

УДК 53.084.2

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНОГО ДАТЧИКА  
ЛОКАЛЬНОГО СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО МИКРОСКОПА  
С ЗОНДОМ В ВИДЕ МИКРОПИПЕТКИ****А.О. Голубок, В.В. Левичев, А.Л. Пинаев, А.В. Стовяга**

Исследован пьезорезонансный датчик для сканирующего зондового микроскопа зондом в виде стеклянной микропипетки. Измерены резонансная частота и добротность датчика в воздушной и жидкой средах. Продемонстрировано пространственное разрешение с использованием тестовой решетки. Сделан вывод о возможности использования датчика с микропипеткой в жидкой среде с одновременной работой в полуконтактной силовой моде и в моде измерения ионных токов.

**Ключевые слова:** сканирующая зондовая микроскопия, микропипетка.

**Введение**

В основе сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) лежит идея использования зависимости локального взаимодействия, возникающего при сближении твердотельного нанозонда с поверхностью исследуемого образца, от расстояния зонд–образец. Информацию об исследуемой поверхности получают в процессе прецизионного механического сканирования в системе «зонд–образец», при этом для стабилизации параметров наноконтакта «зонд–образец» используется следящая система (СС) с обратной связью. Исполнительным звеном СС является пьезосканер, изменяющий в процессе сканирования расстояние между зондом и образцом и, следовательно, взаимодействие между ними, которое, в свою очередь, измеряется датчиком локального взаимодействия и стабилизируется с помощью СС. Существуют различные виды СЗМ [1], работа которых основана на измерении отдельных видов локального взаимодействия между зондом и образцом, такие, например, как сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), сканирующий силовой микроскоп (ССМ), оптический микроскоп ближнего поля (ОМБП) и т.п. В связи с этим представляются перспективными исследования, направленные на создание СЗМ с многофункциональными датчиками, обеспечивающими детектирование различных видов локального взаимодействия зонда с образцом. Также представляют интерес СЗМ с датчиками-картриджами, обеспечивающими простой переход к измерениям с различными видами локального взаимодействия. Целью данной работы было исследование пьезорезонансного датчика локального силового взаимодействия с зондом в виде стеклянной микропипетки. Такой датчик может оказаться весьма эффективным, например, при исследовании биологических клеток в функционально активном состоянии, поскольку предоставляет возможность визуализировать топографию клетки, построить карты механической жесткости клеточной мембраны и распределения ионных токов.

**Эксперимент**

Конструкция датчика представляет собой модификацию пьезорезонансного датчика с вольфрамовым зондом [2]. Датчик (рис. 1) представляет собой пьезокерамическую трубку (1) длиной  $l = 5\text{--}10$  мм, диаметром  $d = 1,0\text{--}1,5$  мм и толщиной стенки  $h = 0,20\text{--}0,30$  мм, жестко закрепленную с одного конца.

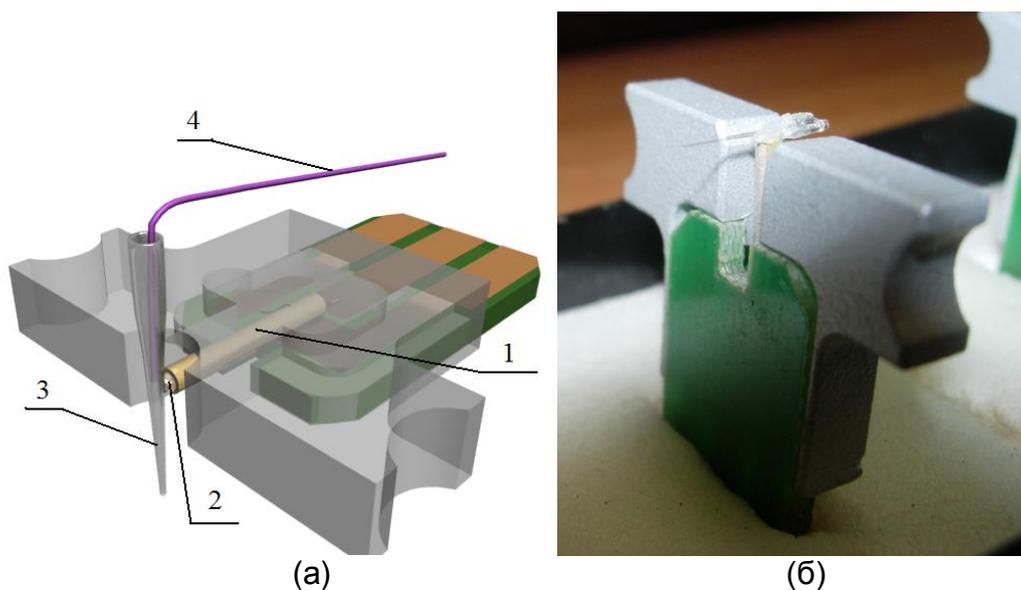


Рис. 1. Пьезорезонансный датчик локального силового взаимодействия с зондом в виде микропипетки: а – схема датчика, б – внешний вид

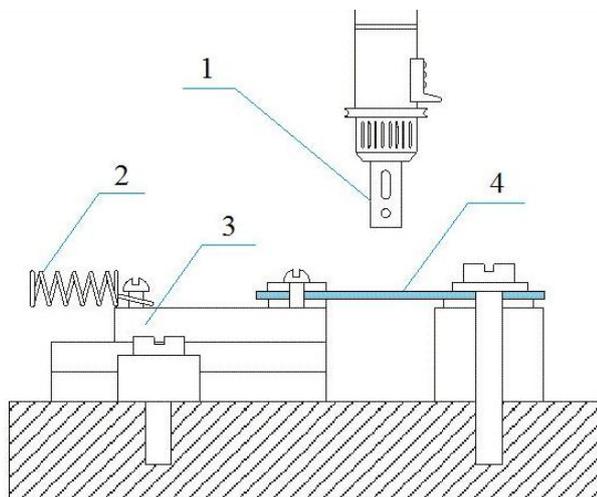


Рис. 2. Схема вытяжки микропипетки с помощью горелки: 1 – газовая горелка, 2 – пружина, 3 – каретка, 4 – стеклянный капилляр

На внутреннюю поверхность трубки нанесен проводящий электрод, а на внешнюю поверхность трубки – два электрически изолированных полуцилиндрических электрода. Одна часть трубки при прикладывании к ней напряжения от генератора играет роль пьезовибратора. Напряжение, снимаемое при этом со второй части трубки, пропорционально амплитуде возникающих механических колебаний. К свободному концу трубки с помощью капли клея (2) прикреплена стеклянная микропипетка (3). Использовались двухкомпонентный клей «РОХИРОЛ», клей «Момент» или аналогичные им. Для достижения максимальной твердости клея обеспечивалась неподвижность датчика с микропипеткой в течение 24 часов. Сверху во внутреннюю полость микропипетки вводится электрод в виде тонкой проволоки (4), инертной к рабочей жидкой среде. Предполагается, что такой датчик может работать в стандартной полуконтактной силовой моде, когда нижний конец микропипетки постукивает по исследуемой поверхности. Если во внутренней полости микропипетки находится рабочий электролит (например, слабый раствор соли в воде), то, наряду с силовыми измерениями, появляется возможность измерять ионный ток, проходящий через внутреннее отверстие микропипетки. Заполнение внутреннего объема микропипетки жидкостью производится под

действием капиллярных сил. На рис. 1, б, представлен внешний вид датчика с зондом в виде микропипетки.

Микропипетки изготавливались методом механической вытяжки из стеклянных капилляров при тепловом нагреве (рис. 2). Для нагрева можно использовать газовую горелку или лазерное излучение. В качестве натягивающего элемента используется цилиндрическая пружина или резиновый жгут с регулируемым натяжением. Применяя такой способ вытягивания, можно получить микропипетки с внешним диаметром приблизительно 0,5–2 мкм.

### Результаты и обсуждение

Тестирование датчика проводилось в СЗМ «NanoEducator», так как его конструктивные посадочные размеры совпадали с посадочными размерами штатного датчика с вольфрамовым зондом. На рис. 3, а, б, представлены резонансные кривые, измеренные для штатного датчика СЗМ «NanoEducator» и датчика с зондом в виде микропипетки. Резонансные кривые имели похожий характер. Резонансная частота датчиков с микропипетками лежала в диапазоне 4,7–6,6 кГц при добротности  $Q = 20,6–26,0$ .

Резонансная частота датчиков с вольфрамовыми зондами лежала в диапазоне 8–10 кГц. Более низкая резонансная частота датчиков с микропипетками объясняется превышением веса микропипеток над весом вольфрамовых зондов. Была также измерена резонансная кривая при погружении кончика микропипетки в каплю воды. При этом отличий от добротности датчика, измеренной в воздушной среде, обнаружено не было.

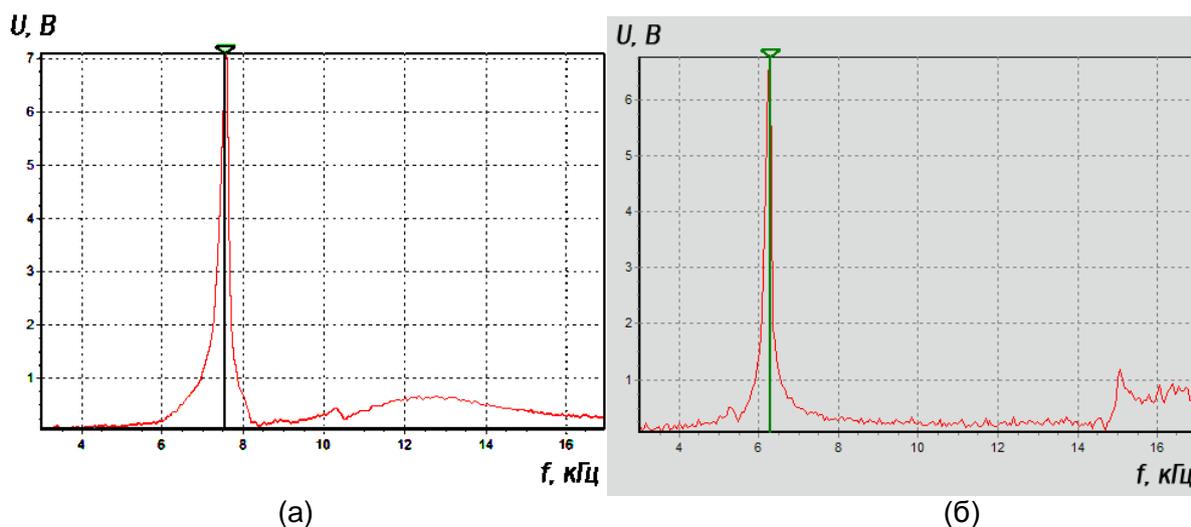


Рис. 3. Резонансные кривые: (а) датчик с вольфрамовым зондом  $Q=25,1$ ; (б) датчик с микропипеткой  $Q=28,9$

На рис. 4, а, б, представлены СЗМ-изображения тестовых решеток, полученные в СЗМ «NanoEducator» в полуконтактной силовой моде с использованием вольфрамовых зондов с радиусом закругления вершины приблизительно 200 нм (рис. 3, а) и зондов в виде стеклянных микропипеток с внешним диаметром приблизительно 2 мкм (рис. 3, б). Сравнение этих изображений, а также их поперечных сечений показывает, что на рис. 3, а, наблюдается лучшее пространственное разрешение. Вместе с тем пространственное разрешение, достигнутое на рис. 3, б, значительно лучше того, которое можно было бы ожидать от применения зонда с внешним диаметром приблизительно 2 мкм. Наблюдаемое в эксперименте пространственное разрешение можно связать с присутствием на торце микропипетки случайного острого выступа с характерным размером менее 1 мкм, который образовался в процессе вытяжки.

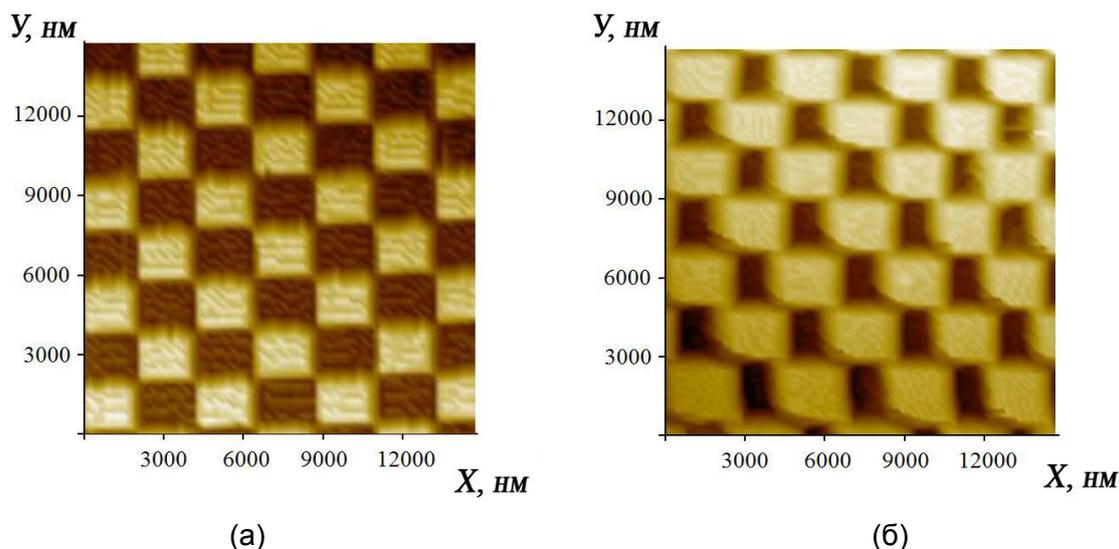


Рис. 4. СЗМ-изображения тестовых решеток, полученные в полуконтактной силовой моде: (а) вольфрамовый зонд; (б) зонд в виде микропипетки

### Заключение

Таким образом, исследование пьезорезонансного датчика с микропипеткой в качестве зонда показало, что он обладает пространственным разрешением, превышающим внешний диаметр микропипетки. Добротность датчика с микропипеткой близка к добротности датчика с вольфрамовым зондом. Жидкая среда не влияет на добротность датчика. Пространственное разрешение датчика с микропипеткой определяется микровыступами, формирующимися в процессе вытяжки микропипетки. На основании результатов исследования можно сделать вывод о возможности применения датчика с микропипеткой в жидкой среде с одновременной работой в полуконтактной силовой моде и в моде измерения ионных токов.

Работа поддержана грантом Министерства образования и науки № 2.1.2/4187 «Многофункциональные нанозонды для сканирующей зондовой микроскопии, спектроскопии и литографии (СЗМ-С-Л): концепция, технология, характеристика, применение» и грантом Carl Zeiss «Создание и исследование зондов на основе стеклянных нанопипеток для сканирующих зондовых микроскопов». Исследования выполнены на оборудовании фирмы Carl Zeiss в НОЦ-ИТ СПбГУ ИТМО.

### Литература

1. Yasoot A., Koenders L. // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2008. – V. 41. – Is. 10. – P. 103001.
2. Голубок А.О., Васильев А.А., Кerpелева 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.

<i>Голубок Александр Олегович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, зав. кафедрой, golubok@ntspb.ru
<i>Левичев Вадим Вячеславович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, преподаватель, levicev_vadim@mail.ru
<i>Пинаев Александр Леонидович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, pinaich@mail.ru
<i>Стонига Александр Владимирович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, sanja100v@mail.ru