

УДК 544.6.076 + 006.55

МЯГКИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ТЕСТ-СТРУКТУРЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ В СКАНИРУЮЩЕЙ КАПИЛЛЯРНОЙ МИКРОСКОПИИ

Жуков М.В. (ИАП РАН), Банков А.А. (ИАП РАН, Университет ИТМО)

Научный руководитель – кандидат технических наук, научный сотрудник
Жуков М.В. (ИАП РАН)

Введение. Сканирующая капиллярная микроскопия (СКМ, scanning ion-conductance microscopy, SICM) является перспективным методом бесконтактного исследования поверхности в жидкой среде с нано- и микрометровым пространственным разрешением. Метод широко применяется для исследования биологических и мягких материалов, где механическое взаимодействие зонда с поверхностью недопустимо [1–3]. Однако, в отличие от атомно-силовой микроскопии (АСМ), для SICM в настоящее время отсутствует развитая система метрологического обеспечения и стандартизованные калибровочные образцы, что затрудняет оценку линейных размеров и пространственного разрешения, а также снижает сопоставимость результатов между различными установками и лабораториями [4–6].

Использование калибровочных структур позволяет не только повысить достоверность измерений, но и улучшить качество получаемых изображений за счёт снижения влияния систематических искажений, что, в свою очередь, упрощает последующую обработку данных и уменьшает количество артефактов изображения, характерных для SICM [7–9].

Основная часть. В работе предложен подход к созданию мягких полимерных калибровочных образцов методом импринтинга стандартных кремниевых решёток, применяемых в АСМ. В качестве матриц использовались Si-структуры с различной геометрией рельефа (периодические массивы лунок, борозд прямоугольного и треугольного профиля, «шахматные» решётки фиксированной высоты), что позволило сформировать набор тест-объектов для оценки пространственного разрешения и линейных размеров при измерении топографии объектов в SICM.

Полимерные реплики изготавливались на основе этиленвинилацетата методом импринтинга. Контроль геометрических параметров реплик осуществлялся в полутактном режиме АСМ, выбранным в качестве референтного метода. В SICM структуры исследовались в режиме «hopping» («прыжковая» мода) с использованием полых стеклянных нанопипеток.

Обнаружено, что период структур воспроизводится с хорошей точностью в обоих методах и может использоваться для оценки линейных размеров в SICM по координатам XY, а фиксированный размер выступающих элементов позволяет проводить оценку по координате Z. При этом минимальный достижимый размер высоты для реплики составил всего ~ 20 нм. В то же время уширение элементов рельефа в области резкого перепада высот является геометрической сверткой изображения в системе «нанопипетка–образец», что может применяться для оценки разрешающей способности в методе SICM, поскольку является искажением реального профиля поверхности из-за конечных размеров и формы кончика зонда -нанопипетки. Дополнительно исследована деградация полимерных реплик при длительном пребывании в PBS-буфере, выявившая ограничения по времени эксплуатации образцов.

Выводы. Показана возможность применения мягких полимерных тест-структур, созданных методом импринтинга с калибровочных Si структур, для использования в SICM без риска повреждения хрупких стеклянных зондов-нанопипеток. Установлено, что такие структуры позволяют оценивать как линейные размеры объектов, так и пространственное разрешение в SICM при условии предварительного АСМ-контроля геометрии реплик. Выявленные эффекты уширения элементов рельефа в области

перепадов высот и деградации материала в буферных растворах определяют границы применимости предложенных образцов и указывают на необходимость регламентированной методики их использования. Полученные результаты могут быть использованы для развития метрологического обеспечения SICM, повышения точности и воспроизводимости измерений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-00169, <https://rscf.ru/project/24-79-00169/>.

Список использованных источников:

1. Hansma P.K. et al. The scanning ion-conductance microscope // *Science*. 1989. Vol. 243. no. 4891. P. 641–643. <https://doi.org/10.1126/science.2464851>
2. Happel P., Thatenhorst D., Dietzel I.D. Scanning ion conductance microscopy for studying biological samples // *Sensors*. 2012. Vol. 12. no. 11. P. 14983–15008. <https://doi.org/10.3390/s121114983>
3. Shevchuk A.I. et al. Imaging proteins in membranes of living cells by high-resolution SICM // *Angewandte Chemie International Edition*. 2006. Vol. 45. no. 14. P. 2212–2216. <https://doi.org/10.1002/anie.200503915>
4. Rheinlaender J., Schäffer T.E. Image formation, resolution, and height measurement in SICM // *Journal of Applied Physics*. 2009. Vol. 105. no. 9. P. 094904. <https://doi.org/10.1063/1.3122007>
5. Edwards M.A. et al. Scanning ion conductance microscopy: a model for experimentally realistic conditions and image interpretation // *Analytical Chemistry*. 2009. Vol. 81. no. 11. P. 4482–4492. <https://doi.org/10.1021/ac900376w>
6. Thatenhorst D. et al. Effect of sample slope on image formation in scanning ion conductance microscopy // *Analytical Chemistry*. 2014. Vol. 86. no. 19. P. 9838–9845. <https://doi.org/10.1021/ac5024414>
7. Dorwling-Carter L. et al. Combined ion conductance and atomic force microscope for fast simultaneous topographical and surface charge imaging // *Analytical Chemistry*. 2018. Vol. 90. no. 19. P. 11453–11460. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.8b02569>
8. Perry D. et al. Simultaneous nanoscale surface charge and topographical mapping // *ACS Nano*. 2015. Vol. 9. no. 7. P. 7266–7276. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b02095>
9. Rheinlaender J., Schäffer T.E. An accurate model for the ion current–distance behavior in scanning ion conductance microscopy allows for calibration of pipet tip geometry and tip–sample distance // *Analytical Chemistry*. 2017. Vol. 89. no. 21. P. 11875–11880. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b03871>