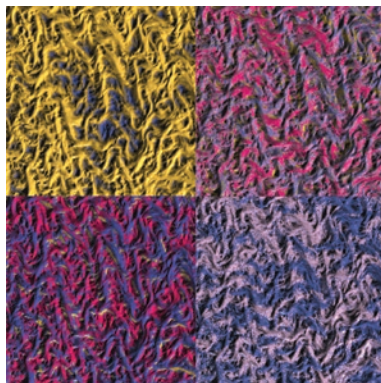
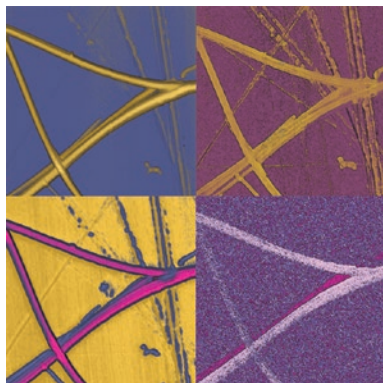


Прыжковая Силовая микроскопия пьезоотклика: комплексное изучение биопьезоэлектриков



- Исследование доменной структуры биопьезоэлектриков
- Силовая микроскопия пьезоотклика мягких, сыпучих и хрупких образцов
- Комплексный анализ морфологических, наномеханических, адгезионных и пьезоэлектрических свойств

Арсений Калинин,
NT-MDT Спектрум Инструментс

Представлен новый подход к комплексному анализу рельефа и пьезоэлектрических свойств мягких и хрупких образцов. Новая методика атомно-силовой микроскопии, именуемая Прыжковой (HybriD) Силовой микроскопией пьезоотклика, позволяет проводить одновременное неразрушающее исследование морфологии поверхности, отображение количественных наномеханических характеристик и доменной структуры ферро- и пьезоэлектриков.

ВВЕДЕНИЕ

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) является мощным инструментом для отображения поверхности и изучения локальных свойств материалов с нанометровым пространственным разрешением.

С тех пор как был предложен принцип работы АСМ, основанный на прямом взаимодействии между острым зондом и образцом, было развито множество уникальных методик АСМ измерений: количественные наномеханические измерения, отображение проводимости, локальные электромагнитные исследования и т.д.

Одной из таких АСМ методик является Силовая микроскопия Пьезоотклика, с помощью которой изучаются электромеханические характеристики ферроэлектрических и пьезоэлектрических материалов в терминах их доменной морфологии с нанометровым пространственным разрешением в разных условиях и при разных температурах.

Принцип работы СМП основан на контактной АСМ – методе сканировании образца, когда зонд находится в постоянном контакте с поверхностью образца при поддерживаемой обратной связи величине силы взаимодействия.

В процессе сканирования между проводящим зондом и образцом прикладывается переменное напряжение, приводящее в зависимости от доменной структуры к вертикальным и латеральным колебаниям поверхности образца под зондом.

Это позволяет изучать геометрию доменов, их динамику, локальные пьезоэлектрические коэффициенты и направления поляризации с пространственным разрешением в десятки нанометров, что определяется радиусом АСМ зонда.

Со времени первой разработки этой методики Guthner и Dransfeld в 1991 [1] СМП стала широко используемой методикой для ферро- и пьезоэлектрических исследований кристаллов.

Множество кристаллических материалов, в структуре которых отсутствует центр симметрии, были изучены в терминах пьезоэлектрической доменной структуры и динамики [1-4]: цирконат-титанат свинца, триглицинсульфат, BiFeO_3 и т.д.

Любой материал с нецентросимметричной структурой способен демонстрировать пьезоэлектрические свойства.

С этой точки зрения наиболее интересной областью является исследование электромеханической связи в биомедицине, где большинство изучаемых протеинов, полисахаридов и органелл имеют нецентросимметричную природу [5].

Пьезоэлектричество в биологических объектах было открыто Fukada в 1950 годах в древесных и позже в костных тканях [6-9].

Этот эффект, который возникает из электромеханической связи, был назван биопьезоэлектричеством. Впоследствии биопьезоэлектричество наблюдалось в определенных типах мускульного движения, в нервной системе, транспорте ионов, аминокислотах и т.д. [10-16], и, в результате, его обнаружение стало существенным для наномедицины и биомедицинского применения. Однако это требует использова-

ния нового метода для исследования электромеханической связи в живых системах. СМП является важным кандидатом для этих целей, поскольку позволяет проводить измерение пьезоотклика с нанометровым разрешением. Но СМП непригодна для изучения биологических образцов, поскольку является контактной методикой. Латеральное взаимодействие зонд-образец, возникающее вследствие постоянного контакта АСМ зонда с поверхностью, может быть весьма значительным, вплоть до деформации или разрушения мягких и хрупких материалов.

НТ-МДТ Спектрум Инструментс вводит новый подход для СМП исследований таких мягких и хрупких объектов, используя уменьшенное латеральное взаимодействие зонд-образец в HybriD Силовой микроскопии пьезоотклика (HD СМП).

ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

HD СМП является расширением недавно представленной методики HybriD (HD методики) – метода сканирования на основе быстрых измерений силовых кривых с обработкой отклика зонда в режиме реального времени [17]. С аппаратной точки зрения HD СМП реализуется с использованием нового контроллера HybriD 2.0 (см. подробную спецификацию в Приложении).

В HD методике образец или зонд АСМ совершает вертикальные колебания с частотой значительно ниже резонансных частот кантилевера и пьезосканера. Поскольку острие зонда и образец взаимодействуют друг с другом в каждом цикле, зонд периодически приходит в контактное состояние, и

кантилевер изгибается в соответствии с величиной взаимодействия зонд-образец.

Эта последовательность состояний с идеализированными профилями изгибов зондового датчика представлены на Рисунках 1а-с.

При уменьшении расстояния зонд-образец форма кантилевера сначала остается неизменной на уровне базовой линии (точка 1), затем он изгибается под действием капиллярных или адгезионных сил (точка 2). При дальнейшем сближении с образцом доминируют отталкивающие сила зонд-образец, кантилевер изгибается вверх, пока не достигнет заданного значения (точка 3), выбранного для работы обратной связи. Это Z-точка возврата в каждом цикле.

Когда образец и острие зонда начинают отделяться, зонд может испытывать сильное адгезионное взаимодействие, отображаемое ямой (точка 4), прежде чем он полностью оторвется от образца, и кантилевер восстановит состояние, соответствующее базовой линии (точка 5).

Временная кривая изгиба содержит массу полезной информации, которая может быть обнаружена, также отображается во время латерального сканирования и используется для извлечения количественных локальных свойств образца: наклоны кривых подвода и отвода в контактной части цикла соотносятся с модулями упругости (и могут быть пересчитаны в количественные локальные модули Юнга); ямы притяжения на участках подвода и отвода могут быть применены для измерений

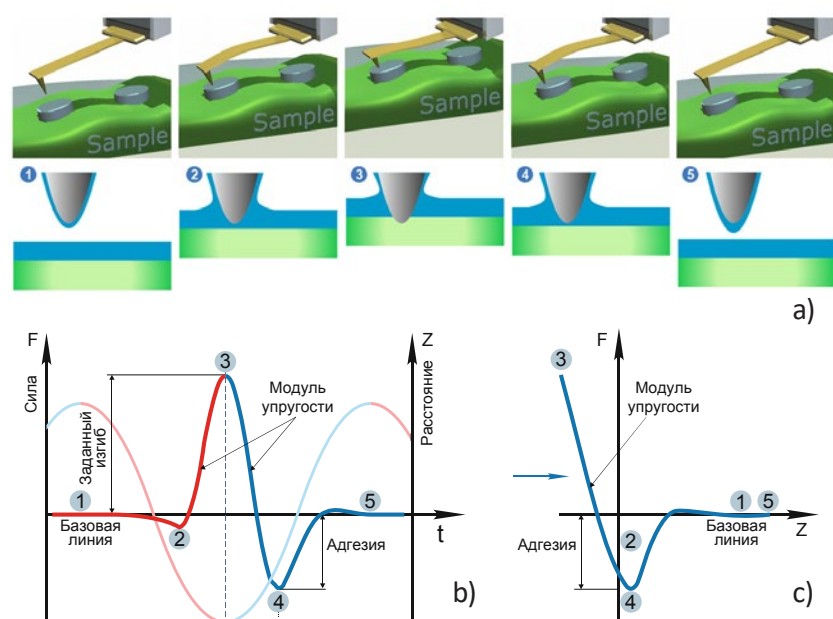


Рисунок 1. (а) модель, иллюстрирующая HD методику, (б) идеализированной временная кривая изгиба кантилевера во время колебательного цикла, (с) кривая изгиб (сила) от расстояния (FvZ), восстановленная из временного изгиба и вертикальных кривых расстояние-время.

адгезии базовые линии могут быть подвержены влияниям дальнедействующих электростатических и магнитных сил, которые могут быть зарегистрированы зондами с проводящими или ферромагнитными покрытиями соответственно. Эти хорошо известные особенности временных изгибных кривых и соответствующих кривых сила-Z (FvZ, Рисунок 1с) использовались в течение длительного времени в контактном методе АСМ исследований [18, 19]. FvZ или силовые кривые в контактном методе обычно снимаются в диапазоне частот 0.1 – 10 Гц, что значительно ограничивает их применение.

Это препятствие преодолевается в HD методике, где быстрое получение данных позволяет в режиме реального времени проводить сбор, анализ и отображение данных, записанных в килогерцовом частотном диапазоне. Кроме того, вариации

изгиба в различных частях цикла колебаний могут быть обнаружены и обработаны независимо друг от друга в режиме реального времени. Одной из особенностей HD методики является возможность использования «временного окна» для измерений: возможность подключения напряжения питания переменного или постоянного тока, записи и обработки сигнала в заданной части цикла колебаний.

Эта особенность позволяет, например, исследовать проводимость углеродных нанотрубок приложением постоянного напряжения и детектированием тока зонд-образец во «временном окне», соответствующем контакту зонда с образцом (область 2-4 на Рисунке 1b) [20].

Методика HD СМП также базируется на использовании «временного окна» (Рисунок 2).

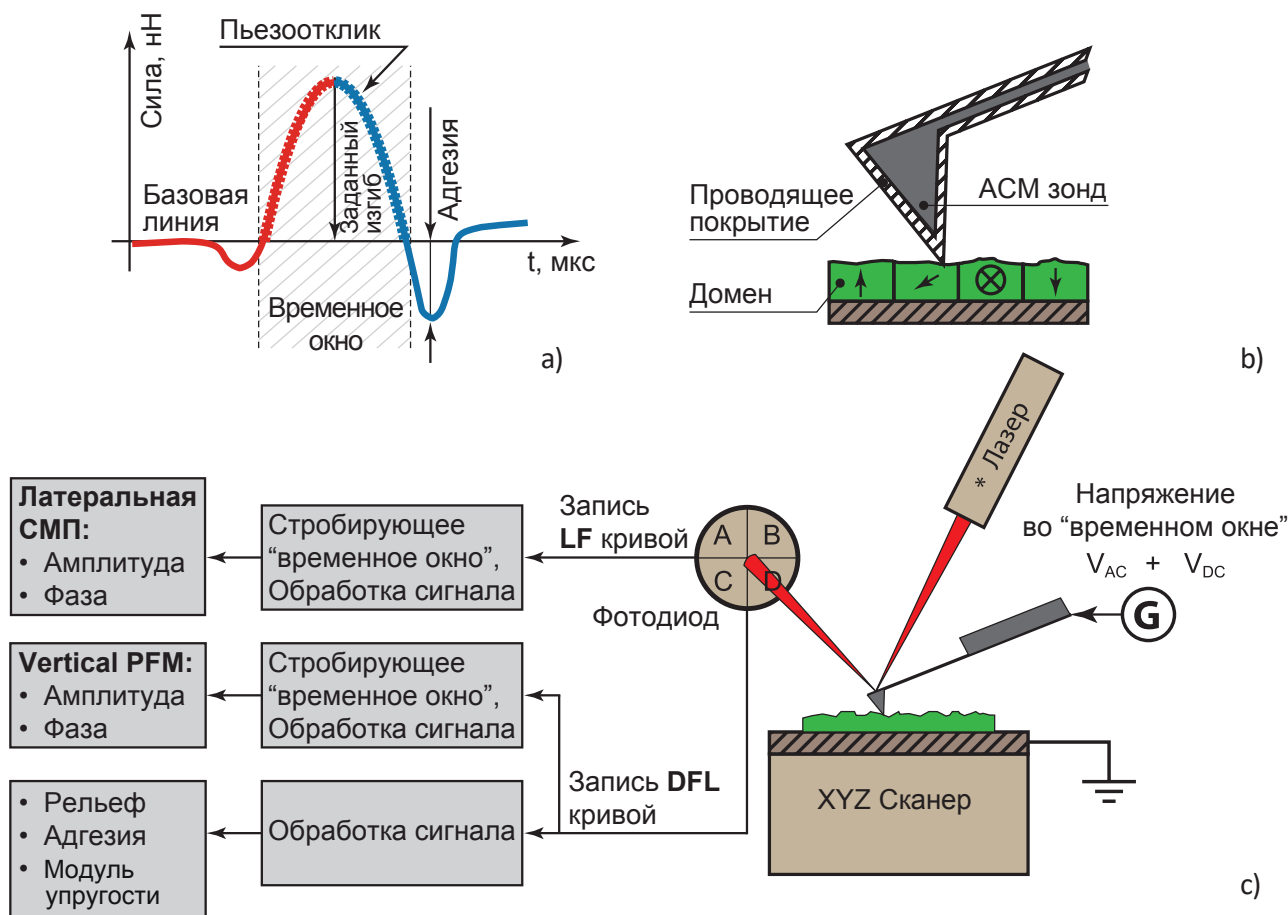


Рисунок 2. Принцип работы HD СМП

В определенном пользователем «временном окне», относящемся к области контакта зонд-образец, между проводящим покрытием зонда и исследуемым объектом прикладывается переменное напряжение V_{AC} , которое вызывает механические колебания образца под зондом, зависящие от локальной поляризации.

Соответствующие вертикальные (сигнал DFL) и латеральные (сигнал LF) перемещения кончика АСМ зонда записываются в заданном «временном окне» и обрабатываются для получения амплитуды и фазы сигналов. Амплитуды сигналов DFL и LF характеризуют локальные пьезоэлектрические ко-

эффициенты материалов, в то время как фазовые сигналы предоставляют информацию о локальных направлениях поляризации.

Полная кривая DFL(t) каждого цикла методики Hybrid используется также для вычисления изменения рельефа, силы адгезии, модулей упругости.

Таким образом, HD СМП за один цикл измерений дает комплексную информацию о свойствах образца, и в то же время делает измерения неразрушающими за счет отрыва зонда от образца на каждом Hybrid цикле колебаний.

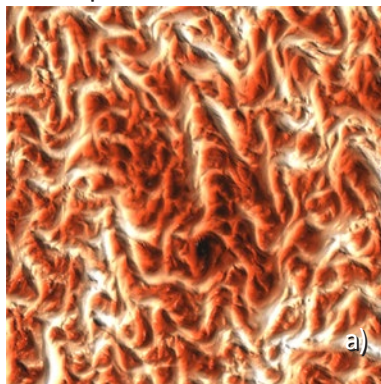
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. КОЛЛАГЕНОВЫЕ МАТРИЦЫ

Одним из самых интересных биоматериалов, демонстрирующих пьезоэлектричество, являются коллагеновые фибриллы – основной строительный компонент костей, зубов, стромы роговицы и кровеносных сосудов. Коллаген состоит из ориентированных полярных молекул белка (фибрилл) [21], которые формируют прочную органическую кристаллическую матрицу. Пьезоэлектрические свойства единичных фибрилл коллагена были недавно изучены с нанометровым разрешением [22,23]. Несмотря на этот успех, научная проблема любого исследования пьезоотклика коллагеновой матрицы все еще сложна.

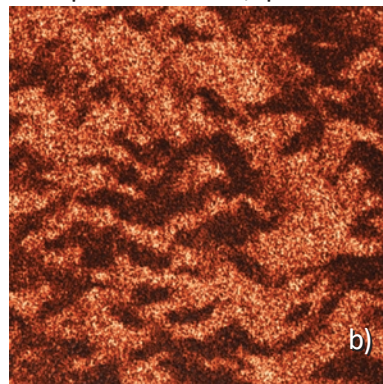
Основным препятствием для традиционных контактных СМП измерений этих структур является наличие шероховатых поверхностей, где вариации высоты достигают почти одного микрометра. Это приводит к залипанию АСМ зондов на одиночных фибриллах, и как следствие, к сильному искажению рельефа и отображения пьезоотклика.

Было обнаружено, что благодаря принципу работы методика HD СМП является прекрасным способом изучения коллагеновой матрицы, образцы которой были представлены Fibralign Corporation, разработавшей уникальный метод нанесения животного коллагена на стеклянную подложку [24].

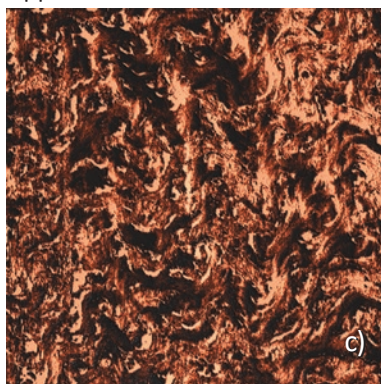
Рельеф



Латеральная СМП, фаза



Адгезия



E модули

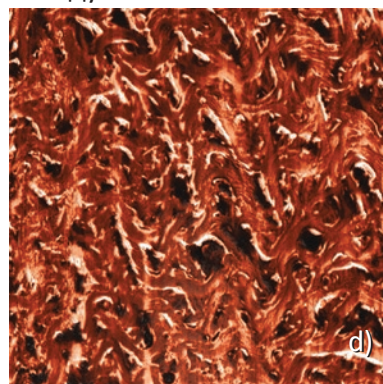


Рисунок 3. HD СМП изображения коллагеновой матрицы животного. Размер изображения 15x15 мкм. Использовался АСМ зонд NT-MDT SI Etalon HA_HR / W2C + с жесткостью 14 Н/м. Образец представлен М. Pauksho, Fibralign Corp.

Рисунок 3 иллюстрирует результаты HD СМП исследования матрицы коллагена I типа, выделенной из бычьей роговицы. Измерения проводились с применением к проводящему зонду переменного тока с напряжением 8 В и частотой 280 кГц, использовались АСМ зонды NT-MDT SI Etalon HA_HR / W2C + с жесткостью 14 Н / м. Контраст в (а) охватывает изменение высоты в диапазоне 0-800 нм. Латеральная СМП фаза в (б) демонстрирует распределение доменов, более темные и более яркие участки соответствуют разным направлениям поляризации.

Адгезия в (с) отображает силу адгезии зонд-образец, более яркие участки соответствуют большей адгезии. E модули в (d) отображают E модули коллагеновой матрицы, более яркие участки соответствуют большим значениям E модулей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. ПЕПТИДНЫЕ НАНОТРУБКИ

Недавно были обнаружены пептидные нанотрубки (ПНТ), самоорганизованные из мономеров дифенилаланина, демонстрирующие сильные пьезоэлектрические свойства. Холкин и др. продемонстрировали латеральный СМП контраст и высокоэффективный пьезоэлектрический коэффициент d_{15} , по меньшей мере, 60 мкм/В [25] (для нанотрубок диаметром 200 нм), что является самым высоким значением для известных биопьезоэлектриков.

Вместе с собственной биосовместимостью и чрезвычайно высоким модулем упругости для молеку-

лярных кристаллов это делает ПНТ дифенилаланина очень перспективными материалами для разработки пьезонаноустройств, которые потенциально совместимы с тканями человека.

ПНТ являются сложными образцами для традиционного контактного СМП исследования вследствие их хрупкости и слабой связи с подложкой. В результате в литературе нет СМП изображений нанотрубок без нарушений. Между тем недавно были продемонстрированы неразрушающие HD СМП исследования тонких ПНТ (около 10 нм в диаметре)

другого типа с представлением информации о рельефе, адгезии и модуле Юнга [20]. Изучение модуля Юнга этих структур также представляет большой интерес, поскольку ранее измеренные значения различными методами варьируются от 9 до 32 ГПа. Также, насколько нам известно, нет данных с картами механических свойств.

Поэтому было логично применять HD СМП к ПНТ дифенилаланина для измерения пьезорезонансных, механических и электростатических свойств. На рисунках 4 и 5 показаны полученные данные: одновременно измеренные рельеф, латеральные пьезорезонансы, карты деформации, карты адгезии и электростатических свойств трубок диаметром менее 100 нм. Измерения проводились на АСМ ВЕГА производства НТ-МДТ СИ с использованием зонда NSG30/TiN. Изображение фазы Латеральной СМП демонстрирует ПНТ с противоположным направлением поляризации, соответствующим пьезоэ-

лектрической постоянной d_{15} (вертикальное электрическое поле и поляризация, параллельная оси трубки).

На карте деформации показано неоднородное распределение жесткости нанотрубок. Это было связано с изменением внутреннего диаметра трубки. Поскольку ни одна из стандартных моделей механической контактной механики (Hertz, DMT, JKR и т. Д.) не описывает взаимодействие зонд-нанотрубка, для количественного определения поперечного модуля Юнга применялось моделирование МКЭ. Полученное значение 29 ± 1 ГПа совпадает с ранее измеренными методами наноиндентирования и АСМ спектроскопии [26].

Все HD СМП исследования дифенилаланиновых ПНТ опубликованы и обсуждены в журнале Ultramicroscopy [27].

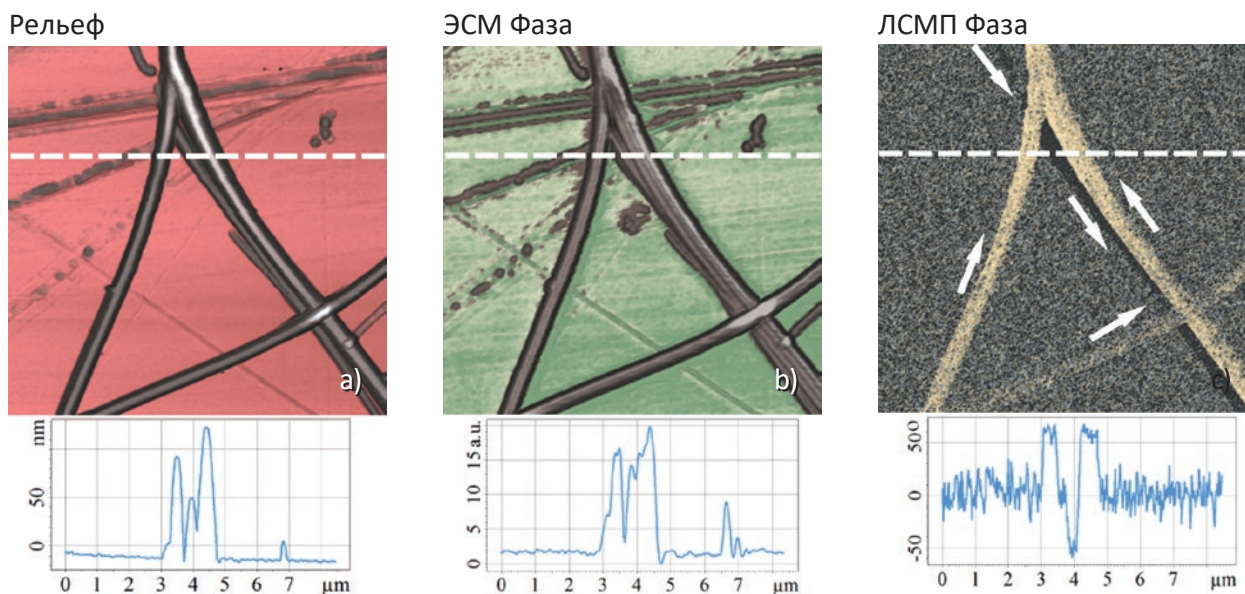


Рисунок 4. Неразрушающее отображение электромеханических свойств дифенилаланиновых нанотрубок, полученное с применением HD СМП. Размер скана 7x7 мкм. Образец представлен Dr. A. Kholkin, University of Aveiro, Portugal.

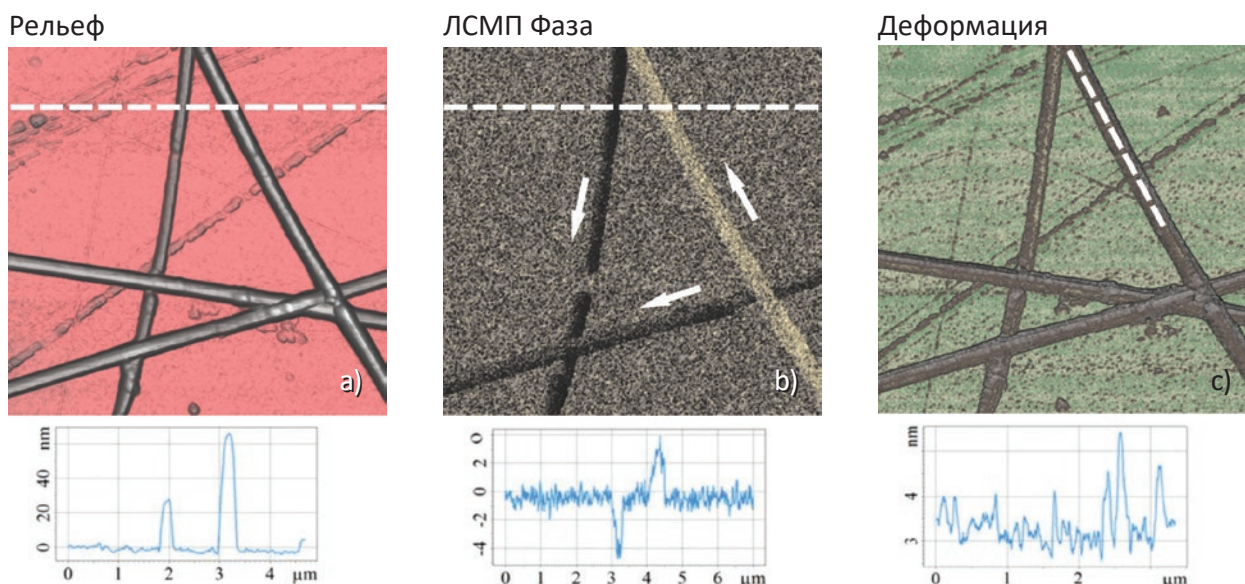


Рисунок 5. Неразрушающее отображение электромеханических свойств дифенилаланиновых нанотрубок, полученное с применением HD СМП. Размер скана 8x8 мкм. Образец представлен Dr. A. Kholkin, University of Aveiro, Portugal.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. ИССЛЕДОВАНИЯ ПЬЕЗОТКЛИКА С ОДНОВРЕМЕННЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ

В настоящее время большой интерес представляет изучение температурной динамики ферро- и пьезоэлектрических доменов. Поскольку принцип работы АСМ позволяет проводить измерения при различных температурах образца, СМП в настоящее время широко используется для такого типа исследований. Самым большим недостатком традиционной СМП является то, что измерение рельефа основано на использовании изгиба кантилевера в качестве параметра обратной связи.

В результате любое изменение температуры образца вызывает паразитный дрейф кантилевера и, как результат, искажает полученное изображение. Напротив, принцип работы HD СМП допускает компенсацию дрейфа в каждой точке сканирования: входной сигнал петли обратной связи равен не изгибу кантилевера, а разнице

между максимальным изгибом кантилевера в колебательном цикле и базовым уровнем.

Одним из модельных образцов для изучения температурной динамики сегнетоэлектрических свойств является кристалл триглицина сульфата (TGS). Хотя примитивная ячейка TGS состоит из более чем 100 атомов, природа спонтанной поляризации очень проста. Этот образец использовался для демонстрации способности непрерывного измерения пьезорезонанса при изменении температуры. Образец TGS был измерен с чрезвычайно высоким для АСМ значением температурного градиента: $> 0,1 \text{ }^\circ\text{C} / \text{сек}$. Результат на рисунке 6 демонстрирует динамику морфологии домена, когда значение температуры проходит через точку Кюри. Хотя паразитный температурный дрейф кантилевера составлял более 100 нм (рис. 6с), измерения рельефа и СМП верны.

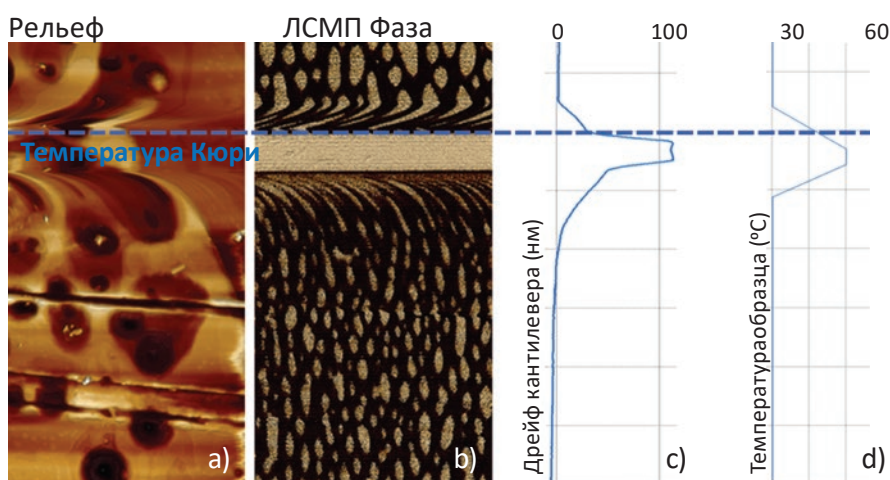


Рисунок 6. *In situ* HD СМП изучение фазового перехода второго рода кристалла триглицина сульфата. Размер скана $15 \times 27 \text{ мкм}$. Образец представлен Dr. R. Gainutdinov, Institute of Crystallography of RAS, Russia.

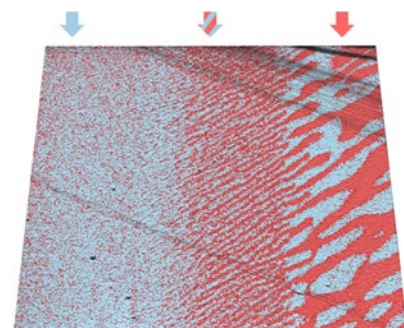


Рисунок 7. *In situ* HD СМП исследование фазового перехода второго рода кристалла триглицина сульфата. Размер скана $15 \times 15 \text{ мкм}$. Образец представлен Dr. R. Gainutdinov, Institute of Crystallography of RAS, Russia.

Свежесколотый кристалл TGS был измерен также вблизи точки Кюри для наблюдения *in situ* образования доменной структуры. Было показано, что вблизи точки Кюри возникает квазипериодическая структура домена, за которой следует хорошо известная овальная доменная структура (рис. 7). Данные были получены с использованием АСМ ВЕГА (НТ-МДТ СИ) и зондовых датчиков NSG30/TiN.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Этот Пример применений демонстрирует новый подход для неразрушающих комплексных исследований мягких и хрупких пьезоэлектриков. Hybrid Силовая микроскопия пьезоотклика была успешно применена для одновременных исследований рельефа, пьезоотклика, адгезии и модуля упругости сложных биообразцов – коллагеновой матрицы стромы роговицы и самоорганизующихся дифенилаланиновых пептидных нанотрубок [27].

В первый раз продемонстрирована возможность изменений температуры образца в процессе изме-

рений пьезоотклика. Hybrid Силовая микроскопия пьезоотклика открывает новые горизонты для применений атомно-силовой микроскопии в области биопьезоэлектриков и других областей, где обычная СМП неприменима.

Хороший пример комплексных исследований, включая исследования механических, электрофизических, пьезо- и ферроэлектрических свойств, приведен в работе [28]. Изучались композитные материалы на основе сополимера P(VDF-TrFe) с наполнителями из ниобата лития.

1. Guthner, P., Dransfeld, K.: Local poling of ferroelectric polymers by scanning force microscopy, *Appl. Phys. Lett.* 61(9), 1137–1139 (1992).
2. Gruverman, A., Auciello, O. and Tokumoto, H.: Scanning Force Microscopy for the Study of Domain Structure in Ferroelectric Thin Films. *J. Vac. Sci. Technol. B* 1996, 14, pp. 602-605.
3. Kalinin, S. V. and Bonnell D. A.: Imaging mechanism of piezoresponse force microscopy of ferroelectric surfaces. *Phys. Rev. B* 2002, 65, 125408.
4. Kholkin, A. L., Kalinin, S. V., Roelofs, A. and Gruverman, A.: Review of ferroelectric domain imaging by piezoresponse force microscopy (in *Scanning Probe Microscopy*, Kalinin, S., Gruverman, A. eds.), vol 1, pp. 173–214, Springer, New York, 2007.
5. Bystrov, V. S., Bdikin, I., Heredia, A., Pullar, R. C., Mishina, E., Sigov, A.S., Kholkin, A.L.: Piezoelectricity and Ferroelectricity in Biomaterials: From Proteins to Self-assembled Peptide Nanotubes (in *Piezoelectric Nanomaterials for Biomedical Applications*, Ciofani, G., Menciassi, A. eds.), pp. 187–211. Springer, New York, 2012.
6. Fukada, E.: Vibrational study of the wood used for the sound boards of pianos. *Nature* 166, pp. 772–773, 1950
7. Fukada, E.: Piezoelectricity of wood. *J. Phys. Soc. Jpn.* 10, pp. 149–154, 1955
8. Fukada, E., Yasuda, I.: On the piezoelectric effect of bone. *J. Phys. Soc. Jpn.* 12, pp. 1158-1162, 1957
9. Fukada, E., Yasuda, I.: Piezoelectric effects in collagen. *Jpn. J. Appl. Phys.* 3, pp. 117–121, 1964
10. Leuchtag, H.R.: *Voltage-Sensitive Ion Channels: Biophysics of Molecular Excitability*. Springer, Dordrecht (2008)
11. Leuchtag, H. R., Bystrov, V. S., Theoretical models of conformational transitions and ion conduction in voltage-dependent ion channels: Bioferroelectricity and superionic conduction. *Ferroelectrics* 220 (3-4), 157-204(1999)
12. Amdursky, N., Beker, P., Schklovsky, J., Gazit, E., Rosenman, G.: Ferroelectric and related phenomena in biological and bioinspired nanostructures. *Ferroelectrics* 399, 107-117 (2010)
13. Athenstaedt, H.: Permanent Longitudinal Electric Polarisation and Pyroelectric Behaviour of Collagenous Structures and Nervous Tissue in Man and other Vertebrates. *Nature* 228, 830-834 (1970)
14. Athenstaedt, H.: Pyroelectric and piezoelectric properties of vertebrates. *Ann. NY Acad. Sci.* 238, 68–94 (1974)
15. Lemanov, V.V., Popov, S.N., Pankova, G.A.: Piezoelectric properties of crystals of some protein aminoacids and their related compounds. *Phys. Sol. Stat.* 44, 1929–1935 (2002)
16. Lemanov, V.V., Popov, S.N., Pankova, G.A.: Protein amino acid crystals: Structure, symmetry, physical properties. *Ferroelectrics* 285, 581–590 (2003)
17. Magonov, S.N.: Expanding Atomic Force Microscopy with Hybrid Mode Imaging. *NT-MDT Spectrum Instruments Application Note* 087.
18. Weisenhorn, A. L., Hansma, P. K., Albrecht, T. R. and Quate, C. F.: Forces in atomic force microscopy in air and water. *Appl. Phys. Lett.* 1989, 54, 2651-2653.
19. Burnham, N. A. and Colton, R. J.: Measuring the nanomechanical properties and surface forces of materials using an atomic force microscope. *J. Vac. Sci. Technol. A* 1989, 7, 29 06–2913.
20. Montenegro, J., Vazquez-Vazquez, C., Kalinin, A.S., Geckeler, K.E., Granja, J.R.: Coupling of peptide and carbon nanotubes. *J. Am. Chem. Soc.*, 2014.
21. Athenstaedt, H.: Pyroelectric and piezoelectric properties of vertebrates. *Ann. NY Acad. Sci.* 238, 68–94 (1974)
22. Minary-Jolandan, M., Yu, M.F.: Nanoscale characterization of isolated individual Type I collagen fibrils: Polarisation and piezoelectricity. *Nanotechnology* 20, 85706 (2009)
23. Minary-Jolandan, M., & Yu, M. F.: Uncovering nanoscale electromechanical heterogeneity in the subfibrillar structure of collagen fibrils responsible for the piezoelectricity of bone. *ACS Nano*, 3(7), pp. 1859–1863 (2009)
24. Muthusubramaniam, L., Peng, L., Zaitseva, T., Paukshto, M., Martin, G. R., & Desai, T. A.: Collagen fibril diameter and alignment promote the quiescent keratocyte phenotype. *Journal of Biomedical Materials Research. Part A*, 100 A(3), pp. 613–621 (2012).
25. Kholkin, A., Amdursky, N., Bdikin, I., Gazit, E., & Rosenman, G.: Strong piezoelectricity in bioinspired peptide nanotubes. *ACS Nano*, Vol. 4, pp. 610–614 (2010)
26. Zelenovskiy, P., Kornev, I., Vasilev, S. Kholkin, A. On the origin of the great rigidity of self-assembled diphenylalanine nanotubes. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 18, 29681–29685 (2016).
27. Kalinin, A.S., Atepalikhin V.V., Pakhomov, O., Kholkin, A.L., Tselev, A. An atomic force microscopy mode for nondestructive electromechanical studies and its application to diphenylalanine peptide nanotubes. *Ultramicroscopy.* 185, 49-54.
28. M.S. Ivanov, M.V. Silibin, V.A. Khomchenko, T. Nikitin, A.S. Kalinin, D.V. Karpinsky, I. Bdikin, V.V. Polyakov, R. Fausto, J.A. Paixão. Strong impact of LiNbO3 fillers on local electromechanical and electrochemical properties of P(VDF-TrFe) polymer disclosed via scanning probe microscopy. *Applied Surface Science* 470 (2019) 1093–1100. doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.213

Контроллер HybridD



Параметр	Значение
Высокоскоростные АЦП	2 × 20 МГц, 16 бит
Высокоточные АЦП	4 × 1 МГц, 18 бит
ЦАП-ы	20 × 16 бит 1 МГц 2 × 12 бит 20 МГц
ПЛМ	120 MHz, Floating Point
DDS (прямой цифровой синтез частоты)	2 × 20 МГц, с плавающей запятой
Полоса СД	4 МГц
Высоковольтный усилитель	+/-150 В, скорость нарастания 32 В/мксек (ограничение до 33 кГц при 150 В) малосигнальная ширина полосы 500 кГц при амплитуде < 10 В
Максимальное количество кривых в секунду	Не менее 10000, ограничивается только резонансной частотой Z сканера
ФАПЧ	
Реализованные режимы	Самовозбуждения, постоянной амплитуды, постоянного возбуждения
Разрешение	0,3 Гц при 10 кГц ШП; 0,02 Гц при 600 Гц ШП
ШП демодуляции	500 кГц
Фазовращатель	0 – 360° (20 бит); шаг 0,34 миллиградуса
Анализ спектра	Амплитуда, фаза
Безопасность зонда	Да
Выходная модуляция	Размах 10 В, разрешение 15 мВ
Входной сигнал	10 кГц - 1 МГц; 70 мВ - 10 В
Типовой	
РС интерфейс	USB 2.0, Ethernet
Интерфейс SDK	Labview
Источник питания	100-240 В (50/60 Гц)
Набор методик	
HybridD mode, HD QNM, HD PFM, HD ESM, HD KPFM, HD SRI, HD MFM	