

07;12

Применение диафрагмирования для снижения шумов в оптической системе регистрации атомно-силового микроскопа

© В.В. Бауков, В.В. Жижимонтов, А.В. Беляев,
С.А. Саунин, В.А. Быков

ЗАО „НТ-МДТ“, Москва
E-mail: victor_baukov@ntmdt.ru

Поступило в Редакцию 16 ноября 2006 г.

Предложено использовать диафрагмирование для снижения влияния поперечных блужданий лазерного пучка на общий уровень шумов в системе регистрации изгиба кантилевера по отклонению лазерного луча в атомно-силовом микроскопе (АСМ). Эффективность метода продемонстрирована экспериментально. Показано, что использование метода позволяет снизить уровень шумов до 0.01 nm.

PACS: 07.79.Lh, 42.60.Mi, 42.79.Ag

От величины шумов в АСМ напрямую зависит качество получаемых изображений, в первую очередь такой важный параметр, как предельное разрешение, которого можно достичь в АСМ. Разрешение (пороговая чувствительность) при измерении перепада высот характеризуется абсолютным шумом по Z . От этой величины зависит и пространственное разрешение по X, Y .

Применяемая сейчас практически во всех коммерческих АСМ система регистрации по отклонению лазерного луча состоит из полупроводникового лазера, излучение которого сфокусировано на обратной (отражающей) стороне кантилевера и четырехсекционного позиционно-чувствительного фотодиода (ФД) с предусилителем, регистрирующего отклонение отраженного пучка. Каждый элемент системы вносит вклад в общий шум [1].

Основными источниками шума, обычно описываемыми в литературе, помимо механических шумов, связанных с внешним окружением,

являются дробовой шум ФД, тепловой шум нагрузочного резистора в предусилителе, шум интенсивности лазера и тепловой шум балки [2]. Кроме того, всегда присутствует шум, связанный с блужданиями лазерного пучка перпендикулярно направлению распространения. В данной работе показано, что в области низких частот, важной для контактного режима работы АСМ, именно он определяет общий уровень шума в регистрирующей системе.

Для этого в работе измерялся шум в системе регистрации серийной измерительной головки производства NT-MDT-SFC050. В этой головке используется лазер Imatronic LDM115G/650/1. Измерялась величина среднеквадратичного отклонения от среднего значения сигнала DFL (deflection), пропорционального нормальному отклонению кантилевера. Измерения проводились в трех полосах: от 1 Hz до 0.1 kHz, 1.0 kHz и 4.0 kHz соответственно. Для характерной мощности излучения, падающего на ФД, и полосы 1 kHz несложный теоретический расчет (который можно сделать, воспользовавшись [2]) для дробового шума дает около 2 pm, а для джонсоновского — 0.4 pm (в работе величины всех шумов рассчитывались на длину кантилевера 90 μm). Как будет видно далее, этими вкладами можно пренебречь.

Результаты измерений показывают, что величина шума сигнала DFL линейно зависит от мощности падающего на ФД излучения — сигнала *Laser* (варьировался за счет использования кантилеверов с различным коэффициентом отражения). При этом величина шума имеет степенную зависимость от ширины полосы с показателем степени 0.35, т.е. шум сигнала DFL заметно отличается от белого и имеет значительную низкочастотную составляющую типа $1/f$ до 100 Hz. При этом мы имеем в полосе 1 kHz пересчитанный к высоте шум 0.4 pm.

Из всего этого можно сделать вывод, что основным источником шума являются блуждания лазерного пучка перпендикулярно направлению распространения. Это также подтверждает эксперимент с равномерной засветкой ФД лампой накаливания вместо лазера, где шум сигнала DFL при той же мощности света на ФД упал более чем в 5 раз (при этом остальные вклады в результирующий уровень шума остаются на прежнем уровне).

Следует отметить, что блуждания пятна на фотодиоде в общем случае могут объясняться двумя причинами, соответственно возможно существование двух видов шумов. Они могут быть вызваны либо параллельным переносом лазерного пучка в боковом направлении —

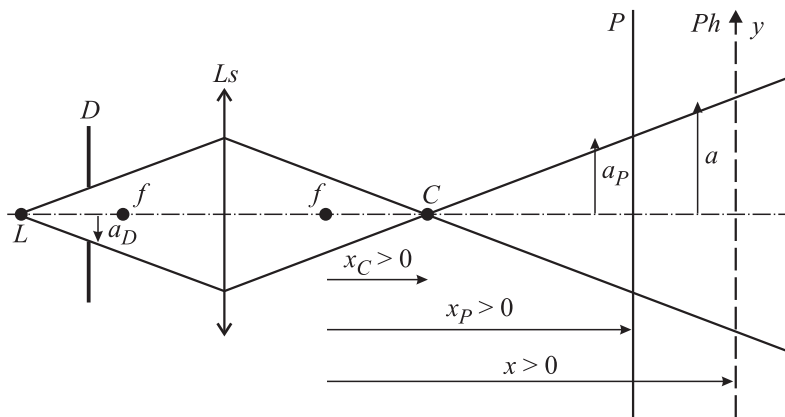


Рис. 1. Оптическая схема системы регистрации. L — источник лазерного излучения, D — диафрагма, L_s — линза, C — кантилевер, P — плоскость изображения диафрагмы, Ph — плоскость ФД.

назовем его позиционным шумом, либо угловым отклонением лазерного пучка — будем называть его угловым шумом.

Были рассмотрены оба случая в следующих предположениях: лазерный пучок, даваемый точечным источником, имеет гауссово распределение интенсивности по углу и соответственно по координате y в плоскости ФД (см. рис. 1), сдвиг лазерного пучка мал по сравнению с размерами пучка, ось лазерного пучка попадает в центр ФД — величина сигнала DFL равна нулю. Общая идея такова: из-за сдвига лазерного пучка в плоскости ФД (в силу углового отклонения лазерного пучка или линейного перемещения источника излучения) сигнал рассогласования DFL становится отличным от нуля. В отсутствие какой-либо диафрагмы при этом он равен максимуму интенсивности $I = \partial P / \partial y$ (где P — мощность излучения), умноженному на удвоенную величину сдвига δ (см. рис. 2). Если в оптической схеме есть некоторая диафрагма (предполагается, что сдвиг лазерного пучка также мал по сравнению с размерами диафрагмы), находящаяся между источником лазерного излучения и кантилевером, выделяющая центральную часть пучка, то при уменьшении ее полуширины величина рассогласования (абсолютное значение шума), равная сумме площадей заштрихованных областей,

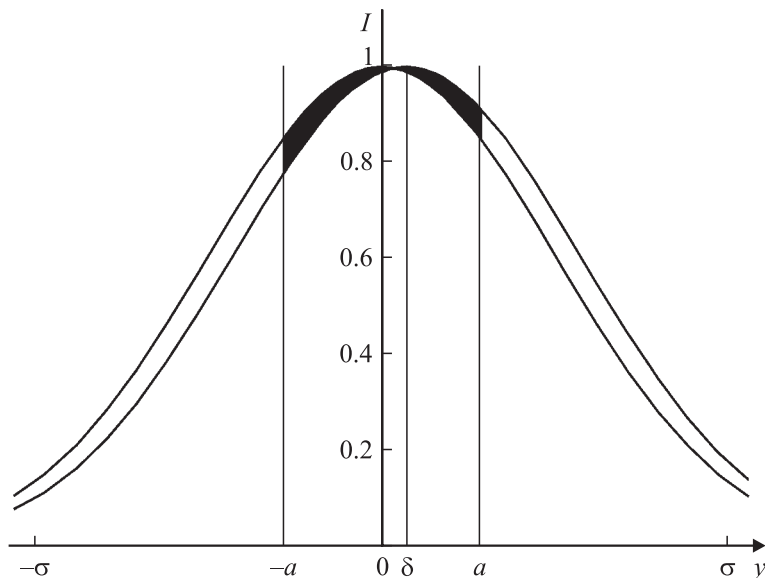


Рис. 2. Иллюстрация сдвига в плоскости ФД на величину δ лазерного пучка с гауссовым распределением интенсивности $I = (\partial P / \partial y) / (\partial P / \partial y)_{\max}$ с полушириной σ (по уровню $1/e^2$), ограниченного диафрагмой, дающей в плоскости ФД пучок с полушириной a . Сумма площадей заштрихованных областей дает значение сигнала рассогласования на ФД — DFL .

уменьшается, причем быстрее, чем общая мощность, падающая на ФД (сигнал *Laser* — интеграл интенсивности I от $-a$ до a). Соответственно уменьшается величина рассогласования, нормированная на эту мощность. Таким образом, при вырезании диафрагмой центральной части пучка с медленно изменяющимся распределением интенсивности понижается величина относительного шума. Величина результирующего абсолютного шума высоты δz , измеряемого в нанометрах, связана с величиной шума относительного рассогласования $\delta DFL / Laser$ на ФД следующим образом [2]:

$$\delta z = \frac{l\beta}{3} \frac{\delta DFL}{Laser}, \quad (1)$$

где l — длина балки, β — апертура лазерного пучка.

В случае углового шума лазера несложный расчет для одномерного случая показывает, что диафрагма снижает (по сравнению со случаем без нее) относительный (нормированный на мощность) шум следующим образом:

$$\frac{\delta DFL_D}{Laser_D} / \frac{\delta DFL_F}{Laser_F} = \frac{\delta DFL_D}{\delta DFL_F} / \frac{Laser_D}{Laser_F} = \frac{1 - e^{-2\alpha^2}}{\operatorname{erf}(\sqrt{2}\alpha)} \rightarrow \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}} \alpha, \quad \alpha \rightarrow 0, \quad (2)$$

где индекс D (Diaphragm) относится к варианту с диафрагмой, F (Full) — без нее, $\alpha = a/\sigma = a_D/\sigma_D$, σ и σ_D — полуширины гауссова распределения интенсивности (по уровню $1/e^2$) в плоскости ФД и диафрагмы соответственно, a — полуширина пучка, ограниченного диафрагмой, в плоскости ФД, a_D — полуширина диафрагмы (щели). Полученная функция монотонно возрастает от нуля до единицы при изменении α от нуля до бесконечности. Более детальный расчет для двумерного случая дает очень слабую зависимость шумов сигнала DFL от размера диафрагмы в перпендикулярном направлении. Из последнего выражения видно, что для существенного снижения относительного шума надо уменьшать размер диафрагмы так, чтобы $a < \sigma$. При этом, если размеры диафрагмы малы по сравнению с размерами пучка ($\alpha \rightarrow 0$, $a \ll \sigma$), при одинаковом изменении размеров по обеим осям с сохранением формы мощность излучения, падающего на ФД, зависит от ширины диафрагмы квадратично (линейно от каждого из размеров). Отметим одну особенность углового шума: сдвиг ФД или диафрагмы (при неизменной угловой апертуре диафрагмы) вдоль оси системы не влияет на итоговый вклад углового шума, так как параметр α остается постоянным.

В случае позиционного шума лазера присутствуют два эффекта: во-первых, за счет сдвига источника в направлении, перпендикулярном оптической оси системы, сдвигается распределение интенсивности пучка в плоскости диафрагмы — этот эффект эквивалентен угловому шуму, во-вторых, за счет сдвига источника происходит изменение угла между геометрической осью пучка, прошедшего через диафрагму, и осью системы. В плоскости изображения диафрагмы последний эффект не дает вклада в шум, а позади нее он конкурирует с первым. В этом случае можно минимизировать вклад, вносимый позиционным шумом лазера, поместив ФД в некоторую плоскость позади плоскости изображения диафрагмы. Это отличие также позволяет определить, какого именно

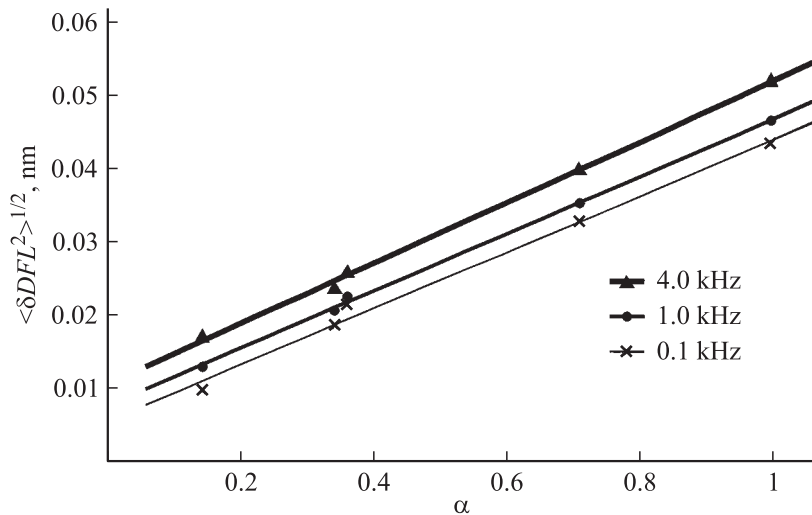


Рис. 3. Зависимость шума сигнала DFL (пересчитан в nm по формуле (1)) от $\alpha = a/\sigma$. Толстая линия — 4.0 kHz, средняя линия — 1.0 kHz, тонкая линия — 0.1 kHz.

типа шум преобладает у лазера. У позиционного шума есть еще одна особенность. Поскольку изображением источника лазерного излучения является пятно на кантилевере (см. рис. 1), то при позиционном шуме это пятно перемещается по поверхности кантилевера. Чтобы это не вносило вклад в итоговый шум, пятно должно оставаться в пределах отражающей поверхности кантилевера, а сама поверхность должна быть плоской и с нулевой шероховатостью. Величина позиционного шума на ФД зависит от его положения вдоль оси системы следующим образом:

$$\left. \frac{\delta DFL_D(x)}{Laser_D} \right|_{x \geq x_p} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \frac{\frac{x(x_p - x_c)}{(x - x_c)x_p} - e^{-2\alpha^2}}{\text{erf}(\sqrt{2}\alpha)} \gamma, \quad (3)$$

где $\gamma = \delta/\sigma_D$, δ — смещение источника излучения перпендикулярно оси системы, x_c и x_p — координаты изображений источника излучения (совпадает с кантилевером) и диафрагмы соответственно, x — координата ФД, все координаты отсчитываются от заднего фокуса линзы.

Эффективность предложенного метода проверялась на стенде, моделирующем оптическую схему регистрирующей системы измерительной головки SFC050. Для проверки использовался лазер Hitachi HL6724MG. Результаты измерений шума сигнала *DFL* (пересчитанного в нанометры по формуле (1)) приведены на рис. 3, из которого видно, что путем уменьшения $\alpha = a/\sigma$ в 7 раз с 1 до 0.15 можно уменьшить шум сигнала *DFL* с 0.04 до 0.01 nm (в полосе 1 kHz). Кроме того, выяснилось, что от положения ФД вдоль оси пучка шумы никак не зависят, т.е. можно утверждать, что в полосе частот от 1 Hz до 4 kHz шум на ФД определяется в основном угловым шумом лазера.

Таким образом, показано, что шум в системе регистрации изгиба кантилевера АСМ по отклонению лазерного луча обусловлен преимущественно поперечными блужданиями лазерного пятна на ФД, вызванными угловыми отклонениями пучка. Для снижения вклада таких блужданий в результирующий уровень шумов предложено использовать диафрагмирование. Использование данного метода позволяет снизить уровень шумов, по крайней мере, до 0.01 nm. На практике максимальная эффективность данного метода (минимально возможный угловой размер диафрагмы) при сохранении мощности излучения, падающего на ФД, и вместе с ней остальных составляющих шума ограничивается максимальной мощностью используемого лазерного диода.

Список литературы

- [1] *Springer Handbook of Nanotechnology* / Ed. by V. Bhushan. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. P. 333,353.
- [2] *Scanning Force Microscopy* / Ed. by D. Sarid. Oxford: Oxford Univ. Press, 1994, rev. edn. P. 39,119.