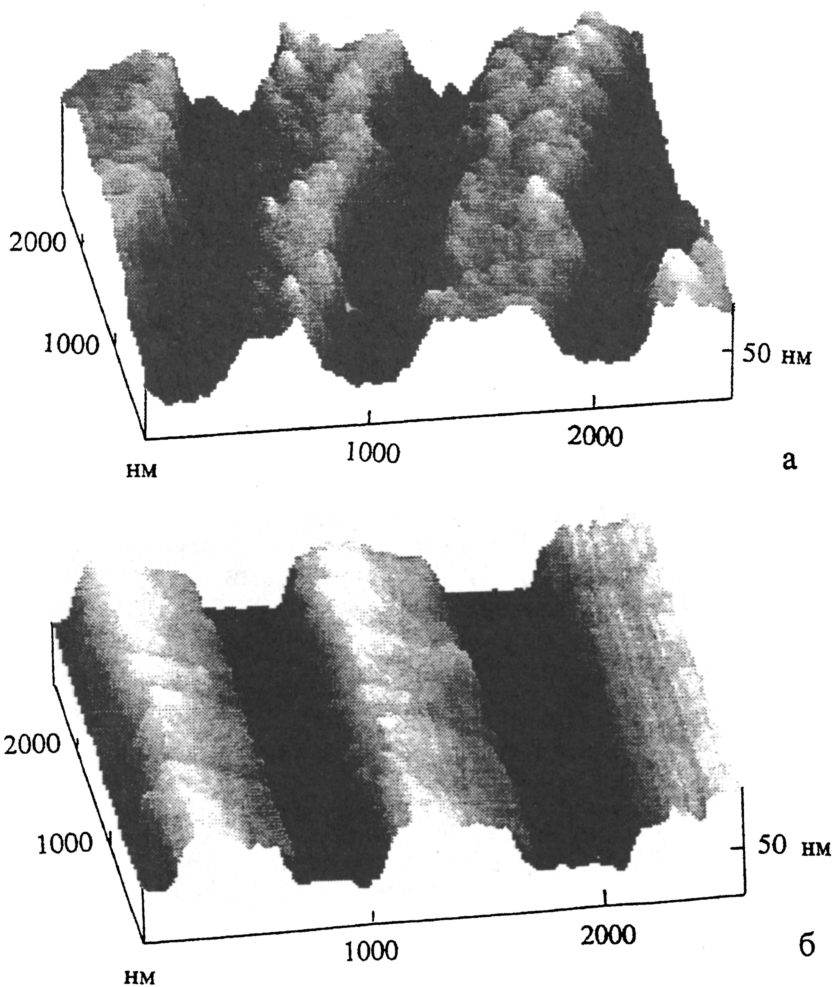


Рис. 1. Полученное с помощью атомно-силового микроскопа изображение сформированных лазерным излучением дифракционных решеток: а — на стекле, имплантированном ионами Fe⁺; б — на Si, имплантированном ионами Sb⁺ (АСМ-изображение в режиме сочетания профиля и градации серого цвета).

в пределах 3.7×3.7 мкм. За счет цепи обратной связи прибор работает в режиме постоянного давления зонда (иглы) АСМ на поверхность исследуемого образца, которое не превышает 100 нН.

На рис. 1, а приведено полученное с помощью АСМ изображение участка дифракционной решетки, сформированной лазерным излучением на поверхности стекла. Из него видно, что глубина периодического микрорельефа составляет 70 нм. Это близко к значению (60 нм) максимальной глубины пробега ионов железа с энергией 40 кэВ в стеклах, полученному из теоретических оценок. Следовательно, как и предполагалось, при используемых плотностях лазерного излучения происходит преимущественное испарение имплантированного слоя. Сравнение с решеткой, сформированной таким же способом на кремнии (рис. 1, б), свидетельствует о лучшем качестве последней. Края сформированных штрихов и дно испарившихся участков кремниевой

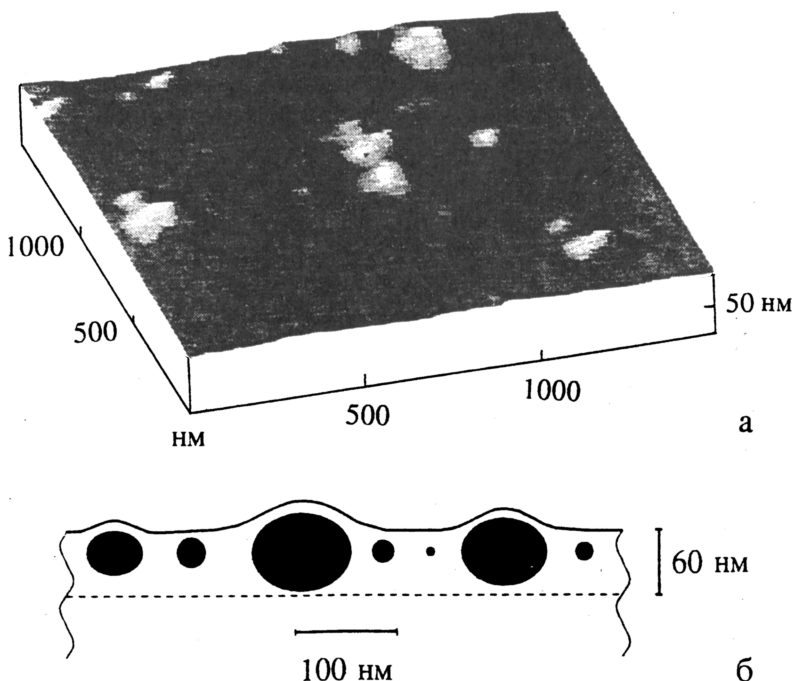


Рис. 2. а — полученное с помощью атомно-силового микроскопа изображение поверхности стекла после имплантации ионов Fe^+ (АСМ-изображение в режиме “подсветки” — аналог изображений, получаемых в электронных микроскопах); б — схематическое изображение поперечного сечения стекла, имплантированного ионами Fe^+ .

решетки относительно прямые и ровные. Это обусловлено, на наш взгляд, более равномерным поглощением падающего светового излучения в аморфном поверхностном слое имплантированного кремния по сравнению со стеклом, содержащим частицы металла. Размер характерных неровностей у решетки на стекле лежит в пределах 50–100 нм. Такого же размера были наиболее крупные частицы железа, наблюдавшиеся нами ранее с помощью просвечивающего электронного микроскопа [3].

С помощью АСМ были получены также изображения поверхности исследуемого стекла до и после ионной имплантации. После имплантации стекла железом на его поверхности наблюдаются отдельные выступы диаметром от 50 до 100 нм и высотой до 40 нм (рис. 2, а). Микрофотография наблюдаемой поверхности существенно отличается от микротопографии поверхности, сформированной ионным распылением [5]. По нашему мнению, эти выступы обусловлены вспучиванием поверхности стекла над отдельными, наиболее крупными частицами металла, размеры которых превышают глубину проекционного пробега ионов железа в стекле, в результате чего поперечное сечение имплантированного слоя имеет вид, схематически изображенный на рис. 2, б.

Сравнение рис. 1, а и б показывает, что наличие в поверхностном слое частиц металла размерами до 100 нм заметно снижает разрешающую способность имплантированного стекла. Тем не менее, как это видно из рис. 1, а, в нем можно формировать светом линии шириной 0.4 мкм, что удовлетворяет требованиям бинарной записи информации с плотностью до 10^6 бит/см². Таким образом, показано, что с помощью АСМ можно изучать с нанометровым разрешением модификацию поверхности стекол лазерным излучением, в частности, исследовать влияние размеров поглощающих свет центров на формирование микрорельефа поверхности при ее локальном лазерном испарении.

Авторы выражают благодарность сотрудникам фирмы "Навотехнология-МЛТ" М.Д. Еремченко и А.В. Беляеву за помощь при проведении АСМ-измерений.

Работа частично поддержана Академией наук Татарстана.

Список литературы

- [1] Бухараев А.А., Самарский Е.А., Яндуганов В.М., Бердунов Н.В., Антонов П.Г. // Поверхность. 1994. В. 12. С. 69-79.
- [2] Бухараев А.А., Казаков А.В., Манапов Р.А., Хайбуллин И.Б., Яфеев Н.Р. // Физика и химия стекла. 1986. Т. 12. В. 3. С. 376-378.
- [3] Бухараев А.В., Казаков А.В., Манапов Р.А., Хайбуллин И.Б. // ФТТ. 1991. Т. 33. В. 4. С. 1018-1026.
- [4] Вейко В.П. // Лазерная литография. Итоги науки и техники. Сер. Физические основы лазерной и пучковой технологии. Т. 3. М.: ВИНТИ, 1989. С. 40-56.
- [5] Bukharaev A.A., Gubydullin F.F., Lobkov V.S., Nazarov A.V., Berdunov N.V. // Phys. Stat. Sol. (a) 1992. V. 131. P. 79-87.

Казанский
физико-технический институт
им. Е.К. Завойского КНЦ РАН

Поступило в Редакцию
22 марта 1995 г.

