

УДК 534.1, 539.3

**И. В. Уваров**, мл. науч. сотр.,  
e-mail: ilnik88@mail.ru,

**В. В. Наумов**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,  
e-mail: vvnau@rambler.ru,

**И. И. Амиров**, д-р физ.-мат. наук, зам. директора  
по научной работе,  
Ярославский филиал Физико-технологического  
института РАН, Ярославль

## РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОКАНТИЛЕВЕРОВ

*Поступила в редакцию 25.12.2012*

*Исследованы резонансные свойства трехслойных металлических кантилеверов, имеющих толщину 40 нм. Были изготовлены два типа кантилеверов: Cr—Al—Cr и Ti—Al—Ti. Резонансные частоты кантилеверов определялись по экспериментально полученным резонансным кривым. Возбуждение колебаний кантилеверов осуществлялось электрическими силами, для регистрации колебаний применялся метод светового рычага. Экспериментально получены зависимости первой и второй резонансных частот кантилеверов от длины и ширины. Проведен анализ экспериментальных данных, а также сравнение с результатами расчетов. Обсуждается связь резонансных свойств с формой и материалом нанокантилеверов.*

**Ключевые слова:** наноэлектромеханические системы, нанокантилевер, резонансная частота, изгибные колебания, световой рычаг, шероховатость

Кантилеверы широко применяются в МЭМС и НЭМС. Они используются в биосенсорах [1], детекторах различных веществ [2] и др. Уменьшение размеров кантилеверов позволяет снизить энергопотребление и повысить чувствительность устройств, поэтому использование нанокантилеверов возрастает. Применение металла в качестве структурного материала кантилеверов связано с определенными трудностями, так как металлические пленки имеют зернистую структуру, высокую шероховатость поверхности и содержат остаточные напряжения. В то же время металлы пластичны и являются проводниками. Для производства изделий, в которых кантилевер должен быть проводящим (например, наномеханических переключателей [3]), необходимо уметь изготавливать металлические кантилеверы. В данной работе исследуются резонансные свойства сверхтонких металлических кантилеверов, имеющих трехслойную структуру.

Исследованные нанокантилеверы состояли из трех слоев металла и изготавливались в двух вариантах: Cr—Al—Cr и Ti—Al—Ti. Маршрут изготовления кантилеверов показан на рис. 1. На окисленную КДБ-пластину (кремний дырочного типа проводимости, легированный бором) (толщина слоя SiO<sub>2</sub> составляла 0,9 мкм) магнетронным напылением наносился жертвенный слой аморфного кремния ( $\alpha$ -Si) толщиной 2 мкм. Затем пластина покрывалась слоем позитивного фоторезиста, в котором методом контактной фотолитографии выполнялся рисунок кантилеверов (рис. 1, а). Магнетронным напылением на пластину наносились

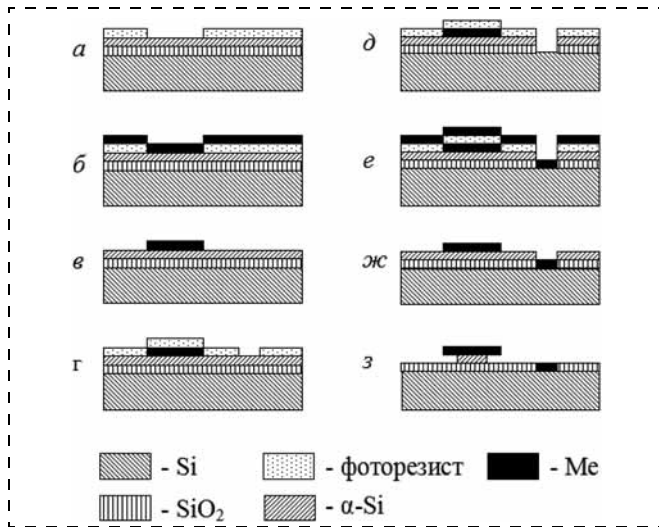


Рис. 1

структурные слои металла (Cr—Al—Cr или Ti—Al—Ti толщами 5—30—5 нм), затем оставшийся фоторезист удалялся (взрывная литография, рис. 1, б, в). Далее пластина снова покрывалась слоем фоторезиста, в котором методом контактной фотолитографии наносился рисунок контактной площадки (рис. 1, г). Через окно в слое фоторезиста выполнялось травление слоя  $\alpha$ -Si в плазме  $SF_6$  и травление слоя  $SiO_2$  в растворе  $NH_4F$  (рис. 1, д). Затем напылялся слой Al толщиной 100 нм и осуществлялся "взрыв" (рис. 1, е, ж). Далее удалялся жертвенный слой  $\alpha$ -Si из-под кантилеверов в плазме  $SF_6$  и происходило освобождение кантилеверов (рис. 1, з). Таким образом, воздушный зазор между кантилеверами и слоем  $SiO_2$  составлял 2 мкм. Изготавливаемые кантилеверы имели длину от 10 до 100 мкм, ширину от 2 до 10 мкм и толщину 40 нм. На рис. 2 показано СЭМ-изображение нанокантилеверов размерами 10 мкм  $\times$  4 мкм  $\times$  40 нм. Толщина кантилеверов измерялась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Zeiss Supra-40 и профилометра TALYSTER фирмы Taylor—Hobson. Наличие тонких слоев Cr и Ti контролировалось с помощью ВИМС (вторично-ионный масс-спектрометр) IONTOF SIMS5.

Измерялись резонансные кривые нанокантилеверов. Колебания кантилеверов возбуждались электромагнитным полем и регистрировались методом светового рычага. Описание экспериментальной установки и процедуры измерения можно найти в работе [4]. Измерения проводили в воздухе при нормальных условиях. По резонансным кривым определялись резонансные частоты кантилеверов.

На экспериментально полученных резонансных кривых (рис. 3) наблюдались, как правило, не менее двух пиков. Пики могут соответствовать изгибным и крутильным колебаниям кантилевера. Согласно классической теории балок Эйлера—Бернулли собственные частоты изгибных колебаний кантилевера длиной  $L$  и толщиной  $t$ , состоящего в

направлении оси  $z$  (по толщине) из  $N$  слоев с толщинами  $t_i$ , плотностями  $\rho_i$  и модулями Юнга  $E_i$ , задаются выражением [5]

$$f_n^{\text{изг}} = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{k_n^2}{2\pi L^2} \left( \frac{\int E(z-z_0)^2 dz}{\sum_{i=1}^N (t_i \rho_i)} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\omega_n$  — круговая частота;  $k_n$  — соответствующая  $n$ -й частоте постоянная ( $k_n = 1,8751; 4,6941$  для первой и второй моды соответственно);  $z_0$  — координата нейтральной линии кантилевера. Собственные частоты крутильных колебаний кантилевера задаются выражением

$$f_n^{\text{крут}} = \frac{(2n-1)\sqrt{3}}{wL} \left( \frac{\int G(z-z_0)^2 dz}{\sum_{i=1}^N (t_i \rho_i)} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$ ,  $w$  — ширина кантилевера,  $G$  — модуль сдвига. Выражения (1) и (2) использовались при расчете собственных частот кантилеверов. При этом кантилеверы полагались трехслойными: внешние слои Cr или Ti толщиной по 5 нм каждый, внутренний слой Al толщиной 30 нм. Использовались следующие значения модулей Юнга, модулей сдвига и плотностей:  $E_{Cr} = 279$  ГПа,  $E_{Ti} = 112$  ГПа,  $E_{Al} = 70$  ГПа,  $G_{Cr} = 115$  ГПа,  $G_{Ti} = 41$  ГПа,  $G_{Al} = 26$  ГПа,  $\rho_{Cr} = 7150$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{Ti} = 4506$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{Al} = 2700$  кг/м<sup>3</sup>.

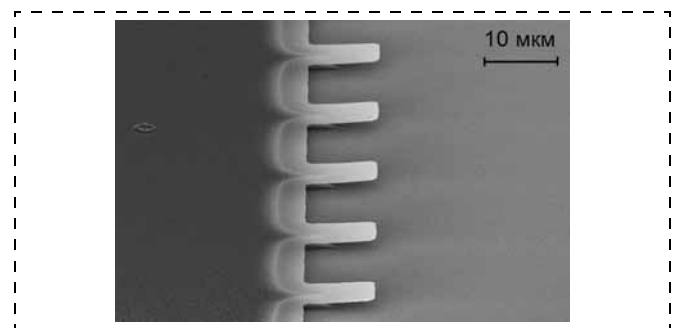


Рис. 2

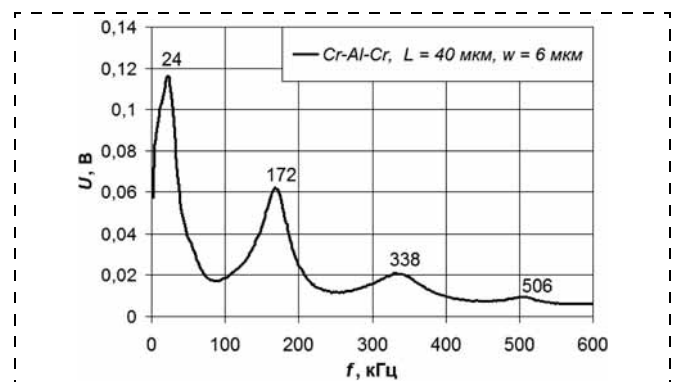


Рис. 3

Добротности кантилеров, рассчитанные по первым двум резонансным пикам, составляли порядка 4. Расчеты показывают, что таким добротностям соответствует сдвиг резонансной частоты относительно собственной не более чем на 3%. Это позволяет не учитывать демпфирование при сравнении измеренных резонансных частот с собственными частотами нанокантилеров.

На рис. 4, а и б показаны зависимости 1-й и 2-й резонансных частот кантилеров Cr—Al—Cr от длины кантилера. Маркеры соответствуют экспериментальным данным, линии — результатам расчетов с помощью выражения (1). Видно, что в случае первой резонансной частоты (рис. 4, а) экспериментальные данные хорошо согласуются с теорией для первой изгибной моды. Характер зависимости соблюдается для кантилеров различной ширины. В случае второй резонансной частоты наблюдается расхождение эксперимента с теорией для второй изгибной моды, особенно у кантилеров длиной 10 мкм (рис. 4, б). Если предположить, что вторая резонансная частота соответствует крутильной моде, то должна наблюдаться обратная зависимость частоты от ширины кантилера (см. выражение (2)). На рис. 4, б такой зависимости не наблюдается.

На рис. 5, а и б показаны экспериментально полученные зависимости 1-й и 2-й резонансных частот кантилеров от ширины кантилера. Видно, что с увеличением ширины резонансные частоты кантилеров увеличиваются. Это говорит о том, что и 1-я, и 2-я частоты не могут соответствовать крутильным модам, так как согласно (2) частоты крутильных мод должны уменьшаться с ростом ширины кантилера. В то же время, согласно (1), частоты изгибных мод не должны зависеть от ширины. Наблюдаемый рост частоты может быть вызван дефектами, возникающими в процессе изготовления кантилеров [6]. Одним из таких дефектов является неполное удаление жертвенного слоя из-под кантилера. На рис. 2 виден остаток слоя  $\alpha$ -Si под кантилерами в области крепления к опорной площадке. Чем больше ширина кантилера, тем больше аморфного кремния необходимо удалить, чтобы освободить его. Кантилеры различных длин и ширин освобождались одновременно. Поэтому чем шире был кантилер, тем длиннее была неосвобожденная область и тем меньше была эффективная длина кантилера. Поэтому более широкие кантилеры имели более высокие резонансные частоты изгибных колебательных мод.

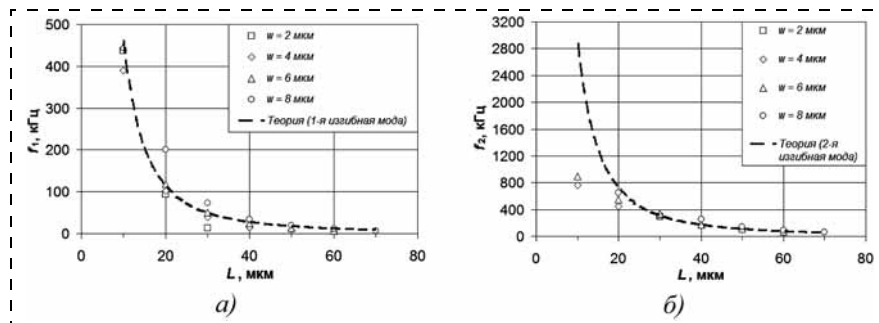


Рис. 4

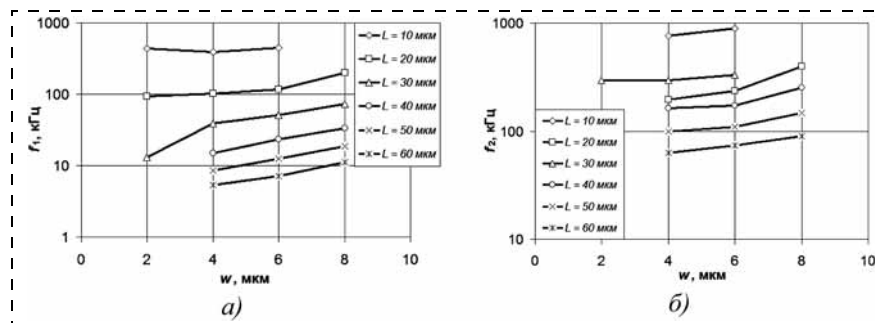


Рис. 5

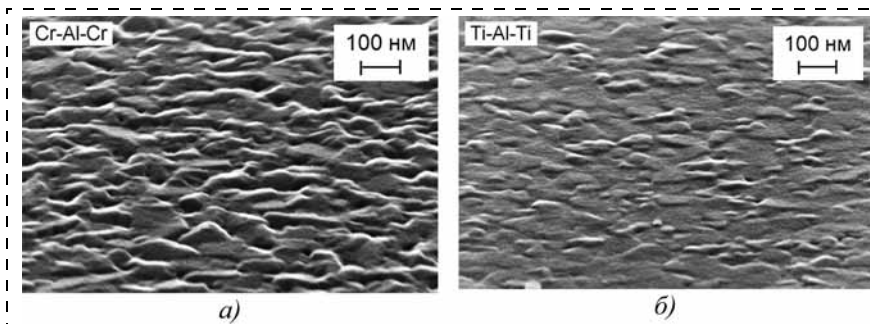


Рис. 6

На рис. 6 показаны СЭМ-изображения поверхности кантилеров Cr—Al—Cr и Ti—Al—Ti, полученные под углом 30° к поверхности. Видна зернистая структура металлической пленки. Латеральные размеры зерен у образцов Cr—Al—Cr и Ti—Al—Ti были одинаковыми и составляли порядка 50...100 нм. Также видно, что неровности на поверхности кантилера Ti—Al—Ti имеют меньшую высоту, чем на поверхности Cr—Al—Cr.

На рис. 7 показаны экспериментально полученные значения 1-й резонансной частоты кантилеров Cr—Al—Cr и Ti—Al—Ti шириной 6 мкм, а также рассчитанные по формуле (1) зависимости 1-й резонансной частоты от длины кантилера. Согласно расчетам, резонансные частоты кантилеров Cr—Al—Cr должны быть несколько выше, чем Ti—Al—Ti. В эксперименте не было обнаружено систематических различий в резонансных частотах кантилеров Cr—Al—Cr и Ti—Al—Ti. Это может говорить о том, что слои Cr и Ti толщиной 5 нм с учетом шероховатости поверхности кантилера практически не отличались друг от друга по упругим свойствам.

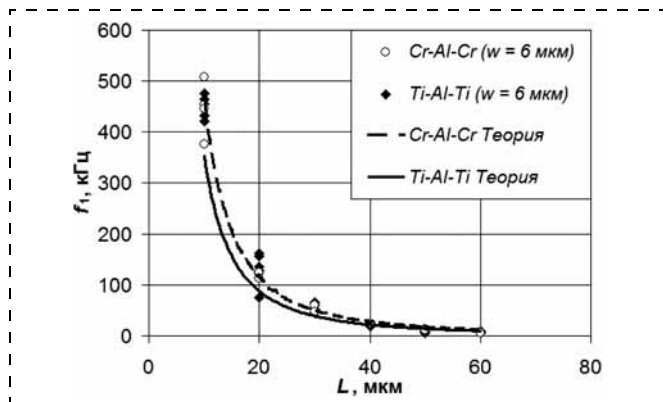


Рис. 7

В работе исследовались резонансные свойства трехслойных металлических кантилеверов Cr—Al—Cr и Ti—Al—Ti толщиной 40 нм. Были экспериментально получены зависимости 1-й и 2-й резонансных частот от длины и ширины кантилеверов. Обе резонансные частоты соответствовали изгибным колебаниям кантилевера. Экспериментально полученные значения 1-й резонансной частоты хорошо согласуются с расчетной зависимостью частоты от длины кантилевера. В случае 2-й резонансной частоты наблюдается расхождение с теорией для кантилеверов длиной 10 мкм. Наблюдается увеличение резонансных частот с ростом

ширины кантилевера. Возможно, это связано с неполным освобождением широких кантилеверов. Cr—Al—Cr кантилеверы имели более шероховатую поверхность, чем Ti—Al—Ti. Разница в шероховатости поверхности могла привести к тому, что кантилеверы двух типов имели практически одинаковые резонансные свойства.

*Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП "Диагностика микро- и наноструктур" при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, а также РФФИ (грант № 10-07-00447-а).*

#### Список литературы

1. Arlett J. L., Myers E. B., Roukes M. L. Comparative advantages of mechanical biosensors // Nature Nanotechnology. 2011. Vol. 6. P. 203—215.
2. Boisen A., Dohn S., Keller S. S. et al. Cantilever-like micromechanical sensors // Reports on Progress in Physics. 2011. Vol. 74, N 3. 036101.
3. Loh O. Y., Espinosa H. D. Nanoelectromechanical contact switches // Nature Nanotechnology. 2012. Vol. 7. P. 283—295.
4. Уваров И. В., Наумов В. В., Аминов М. К. и др. Исследование резонансных характеристик металлических микро- и нанобалок // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 12. С. 45—48.
5. Sandberg R., Svendsen W., Molhave K. et al. Temperature and pressure dependence of resonance in multi-layer microcantilevers // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2005. Vol. 15, V. 8. P. 1454—1458.
6. Guillon S., Saya D., Mazonq L. et al. Effect of non-ideal clamping shape on the resonance frequencies of silicon nanocantilevers // Nanotechnology. 2011. Vol. 22, N 24. 245501.