

УДК 53.086

© А. В. Стовпяга, И. Д. Сапожников, А. О. Голубок

СКАНИРУЮЩИЙ МИКРОСКОП ИОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ С ОДНОВРЕМЕННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦА В ПОЛУКОНТАКТНОЙ СИЛОВОЙ МОДЕ

Предложен и исследован зондовый датчик для одновременной работы в полуконтактном силовом режиме и в режиме сканирующей микроскопии ионной проводимости (СМИП). Проведено численное моделирование изображения ступеньки на поверхности диэлектрического образца в режиме СМИП. Представлены экспериментальные результаты, полученные при сканировании тестового образца.

Кл. сл.: сканирующая зондовая микроскопия, сканирующий микроскоп ионной проводимости, микропипетка

ВВЕДЕНИЕ

Открытие сканирующего туннельного микроскопа в 1981 г. [1] привело к появлению нового метода диагностики материалов различной природы с нанометровым уровнем пространственного разрешения, получившего название сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ). В настоящее время СЗМ насчитывает несколько десятков методик, основанных на взаимодействии острого твердотельного зонда с образцом в процессе сканирования вблизи его поверхности. В зависимости от природы детектируемого взаимодействия различают туннельную микроскопию, атомно-, электро- и магнито-силовую микроскопии, оптическую микроскопию ближнего поля и т. п. [2]

В последнее время большой интерес вызывает исследование мягких объектов биологической природы, в частности клеток в нативном состоянии. Для исследования с субмикронным разрешением биологических клеток, находящихся в функциональном растворе, разработана методика, получившая название сканирующей микроскопии ионной проводимости (СМИП) [3]. Принцип работы СМИП основан на использовании в качестве зонда стеклянной микропипетки (МП), регистрирующей ионный ток, протекающий через ее внутреннее отверстие с радиусом $r_0 \sim (100\text{--}500)$ нм. Такая разновидность СЗМ позволяет исследовать мягкие биологические объекты, функционирующие в жидкой среде с ионной проводимостью, а также поверхность твердых диэлектриков, находящиеся в растворе электролита, например визуализировать поры в искусственных мембранах. Используя СМИП [4], можно получить детальную информацию о функционировании биологических

клеток с нанометровым уровнем пространственного разрешения. Как показано в [5], латеральное разрешение СМИП главным образом определяется размером открытой полости МП и имеет величину $\sim 3 r_0$.

До настоящего времени зонд в виде МП использовался только для измерений в режиме СМИП. Целью данной работы было создание и исследование зондового датчика на основе МП, позволяющего визуализировать объект, находящийся в жидком электролите, как в режиме СМИП, так и в режиме силовой микроскопии.

ПРИНЦИП РАБОТЫ СМИП

Принцип работы СМИП показан на рис. 1. Непроводящий образец помещается в стеклянную или пластмассовую чашечку с электролитом и размещается на сканере СЗМ. Зондовый датчик в виде заполненной электролитом МП устанавливается над поверхностью образца. В качестве электролита может выступать физиологический раствор или раствор хлорида натрия (калия). Во внутреннюю полость МП вставлен электрод в виде тонкой Ag проволоки, покрытой слоем AgCl. С внешней стороны МП располагается второй Ag/AgCl-электрод, к которому прикладывается напряжение смещения V_0 , поддерживающее ионный ток между внутренним и внешним электродами. Вдали от поверхности образца ионный ток I максимален и не зависит от величины зазора между образцом и торцом МП. Величина ионного тока сквозь МП [6] определяется ее геометрией, напряжением смещения V_0 и проводимостью электролита σ .

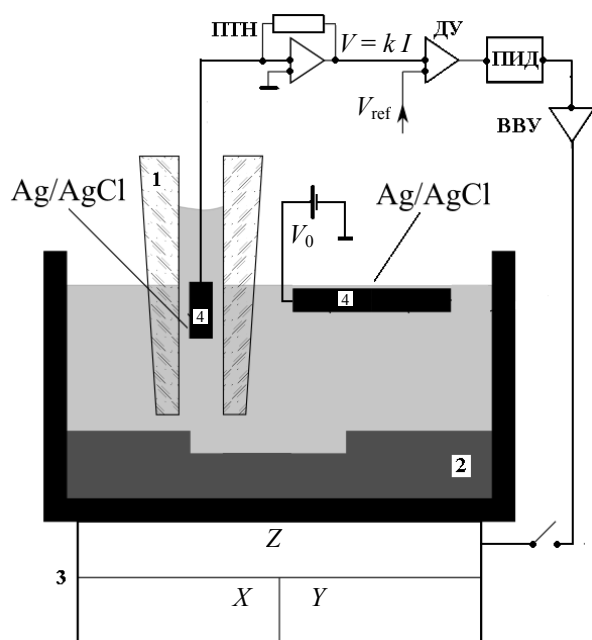


Рис. 1. Схема сканирующего микроскопа токов ионной проводимости.

1 — микропипетка (в разрезе); 2 — непроводящий образец; 3 — 3D сканер; 4 — проводящие электроды; ПТН — преобразователь ток-напряжения; ДУ — дифференциальный усилитель; ПИД — ПИД-регулятор; ВВУ — высоковольтный усилитель

$$I = V_0 \cdot \sigma \cdot \pi \cdot r_0 \cdot \operatorname{tg}(\alpha), \quad (1)$$

здесь r_0 и α — радиус внутреннего отверстия и угол сходимости МП соответственно. На Ag/AgCl-электроде ионный ток трансформируется в электронный ток и с помощью преобразователя "ток-напряжение" преобразуется в напряжение $V = k \cdot I$ (k — коэффициент преобразования). При приближении МП к поверхности образца на расстояния, сравнимые с величиной r_0 , ионный ток начинает уменьшаться. Для стабилизации ионного тока при малых расстояниях между поверхностью образца и торцом МП используется следящая система (СС) с отрицательной обратной связью. Напряжение V сравнивается с опорным напряжением V_{ref} , сигнал ошибки $V - V_{\text{ref}}$ преобразуется с помощью ПИД-регулятора, усиливается и прикладывается к сканеру, смещающему образец вдоль оси МП. В режиме СМПП осуществляется сканирование образцом на малых расстояниях от торца МП при постоянном значении ионного тока. В результате МП считывает микрорельеф поверхности диэлектрического образца, находящегося в растворе электролита, не касаясь поверхности образца.

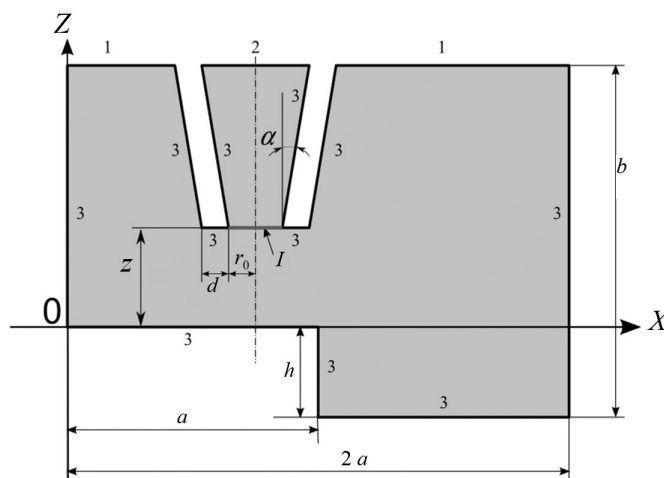


Рис. 2. Расчетная модель СМПП.

r_0 — внутренний радиус микропипетки, d — толщина стенки микропипетки, z — расстояние между торцом микропипетки и поверхностью образца; h — высота ступеньки на поверхности образца; a — расстояние от ступеньки до границы с диэлектриком в плоскости образца; b — расстояние от поверхности образца до проводящих электродов; 1 — граничная линия, соответствующая электрическому потенциалу $\varphi = 0.2eV$ на внешнем электроде; 2 — граничная линия, соответствующая нулевому электрическому потенциалу $\varphi = 0$ на внутреннем электроде; 3 — линия границы с диэлектриком, соответствующая условию $\mathbf{j} \cdot \mathbf{n} = 0$, $\mathbf{n}$ — нормаль к линии границы с диэлектриком, $\mathbf{j}$ — вектор плотности ионного тока

МОДЕЛИРОВАНИЕ СМПП-ИЗОБРАЖЕНИЯ

Для оценки пространственного разрешения и контраста метода моделировалось СМПП-изображение образца в виде одномерной ступеньки высотой h на диэлектрической поверхности (рис. 2)

$$z_s(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \leq x < a, \\ -h, & \text{при } a \leq x \leq 2a. \end{cases}$$

Характерные геометрические параметры модели h , a , b выбирались много меньшими по сравнению с внутренним радиусом МП r_0 . Рассчитывалось распределение электрического потенциала $\varphi(x, z)$ с граничными условиями, представленными на рис. 2, и электрическое поле $E(x, z)$ в зависимости от положения МП без учета влияния дзета-потенциала [7]. Влиянием дзета-потенциала можно пренебречь, если его величина мала по сравнению с напряжением смещения V_0 , а длина, на которой он спадает, много меньше ширины зазора.

Ионный ток I , протекающий через внутреннюю полость МП, рассчитывался путем интегрирования плотности тока $j = \sigma E$ в рамках используемой

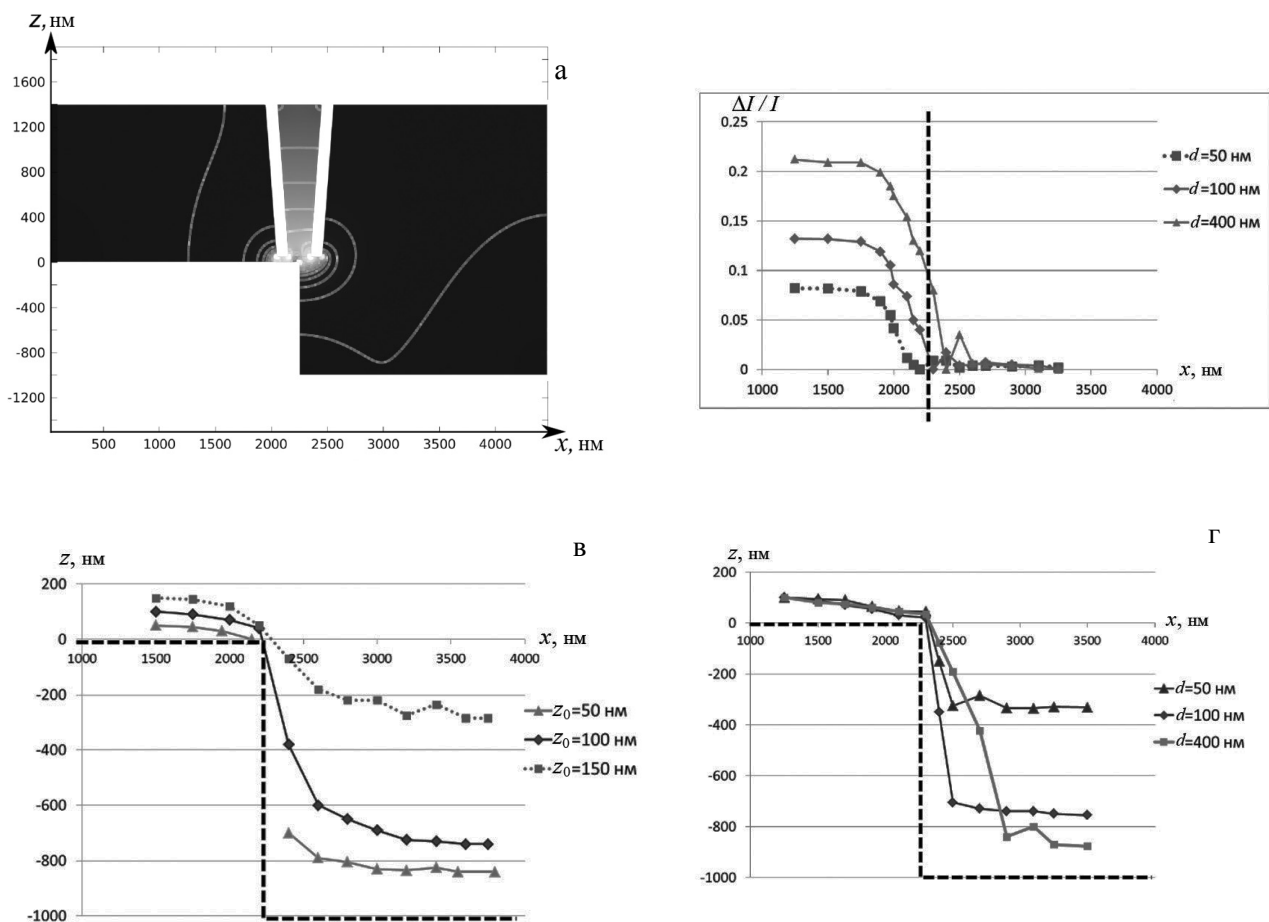


Рис. 3. Результаты моделирования работы СМПП при $r_0=100$ нм, $V_0=0.2$ В для образца в виде плоской диэлектрической поверхности со ступенькой высотой $h=1000$ нм. а — распределение потенциала $\varphi(x, z)$; б — зависимость $\Delta I / I$ при $z_0 = 100$ нм для различных толщин стенок $d=50, 100, 400$ нм; в — зависимость $z(x)$ при $d = 100$ нм для различных начальных зазоров $z_0 = 50, 100, 150$ нм; г — зависимость $z(x)$ при $z_0 = 100$ нм для различных толщин стенок $d = 50, 100, 400$ нм

модели (рис. 2). Проводимость σ определялась из справочных данных через известную концентрацию NaCl в водном растворе. В точке $x_0 = a/2$ устанавливался начальный зазор z_0 между поверхностью образца и торцом МП и вычислялся ток $I_0(x_0, z_0)$. Затем МП перемещалась с шагом $2 r_0$ вдоль координаты x вправо до точки $x = 3/2 a$, и на каждом шаге вычислялся зазор $z(x)$, при котором значение тока оставалось постоянным $I(x, z) = I_0(x_0, z_0) = \text{const}$.

Как и в [5], расчеты проводились с помощью метода конечных элементов в программном пакете COMSOL MULTIPHYSICS 3.5a с использованием модуля Electromagnetics/Conductive media DC [8].

При сканировании по координате x СМПП-изображение формируется за счет смещения сканера при замкнутой петле обратной связи СС, в результате которого поддерживается постоянное

значение ионного тока (рис. 1). Будем считать ошибку слежения бесконечно малой, что справедливо для медленного сканирования. Тогда СМПП-изображением будет зависимость $z_I(x) = z(x) - z_0$ ($x=a/2$), представляющая собой зависимость $z(x)$ при $I=\text{const}$, сдвинутую на величину начального зазора. Будем в дальнейшем для простоты называть СМПП-изображением зависимость $z(x)$.

Ионный ток рассчитывался при напряжении смещения $V_0 = 0.2$ В на внешнем электроде относительно заземленного внутреннего электрода, концентрации электролита $n = 0.1$ М, угле сходимости МП $\alpha = 7.5^\circ$. Радиус МП r_0 выбирался равным 100 нм. Расчеты выполнялись при различных начальных зазорах между поверхностью образца и торцом МП ($z_0 = 0.5r_0, 1.0r_0$ и $1.5r_0$) и различных толщинах стенки МП ($d = 0.5r_0, 1.0r_0$ и $4r_0$).

На рис. 3 представлены результаты моделирования. На рис. 3, а, дано для примера распределение потенциала $\varphi(z, x)$ при расположении МП над краем ступеньки. Расположение МП по координате z выбрано таким образом, чтобы протекающий через нее ток I был равен току, соответствующему ее расположению в точке $x = a/2, z_0 = r_0$. На рис. 3, б, показано относительное изменение тока при перемещении МП от точки $x = a/2$ до точки $x = 3/2 a$ при начальном зазоре $z_0 = 100$ нм для разных толщин стенок МП $d = 50, 100$ и 400 нм. На рис. 3, в, дано СМПП-изображение, рассчитанное для МП с толщиной стенки $d = 100$ нм при разных начальных зазорах $z_0 = 50, 100$ и 150 нм. На рис. 3, г, дано СМПП-изображение, рассчитанное для МП с толщиной стенки $d = 100$ нм, начальном зазоре $z_0 = 100$ нм при разных толщинах стенок МП $d = 50, 100$ и 400 нм.

Расчет показывает, что электрическое поле концентрируется по внешнему и внутреннему периметру на торце МП и в области около острого края ступеньки (рис. 3, а).

На рис. 3, б, видно, что наибольшее изменение тока ($\sim 20\%$) при прохождении МП над ступенькой на поверхности наблюдается в случае толстой стенки ($d = 400$ нм). Однако при этом наблюдается максимальное колебание тока при прохождении МП над ступенькой. Из рис. 3, в, следует, что наибольший контраст на СМПП-изображении наблюдается при начальном зазоре $z_0 = 50$ нм. Однако при этом имеет место касание и вдавливание МП в поверхность образца, что приведет к ее разрушению. Таким образом, расчеты показывают, что существует оптимальный начальный зазор $z_0 = 100$ нм, дающий максимальный контраст СМПП-изображения без разрушения МП. Из рис. 3, г, следует, что при начальном зазоре $z_0 = 100$ нм наилучший контраст на СМПП-изображении дает МП с толстой стенкой $d = 400$ нм. Однако в этом случае на СМПП-изображении наблюдается гофрировка, отсутствующая в рассматриваемой модели вертикальной ступеньки. Размытие положения вертикальной стенки при этом составляет ~ 600 нм. Для МП с тонкой стенкой расчет дает меньшее размытие, но и меньший контраст на СМПП-изображении. Из рис. 3, г, следует, что в рамках рассмотренной модели наименьшее размытие СМПП-изображения вертикальной стенки (~ 200 нм) при максимальном контрасте и отсутствии артефактов достигается при начальном зазоре $z_0 = 100$ нм и толщине стенки МП $d = 100$ нм.

Таким образом, в случае высокой ступеньки ($h \gg r_0$) размытие положения ее вертикальной стенки при оптимальных значениях z_0 и d составляет $\sim 2.0 r_0$, т. е. определяется диаметром внутреннего канала МП.

УСТОЙЧИВОСТЬ ЗОНДА-МИКРОПИПЕТКИ ПРИ РАБОТЕ В СИЛОВОМ РЕЖИМЕ

При использовании МП в качестве зонда в режиме силовой микроскопии необходимо оценить устойчивость такого зонда при продольном сжатии. Будем рассматривать МП как балку переменного сечения с внутренней полостью, зажатую с двух концов. Уравнение, описывающее изгиб балки переменного сечения, согласно [9], имеет вид

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

где ξ — поперечное смещение оси балки; z — продольная координата; E — модуль Юнга материала балки; F — продольная сила, сжимающая балку; $I(z)$ — момент инерции поперечного сечения балки. Для балки, опертой по концам, граничные условия к уравнению (2) имеют вид

$$\xi_{z=0,L} = 0, \quad \left. \frac{d^2 \xi}{dz^2} \right|_{z=0,L} = 0, \quad (3)$$

где L — длина балки.

В случае балки, представляющей собой коническую трубу кругового сечения с внешним радиусом $R(z) = r_0 + (R_0 - r_0) \frac{z}{L}$ и внутренним радиусом $r(z) = \gamma R(z)$ имеем

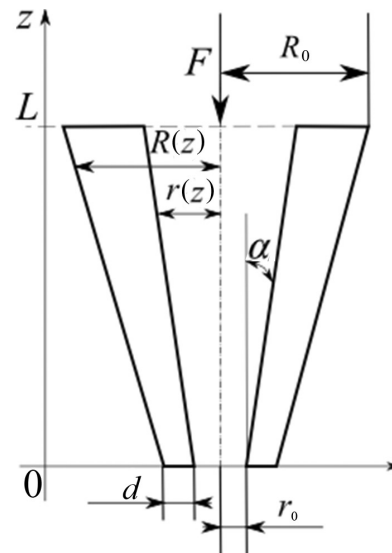


Рис. 4. Модель зонда-микропипетки, используемая при расчете критической силы сжатия

$$I(z) = \frac{\pi}{4} [R^4(z) - r^4(z)] = \frac{\pi}{4} (1 - \gamma^4) R^4(z),$$

где $R(z)$ — радиус стержня в зависимости от продольной координаты z ; r_0 и R_0 — радиус стержня при $z=0$ и L соответственно (рис. 4); γ — постоянная, равная отношению внутреннего радиуса микропипетки $r(z)$ к ее внешнему радиусу $R(z)$.

Решив это уравнение, получим выражение для критической сжимающей силы $F_{кр}$, выше которой стержень теряет устойчивость и изгибается:

$$F_{кр} = \frac{\pi^3 E (1 - \gamma^4) r_0^2 R_0^2}{4L^2}. \quad (4)$$

Рассмотрим характерный для эксперимента случай $L \gg R_0$ и $r_0 = d$, или $\gamma = 0.5$. Тогда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{0.5R_0 - r_0}{L} \approx \frac{0.5R_0}{L}.$$

Критическую силу (4) теперь можно представить в виде

$$F_{кр} = \frac{60}{64} \pi^3 E r_0^2 \operatorname{tg}^2 \alpha. \quad (5)$$

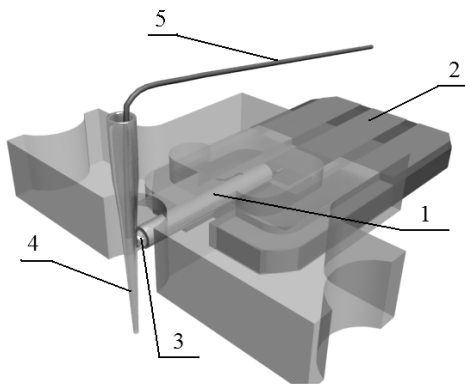


Рис. 5. СМПП-датчик для измерения локальных ионных токов и локального силового взаимодействия. 1 — пьезокерамическая трубка; 2 — плата; 3 — капля скрепляющего клея; 4 — стеклянная МП; 5 — Ag/AgCl-электрод

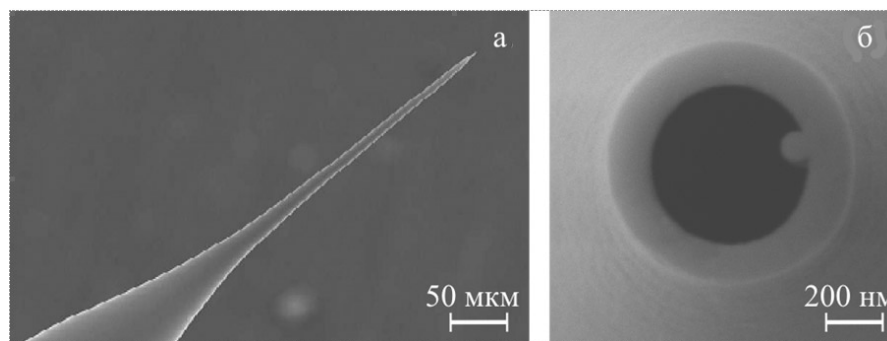


Рис. 6. РЭМ-изображение профиля микропипетки (а) и ее торца (б)

Видно, что при острых углах заточки устойчивость зонда-микропипетки квадратично убывает с уменьшением r_0 и α . Подставляя $r_0 = 200$ нм и $\alpha = 7.5^\circ$, получим величину критической силы потери устойчивости $F_{кр} \sim 10^{-5}$ Н. Поскольку характерные силы взаимодействия зонда с поверхностью образца в СЗМ имеют величину 10^{-9} – 10^{-7} Н, можно сделать вывод о возможности применения СМПП-зонда в режиме силовых измерений.

ЗОНДОВЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ РАБОТЫ В ПОЛУКОНТАКТНОМ СИЛОВОМ И СМПП-РЕЖИМАХ

Как известно, обычно в качестве датчиков для измерения локальных сил в СЗМ используют кремниевые кантилеверы [2]. Совместить такой датчик, имеющий малые размеры и малый вес по сравнению с МП, не представляется возможным. Поэтому в основу зондового датчика функционирующего как в режиме измерения ионных токов, так и локальных сил была положена конструкция пьезорезонансного силового датчика [10–12]. Пьезокерамическая трубка 1 (рис. 5) длиной $L = 5$ – 10 мм, диаметром $D = 1.0$ – 1.5 мм и с толщиной стенки $H = 0.20$ – 0.30 мм жестко закреплена с одного конца на плате 2.

На внутреннюю поверхность трубки нанесен проводящий электрод. На внешнюю поверхность трубки нанесены два электрически изолированных полуцилиндрических электрода. Одна часть трубки при прикладывании к ней переменного напряжения работает как пьезовибратор. Напряжение, снимаемое при этом со второй части трубки пропорционально амплитуде возникающих механических колебаний. К свободному концу трубки с помощью капли клея 3 прикреплена стеклянная МП 4. Сверху во внутреннюю полость МП вводится Ag/AgCl-электрод 5 в виде тонкой Ag проволоки, покрытой слоем AgCl. Заполнение внутреннего объема МП раствором электролита осуществляется под действием капиллярных сил.

Для создания МП использовались стеклянные капилляры из боросиликатного стекла с внутренним диаметром 0.5 мм и внешним диаметром 1 мм (Sutter Instrument, Novato, CA). Вытяжка капилля-

ров проводилась на установке RMP 107 Micropipette puller. Радиус r_0 внутренней полости МП лежал в диапазоне (100–500) нм. На рис. 6 представлены изображения МП, полученные в растровом электронном микроскопе (РЭМ).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты проводились в СЗМ "NanoEducator" [12]. Стандартный пьезорезонансный силовой датчик СЗМ "NanoEducator" с W-острием заменялся на СМПП-датчик (рис. 5). Образец размещался на дне стеклянной или пластмассовой чашки, закрепленной на сканере. В чашку заливался раствор электролита и устанавливался внешний Ag/AgCl электрод.

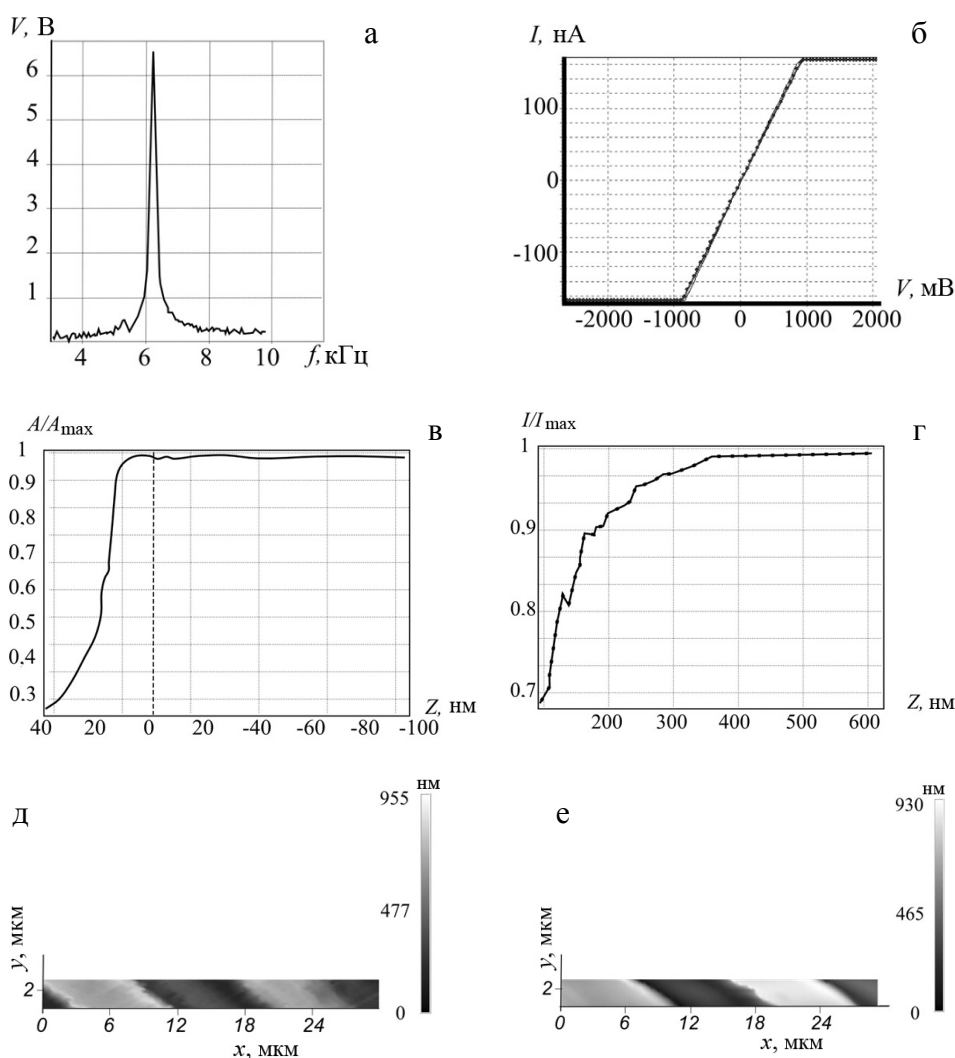


Рис. 7. Тестирование зонда-микропипетки.

а — резонансная кривая датчика с зондом-микропипеткой; б — вольт-амперная характеристика МП, измеренная вдали от поверхности образца ($z \gg r_0$); в — зависимость амплитуды колебаний зонда от равновесного расстояния до поверхности образца (кривая подвода); г — зависимость ионного тока через МП от расстояния до поверхности образца; д — изображение поверхности тестового образца, полученное в полуконтактном силовом режиме; е — СМПП-изображение тестового образца

На рис. 7 представлены результаты экспериментального исследования СМПП-датчика в полуконтактном силовом режиме и в режиме измерения ионных токов. В экспериментах использовался тестовый образец в виде отпечатка упорядоченных каналов на поверхности эпоксидного клея. Ширина каналов равнялась 5 мкм, глубина 1 мкм. Измерения проводились в 1 М растворе NaCl.

Из рис. 7, а, следует, что резонансная частота СМПП-датчика равна 6.2 кГц при добротности $Q=25.4$. Измерения, выполненные для разных датчиков, показали, что резонансные частоты датчиков изменялись в диапазоне (4.9–7) кГц при добротности $Q = (20.6–26.0)$. На рис. 7, б, представлена зависимость $I(V)$, измеренная вдали от поверхности образца $z \gg r_0$. Наблюдаемая линейная зависимость $I(V)$ согласуется с теоретическим выражением (1) и соответствует сопротивлению МП 10 МОм. Подставляя $\sigma = 1.76$ См/м и $\alpha = 7.5^\circ$, получим $r_0 = 220$ нм, что по порядку величины согласуется с результатами, полученными при прямых измерениях размера внутренней полости МП (рис. 6, б). На рис. 7, в, г, представлены типичные кривые подвода в силовом и ионном режимах измерения, т. е. зависимости амплитуды колебаний пьезотрубки и ионного тока от ширины зазора между торцом МП и поверхностью образца. Следует отметить, что вид экспериментальной зависимости ионного тока от расстояния до поверхности образца (рис. 7, г) совпадал с видом теоретических кривых, рассчитанных с помощью метода конечных элементов. На рис. 7, д, е, представлены изображения тестового образца в виде отпечатка упорядоченных каналов на поверхности эпоксидного клея, полученные в полуконтактном силовом ($A=0.9 A_{\max}$) и СМПП ($I=15$ нА, $V=0.09$ В)

режимах соответственно. Видно, что предложенный зондовый датчик дает адекватные результаты при визуализации диэлектрической поверхности как в режиме полуконтактной силовой микроскопии, так и в режиме микроскопии токов ионной проводимости.

Для улучшения пространственного разрешения при работе зонда-микропипетки в силовой моде на торце исходной МП (рис. 8, а) с помощью технологии фокусированного ионного пучка (ФИП) [13] формировался нановыступ (рис. 8, б). Использовался пучок ионов Ga при ускоряющем напряжении 30 кВ и токе пучка 300 пА. На рис. 9 представлены СЗМ-изображения тестовой решетки TGT [14] в виде регулярно расположенных Si-острий и их поперечные сечения, полученные в полуконтактной силовой моде с использованием МП с плоской вершиной с внешним диаметром торца ~ 3.5 мкм (рис. 9, а, б) и МП с нановыступом на торце, сформированным с помощью технологии ФИП (рис. 9, в, г). Сравнение изображений, представленных на рис. 9, а и в, а также их поперечных сечений на рис. 9, б и г, показывает, что МП с нановыступом (рис. 8, б) дает более высокое пространственное разрешение в полуконтактном силовом режиме. Вместе с тем пространственное разрешение, наблюдаемое на рис. 9, а, б, значительно лучше того, которого можно было бы ожидать от применения зонда-микропипетки с внешним диаметром ~ 3.5 мкм (рис. 8, а). Данный экспериментальный факт можно связать с присутствием на торце МП острого выступа, случайно обрзовавшегося в процессе ее вытяжки, либо с отклонением оси МП от нормали к поверхности образца.

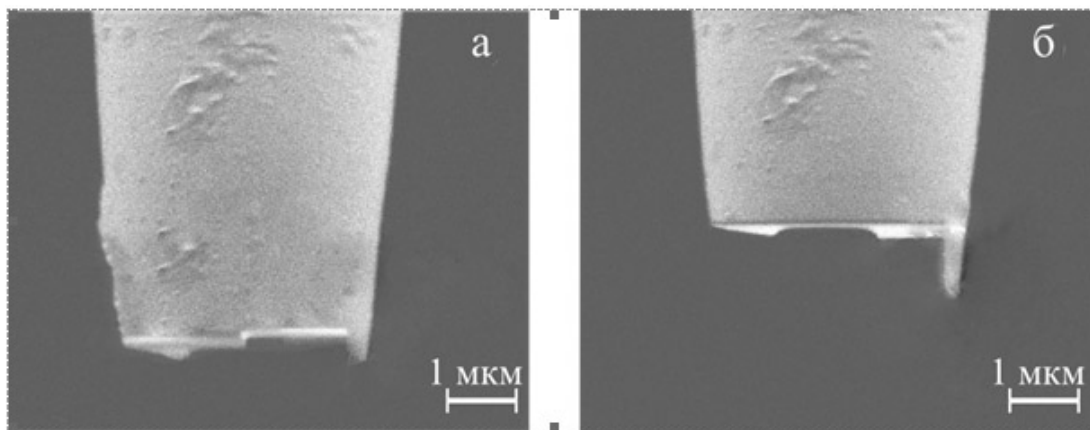


Рис. 8. Электронно-микроскопические изображения.

а — исходный торец МП; б — торец МП с нановыступом, сформированным с помощью технологии ФИП

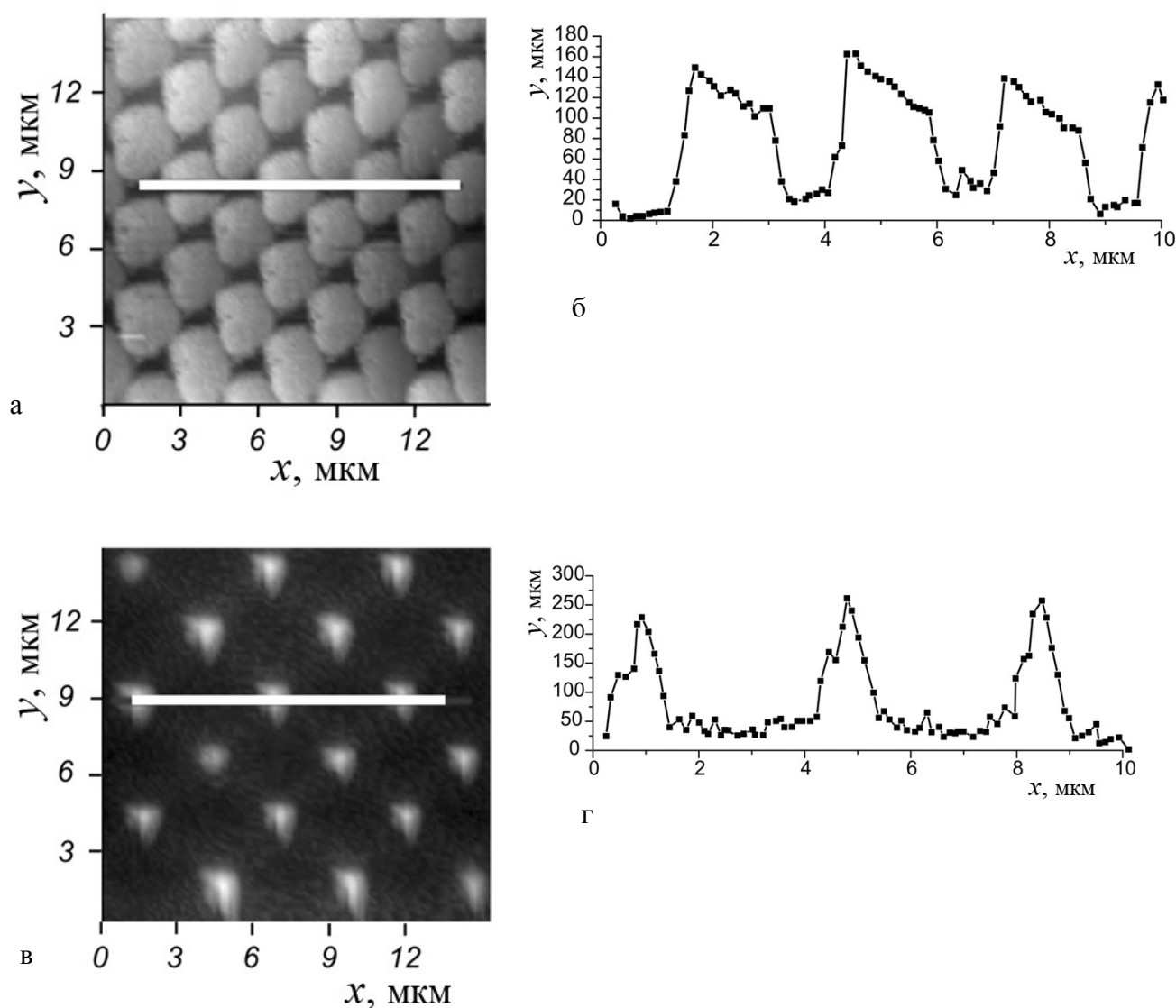


Рис. 9. СЗМ-изображения тестовой решетки TGT и их поперечные сечения, полученные в полуконтактной силовой моде.

а, б — зонд в виде микропипетки после вытяжки; в, г — зонд в виде микропипетки с нановыступом после модификации ФИП

Действительно, наклон оси МП может привести к тому, что с поверхностью образца будет взаимодействовать не вся плоскость торца МП, а только небольшой участок ее острого внешнего края. Следует учесть, что если нановыступ на торце МП будет иметь слишком большую длину, то, улучшая пространственное разрешение в силовом режиме, он будет осложнять работу в СМПП-режиме, не позволяя вплотную приблизиться поверхности образца к торцу МП. Вместе с тем из приведенного выше моделирования СМПП-изображения (рис. 3) следует, что рабочий зазор между поверхностью образца и торцом МП имеет

величину $\sim r_0$. Таким образом, если длина нановыступа будет соизмерима с радиусом r_0 , то такая МП будет работать как в режиме СМПП, так и давать высокое пространственное разрешение в силовом режиме.

Следует отметить, что в наших экспериментах зондовый датчик с МП стабильно работал в силовом режиме, но демонстрировал неустойчивую работу в режиме СМПП. СМПП-изображения часто срывались и случайным образом пропадали в процессе сканирования. Нестабильность СМПП-режима мы связываем с перекрытием внутреннего канала МП загрязнениями либо, наоборот, с появ-

лением сети дополнительных каналов в тонких стенках МП вследствие известного явления выщелачивания боросиликатного стекла.

ВЫВОДЫ

Замена W-острия в пьезорезонансном СЗМ-датчике [10] на стеклянную МП с радиусом внутреннего отверстия $r_0 \sim 100\text{--}500$ нм и толщиной стенки $d \sim 100\text{--}200$ нм обеспечивает возможность создания СМПП, функционирующего также и в режиме силового микроскопа. Выполненные модельные расчеты указывают на существование оптимального начального зазора между поверхностью образца и торцом МП и оптимальной толщины стенки МП, при которых достигаются наилучший контраст и пространственное разрешение на СМПП-изображении. Датчик с МП в качестве острия демонстрирует устойчивую работу как в воздушной, так и в жидкой среде. При погружении кончика МП в жидкость резонансная частота датчика имеет величину $f \sim 6$ кГц, а добротность $Q \sim 20$, что обеспечивает визуализацию поверхности диэлектрического образца, погруженного в раствор электролита, как в СМПП-режиме, так и в полуконтактном силовом режиме. Нановыступ на торце МП, созданный с помощью технологии ФИП, улучшает пространственное разрешение в силовом режиме. Нановыступ на торце МП не будет влиять на работу зонда в СМПП-режиме, если его длина не будет превышать длину внутреннего радиуса МП. Для стабильной работы датчика в СМПП-режиме необходимо обеспечить чистые условия эксперимента, исключающие загрязнение внутреннего канала МП, и использовать кварцевые капилляры, для исключения выщелачивания их тонких стенок в растворе электролита.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 гг. (ГК П557) и гранта НИУ ИТМО "Исследование электромагнитных и электронных свойств наноструктур на основе нановискозоров".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Binnig G., Rohrer H. Scanning tunneling microscopy // *Helv. Phys. Acta*. 1982. V. 55. P. 726–735.
2. Wichramasinghe H. Progress in scanning probe microscopy // *Acta materialia*. 2000. V. 48. P. 347–358.
3. Hansma P.K., Drake B., Marti O. et al. The scanning ion-conductance microscope // *Science*. 1989. V. 243, N 4891. P. 641–643.

4. Ying L., Bruckbauer A., Zhou D. et al. The scanned nanopipette: a new tool for high resolution bioimaging and controlled deposition of biomolecules // *Phys. Chem*. 2005. V. 7, N 15. P. 2859–2866.
5. Rheinlaender J., Schäffer T.E. Image formation, resolution, and height measurement in scanning ion conductance microscopy // *Journal of Applied Physics*. 2009. V. 105. P. 726–735.
6. Chowdhury T.K. Fabrication of extremely fine glass micropipette electrodes // *J. Phys. E*. 1969. V. 2. P. 1087–1090.
7. Yongan G., Dongqing Li. The ζ -potential of glass surface in contact with aqueous solutions // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2000. V. 226, N 2. P. 328–339.
8. URL: (<http://www.comsol.com/>).
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости. М.: Физматлит, 2003. 264 с.
10. Голубок А.О., Васильев А.А., Керпелева С.Ю., Котов В.В., Сапожников И.Д. Датчик локального силового и туннельного взаимодействия в сканирующем зондовом микроскопе // *Научное приборостроение*. 2005. Т. 15, № 1. С. 62–69.
11. Голубок А.О., Левичев В.В., Пинаев А.Л., Стовпяга А.В. Исследование пьезорезонансного датчика локального силового взаимодействия сканирующего зондового микроскопа с зондом в виде микропипетки // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*. 2009. № 3(61). С. 59–62.
12. Быков В.А., Васильев В.Н., Голубок А.О. Учебно-исследовательская мини-лаборатория по нанотехнологии на базе сканирующего зондового микроскопа NanoEducator // *Российские нанотехнологии*. 2009. Т. 4, № 5–6. С. 45–48.
13. Reyntjens S., Puers R. A review of focused ion beam applications in microsystem technology // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2001. V. 7, N 1. P. 287–300.
14. URL: (<http://www.ntmdt-tips.com/products/view/tgt1>).

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Стовпяга А.В., Голубок А.О.)

Институт аналитического приборостроения РАН, г. Санкт-Петербург (Сапожников И.Д., Голубок А.О.)

Контакты: Голубок Александр Олегович,
aogolubok@mail.ru

Материал поступил в редакцию 25.07.2012.

SCANNING ION CONDUCTANCE MICROSCOPE WITH SIMULTANEOUS VISUALIZATION OF THE SAMPLE SURFACE IN THE TAPPING MODE

A. V. Stovpyaga¹, I. D. Sapozhnikov², A. O. Golubok^{1,2}

¹*Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics*

²*Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint-Petersburg*

The probe for the simultaneous operation in the scanning ion conductance microscopy (SICM) mode and in the tapping force mode has been proposed and studied. The numeric modeling of the image of the step on the surface of the dielectric sample in the SICM mode has been carried out. The experimental results which have been obtained by the scanning of the test sample are presented.

Keywords: scanning probe microscopy, scanning ion conductance microscope, micropipette