

УДК 621.382- 181.48.774.002+ 537.533.35

© А. О. Голубок, А. Л. Пинаев, Д. С. Чивилихин, С. А. Чивилихин

## ДИНАМИЧЕСКАЯ СИЛОВАЯ ЛИТОГРАФИЯ НА ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ В СКАНИРУЮЩЕМ ЗОНДОВОМ МИКРОСКОПЕ С ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫМ ДАТЧИКОМ ЛОКАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Проведено исследование режима динамической силовой литографии (ДСЛ) на тонкой (20 нм) Au-пленке, нанесенной на поликарбонатную подложку. Предложена одномерная модель в упругом приближении и выполнены расчеты, демонстрирующие существование оптимального режима ДСЛ. Представлены экспериментальные результаты, полученные в сканирующем зондовом микроскопе NanoEducator с пьезорезонансным датчиком силового взаимодействия и электрохимически заточенным W-зондом. Экспериментально продемонстрировано, что W-зонд прорезает металлическую пленку на всю глубину, а ширина реза составляет ~100 нм и определяется радиусом зонда. Показано, что режим ДСЛ в системе "металлическая пленка—полимер" обеспечивает формирование 2D-наноструктур различной конфигурации и представляет собой простой способ создания элементов наноэлектроники, нанофотоники и наносенсорики.

*Кл. сл.:* сканирующий зондовый микроскоп, динамическая силовая литография, наноструктуры

### ВВЕДЕНИЕ

В современных нанотехнологиях используются три основных метода литографии: пучковые, зондовые и импринтинг [1]. В первом случае осуществляется взаимодействие с веществом жестких ультрафиолетовых или рентгеновских фотонов, электронов или ионов; во втором — наномодификация поверхности осуществляется острым твердотельным зондом сканирующего зондового микроскопа (СЗМ); в третьем — с помощью наноматриц создаются отпечатки на поверхности.

К преимуществам метода сканирующей зондовой литографии (СЗЛ) [2] следует отнести:

- отсутствие масок, резистов, химического травления;
- высокую локальность взаимодействия с поверхностью подложки;
- относительную дешевизну оборудования.

Основным недостатком СЗЛ в настоящее время является низкая скорость процесса литографии и ограниченная в связи с этим область решаемых задач.

При СЗЛ в области наноконтакта происходит концентрация токов большой плотности, высоких электрических полей и механических давлений. Раздельное или совместное действие этих факторов, активизирующих целый ряд физико-химических явлений (локальный разогрев, пласти-

ческая деформация, поляризация, полевое испарение, массоперенос, электрохимические реакции), используется для наномодификации материалов в различных режимах СЗЛ.

Разновидностью СЗЛ является метод динамической силовой литографии (ДСЛ). При ДСЛ осуществляется механический динамический контакт (соударение) зонда с образцом, приводящий к пластической деформации поверхности образца. Обычно с помощью ДСЛ создается нанорельеф на поверхности гомогенных материалов [3].

В данной работе метод ДСЛ использовался для создания микро- и наноструктур из тонких металлических пленок, нанесенных на полимерные подложки. Выбор объекта для исследования обуславливался двумя причинами. Во-первых, применение относительно мягких полимерных подложек позволяет защитить вершину нанозонда от разрушения в процессе ДСЛ. Во-вторых, тонкопленочные микро- и наноструктуры являются основой наноэлектронных устройств. При размерах, сравнимых с длиной свободного пробега электронов, в них проявляются эффекты размерного квантования. Основной целью исследований было экспериментальное определение возможностей метода ДСЛ на металл-полимерных гетероструктурах, в том числе его пространственного разрешения, при использовании пьезорезонансных зондовых датчиков с W-зондами.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

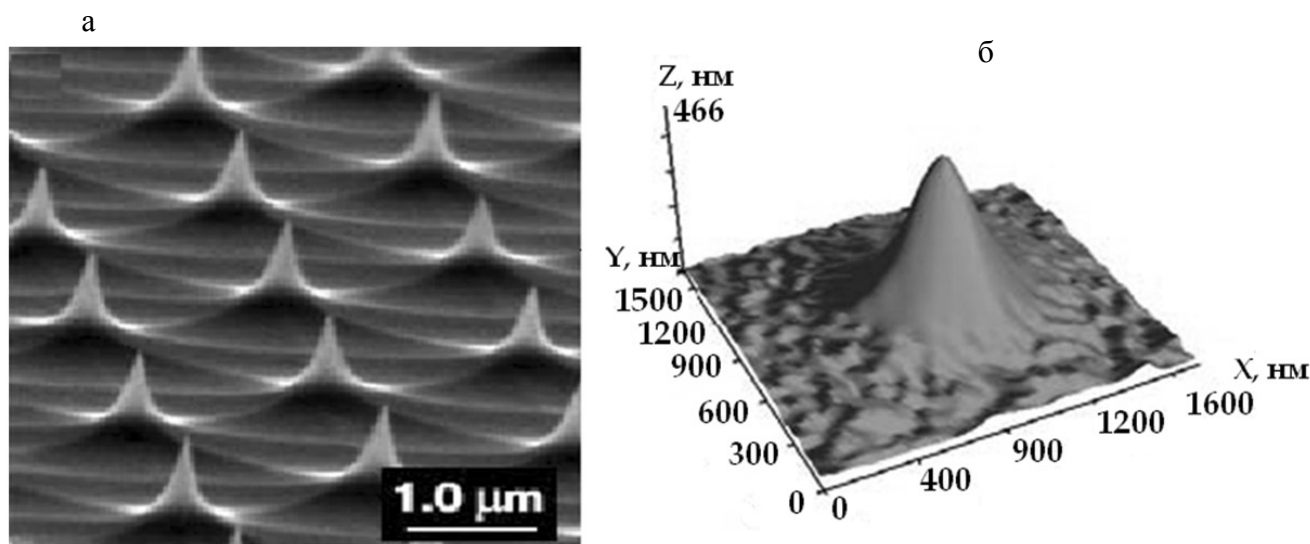
В экспериментах по ДСЛ использовался СЗМ NanoEducator [4] с пьезорезонансным датчиком силового взаимодействия [5] в полуконтактном режиме. В режиме литографии в определенных и заранее заданных точках ( $x_i$ ,  $y_i$ ) на вход высоковольтного усилителя, обеспечивающего перемещение образца по координате Z, подавался импульс напряжения, складывающийся в сумматоре с сигналом обратной связи следящей системы (СС) СЗМ. Амплитуда и длительность управляющего импульса подбирались таким образом, чтобы СС не успевала компенсировать вертикальное перемещение образца и осуществлялся его динамический контакт с зондом. На обратном ходе развертки сканирования управляющий импульс на сумматор не подавался, а производилось считывание нанорельефа, образованного в результате ДСЛ. Т. е. литография и визуализация ее результатов осуществлялись одним и тем же зондом.

Зонды изготавливались из вольфрамовой проволоки с исходным диаметром 150 мкм с помощью электрохимического травления на переменном токе в слабом щелочном электролите (5 %-й раствор КОН). Контроль размеров и формы вершины W-острия проводился с использованием СЗМ (рис. 1, б) и растрового электронного микроскопа (РЭМ) (см. рис. далее). В случае контроля с применением СЗМ использовалась тестовая

решетка из кремния с острыми пиками (рис. 1, а). Если радиус закругления игл тестовой решетки меньше, чем радиус используемого W-зонда, то в процессе сканирования тестовой решетки на СЗМ-изображении многократно отражается топография вершины зонда (рис. 1, б).

Исходными образцами для ДСЛ являлись поликарбонатные фрагменты размером  $10 \times 10 \times 2$  мм, вырезанные из DVD-диска. Рабочей поверхностью образцов являлась внешняя поверхность DVD-диска, на которую методом распыления Au-мишени в Ag-плазме напылялся тонкий слой Au. Давление газа составляло 2 мбар, ток разряда имел величину 30 мА. Расстояние от мишени до подложки составляло  $\sim 4$  см. Толщина пленки контролировалась с помощью кварцевых весов и лежала в диапазоне (20–25) нм.

Для минимизации ширины линии реза необходимо, чтобы в результате динамического контакта образца с зондом конус зонда полностью прорезал проводящую пленку, проникая в полимерную подложку на минимально возможную глубину. При этом необходимо принимать во внимание переколебания столика с образцом вдоль оси Z, которые могут возникать в механической резонансной системе с конечной добротностью в ответ на импульсное воздействие. Время сближения зонда с образцом должно быть меньше, чем постоянная времени СС, поскольку в противном случае СС скомпенсирует механический удар.



**Рис. 1.** РЭМ-изображение тестовой решетки в виде массива острых пиков (а) и ССМ-изображение вершины W-зонда, получаемое при сканировании одиночного пика (б)

Для оптимальной реализации ДСЛ необходимо принимать во внимание совокупность экспериментальных параметров, среди которых:

- предел пластической деформации зонда и образца;
- модуль Юнга и коэффициент Пуассона зонда и образца;
- амплитуда и длительность управляющего импульса электрического напряжения, чувствительность сканера;
- эффективная масса, коэффициент трения, резонансная частота, жесткость и добротность колебательной системы сканера с образцом;
- эффективная масса, коэффициент трения, резонансная частота, жесткость и добротность колебательной системы зонда;
- амплитуда резонансных колебаний зонда и амплитуда вынуждающей силы, приложенной к зонду;
- расстояние между равновесными положениями зонда и образца;
- амплитуда и ускорение перемещения образца;
- радиус зонда и локальное давление в зоне контакта;
- форма зонда и критическая сила, при которой зонд теряет устойчивость при продольном сжатии;
- время затухания колебаний (переколебаний) образца после окончания действия управляющего импульса напряжения;
- скорость сканирования и время задержки между остановкой сканирования в момент механического воздействия и началом сканирования для перехода в другую координату;
- постоянная времени СС.

Важно, чтобы зонд сохранял свою форму после многократных соударений с поверхностью образца, приводящих к деформации и прорезанию металлического покрытия, и обеспечивал необходимое пространственное разрешение при визуализации результатов ДСЛ.

Очевидно, что в области контакта для механического давления  $P$  должно выполняться условие

$$P_p > P > P_s,$$

где  $P_p$  — предел пластической деформации зонда,  $P_s$  — предел пластической деформации образца.

При  $P < P_s$  сила воздействия будет недостаточна для модификации поверхности образца, в то время как при  $P > P_p$  произойдет пластическая деформация вершины зонда, что приведет к уменьшению давления в области контакта, а также ухудшению пространственного разрешения метода.

Кроме того, для исключения необратимого изгиба зонда необходимо обеспечить его устойчивость при продольном сжатии. В процессе ДСЛ должно выполняться условие

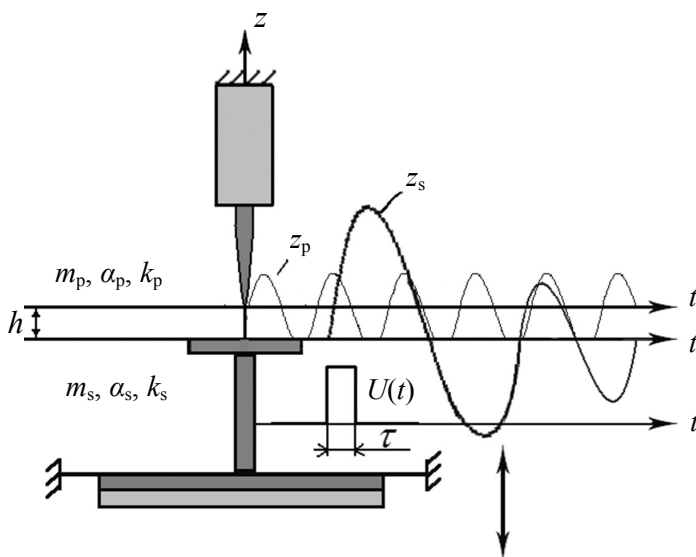
$$F < F_{кр},$$

где  $F_{кр}$  — критическая сила, при которой зонд в виде балки конической формы теряет устойчивость.

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ДСЛ

### Уравнения движения зонда и образца

Рассмотрим упрощенную задачу одномерного движения. Запишем одномерные уравнения движения образца вдоль координаты  $z_s$  и зонда вдоль координаты  $z_p$  (рис. 2). Упростив задачу,



**Рис. 2.** Одномерная модель ДСЛ в упругом приближении.

$z_p, z_s$  — смещение от положения равновесия зонда и сканера с образцом соответственно;  $m_p, \alpha_p, k_p$  — эффективная масса, коэффициент трения и жесткость колебательной системы зонда;  $m_s, \alpha_s, k_s$  — эффективная масса, коэффициент трения и жесткость колебательной системы сканера с образцом;  $U(t)$  — управляющее напряжение, приложенное к пьезоэлементу сканера;  $h$  — расстояние между равновесными положениями зонда и образца на сканере

принимая во внимание только упругое взаимодействие, получим:

$$m_p \ddot{z}_p = -\alpha_p \dot{z}_p - k_p z_p + f_0 \cos(\omega t) + f_g(z_s - z_p - h), \quad (1)$$

$$m_s \ddot{z}_s = -\alpha_s \dot{z}_s - k_s(z_s - \gamma U(t)), \quad (2)$$

где  $z_p$  и  $z_s$  — смещения от положения равновесия зонда и сканера с образцом соответственно;  $m_p$ ,  $\alpha_p$ ,  $k_p$  — эффективная масса, коэффициент трения и жесткость колебательной системы зонда;  $f_g$  — сила упругого взаимодействия между зондом и образцом;  $f_0$ ,  $\omega$  — амплитуда и частота вынуждающей силы, приложенной к зонду;  $h$  — расстояние между равновесными положениями зонда и образца на сканере;  $m_s$ ,  $\alpha_s$ ,  $k_s$  — эффективная масса, коэффициент трения и жесткость колебательной системы сканера с образцом;  $U(t)$  — управляющее напряжение, приложенное к пьезоэлементу сканера;  $\gamma$  — чувствительность пьезосканера.

Запишем выражение для силы  $f_g$ , используя модель Герца [6] для контакта двух твердых сфер:

$$f_g(z_s) = \begin{cases} \eta z_s^{3/2}, & z_s \geq 0, \\ 0, & z_s < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь  $z_s$  — глубина погружения зонда в образец;  $\eta$  — константа, зависящая от механических характеристик зонда и образца:

$$\eta = \sqrt{R} \frac{4/3}{\frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_{обр}^2}{E_{обр}}},$$

где  $E$ ,  $\nu$ ,  $E_{обр}$ ,  $\nu_{обр}$  — модуль Юнга и коэффициент Пуассона зонда и образца соответственно.

При этом для площади контакта зонда с поверхностью имеем [6]

$$S(z_s) = 2\pi R z_s \quad (4)$$

и соответственно для давления:

$$P(z_s) = \frac{f_g(z_s)}{S(z_s)} = \frac{\eta \sqrt{z_s}}{2\pi R}. \quad (5)$$

Из теории колебаний [7] известно, что

$$k = m\omega_r^2 \frac{4Q^2 + 1}{4Q^2 - 1},$$

$$\alpha = \frac{2m\omega_r}{\sqrt{4Q^2 - 1}}.$$

Здесь  $Q = \frac{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}{2\beta}$  — добротность,  $\omega_r =$

$= \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$  — резонансная частота вынужденных колебаний,  $\beta = \alpha/2$ ,  $\omega_0$  — частота свободных колебаний.

В случае  $Q \gg 1$  эти выражения упрощаются:

$$k_p = m_p \omega_{rp}^2,$$

$$\alpha_p = \frac{m_p \omega_{rp}}{Q_p}.$$

Жесткость и коэффициент трения пьезосканера определяются аналогичным способом:

$$k_s = m_s \omega_{rs}^2,$$

$$\alpha_s = \frac{m_s \omega_{rs}}{Q_s}.$$

Для определения амплитуды вынуждающей силы  $f_0$  воспользуемся известным выражением для амплитуды вынужденных колебаний  $|A|$  на частоте  $\Omega$  [7]:

$$|A| = \frac{f_0 / m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2 \Omega^2}}.$$

Тогда, принимая во внимание, что  $|A| = h$ , где  $h$  — расстояние между равновесным положением зонда и образцом, определяемое из экспериментальной кривой подвода (рис. 3), получим выражение для амплитуды вынуждающей силы на резонансной частоте:

$$f_0 = h \cdot m_p \cdot \sqrt{(\omega_0^2 - \omega_{rp}^2)^2 + 4 \left( \frac{\omega_{rp}^2}{2Q_p} \right)^2} \omega_{rp}^2.$$

При  $Q_p \gg 1$   $\omega_0^2 \approx \omega_{rp}^2$ , получим

$$f_0 = h \cdot m_p \cdot \frac{\omega_0^3}{Q_p}.$$

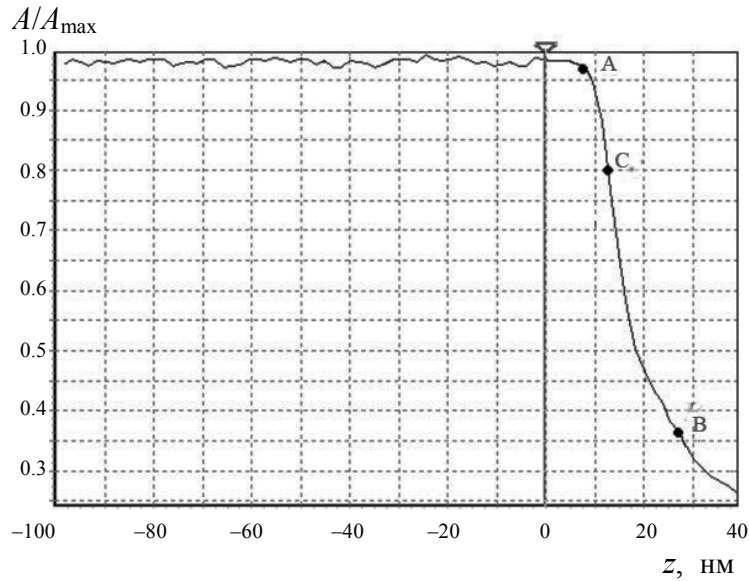
#### Уравнение для критической силы сжатия зонда

Уравнение, описывающее изгиб стержня переменного сечения (рис. 4, б), согласно [8], имеет вид

$$E \frac{d^2}{dx^2} \left( I(x) \frac{d^2 \xi}{dx^2} \right) + F \frac{d^2 \xi}{dx^2} = 0, \quad (6)$$

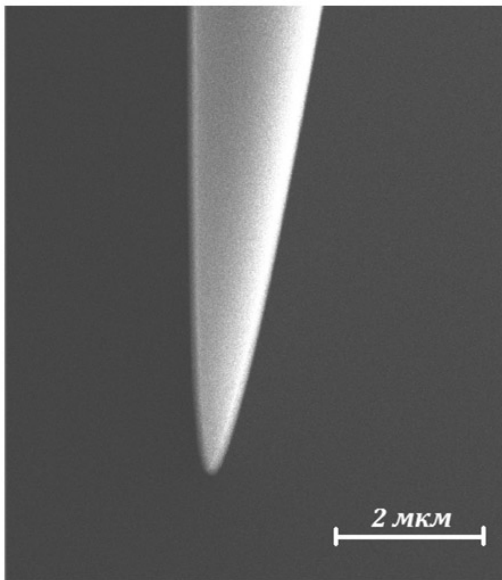
где  $\xi$  — поперечное смещение оси стержня,  $x$  — продольная координата,  $E$  — модуль Юнга вещества стержня,  $F$  — продольная сила, сжимающая стержень,  $I(x)$  — момент инерции поперечного

сечения стержня. Для стержня, с опорами на концах,

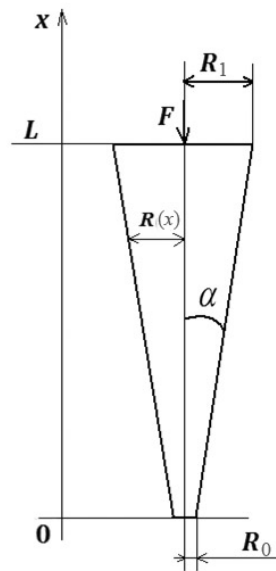


**Рис. 3.** Кривая подвода — зависимость амплитуды переменного напряжения на зондовом датчике от изменения зазора между зондом и образцом.

$A$  — амплитуда напряжения на пьезорезонансном зондовом датчике при взаимодействии зонда с образцом;  $A_{\max}$  — амплитуда напряжения на пьезорезонансном зондовом датчике в отсутствие взаимодействия вдали от образца;  $z$  — изменение координаты сканера



а



б

**Рис. 4.** РЭМ-изображение зонда (а) и модель зонда (б), используемая при расчете критической силы сжатия

граничные условия к уравнению (6) имеют вид

$$\xi|_{x=0,L} = 0, \quad \left. \frac{d^2 \xi}{dx^2} \right|_{x=0,L} = 0, \quad (7)$$

где  $L$  — длина стержня.

В случае конического стержня кругового сечения имеем

$$I(x) = \frac{\pi R^4(x)}{4}, \quad R(x) = R_0 + (R_1 - R_0) \frac{x}{L},$$

где  $R(x)$  — радиус стержня в зависимости от про-

дольной координаты;  $R_0$  и  $R_1$  — радиус стержня при  $x = 0$  и  $L$  соответственно (рис. 4, б)

Как отмечено в [8], для конического стержня кругового сечения существует точное решение задачи устойчивости. Уравнение (6) с граничными условиями (7) имеет отличное от нуля решение, если сжимающая сила  $F$  превышает критическое значение

$$F_{\text{кр}} = \frac{\pi^3 E R_0^2 R_1^2}{4L^2}.$$

При  $F > F_{\text{кр}}$  стержень теряет устойчивость и изги-

бается, переходя к новому устойчивому состоянию.

В случае кругового стержня постоянного сечения это условие сводится к классическому результату [9].

Тангенс угла  $\alpha$  наклона образующей конического стержня по отношению к его оси (рис. 4, б) можно записать в виде

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R_1 - R_0}{L}.$$

Для длинного стержня, при  $R_1 \gg R_0$ ,  $\operatorname{tg} \alpha \approx \frac{R_1}{L}$  и критическую силу можно представить как

$$F_{\text{кр}} = \frac{\pi^3 E R_0^2}{4} \operatorname{tg}^2 \alpha, \quad (8)$$

т. е. при острых (малых) углах заточки  $F_{\text{кр}}$  квадратично убывает с уменьшением радиуса зонда и угла между осью и образующей конуса. Поскольку площадь контакта определяется выражением (4), для критического продольного напряжения получим соотношение

$$P_{\text{кр}}(z_s) = \frac{F_{\text{кр}}}{2\pi R z_s} = \frac{\pi^2 E R_0}{8 z_s} \operatorname{tg}^2 \alpha. \quad (9)$$

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ДСЛ

В рамках рассмотренной выше модели проведено численное моделирование процесса ДСЛ при различных значениях амплитуды ( $U_0 = 0.3, 2.5, 4.28$  В) и длительности ( $\tau = 6, 200$  мкс) прямоугольного управляющего импульса электрического напряжения

$$U(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ U_0, & 0 < t \leq \tau, \\ 0, & t > \tau. \end{cases}$$

Ниже представлены результаты расчета ДСЛ, учитывающие следующие реальные параметры эксперимента.

**Параметры зондового датчика:** резонансная частота  $f_r = 8420 \text{ с}^{-1}$ , добротность  $Q = 22.1$ , масса зонда  $m_p = 1.42$  мг, радиус закругления зонда  $R = 100$  нм, модуль Юнга зонда  $E = 400$  ГПа, коэффициент Пуассона зонда  $\nu = 0.3$ , угол заточки зонда  $\alpha = 15$  град.

**Параметры пьезосканера:** резонансная частота  $f_{rs} = 1320 \text{ с}^{-1}$ , добротность  $Q_s = 11$ , масса держателя с образцом  $m_s = 3.89$  г, чувствительность  $\gamma = 70$  нм/В.

**Параметры образца:** модуль Юнга образца  $E = 80$  ГПа, коэффициент Пуассона образца  $\nu = 0.4$ , равновесное расстояние между зондом и образцом  $h = 24$  нм.

Расстояние  $h$  между поверхностью образца и равновесным положением зонда оценивалось из кривой подвода (рис. 3), представляющей собой зависимость амплитуды переменного напряжения на зондовом датчике, пропорционального амплитуде колебаний зонда, от изменения зазора между зондом и образцом. В точке А амплитуда колебаний зонда начинает уменьшаться, что соответствует началу "постукивания" зонда по поверхности образца. В точке В на кривой подвода наблюдается перегиб, который связывают с прекращением "постукивания" и переходом к колебаниям с прижатым к поверхности образца зондом. Точка С — рабочая точка сканирования в полуконтактном режиме с заданным уровнем взаимодействия зонда с образцом.

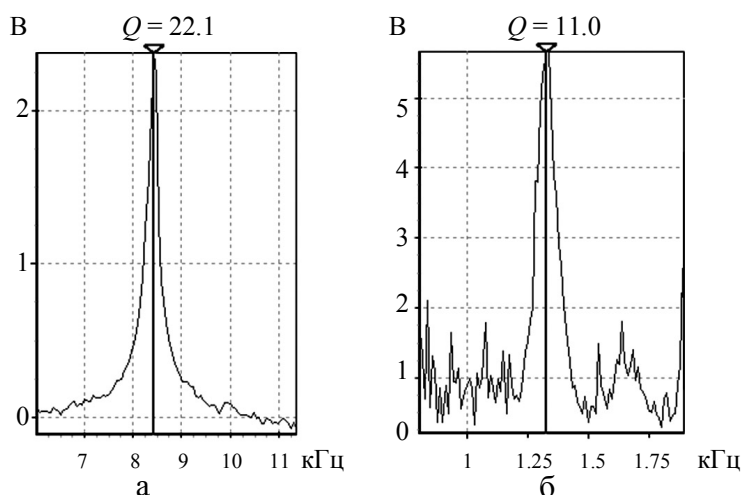
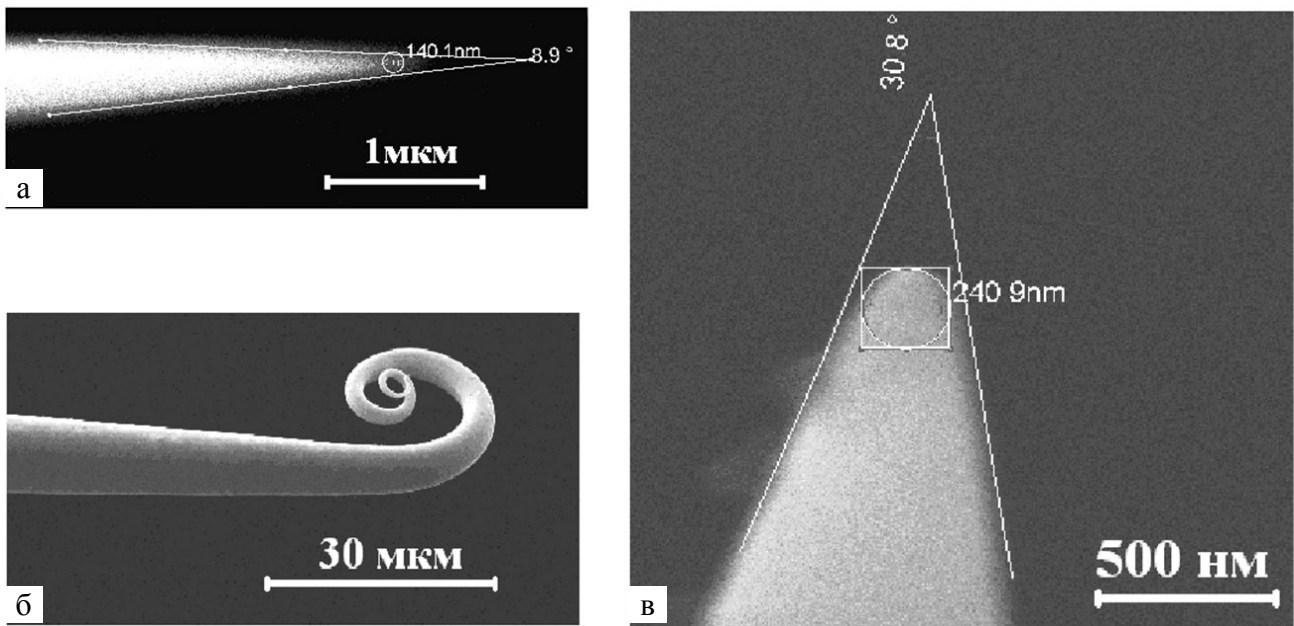
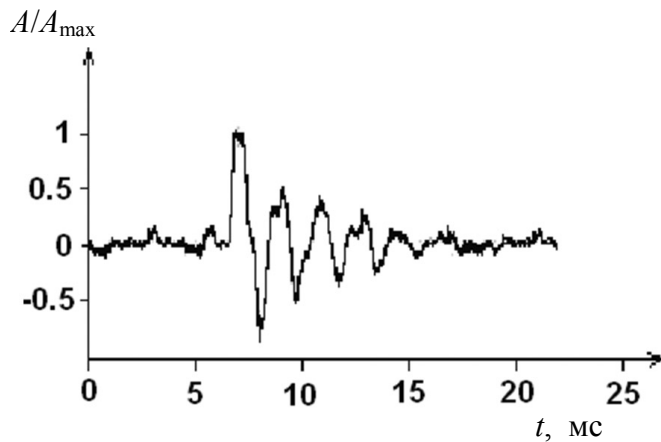


Рис. 5. Резонансные кривые зондового датчика (а) и сканера (б)



**Рис. 6.** РЭМ-изображения зондов.

а — неустойчивый зонд до процесса ДСЛ, угол при вершине зонда  $\alpha = 8.9$  град., диаметр закругления при вершине зонда  $d = 140$  нм; б — зонд (а) после процесса ДСЛ; в — устойчивый зонд после процесса ДСЛ, угол при вершине зонда  $\alpha = 30.8$  град., диаметр закругления при вершине зонда  $d = 240.9$  нм



**Рис. 7.** Экспериментальная зависимость затухания колебаний сканера от времени.

$A/A_{\max}$  — амплитуда колебаний сканера, нормированная максимальным значением

Измерив расстояние по оси абсцисс между точками С и В на кривой подвода, можно экспериментально оценить зазор между поверхностью образца и равновесным положением зонда.

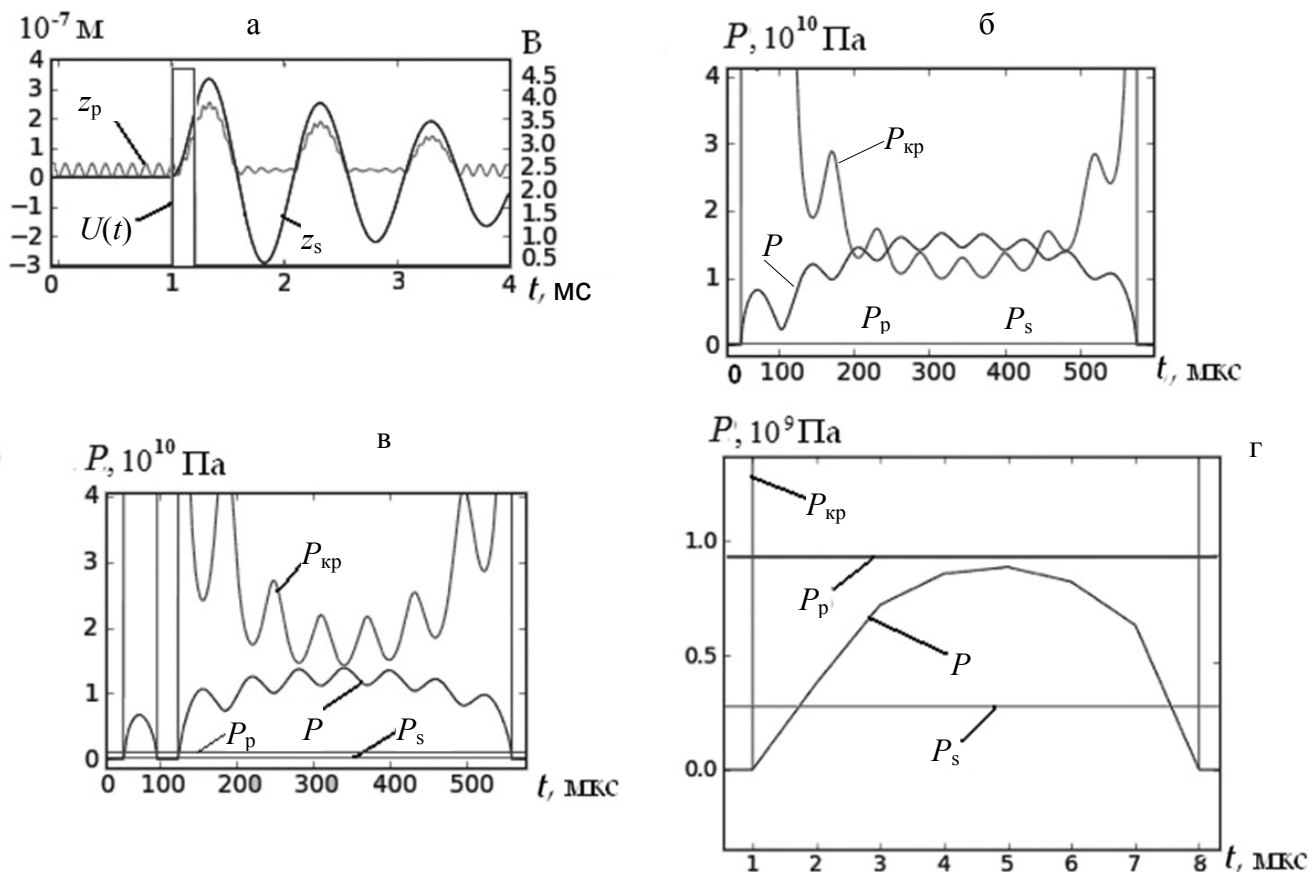
Резонансная частота и добротность зондового датчика и сканера с образцом определялись из экспериментальных резонансных кривых (рис. 5). Вес зонда и образца — путем прямого взвешивания. Радиус зонда определялся из СЗМ- и РЭМ-изображений (см., например, рис. 1, б, в).

Выражения для смещений во времени зонда  $z_p(t)$  и образца  $z_s(t)$  вычислялись из уравнений (1,

2). Значения давления в области контакта вычислялись в соответствии с (5). Критическая сила  $F_{кр}$  вычислялась из (8), при этом угол заточки  $\alpha$  определялся из РЭМ-изображений (рис. 6). Продольное критическое механическое напряжение, приложенное к зонду, вычислялись из (9). Значения пределов пластической деформации, модулей Юнга и коэффициентов Пуассона зонда (W) и образца (Au) брались из справочных данных [12], [13]. Чувствительность сканера по оси Z определялась из кривой калибровки сканера.

На рис. 7 представлена экспериментально измеренная зависимость амплитуды затухающих колебаний сканера от времени после импульсного воздействия. Видно, что кривая  $z_s$  на рис. 8, а, согласуется с экспериментом. Из расчетных кривых, представленных на рис. 8, б, видно, что через 200 мкс после начала действия управляющего импульса давление  $P$  в области контакта превышает критическое давление потери устойчивости  $P_{кр}$ , т. е. при этих условиях произойдет необратимая потеря формы зонда. На рис. 8, в, представлены результаты аналогичных расчетов при уменьшении управляющего напряжения с 4.28 до 2.5 В. Видно, что в этом случае выполняются условия  $P < P_{кр}$ ,  $P > P_s$  и  $P > P_p$ , т. е. зонд сохранит свою форму, однако

одновременно с модификацией поверхности образца произойдет деформация поверхности зонда, т. к. давление в области контакта превышает предел пластической деформации зонда. На рис. 8, г, представлены результаты аналогичных расчетов при уменьшении управляющего напряжения с 4.28 до 0.3 В и уменьшении длительности импульса управляющего напряжения с 200 до 6 мкс. Видно, что в этом случае реализуется оптимальный режим ДСЛ, при котором давление в области контакта выше предела пластической деформации образца  $P > P_s$ , оно не превосходит предела пластической деформации зонда  $P < P_p$  и не превышает критического значения, при котором возникает потеря формы зонда  $P < P_{кр}$ .



**Рис. 8.** Результаты моделирования процесса ДСЛ в рамках одномерной упругой модели.

а — смещение зонда ( $z_p$ ) и образца ( $z_s$ ) под действием импульса управляющего напряжения с амплитудой  $U = 4.28$  В и длительностью  $\tau = 200$  мкс; б — значения давления ( $P$ ) в области контакта и критического давления потери устойчивости зонда ( $P_{кр}$ ), механического напряжения пластической деформации образца ( $P_p$ ) и зонда ( $P_s$ ) при  $U = 4.28$  В,  $\tau = 200$  мкс; в — то же, что и (б) при  $U = 2.5$  В,  $\tau = 200$  мкс; г — то же, что и (б) при  $U = 0.3$  В,  $\tau = 6$  мкс



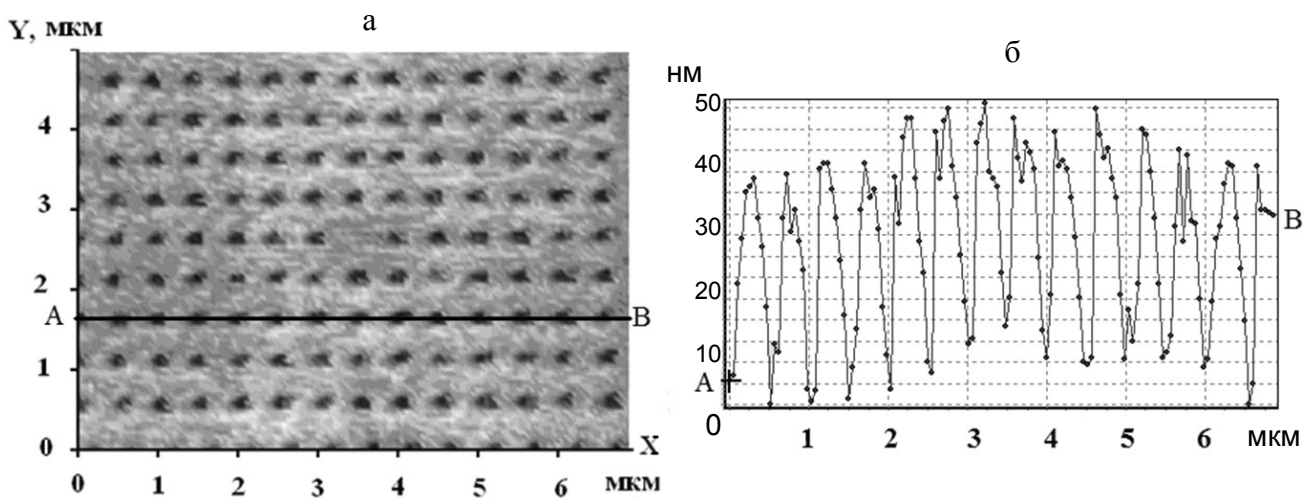
Отметим, что упругое приближение, использованное в рассмотренной выше модели ДСЛ, должно давать завышенное давление в области контакта. Поэтому полученные выше численные значения не следует подвергать строгому сравнению с экспериментальными данными. Полученные расчетные данные рассматриваются нами как полуколичественные оценки, необходимые для понимания особенностей режима ДСЛ.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

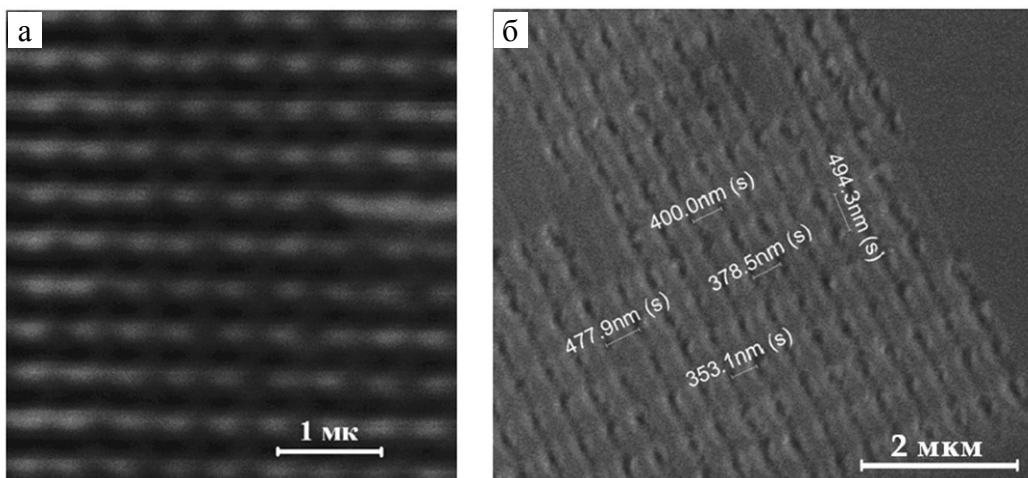
В реальных экспериментах оптимизация режима ДСЛ проводилась путем выбора амплитуды и

длительности управляющего импульса, постоянного времени СС и скорости сканирования.

На рис. 9 представлены СЗМ-изображение и поперечное сечение двумерной решетки, созданной на основе тонкой Au-пленки, напыленной на полимерную подложку. Из поперечного сечения, выполненного вдоль линии (AB), отмеченной на рис. 9, а, видно, что характерный латеральный размер области модификации имеет величину около 200 нм, что согласуется с диаметром используемого вольфрамового зонда. Из рис. 9, б, следует, что глубина реза превышает толщину напыленной проводящей пленки.



**Рис. 9.** СЗМ-изображение двумерной решетки, созданной методом ДСЛ в тонкой (20 нм) Au-пленке, напыленной на поликарбонатную подложку (а) и поперечное сечение области модификации, выполненное вдоль линии АВ (б)



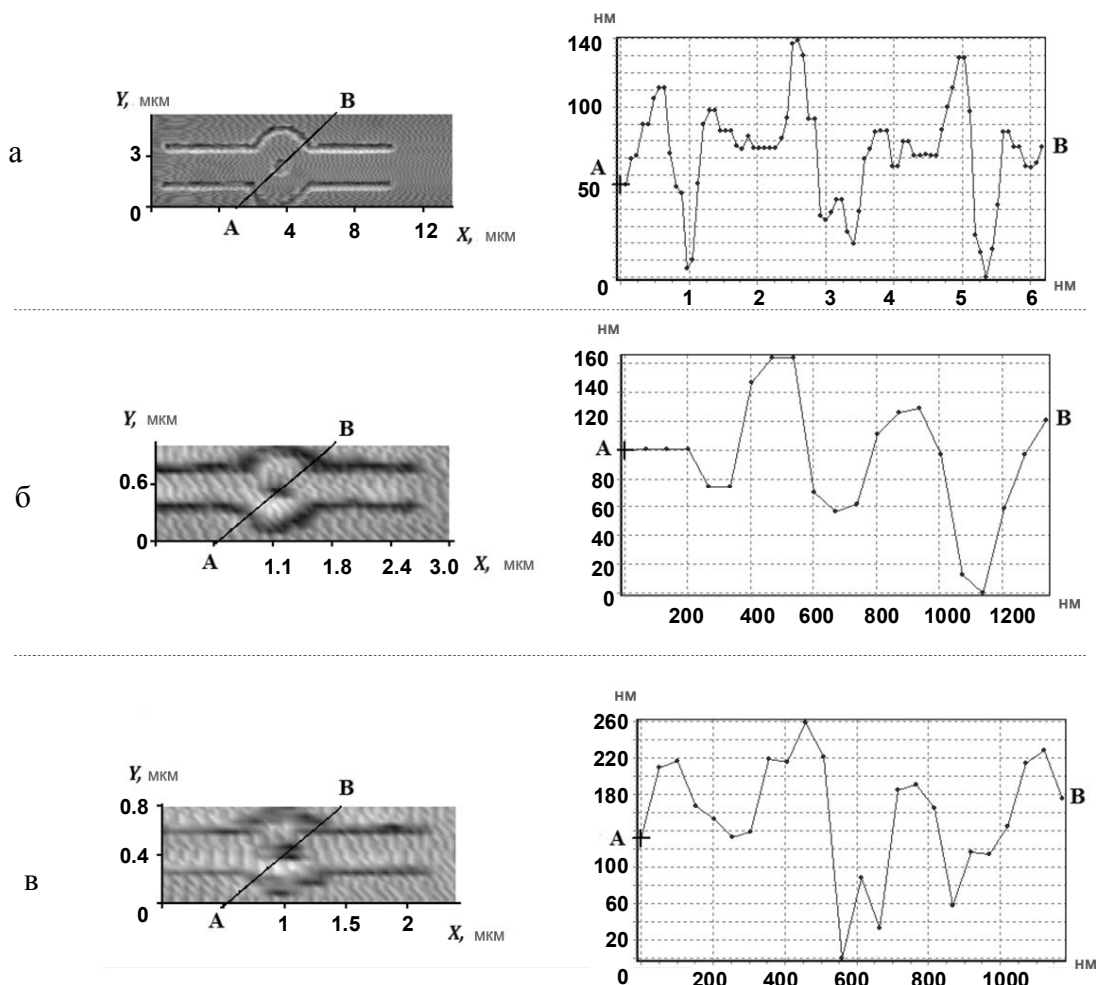
**Рис. 10.** Изображение двумерной решетки, созданной методом ДСЛ в тонкой (20 нм) Au-пленке, напыленной на поликарбонатную подложку, полученное в конфокальном микроскопе на отражение (а), и изображение этого образца в режиме вторичных электронов, полученное в РЭМ (б)

Для ответа на вопрос о прорезании металлической пленки в процессе ДСЛ по всей глубине и ширине реза был поставлен отдельный эксперимент. Методом ДСЛ выполнялся поперечный разрез металлической полоски шириной около 50 мкм при одновременном измерении омического сопротивления полоски. Было установлено, что поперечный рез полностью разделяет проводящую полоску на две части. Этот факт также согласуется с тем, что глубина поперечного сечения на СЗМ-изображении (рис. 9, б) имеет величину около 35–40 нм, что превышает толщину Au-пленки (20 нм).

Поверхность данной двумерной решетки ис-

следовалась также в конфокальном оптическом микроскопе (рис. 10, а) в отражательном режиме и в режиме вторичных электронов в РЭМ (рис. 10, б).

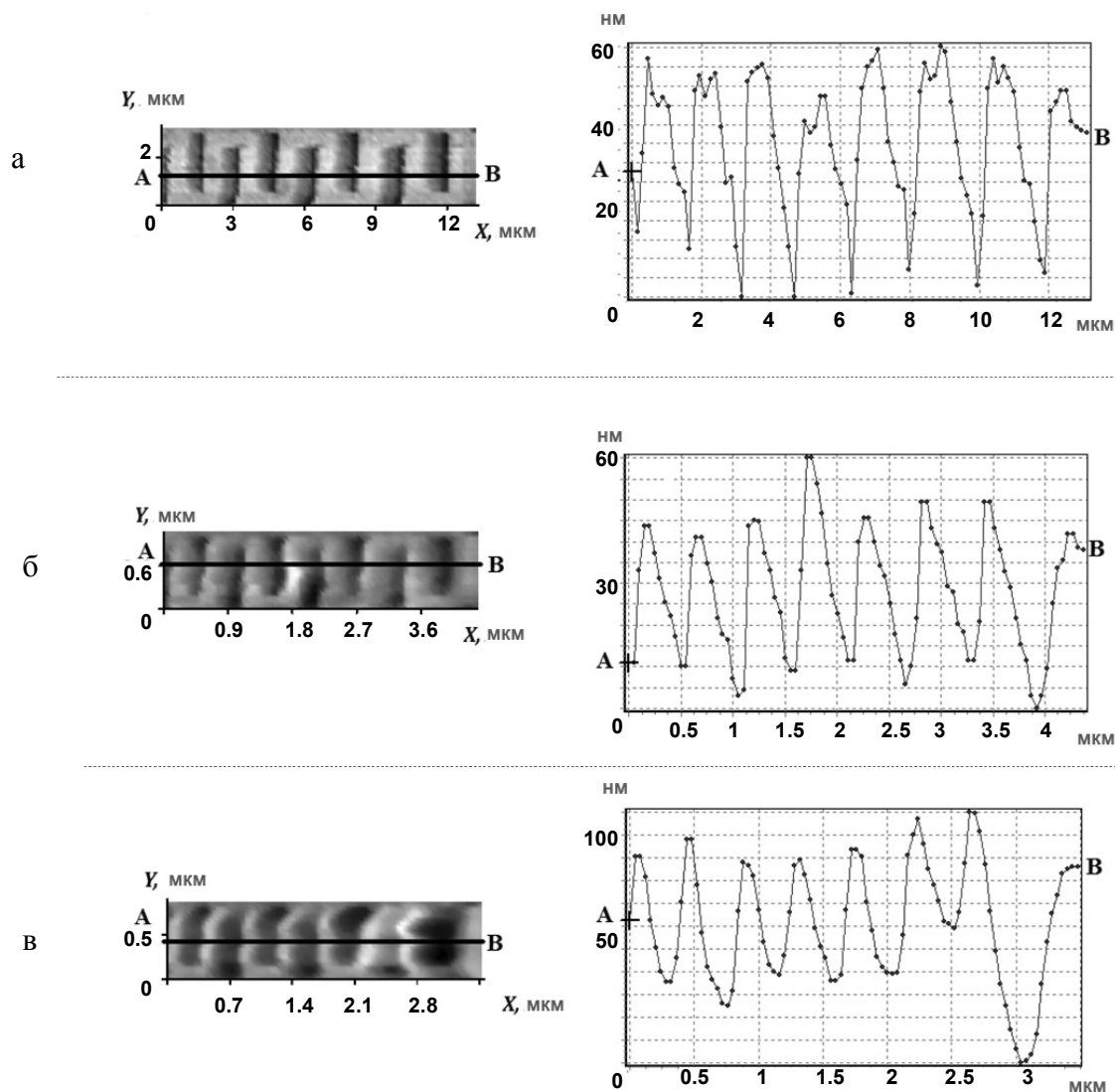
Отметим, что представленная на рис. 10, а, структура с периодическим изменением в пространстве коэффициента отражения фактически является двумерной оптической дифракционной решеткой с периодом около 500 нм. Такой пространственный масштаб характерен для периодических оптических структур, используемых при создании фотонных кристаллов. Изображение, полученное в РЭМ (рис. 10, б) хорошо согласуется с оптическим и СЗМ-изображениями.



**Рис. 11.** СЗМ-изображения (слева) колец с внешним диаметром 4000 нм (а), 900 нм (б) и 500 нм (в), вырезанных методом ДСЛ в тонкой (20 нм) Au-пленке, напыленной на поликарбонатную подложку. Справа представлены поперечные сечения, проведенные вдоль линий АВ, показанных на СЗМ-изображениях

На рис. 11 представлены СЗМ изображения и поперечные сечения проводящих колец различного диаметра, полученные методом ДСЛ. Видно, что ширина линии реза соизмерима с диаметром используемого W-зонда ( $\sim 200$  нм), а глубина линии реза превышает толщину металлической пленки. Минимальный внешний диаметр кольца имеет величину  $\sim 500$  нм при внутреннем диаметре  $\sim 200$  нм.

Как следует из рис. 11, конус зонда проникает в металлическую пленку на минимальную глубину, что подтверждает оптимальность выбранных параметров ДСЛ. Отметим, что при низких температурах в созданных таким образом нанометровых проводящих кольцах могут иметь место размерные эффекты, а проводящие кольца могут выступать в качестве интерферометров электронных волн.



**Рис. 12.** СЗМ-изображения (слева) наноструктур в форме меандра, вырезанных методом ДСЛ в тонкой (20 нм) Au-пленке, напыленной на поликарбонатную подложку. Справа представлены поперечные сечения, проведенные вдоль линий АВ, показанных на СЗМ-изображениях. Ширина проводящих полосок изменяется от 1.2 мкм (а) до 200 нм (в)

На рис. 12 представлена проводящая структура в виде меандра. Минимальный латеральный размер структуры в этом случае также определяется размером используемого зонда. Отметим, что предложенная методика дает простой способ создания криволинейных низкоразмерных наноструктур. Подобные одномерные криволинейные наноструктуры вызывают интерес у теоретиков и экспериментаторов [10], поскольку, изменяя форму, можно управлять их электронными параметрами, такими как плотность электронных состояний. Также отметим, что представленная на рис. 12 меандровая наноструктура рассматривается как вариант реализации кубитов квантовых компьютеров [11].

В описанных выше экспериментах момент подачи управляющего импульса не был согласован с фазой колебаний зонда. Кроме того, переход в новую точку модификации осуществлялся без учета времени, требуемого для затухания колебаний сканера с образцом после воздействия предыдущего управляющего импульса. Реализация динамического контакта, коррелированного с фазой колебаний зонда, и учет времени затухания колебаний образца позволит сделать процесс ДСЛ однозначным и более стабильным. Однако для этого потребуется некоторая модификация аппаратно-программных средств СЗМ NanoEducator, на котором проводились данные эксперименты.

### ВЫВОДЫ

Метод ДСЛ, реализуемый в СЗМ с пьезорезонансным зондовым датчиком, предоставляет простой способ создания низкоразмерных проводящих наноструктур на основе тонких проводящих пленок, нанесенных на поверхность полимерных, в частности поликарбонатных подложек. Экспериментально показано, что при радиусе вольфрамового зонда около 100 нм золотая пленка толщиной 20 нм прорезается на всю глубину и удаляется из области реза. Пространственное разрешение метода определяется радиусом используемых зондов. С помощью ДСЛ в системе "металлическая пленка—полимер" можно создавать элементы наноэлектроники, нанопотоники и наносенсоры.

Работа выполнена в рамках реализации и при финансовой поддержке ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 гг. (ГК П557) и АВЦП "Развитие научного потенциала высшей школы" на 2009–2011 гг. (ГК 2.1.2/4187 и 2.1.2/9784).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алфёров Ж.И., Асеев А.Л., Гапонов С.В. и др. Наноматериалы и нанотехнологии // Нано- и микросистемная техника. 2003. № 8. С. 3–13.
2. Неволин В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике. М.: Техносфера, 2006. 160 с.
3. Стовяга А.В., Пинаев А.Л., Голубок А.О. Исследование нанозонда для модификации поверхности полимера методом динамической силовой литографии // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2008. № 58. С. 86–91.
4. Быков В.А., Васильев В.Н., Голубок А.О. Учебно-исследовательская мини-лаборатория по нанотехнологии на базе сканирующего зондового микроскопа NanoEducator // Российские нанотехнологии. 2009. № 5-6. С. 45–48.
5. Голубок А.О., Васильев А.А., Керпелева С.Ю. и др. Датчик локального силового и туннельного взаимодействия в сканирующем зондовом микроскопе // Научное приборостроение. 2005. Т. 15, № 1. С. 62–69.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 248 с.
7. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959. 918 с.
8. Биргер И.А., Пановко Я.Г. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник. Т. 3. М.: Машиностроение, 1968. 567 с.
9. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.
10. Магарилл Л.И., Чаплик А.В., Энтин М.В. Спектр и кинетика электронов в криволинейных наноструктурах // Успехи физических наук. 2005. Т. 175, № 9. С. 995–1000.
11. Воронов В.К., Подоплелов А.В. Современная физика. Конденсированное состояние. (Учебное пособие). М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 336 с.
12. Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
13. Rabkin E., Srolovitz D.J. Onset of plasticity in gold nanopillar compression // Nano Letters. 2007. V. 7, N 1. P. 101–107.

*Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (Голубок А.О., Пинаев А.Л., Чивилихин Д.С., Чивилихин С.А.)*

*Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург (Голубок А.О.)*

Контакты: Голубок Александр Олегович,  
golubok@ntspsb.ru

Материал поступил в редакцию 28.01.2011.

# **DYNAMIC FORCE LITHOGRAPHY ON THE THIN METALLIC FILMS IN THE SCANNING PROBE MICROSCOPE WITH THE PIEZORESONANCE DETECTOR OF LOCAL INTERACTION**

**A. O. Golubok<sup>1,2</sup>, A. L. Pinayev<sup>1</sup>, D. S. Chivilikhin<sup>1</sup>, S. A. Chivilikhin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics*

<sup>2</sup>*Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg*

Research of dynamic force lithography (DFL) regime on thin (20 nm) Au film on the polycarbonate substrate has been conducted. One-dimensional model in elastic approximation has been suggested and calculations demonstrating existence of the DFL optimal regime have been carried out. Experimental results which have been reached in the *NanoEducator* scanning probe microscope with piezoresonance detector of force interaction and electrochemically edged W probe are presented. It is experimentally demonstrated that the W probe cuts the metallic film throughout and that the width of the cut is approximately 100nm and is determined by the radius of the probe. It is shown that the DFL regime in the system "metallic film—polymer" ensures creation of the 2D-nanostructures of various configuration. This regime is an easy way to create elements of nanoelectronics, nanophotonics and nanosensorics.

*Keywords:* scanning probe microscope, dynamic force lithography, nanostructures