

15

Сканер с балансом центра масс для сканирующего зондового микроскопа

© С.В. Пичахчи, О.М. Горбенко, С.Ю. Лукашенко, М.Л. Фельштын, И.Д. Сапожников, А.О. Голубок

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: pichakhchi.s@yandex.ru

Поступило в Редакцию 24 июля 2025 г.

В окончательной редакции 1 декабря 2025 г.

Принято к публикации 1 декабря 2025 г.

Рассмотрен способ демпфирования низкочастотного резонанса исполнительного элемента в петле обратной связи сканирующего зондового микроскопа, основанный на балансировании положением центра масс пьезоактуатора и симметризации конструкции сканера. С помощью моделирования найдена оптимальная конструкция сканера. Крепление сканера к неподвижному основанию в плоскости симметрии корпуса обеспечивает гашение низкочастотного резонанса сканера, позволяет увеличить коэффициент усиления в разорванной петле обратной связи и, как следствие, улучшает быстродействие следящей системы без ухудшения стабильности ее работы. На основании выполненных расчетов изготовлен макет сканера и экспериментально исследована его амплитудно-частотная характеристика. Получено хорошее согласие между расчетными и экспериментальными данными. На примере визуализации поверхности тестового образца в режиме сканирующей микроскопии ионных токов продемонстрировано преимущество демпфирования низкочастотного резонанса сканера в „hopping“-моде.

Ключевые слова: пьезоактуатор, скорость сканирования, обратная связь, баланс центра масс, сканирующая микроскопия ионной проводимости.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.07.62513.20453

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) является одним из базовых инструментов современных нанотехнологий и включает в себя сканирующую туннельную микроскопию, различные виды сканирующей силовой микроскопии, сканирующую оптическую микроскопию ближнего поля, сканирующую микроскопию ионной проводимости (СМИП) и т.п. Основной проблемой всех видов СЗМ является низкая по сравнению с оптической и электронной микроскопией скорость получения изображения. Это связано с особенностями работы следящей системы (СС) (рис. 1, *a*) с петлей отрицательной обратной связи (ОС), стабилизирующей заданное взаимодействие между нанозондом и поверхностью исследуемого образца в процессе прецизионного механического сканирования. Качество изображений, получаемых с помощью СЗМ, определяется точностью, быстродействием и стабильностью работы СС. Известно, что точность и быстродействие СС тем выше, чем выше общий коэффициент усиления в разорванной петле ОС, а устойчивость работы определяется ее амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) и фазово-частотной характеристикой [1]. Исполнительным элементом СС является электромеханический сканер, работающий, как правило, с использованием обратного пьезоэффекта [2]. Пьезосканер, как и любая механическая система, имеет собственные резонансы, влияющие на быстродействие и устойчивость СС. Действительно, поскольку при увеличении скорости сканирования увеличивается и максимальная частота полезного сигнала, необходимо увеличивать и быстродействие СС, т.е. увеличивать

частоту единичного усиления f_{cut} путем увеличения общего коэффициента усиления G в разорванной петле ОС. Однако известно, что для устойчивой работы СС резонансная частота исполнительного элемента f_r должна превышать частоту единичного усиления f_{cut} . Например, в [3] рекомендуется выдерживать соотношение $f_r \approx 3f_{cut}$. Таким образом, с одной стороны, увеличение G дает увеличение точности и быстродействия слежения, а с другой стороны, такое увеличение приводит к сближению значений f_{cut} и f_r (рис. 1, *b*) и, как следствие, к превышению порога допустимого усиления АЧХ на резонансной частоте сканера и уменьшению необходимого запаса устойчивости СС. В результате возникают положительная обратная связь в СС и нестабильность в работе СЗМ. Поэтому для улучшения быстродействия при сохранении точности и стабильности слежения необходимо демпфировать низкочастотный резонанс сканера или увеличивать его частоту. Конечно, увеличить резонансную частоту можно за счет увеличения жесткости и уменьшения размеров пьезосканера, но это уменьшит его чувствительность. В [4] показано, что низкочастотный резонанс сканера можно погасить, если использовать такую конструкцию, в которой при растяжении и сжатии пьезоактуатора (ПА) положение его центра массы не меняется. Следует отметить, что в СМИП обычно используют так называемый „hopping“-режим [5], в котором производится многократный подвод и отвод зонда к поверхности исследуемого образца, существенно увеличивающий время получения кадра

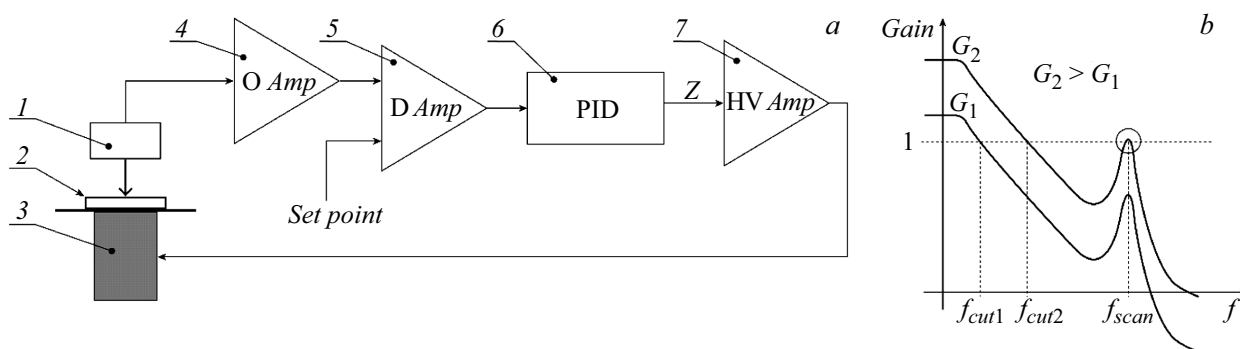


Рис. 1. Следящая система СЗМ. *a* — блок-схема: 1 — датчик взаимодействия зонд—образец, 2 — образец, 3 — сканер Z, 4 — усилитель, 5 — дифференциальный усилитель, 6 — пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор, 7 — высоковольтный усилитель; *b* — схематическое изображение АЧХ разорванной петли ОС при разных коэффициентах усиления G .

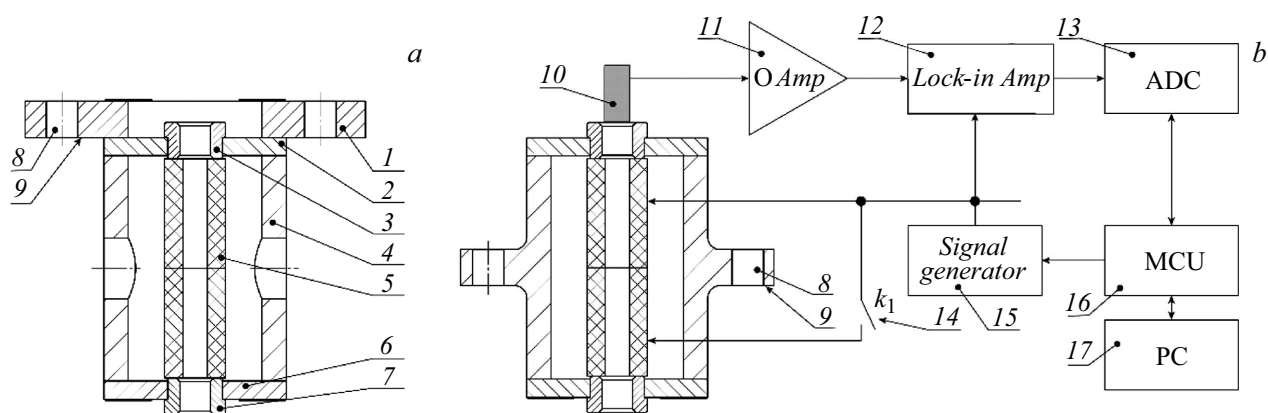


Рис. 2. Модели сканера с неподвижным положением центра масс и разными вариантами крепления корпуса. *a* — исходный вариант с несимметричным закреплением корпуса с одного края: 1 — крепежный фланец, 2, 6 — мембраны, 3, 7 — втулки, 4 — корпус сканера, 5 — ПА, составленный из двух пьезопакетов, 8 — отверстие для крепления сканера, 9 — плоскость крепления сканера; *b* — симметричный вариант с закреплением по плоскости зеркальной симметрии корпуса и схемой измерения АЧХ: 10 — датчик, 11 — предусилитель сигнала, 12 — синхродетектор, 13 — аналого-цифровой преобразователь, 14 — переключатель для отключения второго пьезопакета, 15 — генератор сигналов, 16 — микроконтроллер, 17 — компьютер.

сканирования. Поэтому задача увеличения скорости сканирования становится особенно актуальной для СМПП.

Целью настоящей работы является увеличение быстродействия СМПП за счет демпфирования низкочастотного резонанса исполнительного элемента.

На рис. 2, *a* представлена CAD-модель исходной конструкции пьезосканера, в которой, как и в [4], при сжатии и растяжении ПА положение его центра масс не меняется. Перемещения выполнялись с помощью пьезоактуатора 5, составленного из двух пьезопакетов размером $5 \times 5 \times 9$ mm с центральным отверстием диаметром 2 mm для размещения зонда в виде стеклянной пипетки. Удлинение одного пьезопакета при 120 V составляет $8 \mu\text{m}$. Края такого составного ПА через втулки 3, 7 соединены с упругими мембранами 2, 6, которые по периметру крепятся к корпусу 4. Фланец 1 служит для крепления сканера к неподвижному основанию, не показанному на рисунке. Электрически пара пьезопакетов 5 соединялась параллельно, так что суммарное растяжение ПА при 120 V составляло $16 \mu\text{m}$, а величина

деформации каждой мембраны вдоль оси сканера — $8 \mu\text{m}$. Блокирующая сила пьезопакета составляла 800 N.

На первом этапе проводилось детальное моделирование деформаций и расчет АЧХ исходной конструкции сканера (рис. 2, *a*) с жестким креплением корпуса 4 по плоскости 9 к неподвижному основанию с помощью фланца 1, размещенного в верхней части корпуса. На втором этапе определялось оптимальное положение крепежного фланца на корпусе сканера для наиболее эффективного демпфирования низкочастотного резонанса.

Моделирование пьезосканера проводилось в программе COMSOL с использованием следующих физических модулей: механика твердых тел, электростатика с мультифизической связкой, пьезоэлектрический эффект.

В модели ПА задавался в виде многослойного пьезопакета, составленного из 82 плоских параллельно соединенных пьезоэлементов толщиной 0.15 mm из пьезокерамики PZT-5H (lead zirconate titanate). С двух противоположных торцов ПА прикреплялся к корпусу через упругие металлические мембраны. Путем расчета

подбиралась такая толщина мембран, чтобы упругая сила, возникающая при их деформации, не превышала блокирующую силу пьезопакета. Для полного описания пьезоэлектрического эффекта, как и в работе [6], выбиралась взаимосвязь между поляризацией материала и его деформацией в форме напряжение—заряд (stress—charge)

$$T_{i,j} = \sum_{k,l} c_{E_{ijkl}} S_{kl} + \sum_k e_{ijk}^t E_k, \quad (1)$$

$$D_i = \sum_{j,k} e_{ijk} S_{jk} + \epsilon_0 \sum_j \epsilon_{rS_{ij}} E_j. \quad (2)$$

Здесь \mathbf{T} — тензор механических напряжений, \mathbf{S} — тензор деформаций, \mathbf{E} — вектор напряженности электрического поля, \mathbf{D} — вектор поляризации, c_E — жесткость материала, e — характеристики взаимосвязи, ϵ_{rS} — относительная диэлектрическая проницаемость при постоянной деформации, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума. Величины c_E , e , ϵ_{rS} являются тензорами четвертого, третьего и второго ранга соответственно и могут быть представлены в виде матриц.

Численное значение элемента e_{33} в матрице взаимосвязей e (Elasticity matrix), определяющее величину деформаций в направлении поляризации пьезоматериала, выбиралось таким, чтобы чувствительности модельного и реального ПА были одинаковыми (растяжение на $16 \mu\text{m}$ при напряжении 120 V).

Конструкция сканера, представленная на рис. 2, а, была импортирована в модель COMSOL непосредственно из CAD-файла. В расчеты для всех материалов конструкции, кроме ПА, заложены параметры конструкционной стали.

Граничные условия назначались исходя из способа закрепления сканера в реальном эксперименте. В отверстиях для болтов 8 назначено граничное условие „шарнир“, а на плоскости крепления сканера 9 установлено граничное условие „роллер“. Поскольку жесткость фланца много больше жесткости мембран и он закреплен на массивном основании, его деформацию в процессе работы можно не учитывать. На этом основании в модели также не рассматриваются контакт головок крепежных винтов с фланцем и контакт фланца с основанием.

Расчет показал, что в исходной модели сканера с несимметричным креплением корпуса к основанию (рис. 2, а) в процессе колебаний возникает заметная деформация корпуса, а на его АЧХ (кривая 1 на рис. 3, а) наблюдается ярко выраженный низкочастотный резонанс.

Плохое демпфирование резонанса в исходной конструкции сканера мы связываем с деформацией корпуса 4 и, как следствие, с разными силами сжатия, действующими на пьезоактуатор 5 сверху и снизу, которые вызывают смещение положения центра масс.

Для выравнивания сил, действующих на ПА, крепежный фланец 1 был перенесен на геометрический центр корпуса так, чтобы плоскость контакта фланца с

неподвижным основанием делила корпус на две части с одинаковой жесткостью. В результате упругие силы со стороны корпуса, действующие сверху и снизу на ПА, компенсировались. (рис. 2, б).

Перенос плоскости закрепления корпуса уменьшил величину пика на АЧХ сканера (кривая 2 на рис. 3, а). Для сравнения вариантов с неподвижным и подвижным положением центра масс ПА на этом же рисунке представлена АЧХ, рассчитанная для такого же симметричного закрепления корпуса, но при подаче напряжения только на половину ПА. Видно, что в этом случае низкочастотный пик на АЧХ (кривая 3 на рис. 3, а) в несколько раз выше пика, соответствующего неподвижному положению центра масс ПА.

На основании выполненного моделирования был разработан и изготовлен прототип оптимального сканера с крепежным фланцем в центре его корпуса. Схема измерения АЧХ представлена на рис. 2, б. При измерении АЧХ пьезосканера в качестве датчика вибраций использовался миниатюрный пьезопакет 10 с размерами $2 \times 2 \times 5 \text{ mm}$. Один край пьезопакета-датчика был зафиксирован на втулке 3, а второй оставался свободным. Для измерения АЧХ сигнал от генератора напряжений прикладывался к ПА и раскачивал сканер на частоте f . При исследовании варианта сканера с неподвижным положением центра масс напряжение подавалось на оба пьезопакета, а в случае разбалансированного варианта — только на один. Сигнал с датчика подавался на вход синхродетектора, на референтный вход которого также подавался сигнал от генератора сигналов. Сигнал на выходе синхродетектора был пропорционален амплитуде колебаний пьезосканера на частоте f .

На рис. 3, б представлены экспериментально измеренные АЧХ сканера с симметричным креплением корпуса для двух вариантов включения пьезопакетов, соответствующих неподвижному и подвижному положению центра масс. Видно гашение низкочастотного резонанса (кривая 5 на рис. 3, б) в случае сбалансированного варианта включения пьезопакетов (напряжение подается на оба пьезопакета). Также наблюдается хорошее совпадение расчетных (кривая 3 на рис. 3, а) и экспериментально измеренных (кривая 4 на рис. 3, б) АЧХ для случая с подвижным положением центра масс, когда при расчете напряжение прикладывалось к половине ПА, а при измерениях — к одному из двух пьезопакетов. Различие между расчетной и экспериментально измеренной резонансными частотами составляет менее 1 %.

Исследованный сканер был испытан в оптимизированном (рис. 2, б) и исходном вариантах (рис. 2, а) в качестве Z-сканера в составе „home-made“ СММП. Измерялось время получения кадра в „hopping“-море при сканировании тестового образца в виде полимерного слепка, снятого с периодической кремниевой решетки TGX1. Сканирование проводилось при максимально возможных значениях коэффициентов усиления в разорванной петле ОС так, что малейшее увеличение коэффициента усиления приводило к дестабилизации в

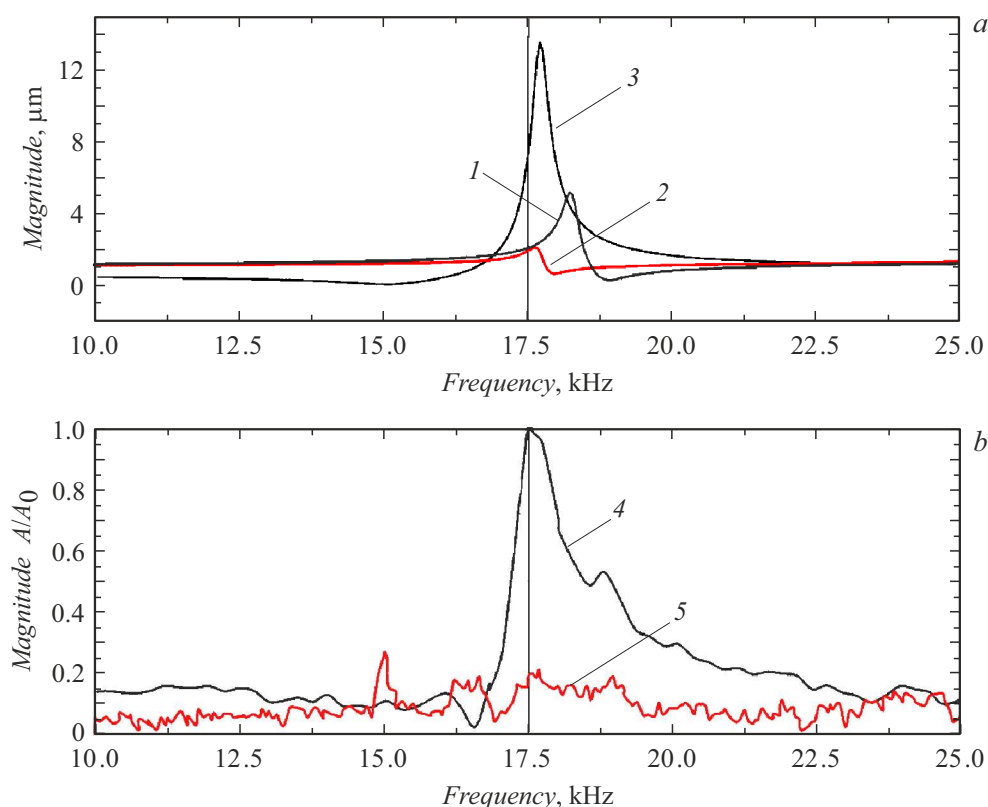


Рис. 3. АЧХ сканера. *a* — результаты расчета: 1 — сбалансированный вариант с неподвижным положением центра масс и несимметричным креплением корпуса, 2 — сбалансированный вариант с симметричным креплением корпуса по плоскости зеркальной симметрии, 3 — разбалансированный вариант с симметричным креплением корпуса; *b* — результаты эксперимента: 4 — разбалансированный вариант и симметричное крепление корпуса, 5 — сбалансированный вариант и симметричное крепление корпуса.

работе СС. Эксперименты, проведенные с образцами различных типов, показали четырехкратное уменьшение времени получения изображения при использовании оптимизированного сбалансированного сканера.

На рис. 4 представлен пример СМПП-изображения, полученного с использованием оптимально сбалансированного сканера.

Таким образом, построена COMSOL-модель сканера для СЗМ с неподвижным положением центра масс, адекватность которой подтверждена хорошим согласием между расчетными и экспериментально измеренными АЧХ сканера. Расчеты, выполненные в рамках разработанной модели, позволили создать оптимальную по эффективности демпфирования низкочастотного резонанса конструкцию сканера. При этом показано, что необходимо выбирать оптимальное крепление сканера к неподвижному основанию, обеспечивающее равенство и встречную направленность сил, действующих на ПА, что в конечном итоге стабилизирует положение центра масс.

Проведено испытание сканера в составе „home-made“ СМПП в „hopping“-моде. Испытания показали, что предложенный подход с демпфированием низкочастотного резонанса сканера СЗМ позволяет значительно увели-

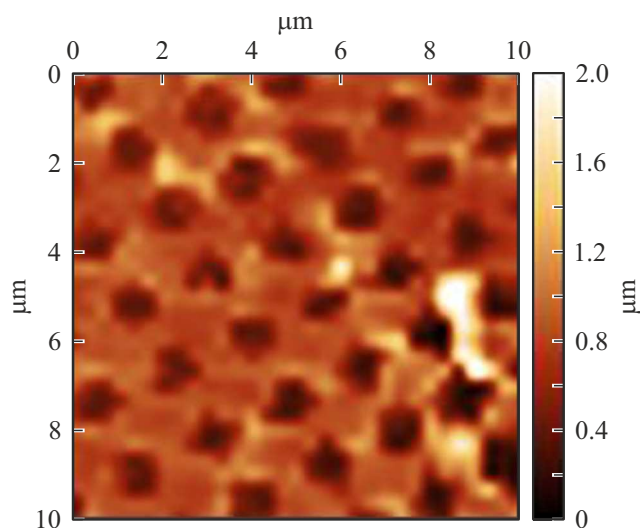


Рис. 4. СМПП-изображение поверхности тестового образца в виде полимерного слепка с Si-решетки TGX1, полученное в „hopping“-моде с использованием оптимально сбалансированного сканера.

чить скорость сканирования, что особенно важно при работе СЗМ в „hopping“-моде с многократным подводом и отводом зонда к поверхности образца.

Финансирование работы

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ (проект № 075-00444-25-00).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Е.И. Юревич, *Теория автоматического управления*, 3-е изд. (БХВ-Петербург, СПб., 2007), с. 122–126.
- [2] N. Kodera, H. Yamashita, T. Ando, Rev. Sci. Instrum., **76** (5), 053708 (2005). DOI: 10.1063/1.1903123
- [3] D.W. Pohl, IBM J. Res. Dev., **30** (4), 417 (1986). DOI: 10.1147/rd.304.0417
- [4] S. Watanabe, S. Kitazawa, L. Sun, N. Kodera, T. Ando, Rev. Sci. Instrum., **90** (12), 123704 (2019). DOI: 10.1063/1.5118360
- [5] С.В. Пичахчи, О.М. Горбенко, С.Ю. Лукашенко, М.Л. Фельштын, И.Д. Сапожников, И.С. Свайкин, А.О. Голубок, Письма в ЖТФ, **50** (20), 48 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.20.58939.19984 [S.V. Pichahchi, O.M. Gorbenko, S.Yu. Lukashenko, M.L. Felshtyn, I.D. Sapozhnikov, I.S. Svaikin, A.O. Golubok, Tech. Phys. Lett., **50** (10), 95 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.10.59707.19984].
- [6] O.M. Gorbenko, S.Y. Lukashenko, S.V. Pichakhchi, I.D. Sapozhnikov, M.L. Felshtyn, A.O. Golubok, Nanosyst.: Phys., Chem., Math., **15** (5), 643 (2024). DOI: 10.17586/2220-8054-2024-15-5-643-653