
**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ**

УДК 534.1, 004.93, 543.08, 681.2

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

**ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
НАНОМЕХАНИЧЕСКИХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ ПУТЕМ
ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИХ КОЛЕБАНИЙ В СКЕНИРУЮЩЕМ
ЭЛЕКТРОННОМ МИКРОСКОПЕ**

Предложена и апробирована методика автоматизированного измерения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) наномеханических осцилляторов (НМО) в виде углеродных нановискеров (УНВ) с диаметром ~ 100 нм, длиной $\sim (1-2)$ мкм и резонансной частотой $\sim (5-10)$ МГц, локализованных на вершине W-иглы. АЧХ НМО измерялась путем визуализации их вынужденных колебаний в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) и записи соответствующего видеофайла при изменении частоты возбуждающего генератора. Полученный видеоряд анализируется методом машинного зрения. Результатом обработки СЭМ-изображений являются график АЧХ, численные значения резонансной частоты и добротности НМО. Проанализированы два способа измерения АЧХ: при сканировании по одной строке, пересекающей УНВ вблизи его колеблющейся вершины и при сканировании по кадру, захватывающему весь УНВ целиком. Выполнена оценка сдвига резонансной частоты НМО, возникающего в результате осаждения атомов углерода на поверхность УНВ под действием сфокусированного электронного пучка в процессе визуализации колебаний в СЭМ. Показано, что сканирование по линии за время, равное 60 с, приводит к уменьшению резонансной частоты на $\sim 0.7\%$, в то время как сканирование по кадру за то же время приводит к ее увеличению на $\sim 0.3\%$.

Кл. сл.: наномеханический осциллятор, углеродный нановискер, анализ изображений, амплитудно-частотная характеристика

ВВЕДЕНИЕ

Наномеханические осцилляторы (НМО) представляют интерес как с прикладной, так и с фундаментальной точек зрения в связи с возможностью их использования в разнообразных наноприборах и наномеханизмах, при измерении малых сил и малых масс, малого электрического заряда, а также при исследовании квантового поведения оптомеханических и мезоскопических систем. Очевидно, что важнейшим параметром НМО является его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). Вследствие малых размеров и малой массы НМО могут иметь АЧХ с высокой резонансной частотой и добротностью и, как следствие, обладать высокой чувствительностью, в частности, к изменению осциллирующей массы. Например в [1], используя в качестве НМО углеродную нанотрубку с диаметром ~ 2 нм и массой $\sim 10^{-18}$ г, измерили массу осажденного на ее поверхность атома золота, фиксируя сдвиг резонансной частоты, возникающий под действием добавленной массы $\sim 10^{-22}$ г. Для "взвешивания" более тяжелых

объектов нужны НМО с большей собственной массой. В [2] в качестве НМО использовались углеродные нановискеры (УНВ) с диаметром ~ 100 нм и массой $\sim 10^{-14}$ г, выращенные на вершине W-иглы из газа прекурсора с помощью технологии фокусированного электронного пучка в рабочей камере сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Используя такие НМО, в [2] взвесили наносферы с массой $\sim 10^{-15}$ г. В [3] массы еще более тяжелых частиц ($\sim 10^{-12}$ г) измерялись с помощью кремниевой балки (кантилевера) микроскопических размеров $\sim 150 \times 10 \times 1$ мкм с массой $\sim 10^{-9}$ г, изготовленной методом фотолитографии. Следует отметить, что если АЧХ кремниевых микромеханических осцилляторов легко измерить с помощью метода оптического рычага, используемого, например, в атомно-силовой микроскопии, то для соответствующих измерений наноразмерных осцилляторов требуются более прецизионные подходы. В частности, в [2] для измерения АЧХ УНВ с диаметром ~ 100 нм и длиной ~ 1 мкм использовалась визуализация колебаний НМО в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). Преимущество

использования СЭМ заключается в том, что появляется возможность измерять АЧХ непосредственно в процессе изготовления НМО. Следует отметить, что в [2] измерение АЧХ проводилось вручную, при этом использовался тот факт, что колебания нановискера приводят к размытию его изображения в СЭМ и имеют максимальную амплитуду на резонансной частоте. Понятно, что для того, чтобы выполнить измерения АЧХ, анализируя СЭМ-изображения "in situ" в зависимости от частоты колебаний, желательно заранее достаточно точно знать, в каком диапазоне находится резонансная частота. При этом задача усложняется тем, что НМО может иметь несколько близко расположенных резонансов, обусловленных, например, отличием формы УНВ от формы идеального цилиндра. В данной работе описан и апробирован метод автоматического определения АЧХ НМО с помощью СЭМ. Измерение АЧХ осуществляется путем анализа методами "машинного зрения" последовательности СЭМ-изображений осциллирующего УНВ, полученных в режиме вторичных электронов.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ АЧХ

В данной работе рассмотрены и апробированы два способа измерения АЧХ по анализу видеопоследовательности СЭМ-изображений НМО:

1 — по двумерному изображению $I(x, y)$, где I — яркость изображения пропорциональная интенсивности сигнала с детектора вторичных электронов, при этом УНВ целиком находится в поле сканирования СЭМ (рис. 1);

2 — по одномерному изображению $Y(x)$, где Y — численное значение, пропорциональное интенсивности сигнала с детектора вторичных электронов, при этом электронный пучок сканирует по линии, пересекающей вершину УНВ в направлении, перпендикулярном его оси (рис. 2).

Задачей обработки изображений в обоих случаях является определение амплитуды колебаний УНВ на каждом кадре, соответствующем определенной возбуждающей частоте, путем измерения амплитуды размытия его изображения. С этой целью для двух способов измерений разработаны специальные алгоритмы.

Собственные резонансные частоты нановискеров зависели от их геометрических размеров и лежали в диапазоне (5–10) МГц. Запись видеоизображения синхронизована с разверткой частоты возбуждения колебаний НМО в заданном диапазоне. Время развертки частоты возбуждающего генератора от минимального до

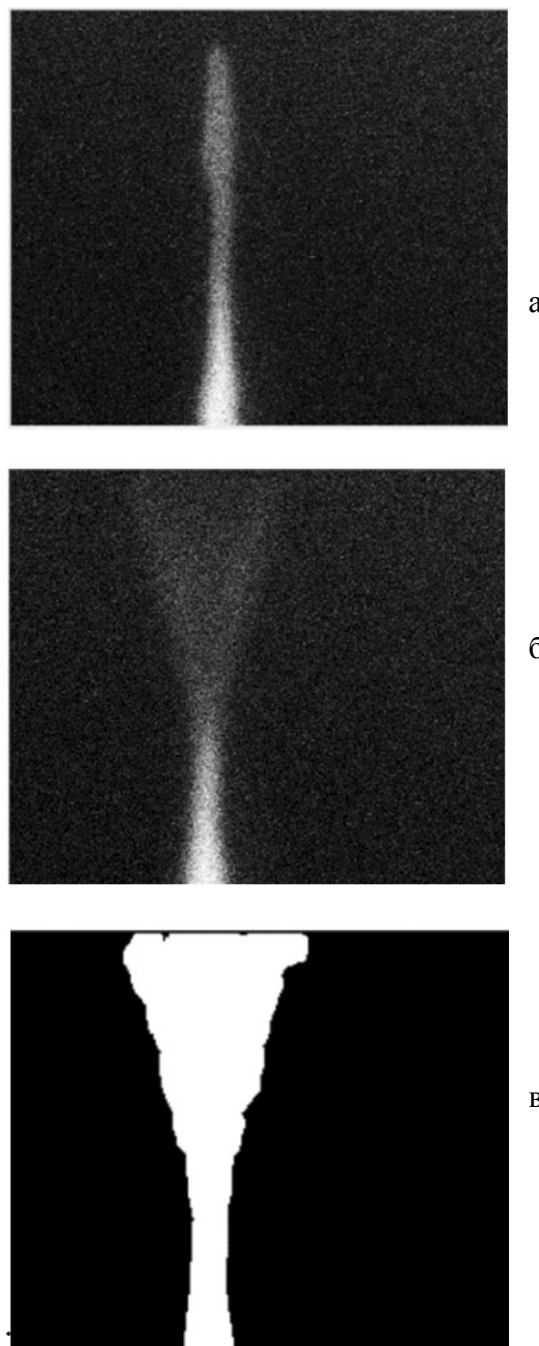


Рис. 1. Пример обработки двумерных изображений УНВ.

а — изображение УНВ при отсутствии колебаний, толщина УНВ — (100–200) нм; б — изображение колеблющегося УНВ; в — результат обработки изображения: выделение на изображении области, ограниченной крайними положениями вискера

максимального значения составляет (30–60) с. Диапазон развертки частоты возбуждающего генератора составляет ~ 4 МГц. Частоты строчной

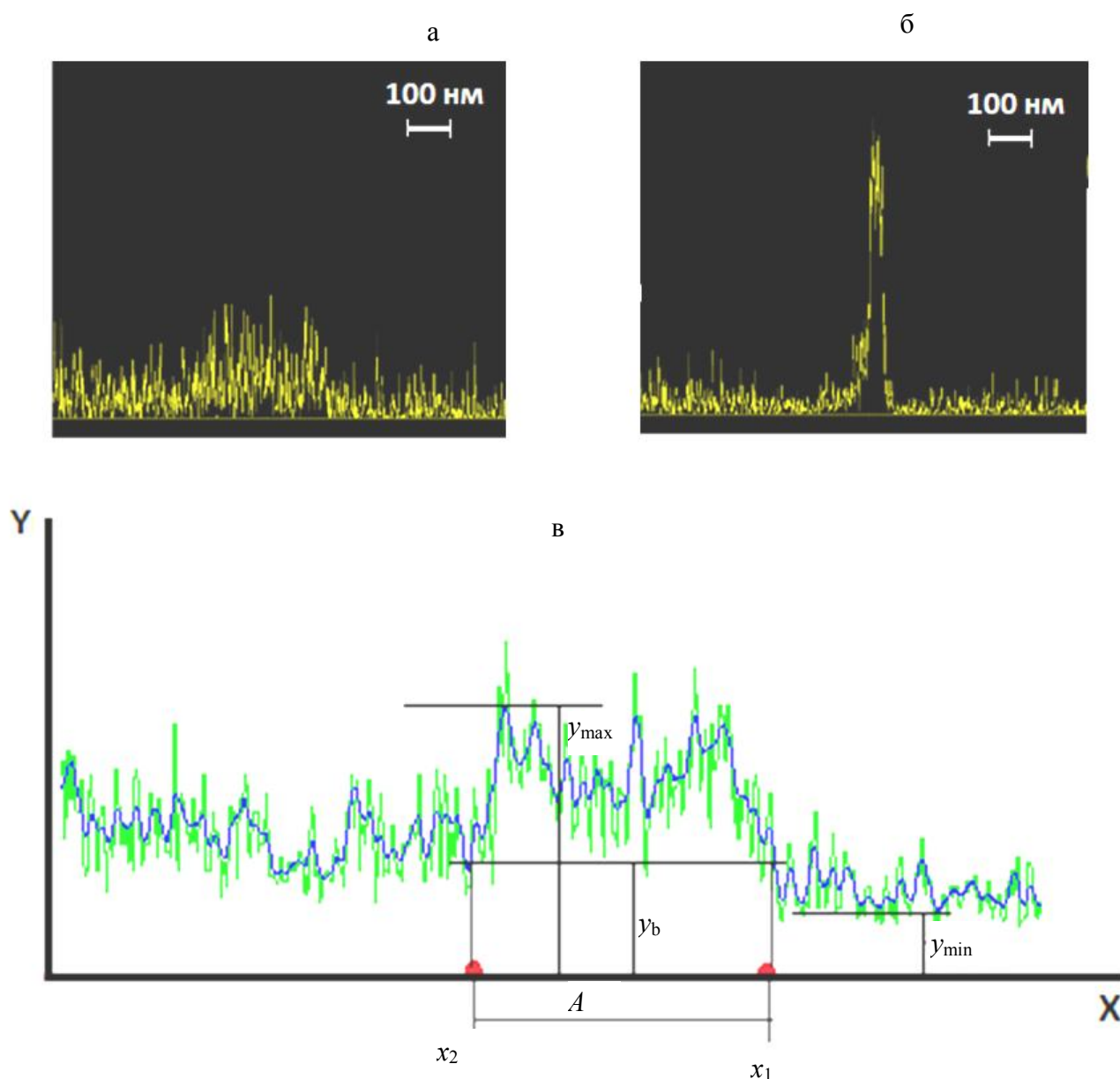


Рис. 2. Пример обработки изображений, полученных при сканировании электронным пучком по линии, пересекающей вершину УНВ перпендикулярно его оси.

а — малая амплитуда колебаний УНВ вдали от резонанса; б — максимальная амплитуда колебаний УНВ на резонансной частоте; в — кривая, полученная в результате распознавания значений на (б). Y — численные значения, пропорциональные интенсивности сигнала с детектора вторичных электронов. Амплитуда колебаний НМО определяется как $A = x_2 - x_1$

и кадровой разверток СЭМ составляют 30–100 кГц и 1–2 кГц соответственно. Видеозапись эксперимента выполняется с частотой 10–20 кадров в секунду. Таким образом, в каждой видеозаписи содержится несколько тысяч кадров. В случае необходимости измерения могут повторяться заданное число раз. Если скорость развертки частоты имеет величину V , МГц/с, а запись видеоизображения осу-

ществляется со скоростью N , кадров/с, то частоты колебаний, соответствующие соседним кадрам, отличаются на величину $\Delta f = V / N$, МГц. Таким образом, каждому кадру соответствует частота колебаний $f = f_0 + \Delta f \cdot n$, где f_0 — начальная частота развертки, n — номер кадра. В нашем случае частоты, соответствующие соседним кадрам отличались приблизительно на 1 кГц.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЧХ НАНОВИСКЕРА ПО ДВУМЕРНОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ ПРИ СКАНИРОВАНИИ ПО КАДРУ

Если УНВ целиком находится в поле сканирования СЭМ (рис. 1), то видеозапись его колебаний содержит совокупность двумерных изображений $I_{\omega}(x, y)$, соответствующих различным частотам колебаний.

Так как частота колебаний нановискера $\sim 5\text{--}10$ МГц много больше частоты сканирования электронного пучка (30–100 кГц) и частоты кадровой развертки (10–20 Гц), а время сбора сигнала для построения кадра (0.05–0.1 с) на много порядков превосходит период колебаний $((4\text{--}10) \cdot 10^{-6}$ с) УНВ, то на одном СЭМ-кадре собирается многократный сигнал от всех точек, в которых находился УНВ в процессе колебаний. Поэтому при приближении возбуждающей частоты к резонансной частоте УНВ его изображение "размывается". Очевидно, что максимальное размытие изображения возникает на резонансной частоте. Определим размытие

изображения как величину, пропорциональную площади области, ограниченной крайними положениями колеблющегося УНВ (рис. 1, в), и будем считать, что эта величина пропорциональна амплитуде его колебаний.

Алгоритм обработки каждого кадра последовательности двумерных $I(x, y)$ изображений включает следующие операции: фильтрация шумов изображения, сглаживание и построчная пороговая обработка. После пороговой обработки для заполнения мелких "дырок" и очищения изображения от мелкого "мусора" применяются морфологические операции замыкания и размыкания [6]. Блок-схема алгоритма обработки одного кадра приведена на рис. 3 (правая ветвь).

При построении АЧХ для каждого кадра вычисляется величина, пропорциональная амплитуде колебаний УНВ и строится зависимость квадрата данной величины от соответствующей каждому кадру возбуждающей частоты.



Рис. 3. Блок-схема алгоритма построения АЧХ НМО при его визуализации в СЭМ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЧХ ВИСКЕРА ПО ОДНОМЕРНОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ ПРИ СКАНИРОВАНИИ ПО ЛИНИИ

На рис. 2 приведен пример одномерных изображений $y(x)$, получаемых при сканировании электронным пучком по линии, пересекающей вершину УНВ перпендикулярно его оси. На рис. 2, а, приведено изображение, соответствующее колебаниям УНВ с малой амплитудой, когда частота пьезовибратора заметно отличается от резонансной частоты НМО и УНВ практически не колеблется. На зависимости $y(x)$ наблюдается пик, ширина которого отражает диаметр УНВ. Изображение на рис. 2, б, соответствует резонансным колебаниям УНВ. В этом случае за время сканирования электронного луча по линии, перпендикулярной оси УНВ, на детектор вторичных электронов СЭМ поступают электроны ото всех точек пространства, в которых многократно находилась вершина УНВ в процессе колебаний, т. е. сигнал от УНВ "размазан" в пространстве по линии, вдоль которой колеблется вершина УНВ. В результате ширина пика на графике зависимости $y(x)$ увеличивается, а его амплитуда уменьшается. Алгоритм обработки каждого кадра последовательности изображений одномерных сигналов $y(x)$ включает следующие операции: распознавание значений и построение кривой $y(x)$ по изображениям видеопоследовательности кадров, перехваченных с экрана СЭМ (рис. 2, а, б); медианная фильтрация шумов на этой зависимости и сглаживание кривой путем усреднения в скользящем окне; определение амплитуды колебаний путем измерения ширины пика на сглаженной зависимости. Схема алгоритма представлена на рис. 3, левая ветвь.

Для измерения ширины пика сначала определяется положение и величина максимума кривой ($y_{\max}$ на рис. 2, в). По величине максимума вычисляется уровень y_b , по которому определяется граница пика (рис. 2, в).

Уровень y_b определяется следующим образом:

$$y_b = y_{\min} + k(y_{\max} - y_{\min}), \quad (1)$$

$k < 1$, стандартное значение $k = 0.25$.

Величина коэффициента k задается при помощи интерфейса программы обработки.

Положения левой и правой границ пика (точки x_1 и x_2 на рис 2, в) определяются путем нахождения точек, в которых сглаженная кривая (изображена на рис 2, в) пересекает уровень y_b . Поиск точек x_1 и x_2 выполняется путем движения по сглаженной кривой $y(x)$ из положения ее

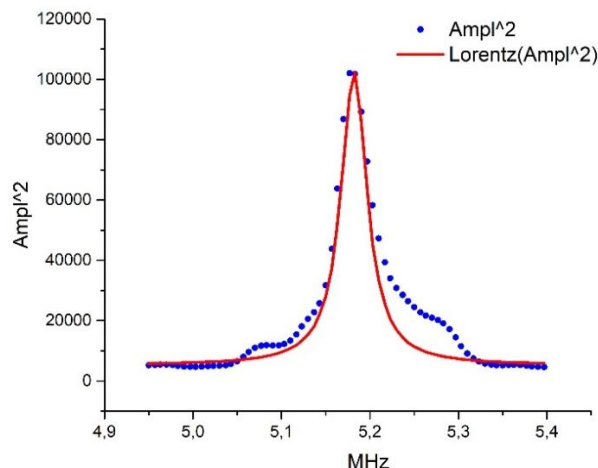


Рис. 4. АЧХ вынужденных колебаний УНВ с явно выраженным главным пиком

максимума как в сторону уменьшения (x_1), так и увеличения (x_2) значений координаты x .

После обработки всех кадров видеопоследовательности строится АЧХ УНВ в виде зависимости квадрата амплитуды колебаний от частоты возбуждения (рис. 4).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОВИСКЕРА

На рис. 4 приведена АЧХ вынужденных колебаний УНВ, полученная при обработке видеопоследовательности СЭМ-изображений, снятых в процессе сканирования сфокусированным электронным пучком, пересекающим вершину УНВ вдоль линии, перпендикулярной его оси. Время линейной развертки частоты генератора от 4.95 МГц до 5.40 МГц составляло 7 с при времени сканирования одной линии электронным пучком 30 мкс.

С целью определения добротности НМО выполняется автоматическая аппроксимация главного пика АЧХ (пика с наибольшей амплитудой) функцией Лоренца по методу наименьших квадратов с использованием итерационного алгоритма Гаусса—Ньютона [7]

$$y = \frac{2A}{\pi} \frac{W}{4(f - f_0)^2}, \quad (2)$$

где A — площадь под кривой, f_0 — координата максимума (резонансная частота), W — ширина пика на полувысоте.

Добротность резонансного пика (H) приблизительно вычисляется как отношение f_0 и W :

$$H = \frac{f_0}{W}. \quad (3)$$

Ширина УНВ в данном эксперименте составляла ~ 80 нм, а его длина — порядка 1 мкм. Резонансная частота УНВ составила $5.183 \pm \pm 0.001$ МГц, добротность 123 ± 10 .

В реальном эксперименте форма НМО на основе УНВ может отличаться от формы идеального цилиндра, что может приводить к существованию нескольких резонансных частот, зависящих от направления действия возбуждающей силы. Более сложную форму колебаний также будут иметь УНВ с дополнительными функциональными элементами. Наконец, в системе "УНВ—острая металлическая игла" могут возникать связанные колебания, обусловленные собственными резонансами иглы. В этом случае анализ АЧХ выполняется в интерактивном режиме путем аппроксимации множественными пиками при помощи нелинейного решения задачи наименьших квадратов методом Левенберга—Марквардта [7].

На рис. 5 для примера представлена конкретная видеопоследовательность, полученная при записи двумерных изображений колебаний УНВ с использованием первого метода, когда УНВ целиком находился в поле сканирования СЭМ (рис 5, а, б, в), соответствующие бинарные изображения, по которым определялась амплитуда колебаний НМО (рис 5, г, д, е) и АЧХ (рис. 5, ж), построенная и обработанная по описанному выше алгоритму. Частотный диапазон и время развертки частоты составляли (7–9) МГц и 30 с соответственно. На АЧХ отчетливо различаются 3 пика с резонансными частотами 8.341 ± 0.005 МГц, 8.432 ± 0.001 МГц, 8.579 ± 0.001 МГц, и добротностями 101 ± 14 , 192 ± 10 , 84.1 ± 3.4 соответственно. Следует отметить, что при использовании СЭМ для измерения АЧХ НМО необходимо принимать во внимание влияние электронного пучка СЭМ на резонансные характеристики УНВ. Действительно, даже в условиях высокого вакуума в рабочей камере СЭМ всегда присутствуют остатки углеводородных радикалов. В результате в процессе получения СЭМ-изображений на поверхности УНВ всегда осаждается небольшое количество углерода, образующегося в результате разложения углеводородных остатков под действием фокусированного электронного пучка. Очевидно, что это приводит к сдвигу резонансной частоты НМО, который необходимо учитывать при интерпретации экспериментальных данных.

Понятно, что уменьшение времени экспозиции НМО под электронным пучком уменьшит искажения, вносимые процессом измерения. Интересно также отметить, что, как установлено экспериментально, экспозиция по линии приводит к уменьшению резонансной частоты, в то время как экспозиция по кадру приводит к ее увеличению. Это связано с тем, что в первом случае происходит осаждение углерода на вершине УНВ без изменения его диаметра по всей длине, приводящее к появлению добавочной массы на его вершине и, как следствие, уменьшению резонансной частоты. Во втором случае углерод осаждается по всей длине УНВ, и вместе с добавлением массы увеличивается его диаметр по всей длине. При этом добавление массы уменьшает резонансную частоту, а увеличение диаметра приводит к увеличению жесткости УНВ, что должно сдвигать резонансную частоту в противоположную сторону. Для оценки частотного сдвига в результате дополнительного осаждения углерода под электронным пучком воспользуемся выражением для резонансной частоты консольной балки [8]:

$$\Omega^2 = \frac{N}{M}, \quad (4)$$

где Ω — круговая частота, N — обобщенная жесткость балки, M — обобщенная масса балки.

$N = \frac{3EI}{L^3}$, где E — модуль Юнга, I — момент инерции, L — длина балки,

Причем, если добавочная масса сосредоточена на свободном конце балки, то $M = \frac{33}{140}m_0 + m_1$, где m_0 — масса балки, m_1 — добавочная масса.

Если добавочная масса равномерно распределена по всей длине балки, то $M = \frac{33}{140}(m_0 + m_1)$.

Поскольку плотность УНВ составляет 2.2 г/см³ [4], то масса УНВ с диаметром 100 нм и длиной 1.5 мкм составит $m_0 = 3.3 \cdot 10^{-14}$ г. В нашем эксперименте время экспонирования УНВ под электронным пучком определялось временем измерения АЧХ и равнялось 60 с. Экспериментально установлено, что за это время под действием сфокусированного электронного пучка СЭМ на поверхности УНВ осаждается $\sim 10^{-16}$ г углерода, т. е. $m_1 \ll m_0$.

Принимая во внимание малость добавочной массы, оценим из (4) изменения резонансной частоты для описанных выше 2 случаев.

Для случая, когда сканирование выполняется вдоль одной линии, пересекающей вершину УНВ:

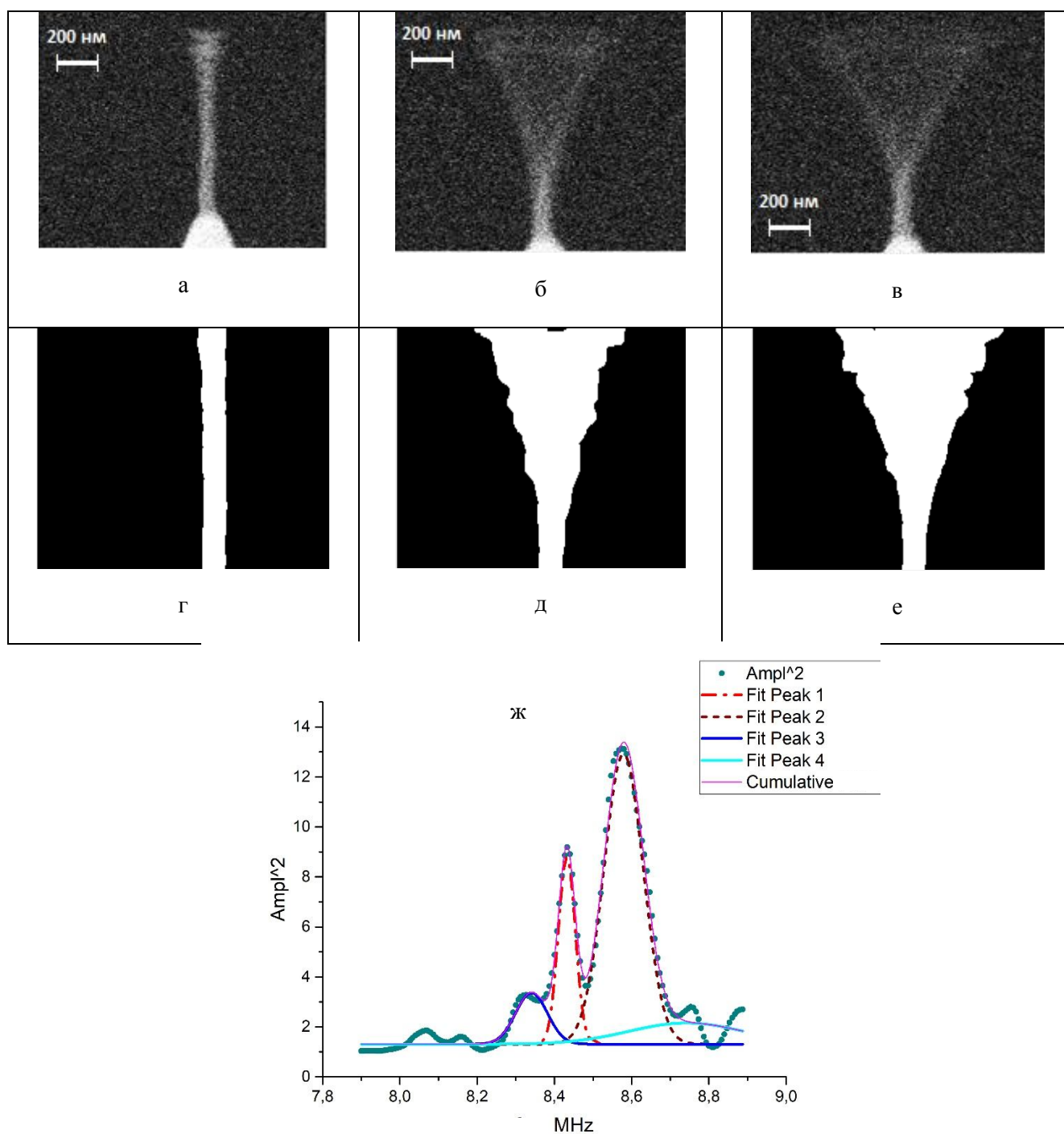


Рис. 5. Анализ АЧХ УНВ сложной формы.

а — состояние покоя; б — колебания с амплитудой, соответствующей Peak 1; в — колебания с амплитудой, соответствующей Peak 2; г, д, е — бинарные изображения УНВ, соответствующие состояниям а, б, в; ж — АЧХ колебаний и ее аппроксимация множественными пиками, имеющими форму лоренциана

$$\Omega \approx \Omega_0 \left(1 - \frac{70m_1}{33m_0} \right).$$

(5) Для случая, когда УНВ полностью находится в поле сканирования СЭМ:

$$\Omega \approx \Omega_0 \left(1 + \frac{m_1}{m_0} \right). \quad (6)$$

Тогда из выражения (5) следует, что при сканировании по линии, когда добавленная масса локализуется на вершине УНВ, его резонансная частота должна уменьшиться на 0.7 % от начальной частоты, а, как следует из (6), при сканировании по кадру, когда добавленная масса распределяется по всей длине УНВ, его резонансная частота должна увеличиться на 0.3 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Предложены методика автоматизации измерения АЧХ НМО в виде УНВ, локализованного на вершине металлической иглы, основанная на анализе видеопоследовательности одномерных и двумерных СЭМ-изображений методом машинного зрения. Методика апробирована при измерении АЧХ УНВ с резонансной частотой ~ 10 МГц. Аппроксимация АЧХ функцией Лоренца позволяет оценить резонансную частоту главного пика и его добротность в автоматическом режиме, а также извлечь соответствующие параметры из АЧХ с множественными пиками в интерактивном режиме. Показано, что предложенный алгоритм автоматизации измерений позволяет выявить тонкую структуру на АЧХ, что важно при исследовании сложных колебаний. Обнаружена различная степень влияния электронного пучка на измерение АЧХ нановискера при записи одномерных и двумерных СЭМ-изображений. Выбор способа измерения АЧХ из двух, предложенных в данной работе, должен определяться характером решаемой задачи.

Работа выполнена в рамках Государственного задания, № госрегистрации НИР АААА-А16-116041110123-5 от 11-04-2016.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jensen K., Kim K., Zettl A. An atomic-resolution nanomechanical mass sensor // *Nature Nanotechnology*. 2008. Vol 3, no. 9. P. 533–537. Doi: 10.1038/nnano.2008.200.

2. Stapfner S., Favero I., Hunger D., Paulitschke P., Reichel J. Cavity nano-optomechanics: a nanomechanical system in a high finesse optical cavity // *Proc. of SPIE*. 2010. Vol. 7727. Doi: 10.1117/12.854066.
3. Ishida M., Fujita J.-ichi, Ochiai Y. Density estimation for amorphous carbon nanopillars grown by focused ion beam assisted chemical vapor deposition // *Journal Vacuum Science Technology B*. 2002. Vol. 20, no. 6. P. 2784–2787. Doi: 10.1116/1.1526699.
4. Mukhin I., Fadeev I., Zhukov M., Dubrovskii V., Golubok A.O. Framed carbon nanostructures: Synthesis and applications in functional SPM tips // *Ultramicroscopy*. 2015. Vol. 148. P. 151–157. Doi: 10.1016/j.ultramic.2014.10.008.
5. Fujita J.-ichi, Okada S., Ueki R. Elastic double structure of amorphous carbon pillar grown by focused-ion-beam chemical vapor deposition // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2007. Vol. 46. P. 6286–6289. Doi: 10.1143/JJAP.46.6286.
6. Gonzales R.C., Woods R.E. Digital image processing. 2nd edition. 2002. Pearson Education, Inc, Prentice Hall.
7. Madsen K., Nielsen H.B., Tingleff O. Methods for non-linear least squares problems. 2nd Edition, April 2004 Informatics and Mathematical Modelling Technical University of Denmark. 58 p.
8. Weaver-jr. W., Timoshenko S.P., John D.H. Vibration Problems in Engineering. 5th edition, Wiley & Sons Inc., New Jersey, USA, 1999.

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург (Горбенко О.М., Фельштын М.Л., Лукашенко С.Ю., Сапожников И.С., Голубок А.О.)

Университет ИТМО, Санкт-Петербург (Лукашенко С.Ю., Голубок А.О.)

Контакты: Горбенко Ольга Марковна,
gorolga64@mail.ru

Материал поступил в редакцию: 25.06.2018

MEASUREMENT OF AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF NANOMECHANICAL OSCILLATORS BY VISUALIZATION OF THEIR OSCILLATIONS IN A SCANNING ELECTRON MICROSCOPE

O. M. Gorbenko¹, M. L. Felshtyn¹, S. Yu. Lukashenko^{1,2},
I. D. Sapozhnikov¹, A. O. Golubok^{1,2}

¹*Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint-Petersburg, Russia*

²*Department of Nano-Photonics and Metamaterials, ITMO University, Saint-Petersburg, Russia*

In this article we propose and test the method of automated measurement of amplitude-frequency characteristics (AFC) of nanomechanical oscillators (NMOS) in the form of carbon nanoviskers (CNV) with a diameter of ~ 100 nm, a length of $\sim (1-2)$ μm and a resonance frequency of $\sim (5-10)$ MHz localized at the top of the W needle is proposed and tested. The frequency response of NMOS was measured by visualizing their forced oscillations in a scanning electron microscope (SEM) and recording the corresponding video file when the frequency of the exciting generator changed. The resulting video sequence is analyzed by machine vision. The result of the processing of SEM images are the graph of frequency response, numerical values of the resonance frequency and quality factor of NMOS. We analyze two methods of measuring the frequency response: scanning alone the line crossing the CNV near its peak and scanning across the frame, including the entire CNV. We suggest the method of the NMO resonance frequency shift resulting from the deposition of carbon atoms on the surface of the UNV under the action of a focused electron beam in the process of visualization of oscillations in the SEM is estimated. It is shown that the one line scanning during 60 s leads to a decrease in the resonant frequency by ~ 1.5 %, while scanning through the frame during 60 s leads to its increase of ~ 3 %.

Keywords: nanomechanical oscillators, carbon nanovisker, image analysis, amplitude-frequency characteristic

REFERENCES

1. Jensen K., Kim K., Zettl A. An atomic-resolution nanomechanical mass sensor. *Nature Nanotechnology*, 2008, vol 3, no. 9, pp. 533–537. Doi: 10.1038/nnano.2008.200.
2. Stapfner S., Favero I., Hunger D., Paulitschke P., Reichel J. Cavity nano-optomechanics: a nanomechanical system in a high finesse optical cavity. *Proc. of SPIE*, 2010, vol. 7727. Doi: 10.1117/12.854066.
3. Ishida M., Fujita J.-ichi, Ochiai Y. Density estimation for amorphous carbon nanopillars grown by focused ion beam assisted chemical vapor deposition. *Journal Vacuum Science Technology B*, 2002, vol. 20, no. 6, pp. 2784–2787. Doi: 10.1116/1.1526699.
4. Mukhin I., Fadeev I., Zhukov M., Dubrovskii V., Golubok A.O. Framed carbon nanostructures: Synthesis and applications in functional SPM tips. *Ultramicroscopy*, 2015, vol. 148, pp. 151–157. Doi: 10.1016/j.ultramicro.2014.10.008.
5. Fujita J.-ichi, Okada S., Ueki R. Elastic double structure of amorphous carbon pillar grown by focused-ion-beam chemical vapor deposition. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, vol. 46. pp. 6286–6289. Doi: 10.1143/JJAP.46.6286.
6. Gonzales R.C., Woods R.E. *Digital image processing*. 2nd edition. Pearson Education, Inc, Prentice Hall, 2002. 793 p.
7. Madsen K., Nielsen H.B., Tingleff O. *Methods for non-linear least squares problems*. 2nd edition. Informatics and Mathematical Modelling Technical University of Denmark, April 2004. 58 p.
8. Weaver-jr. W., Timoshenko S.P., Young D.H. *Vibration Problems in Engineering*. 5th edition. Wiley & Sons Inc., New Jersey, USA, 1990. 624 p.

Contacts: Gorbenko Ol'ga Markovna,
gorolga64@mail.ru

Article received in edition 25.06.2018