

УДК 535.421

СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК, СФОРМИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

© 1995 г. А. А. Бухараев, В. С. Лобков, В. М. Яндуганов, Е. А. Самарский, Н. В. Бердунов

*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского Казанского научного центра РАН,
420029 Казань, Россия*

Поступила в редакцию 03.04.95 г.

Методами сканирующей туннельной микроскопии и атомно-силовой микроскопии исследовались микронные и субмикронные периодические структуры, сформированные импульсным интерференционным световым полем рубинового лазера на поверхности имплантированного кварцевого стекла и кремния. С помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) исследованы тонкие детали взаимодействия света с поверхностью окрашенного имплантацией стекла, в частности, влияние нанометровых размеров поглощающих свет центров на формирование микрорельефа поверхности при ее локальном лазерном испарении, что представляет интерес с точки зрения записи оптической информации. Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) позволил зарегистрировать не только формирование микрорельефа при лазерном испарении, но и периодические изменения поверхностной проводимости, вызванные интерференционным импульсным лазерным отжигом аморфного слоя кремния. С помощью АСМ и СТМ на поверхности имплантированного кремния были обнаружены двумерные субмикронные периодические решетки, обусловленные наложением нескольких интерференционных полей.

ВВЕДЕНИЕ

Сканирующая зондовая микроскопия охватывает в настоящее время широкий спектр методов исследований поверхности. Среди них – сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия, сканирующая микроскопия ближнего светового поля, магнитосиловая микроскопия и целый ряд других методов, родоначальником которых стал сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) и в основе которых лежит использование острого зонда (иглы), перемещаемого пьезодвигателями вдоль образца на расстоянии в несколько ангстрем от поверхности без соприкосновения с нею или при очень слабом взаимодействии, исключая повреждение поверхности зондом [1].

В последние годы методы зондовой микроскопии все шире используются для изучения с нанометровым разрешением процессов взаимодействия оптического излучения с поверхностью различных материалов [2 - 5]. При этом можно выделить две проблемы, привлекающие наибольшее внимание: первая – изучение процессов, лежащих в основе оптической записи и считывания информации, используемых, например, при изготовлении получивших широкое распространение оптических дисков памяти [3]; вторая – изучение процессов модификации поверхности лазерным излучением, в частности, формирование на поверхности периодических микронных и субмикронных структур различной природы [2, 4, 5].

Главными достоинствами современных сканирующих зондовых микроскопов в отличие от традиционных электронных являются: возможность получения достоверных данных о высоте микрорельефа, отсутствие дополнительных промежуточных процедур (напыление, изготовление реплик), снижающих достоверность результатов; возможность получения нанометрового, а иногда и ангстремного разрешения на воздухе.

В последнее время при исследовании процессов на поверхности применяются одновременно несколько методов зондовой микроскопии, дополняющих друг друга. Например, наряду с СТМ используется атомно-силовой микроскоп (АСМ).

СТМ позволяет изучать микротопографию и электронные свойства поверхности проводящих сред. Однако к данным о микротопографии поверхности, получаемых с помощью СТМ (особенно при измерениях в атмосфере), следует относиться с известной осторожностью, так как они зависят от распределения электронных свойств и работы выхода вдоль поверхности. На них также влияют адсорбированные слои, покрывающие поверхность на воздухе [6].

В отличие от СТМ с помощью АСМ можно получать с высоким разрешением изображение поверхности как проводящих, так и непроводящих сред, однако пока невозможно изучать с таким же разрешением, как у СТМ, распределение вдоль поверхности электронных характеристик металлов и полупроводников [7].

В настоящей работе с помощью АСМ и СТМ исследовалась модификация лазерным излучением поверхности кварцевого стекла и кристаллического Si, предварительно подвергнутых ионной бомбардировке.

Основными задачами работы были: во-первых, продемонстрировать сравнительные возможности АСМ и СТМ для изучения лазерной модификации поверхности; во-вторых, изучить процессы, происходящие на поверхности при мощном импульсном лазерном воздействии, с точки зрения пригодности данных сред для записи и хранения оптической информации с высокой плотностью.

Объекты исследования были выбраны не случайно. Известно, что при определенных режимах ионной имплантации поверхностный слой Si аморфизуется, в результате чего коэффициент оптического поглощения Si возрастает в области 1 мкм с 10^2 до 10^4 см⁻¹ [8]. Аналогичный эффект наблюдался нами ранее при имплантации оптических стекол ионами металлов [9, 10]. Коэффициент оптического поглощения стекла в видимой и УФ областях спектра возрастал после ионной бомбардировки до 10^5 см⁻¹. В последнем случае увеличение коэффициента поглощения обусловлено образованием в имплантированном слое металлических частиц размерами от 5 до 100 нм и средним расстоянием между ними порядка 100 нм.

При импульсном лазерном воздействии на такие среды большая часть энергии выделяется в тонком имплантированном слое с высоким коэффициентом поглощения, что обуславливает их высокую чувствительность к световому излучению и перспективность использования в качестве сред для записи оптической информации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Конструкция созданного нами СТМ, применявшегося для изучения поверхности кремния, подробно описана в работе [11]. Отличительной его особенностью является возможность получения одновременно с одного и того же участка поверхности трехмерного изображения рельефа в режиме постоянного тока и картины распределения электронных характеристик. В последнем случае в каждой из 124×64 точек поверхности при сканировании на 100 мс разрывается обратная связь СТМ и в течение 50 мс регистрируется вольт-амперная характеристика (ВАХ), отражающая электронные свойства участка Si под иглой СТМ. Для обеспечения необходимого быстрого действия СТМ ВАХ отображаются с помощью интегрального параметра $Q = \int |I(V)| dV$. Как показано в [11], увеличение Q -параметра соответствует возрастанию проводимости поверхностного слоя полупроводника, связанному с рекристалли-

зацией аморфизованного кремния при нагреве. Изображение, характеризующее распределение проводимости вдоль поверхности, получается так же, как обычное СТМ-изображение в режиме постоянного тока, только вместо величины Z , характеризующей высоту рельефа в данной точке, откладывается соответствующее этой точке значение параметра Q . С помощью этого СТМ были получены изображения поверхности с разрешением не менее 0.1 нм по высоте и 1 нм в плоскости.

Атомно-силовой микроскоп P4-SPM, разработанный фирмой "Нанотехнология-МДТ" (г. Зеленоград), использовался для получения изображений поверхности как кремния, так и кварцевого стекла. Вертикальное перемещение чувствительного зонда (кантиливера) в данном микроскопе регистрируется по отклонению отраженного от зонда лазерного луча. Максимальное разрешение АСМ составляет 0.1 нм как в плоскости образца, так и по нормали к ней, что позволяет наблюдать отдельные атомы углерода на поверхности пиролитического графита. Образец крепится на трубчатом трехкоординатном пьезосканере, который обеспечивает горизонтальное сканирование образца 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, значение которого не превышает 100 нН.

Для светового воздействия на поверхность применялись маломощный азотный лазер ЛГИ-21 (средняя мощность 4 мВт, длина волны 337 нм, частота импульсов до 100 Гц, длительность импульса 10 нс), излучение которого фокусировалось короткофокусной линзой в пятно диаметром 40 мкм, и рубиновый лазер (694 нм, длительность импульса 10 нс). Мощность лазерного излучения, необходимая для модификации поверхности, составляла около 10^7 Вт/см². Для получения на поверхности периодических структур с помощью рубинового лазера использовалась традиционная двухлучевая голографическая схема, аналогичная описанной в [4], с s -поляризацией лазерных лучей, когда вектор их электрического поля перпендикулярен плоскости, в которой расположены падающие лучи, и параллелен плоскости образца. Для синхронизации во времени момента воздействия лазерных импульсов на поверхность использовалась оптическая линия задержки. При одновременном однократном воздействии двух когерентных лазерных пучков на поверхности образца формировалось интерференционное световое поле. В периодически модулированном по интенсивности световом поле происходил пространственно-неоднородный нагрев поверхности, который сопровождался неоднородным плавлением, испарением или рекристаллизацией, в результате чего интерференционная картина сохраня-

лась после прекращения действия импульса в виде интерференционного рельефа или периодического изменения проводимости вдоль поверхности. Поперечный размер полученных таким образом решеток был около 1 мм, они хорошо наблюдались визуально по характерному свечению вследствие дифракции падающего на них света.

Ионная модификация поверхности образцов проводилась на ионно-лучевом ускорителе ИЛУ-3.

Образцы кремния представляли собой промышленные полированные пластины монокристаллического кремния Si (111) КЭФ-4, 5, имплантированные ионами Sb^+ с энергией 30 кэВ и дозами имплантации выше порога аморфизации (от 10^{15} до 10^{16} ион/см²). Полированные пластины оптического кварцевого стекла марки КИ имплантировались ионами Fe^+ с энергией 40 кэВ и дозами имплантации до 4×10^{17} ион/см². Перед СТМ-измерениями кремниевые образцы очищались и пассивировались методом гидрогенизации в атмосфере сухого азота, описанным в [6]. Перед измерениями на АСМ образцы стекла и кремния отмывались в чистом этаноле и воде обычным образом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Подробные данные о спектрах оптического поглощения и природе центров поглощения имплантированных ионами Fe^+ силикатных и кварцевых стекол опубликованы нами ранее в работах [9, 10]. Из них следует, что при высокодозовой имплантации в стекле на глубине до 60 нм, соответствующей максимальной глубине пробега в стекле ионов Fe^+ с энергией 40 кэВ, формируются диспергированные в стекле частицы α -Fe, размеры которых колеблются от 5 до 100 нм. Наведенное ионным облучением оптическое поглощение (с коэффициентом поглощения в видимой и УФ областях спектра до 10^5 см⁻¹) обусловлено поглощением света свободными электронами образовавшихся металлических частиц. Принципиально важно, что практически весь падающий свет поглощается в имплантированном слое. За счет этого сфокусированным до 40 мкм в диаметре лучом импульсного азотного лазера ЛГИ-21 можно было формировать заданный рисунок. Проведенные нами оценки показали, что используемой при этом 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% линии и отдельные точки, полученные после испарения имплантированного слоя, хорошо наблюдались в оптический микроскоп на просвет. После испарения также менялись коэффициент отражения и рельеф поверхности, причем толщина испарившегося слоя должна была

быть близка к глубине проникновения ионов при имплантации.

Локальное изменение коэффициентов поглощения, отражения при испарении на заданную глубину лежит в основе бинарной записи информации сфокусированным до 0.8 - 1 мкм лазерным лучом при изготовлении оптических дисков памяти [12]. Высокая механическая и химическая стойкость сформированной имплантацией металлической пленки, захороненной в поверхностном слое стекла, делает ее весьма перспективной для этой цели. Однако не ясно, какова разрешающая способность такой регистрирующей среды, так как распределенные случайно центры поглощения имеют конечные нанометровые размеры.

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 [13]. В этом случае локальное испарение происходит в местах пучностей энергии, образованных интерференцией двух скрещенных лазерных лучей. Для сравнения использовались дифракционные решетки, сформированные таким же методом на поверхности Si, аморфизованного имплантацией ионов Sb^+ .

На рис. 1 приведены полученные с помощью АСМ изображения дифракционных решеток, сформированных голографическим методом на поверхности имплантированного Si и кварцевого стекла. АСМ-изображения представлены как сочетание рельефа и градации серого цвета. Период зарегистрированных решеток ($d = 0.9$ мкм) хорошо согласуется с известным выражением $d = \lambda / [2 \sin(\alpha/2)]$, где λ – длина волны лазерного излучения, а α – угол между падающими на поверхность лучами [4, 11].

Глубина штрихов у стекла составляет 70 нм; это близко к значению максимальной глубины пробега ионов железа с энергией 40 кэВ в стеклах, полученного из теоретических оценок (60 нм). Следовательно, как и предполагалось, при используемых плотностях лазерного излучения происходит преимущественное испарение имплантированного слоя стекла. У решетки, сформированной на имплантированном сурьмой Si, глубина штрихов (60 нм) превышает максимальные глубины (25 нм) проникновения ионов Sb^+ с энергией 30 кэВ в Si. Это обусловлено, по-видимому, достаточно высоким коэффициентом оптического поглощения (3×10^3 см⁻¹) неимплантированного Si на длине волны 694 нм [8], вследствие чего лазерным излучением испаряется не только аморфный слой, но и более глубокие слои Si.

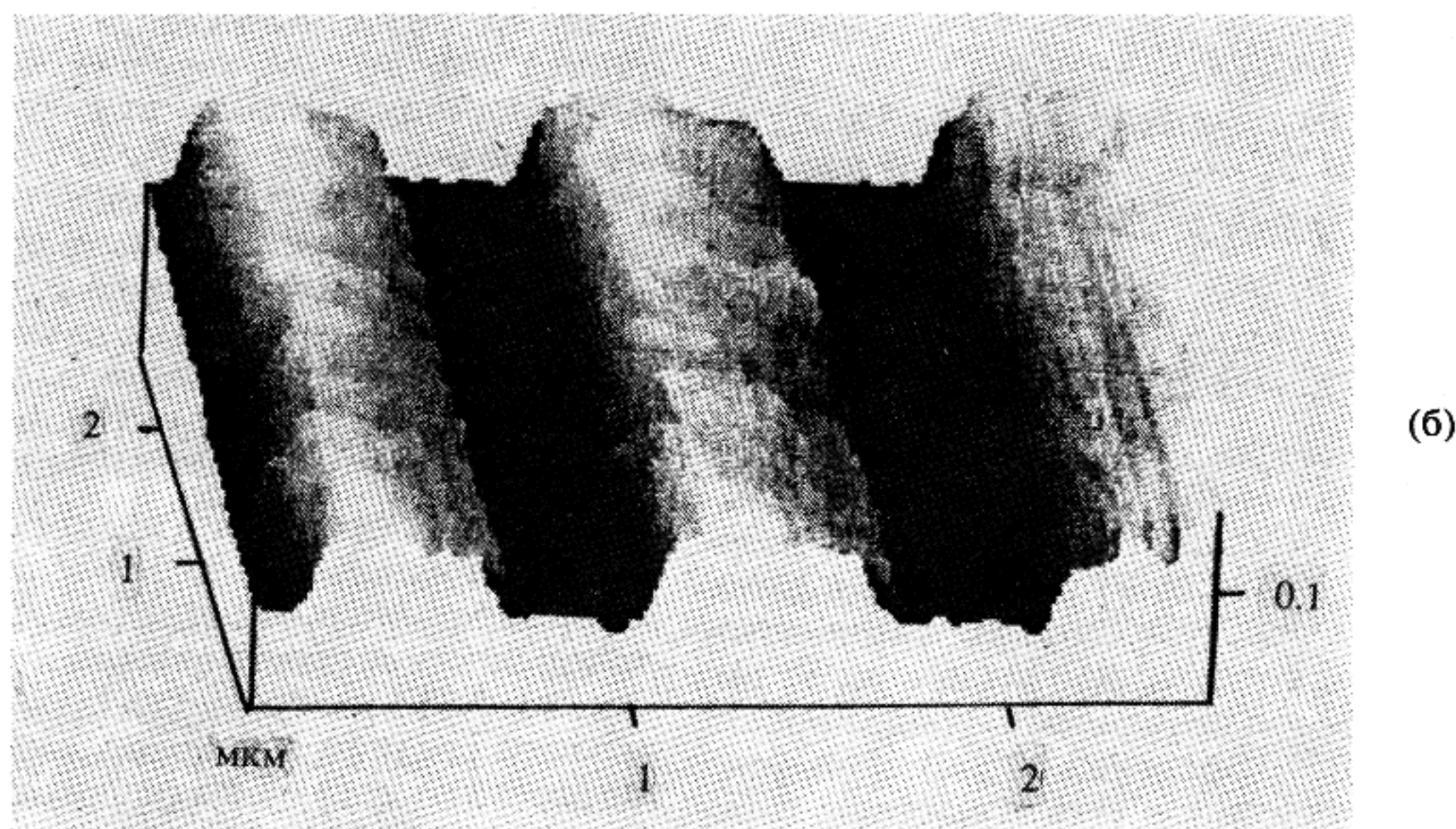
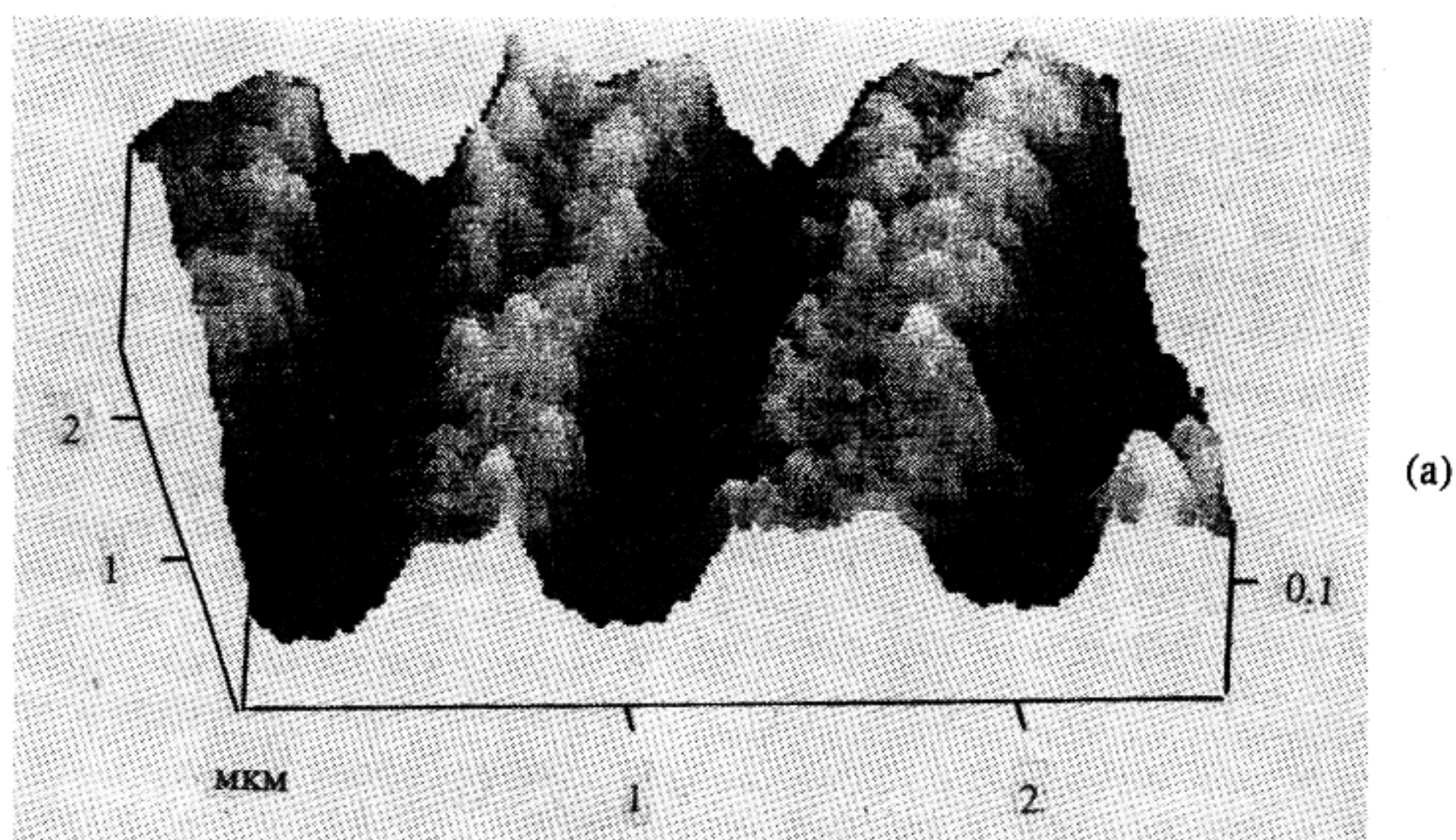


Рис. 1. Изображения, полученные с помощью АСМ (сочетание профилей с градацией серого цвета), участков дифракционных решеток, полученных со скрещенными лазерными пучками на поверхности имплантированного стекла (а) и имплантированного кремния (б).

Качество дифракционных решеток, сформированных на кремнии, выше, чем у решеток, полученных на стекле (рис. 1а и 1б). В отличие от решетки на стекле края и дно штрихов у решетки на Si относительно прямые и ровные. Это обусловлено, на наш взгляд, более равномерным поглощением падающего светового излучения в 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 [10].

Таким образом, наличие в поверхностном слое частиц металла размером до 100 нм заметно сни-

жает разрешающую способность имплантированного стекла. Тем не менее, как это видно из рис. 1а, в нем можно формировать светом линии шириной 0.4 мкм, что удовлетворяет требованиям бинарной записи информации с плотностью до 10^6 бит/см² [12].

В отличие от АСМ с помощью СТМ можно изучать не только микрорельеф, но и электронные свойства поверхности полупроводников. На рис. 2 приведены СТМ- и Q-изображения одного и того же участка дифракционной решетки, сформированной на Si. Из их сравнения очевидно, что выступы на СТМ-изображении соответствуют областям с более высокой проводимостью поверхностного слоя. Наблюдаемое периодическое изменение проводимости обусловлено эффектом интерференционного импульсного лазерного от-

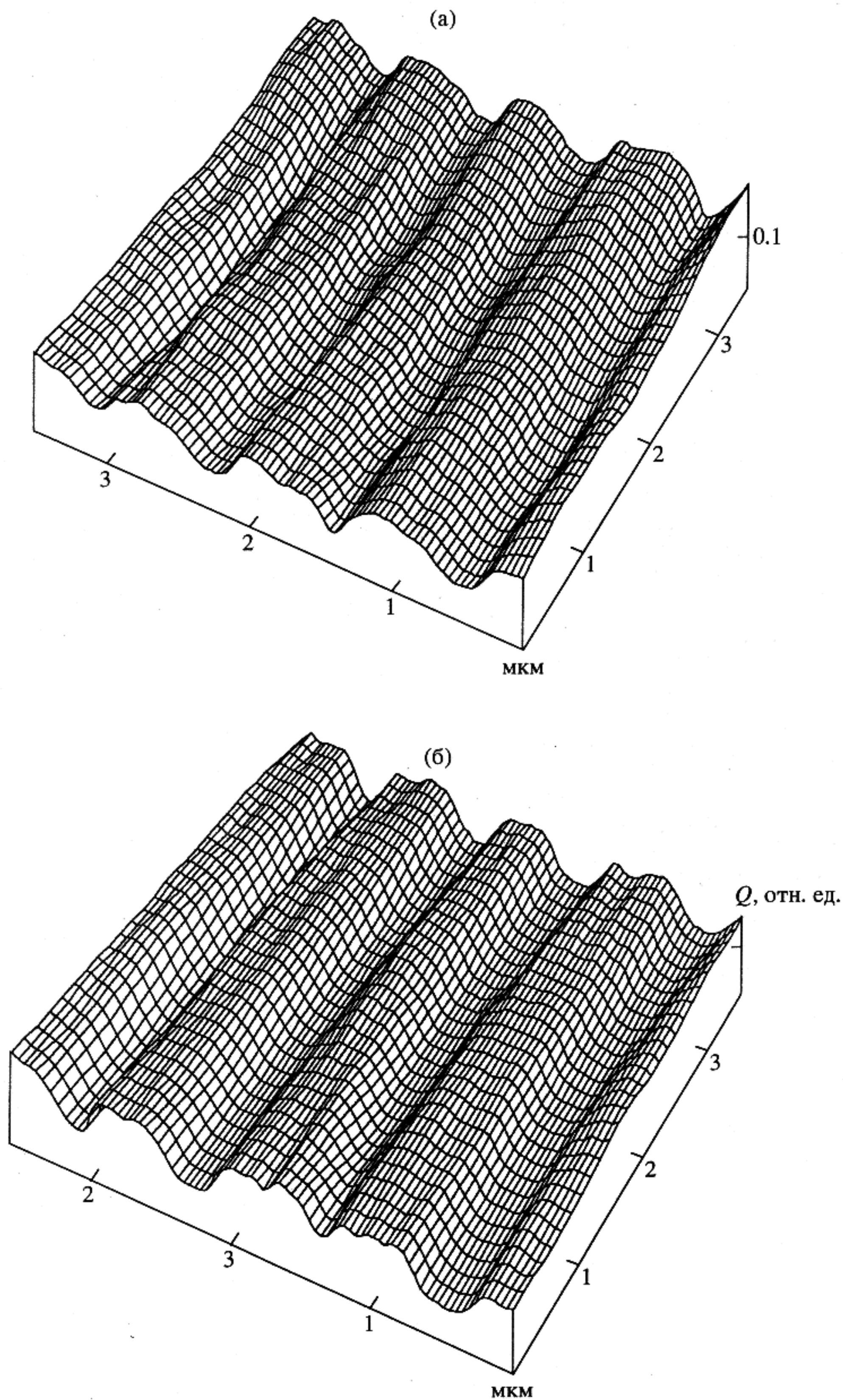


Рис. 2. Изображения, полученные с помощью СТМ, с одного и того же участка дифракционной решетки, полученной на кремнии лазерным облучением с плотностью энергии около 1 Дж/см^2 . а – микрорельеф, зарегистрированный в режиме постоянного тока; б – распределение проводимости, представленное как пространственное изменение величины Q -параметра.

жигу полупроводников (ИИЛО) [13, 14]. В местах пучностей энергии и интерференционном световом поле, создаваемом на поверхности двумя скрещивающимися когерентными лазерными лучами, за счет нагрева происходит локальная рекристаллизация аморфного поверхностного слоя Si. При этом, как известно [8], происходит увеличение на несколько порядков числа носителей тока, в частности, из-за электрической активации внедренной при имплантации сурьмы. В результате на поверхности формируется периодическая последовательность кристаллических (отожженных) и аморфных (неотожженных) участков.

В зависимости плотности энергии, падающей на образец, наблюдались различные степени соответствия СТМ- и Q -изображений. При плотностях более 1 Дж/см^2 (как правило, в центре сформированной решетки) наблюдались СТМ-изображения решеток с высотой профиля около 40 нм, однако заметных изменений величины Q -параметра на этом участке поверхности не наблюдалось. По-видимому, в этом случае происходят испарение Si на значительную глубину и полная рекристаллизация всей поверхности, что приводит к формированию микрорельефа с практически постоянной проводимостью вдоль поверхности. При плотности около 1 Дж/см^2 обычно наблюдались СТМ- и Q -изображения, аналогичные приведенным на рис. 2. Наконец, при плотности падающего излучения менее 1 Дж/см^2 , как правило, на СТМ-изображении решетка практически не наблюдалась (рис. 3а), в то время как на Q -изображении отчетливо проявлялась структура с периодом 0.9 мкм (рис. 3б). В последнем случае, по нашему мнению, не происходит сколько-нибудь значительного испарения поверхности Si, а происходит локальная рекристаллизация поверхности Si, аморфизованной имплантацией. Поскольку плотность аморфизованной имплантацией Si лишь на 2–3% меньше, чем у кристаллического Si [15], рекристаллизация 20 нм аморфного слоя не должна приводить к формированию заметного микрорельефа. Наблюдаемая на рис. 3а периодическая структура в большей степени обусловлена изменением электронных свойств, которое проявляется как изменение высоты рельефа при регистрации СТМ-изображений в режиме постоянного тока. В этом случае для поддержания заданного в цепи обратной связи СТМ постоянного тока (5 нА) игла микроскопа отводится при ее движении над участками с высокой концентрацией носителей тока (низкоомными областями Si) и опускается над участками с низкой концентрацией (высокоомными областями Si).

В центральной части некоторых решеток, сформированных голографическим способом на поверхности Si, наблюдались двумерные периодические структуры, зарегистрированные как с помощью АСМ, так и СТМ (рис. 4). При СТМ-из-

мерениях они проявлялись наиболее отчетливо как изменение Q -параметра (рис. 4б). В направлении, совпадающем с периодическим изменением профиля рассмотренных выше одномерных интерференционных решеток, период новых структур был меньше почти в два раза и составлял 0.5 мкм. Одновременно перпендикулярно им в направлении, совпадающем с направлением линейной s -поляризации падающего излучения, наблюдалась периодическая структура со средним шагом около 0.4 мкм на АСМ-изображении и 0.8 мкм на СТМ-изображении.

Появление дополнительной периодической структуры в направлении, совпадающем с направлением поляризации падающего излучения и периодом, близким к длине волны, обычно объясняют интерференцией падающей световой волны с волной, рассеянной на неровностях поверхности образца [4, 14] и распространяющейся вдоль поверхности образца. В результате создается периодическое интерференционное световое поле с периодом $d \approx \lambda$ в направлении, совпадающем с направлением вектора электрического поля, т.е. перпендикулярно штрихам голографической решетки. Ряд авторов считают [16], что периодические структуры с $d \approx \lambda$ образуются за счет интерференции падающей электромагнитной волны с возбуждаемой ею на границе поверхности поверхностной электромагнитной волной и (ПЭВ), характерной для металлических поверхностей (предполагается, что при плавлении под действием лазерного луча полупроводники переходят в металлическое состояние). Возбуждение ПЭВ в этом случае происходит на неровностях расплава.

Эта же модель используется для объяснения “мелких” периодических структур с $d \approx \lambda/n$ (n – показатель преломления полупроводника), ориентированных параллельно вектору электрического поля поляризованной падающей световой волны. Интерференционное поле с периодом меньше λ образуется в результате взаимодействия падающего излучения со световой модой, возбужденной в асимметричном градиентном поверхностном волноводе, образовавшемся за счет увеличения показателя преломления при нагреве полупроводника лазерным излучением.

В принципе, как показано в [16], при сильном тепловом воздействии и металлизации полупроводника в нем могут одновременно генерироваться ПЭВ и световая волна в поверхностном волноводе. В результате в поверхностном слое полупроводника формируется двумерное интерференционное световое поле.

Видимо, этими явлениями объясняются зарегистрированные с помощью СТМ и АСМ структуры (рис. 4) с периодом, приблизительно в два раза меньшим, чем длина волны падающего лазерного излучения. Не исключено, однако, что наблюдае-

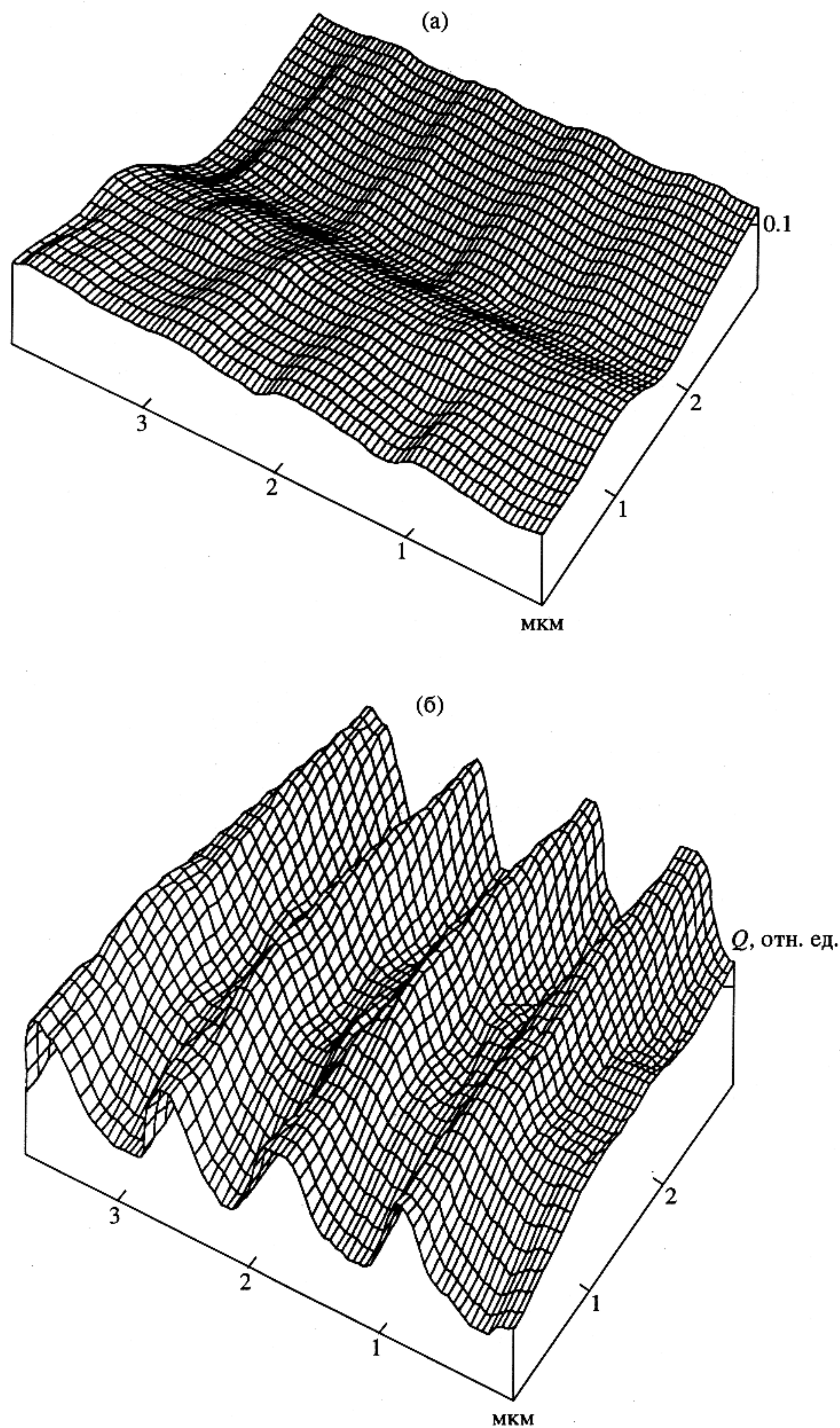


Рис. 3. Изображения, полученные с помощью СТМ, с одного и того же участка дифракционной решетки, полученной на кремнии лазерным облучением с плотностью энергии менее 1 Дж/см^2 . а – микрорельеф, зарегистрированный в режиме постоянного тока; б – распределение проводимости, представленное как пространственное изменение величины Q -параметра.

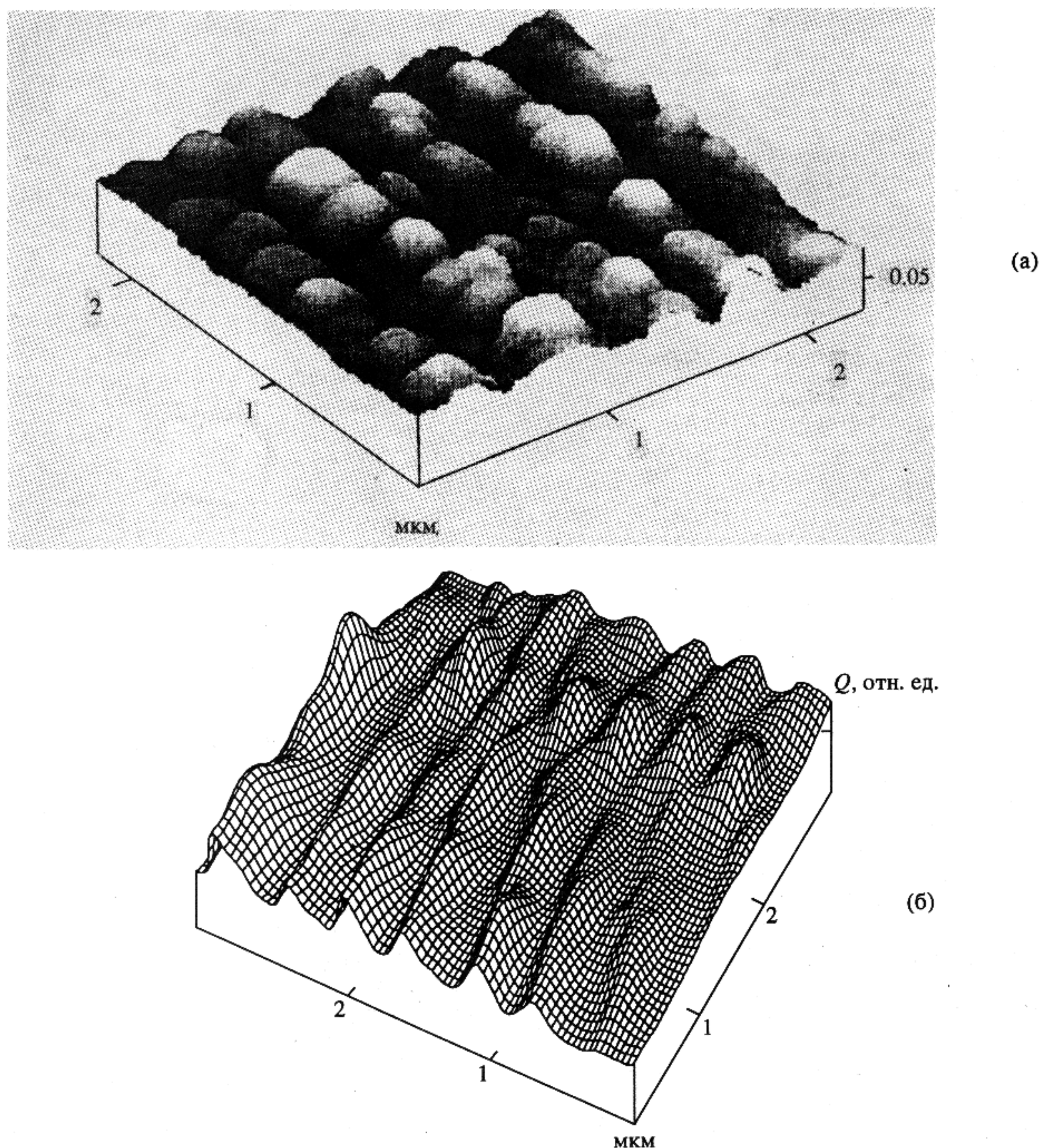


Рис. 4. Изображения двумерных периодических структур, сформированных на поверхности кремния лазерным излучением. а – АСМ-изображение, б – полученное с помощью СТМ распределение проводимости, представленное как пространственное изменение величины Q -параметра.

мые периодические структуры обусловлены интерференцией поверхностных волн расплава (капиллярных волн), образующихся в момент импульсного лазерного воздействия [14]. Дальнейшее использование АСМ и СТМ для исследования с высоким пространственным разрешением сформированных лазерным излучением решеток может дать дополнительную информацию для выяснения природы таких структур.

ВЫВОДЫ

Приведенные экспериментальные результаты демонстрируют успешное использование АСМ и СТМ для изучения периодических интерференционных структур, индуцированных на поверхности импульсным лазерным излучением. Благодаря высокому разрешению такие микроскопы позволяют изучать тонкие детали взаимодействия света

с поверхностью, в частности, исследовать влияние размеров поглощающих свет центров на формирование микрорельефа поверхности при ее локальном лазерном испарении.

С помощью АСМ было показано, что, хотя поперечные размеры частиц α -Fe, заглубленных в поверхностном слое кварцевого стекла, могут достигать 100 нм, такое стекло можно в принципе использовать как среду для оптической записи информации с плотностью 10^6 бит/см².

СТМ позволяет изучать не только формирование интерференционного микрорельефа при лазерном испарении поверхности, но и периодические изменения проводимости вдоль поверхности, вызванные импульсным лазерным отжигом аморфного слоя в интерференционном световом поле.

С помощью АСМ и СТМ на поверхности имплантированного кремния были обнаружены двумерные субмикронные периодические структуры, обусловленные наложением нескольких интерференционных решеток.

Авторы выражают благодарность сотрудникам фирмы "Нанотехнология-МДТ" М.Д. Еремченко и А.Б. Беляеву за помощь при проведении АСМ-измерений.

Работа частично поддержана Академией наук Татарстана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scanning Tunneling Microscopy II / Ed. by Wiesendanger R., Guntherodt H.-J. Springer-Verlag. 1992. 308 p.
2. Heil J., Wesner J., Hilmann K. et al. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1988. V. 6. № 2. P. 401 - 403.
3. Bartolome A., Garsia R., Vazquez L., Baro A.M. // J. Microscopy. 1988. V. 152. Pt 1. P. 205 - 211.
4. Kumagai H., Ezaki M., Toyoda K., Obara M. // J. Appl. Phys. 1993. V. 73. № 4. P. 1971 - 1974.
5. Hiraoka H., Sendova M. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. № 5. P. 563 - 565.
6. Бухараев А.А., Самарский Е.А., Яндуганов В.М., Бердунов Н.В., Антонов П.Г. // Поверхность. 1994. № 12. С. 69 - 79.
7. Dror Sarid, Virgil Elings. // J. Vac. Sci. Technol. B. 1991. V. 9. № 2. P. 431 - 437.
8. Коротеев Н.И., Шумай И.Л. // Физика мощного лазерного излучения. М.: Наука, 1991. С. 169.
9. Бухараев А.А., Казаков А.В., Манапов Р.А., Хайбуллин И.Б., Яфаев Н.Р. // Физика и химия стекла. 1986. Т. 12. В. 3. С. 376 - 378.
10. Бухараев А.А., Казаков А.В., Манапов Р.А., Хайбуллин И.Б. // ФТТ. 1991. Т. 33. В. 4. С. 1018 - 1026.
11. Бухараев А.А., Губайдуллин Ф.Ф., Лобков В.С., Назаров А.В., Бердунов Н.В. // Поверхность. 1993. № 4. С. 104 - 111.
12. Вейко В.П. // Лазерная литография. Итоги науки и техники. Сер. Физические основы лазерной и пучковой технологии. Т. 3. М.: ВИНТИ, 1989. С. 40 - 56.
13. Штырков Е.И., Хайбуллин И.Б., Галляутдинов М.Ф., Заринов М.М. // Опт. и спектр. 1975. Т. 38. В. 5. С. 1031 - 1034.
14. Ахманов С.А., Емельянов В.И., Коротеев Н.И., Семигонов В.Н. // УФН. 1985. Т. 147. В. 4. С. 675 - 745.
15. Custer J.S., Tomson M.O., Jacobson D.C. et al. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. № 4. P. 437 - 439.
16. Бонч-Бруевич А.М., Коченгина М.Л., Либенсон М.Н., Макин В.С., Пудков С.Д., Трубаев В.В. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1982. Т. 46. № 6. С. 1186 - 1193.