

МНОГОУРОВНЕВАЯ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ИНТЕРФЕЙСОВ С ПОМОЩЬЮ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Букато А. В., Досова А. П.

Гременок В.Ф. – доктор физ.-мат.наук, профессор
Боднарь И.В. – доктор хим. наук, профессор

Пространственное разрешение атомно-силовой микроскопии зависит от размера кантилевера и кривизны его острия. Здесь описывается новая multifunctional техника функциональной визуализации, которая позволяет настраивать пространственное разрешение на месте. Данная техника может применяться к широкому спектру неоднородных материалов, устройств и интерфейсов. Пространственное разрешение результирующего изображения определяется d -зависимостью сигнала. Электростатические измерения с зондовой микроскопией Кельвина с открытым контуром показывают, что можно применять несколько силовых модуляций одновременно. Кроме того, этот метод может применяться к любой силе наконечника-образца, что показывает универсальность метода.

Развитие атомно-силовой микроскопии послужило катализатором значительного роста нанонауки и нанотехнологий за последние три десятилетия. В дополнение к визуализации топографии поверхности, атомно-силовая микроскопия послужила основой для разработки дополнительных методов сканирующего зонда, которые используют атомно-силовую микроскопию для измерения функциональных свойств материалов.

Здесь описывается общая техника для управления пространственным разрешением АСМ изображений путем изменения степенного закона зависимости измеряемого сигнала от расстояния. Этот метод гармонического перемешивания использует преимущество нелинейности взаимодействий наконечника с поверхностью для изменения d -зависимости обнаруженного сигнала. Таким образом достигается увеличения разрешения в два раза по сравнению с традиционными методами. Данная методика имеет потенциал для последующего использования в функциональной характеристике наноразмерных систем, от наноструктурированных солнечных элементов до металлических строительных блоков для нанофотоники и 2D гетеропереходов [1].

В методе гармонического перемешивания для атомно-силовой микроскопии пространственное разрешение контролируется выбором d -зависимости измеряемого сигнала, где d – это расстояние между зондом и образцом. Эта d -зависимость модифицируется путем смешивания гармоник колебаний кантилевера на одной (несущей) частоте, что также используется для методов обратной связи по топографии, при этом кантилевер колеблется на частоте равной первой собственной моде кантилевера, чтобы поддерживать устойчивое усредненное по периоду разделение наконечника-образца. Зависимость силы наконечника от образца в зависимости от времени может быть аппроксимирована как ряд Тейлора для среднего расстояния между наконечником и образцом. Поскольку силы наконечника-образца, как правило, являются нелинейными, члены ряда с более высоким коэффициентом n (степенью, в которую возводится значение d) имеют более резкую зависимость от d , чем члены с более низким n , где n индексирует ряд. Используя частоту обнаружения вблизи резонанса кантилевера, данный метод позволяет обнаруживать сигналы, генерируемые членами более высокого порядка ряда Тейлора. Выбор n определяет d -зависимость сигнала. Например, сигнал, генерируемый электростатической силой, следует степенному закону $d^{-(n+1)}$ при усилении n -м членом, важно отметить, что $n = 0$ соответствует традиционной Кельвин-зондовой силовой микроскопии. Метод гармонического перемешивания основан на изменении зависимости сигнала для управления пространственным разрешением. Обнаружено, что d -зависимость сигналов примерно соответствует предсказанным законам мощности: $n = 0$ и 1 показывают избыточный сигнал при больших расстояниях из-за паразитной емкости от кантилевера, которая не включена в модель; $n = 2$ и 3 показывают избыточный сигнал на малом расстоянии [2].

Соотношение между d -зависимостью сигнала и пространственным разрешением изображения рассчитывается с использованием приближения PFA. PFA моделирует острие как сферу радиуса R , пренебрегая конусом-зондом и кантилевером, и утверждает, что каждая небольшая область острия взаимодействует с ближайшей областью образца. Общая сила зогда - образца определяется путем интегрирования по вершине зонда. Чтобы определить пространственное разрешение сигнала, потенциальная граница моделируется как ступенчатая функция Хевисайда (см. Вспомогательную информацию). Расстояние, на котором происходит 80% изменения силы, то есть разрешение 10–90, используется для определения пространственного разрешения [3].

Считается, что разрешение может быть улучшено произвольно с использованием большого n , но с каждым увеличением разрешения происходит одновременное уменьшение движущей силы. Исследования показывают, что существует амплитуда колебаний, которая максимизирует сигнал для данного n и ближайшего подхода. Сканирование вблизи поверхности слегка демпфирует колебания, но изменения передаточной функции, особенно более высокие собственные моды, незначительны [3].

Альтернативный метод улучшения пространственного разрешения заключается в уменьшении радиуса острия. Поскольку пространственное разрешение пропорционально радиусу острия, когда d намного меньше R , уменьшение вдвое радиуса приводит к увеличению пространственного разрешения на 29% [4]. Однако часто бывает неудобно и иногда невозможно изменить датчик, а значит и радиус зонда, используемый во время сканирования, так как это легко может нарушить эксперимент. Также методы снижения радиуса острия ограничены определенными подложками, а радиус зонда с металлическим покрытием, типичный для электростатических измерений на воздухе, составляет более 20 нм [5].

При контрастности напряжения наблюдается сопутствующее уменьшение отношения сигнала к шуму в результате процедуры генерации сигнала, которая вдвое уменьшает движущую силу с каждым увеличением n . Однако при постоянной амплитуде колебаний значение минимального обнаруживаемого напряжения увеличивается на постоянную пропорцию для каждого увеличения n . При этом, увеличение больше, когда амплитуда колебаний меньше среднего расстояния [6].

Преимущество метода гармонического перемешивания состоит в том, что количество сигналов, усиливаемых единственной собственной модой кантилевера, ограничено только шириной полосы. Основной причиной развития данного метода для АСМ является необходимость улучшить разрешение электростатического потенциала поверхности, что особенно актуально в ситуациях, когда неоднородность напряжения напрямую не связана с топографией. Пространственное разрешение искусственно уменьшает автокорреляционную функцию при самых коротких расстояниях, одновременно увеличивая ее для немного больших расстояний. Самые маленькие пятна, которые могут быть точно разрешены этим методом, находятся между 20 и 50 нм [7].

Методика гармонического перемешивания позволяет исследовать поверхности в различных масштабах длины. так, когда установлено на низкое разрешение, есть возможность быстро сканировать относительно большую область благодаря высокой чувствительности к напряжению. Впоследствии заинтересовавшие области поверхности могут сканироваться с более высокими настройками пространственного разрешения.

Данная методика позволяет использовать преимущества высокой чувствительности и параметров высокого разрешения, что позволяет собирать информацию в нескольких масштабах длины с помощью одного зонда АСМ в одном эксперименте [8].

Ожидается, что другие силы, присутствующие в наноразмерном диапазоне, могут также контролироваться, например, силы Ван-дер-Ваальса, магнитные, фотоиндуцированные и электростатические силы [9].

Метод гармонического перемешивания для атомно-силовой микроскопии улучшает пространственное разрешение, изменяя d -зависимость сигнала, генерируемого силами зонда-образца и позволяет усиливать несколько сигналов одновременно. Поскольку метод гармонического перемешивания может применяться к силам, отличным от электростатической силы, предполагается, что он позволит лучше контролировать разрешение с помощью различных модулированных сил зонда и образца, критических для нанонауки, таких как оптические силы для спектроскопии и плазмонной визуализации, магнитная сила для хранения данных, и силы Ван дер Ваальса.

Список использованных источников:

1. Chawla, G., Solares, S. D. Mapping of Conservative and Dissipative Interactions in Bimodal Atomic Force Microscopy Using Open-Loop and Phase-Locked-Loop Control of the Higher Eigenmode / *Applied Physics Letters*. – 2011. – Vol. 99, № 7.
2. Garrett, J. L., Krayner, L. J. Effect of Lateral Tip Motion on Multifrequency Atomic Force Microscopy / *Applied Physics Letters*. – 2017. – Vol. 11, № 7.
3. Garrett J. L., Leite M. S., Munday J. N. Multiscale Functional Imaging of Interfaces through Atomic Force Microscopy Using Harmonic Mixing / *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2018. – Vol. 10. – P. 28850–28859.
4. Garrett J. L., Munday J. N. Fast, High-Resolution Surface Potential Measurements in Air with Heterodyne Kelvin Probe Force Microscopy / *Nanotechnology*. – 2016. – Vol. 27.
5. Santos, S., Guang, L. A Method to Provide Rapid in Situ Determination of Tip Radius in Dynamic Atomic Force Microscopy / *Review of Scientific Instruments*. – 2012. – Vol. 83.
6. Lai, C. Y., Perri, S., Santos, S. Quantitative Chemical Mapping of Surfaces with Sub-2 Nm Resolution / *Nanoscale*. – 2016. – Vol. 8. – P. 9688–9694.
7. Takeuchi, O., Ohrai, Y., Yoshida, S. Kelvin Probe Force Microscopy without Bias-Voltage Feedback / *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2007. – Vol. 46. – P. 5626–5630.
8. Kou, L., Naitoh, Y. The Stray Capacitance Effect in Kelvin Probe Force Microscopy Using FM, AM and Heterodyne AM Modes / *Nanotechnology*. – 2013. – Vol. 24.
9. Gu K. L., Zhou Y., Morrison W. A. Nanoscale Domain Imaging of All-Polymer Organic Solar Cells by Photo-Induced Force Microscopy / *ACS Nano*. – 2018. – Vol. 12. – P. 1473–1481.