

---

---

УДК 621.3.049

**И. В. Уваров**, мл. науч. сотр.,  
**В. В. Наумов**, ст. науч. сотр.,  
**М. К. Аминов**, вед. электроник,  
**А. Н. Куприянов**, мл. науч. сотр.,  
**И. И. Амиров**, д-р физ.-мат. наук, зам. дир-ра  
Ярославский филиал Учреждения Российской  
академии наук Физико-технологического института  
РАН, г. Ярославль,  
e-mail: ilnik88@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МИКРО- И НАНОБАЛОК

*Поступила в редакцию 04.10.2011*

*Исследуются резонансные характеристики трехслойных  
металлических микро- и нанобалок толщиной от 60 до 180 нм.*

*Колебания балок возбуждаются электростатически, регистрация колебаний осуществляется оптическим методом. Получены зависимости резонансных частот балок от геометрических параметров балок. Выполнено сравнение экспериментальных данных с результатами аналитических расчетов и численного моделирования.*

**Ключевые слова:** *металлические микро- и нанобалки, многослойные балки, электростатическое возбуждение, резонансная частота*

### Введение

Балочные структуры — простейшие элементы микро- и наномеханических устройств. Область их применения чрезвычайно широка и продолжает расширяться. Малая масса и высокая резонансная частота позволяют использовать их в качестве высокочувствительных частотных сенсоров массы [1], а нанесение на поверхность балок особых слоев способно сделать их чувствительными только к определенным частицам [2]. Возможность соз-

дания балок с перестраиваемой в широких пределах резонансной частотой позволяет использовать их в качестве фильтрующих элементов при обработке сигналов [3]. На основе микробалок изготавливают различные ВЧ-переключатели, отличающиеся малыми габаритными размерами и низким энергопотреблением [4].

В современных устройствах важную роль играют резонансные свойства балок. Регистрация адсорбированных балкой частиц зачастую осуществляется по сдвигу резонансной частоты. Для многих применений, например в микромеханических фильтрах, требуется изготовление микро- и нанобалок с заданными резонансными свойствами. Уменьшение размеров балок влечет за собой рост их резонансных частот и позволяет повышать чувствительность балочных сенсоров. Однако с уходом в наноразмеры возникают проблемы, связанные с технологией изготовления таких устройств. Остаточные напряжения в тонкопленочных материалах приводят к деформации микро- и нанобалок. Один из путей решения данной проблемы — изготовление многослойных структур. В данной работе приведены результаты исследования резонансных свойств трехслойных металлических микро- и нанобалок.

### Изготовленные образцы и измерительный стенд

В ЯФ ФТИАН были изготовлены образцы, представляющие собой металлические опорные площадки (три слоя металла:  $x$  (нм) — Cr;  $10x$  — Al;  $x$  — Cr), выполненные на окисленной кремниевой подложке магнетронным распылением. По краям опорных площадок расположены балки размерами  $20 \times 2$ ;  $40 \times 2$ ;  $20 \times 4$ ;  $40 \times 4$ ;  $20 \times 6$  и  $40 \times 6$  мкм (длина  $\times$  ширина). При изготовлении балочных структур жертвенным слоем служил слой аморфного кремния толщиной 1 мкм. Были изготовлены образцы с общей толщиной слоев металлов 60 ( $x = 5$ ), 120 ( $x = 10$ ) и 180 ( $x = 15$ ) нм. На рис. 1 изображены балки размерами  $20 \times 4 \times 0,06$  мкм.

Резонансные характеристики балок измеряли с помощью собранного в ЯФ ФТИАН оптического стенда, принцип работы которого показан на рис. 2. Луч гелий-неонового лазера 1 с длиной волны 628 нм фокусировался  $40\times$  объективом на поверхность балки 2. Отраженный от поверхности луч попадал на позиционно-чувствительный фотоприемник (ФП) 3. Основной эле-

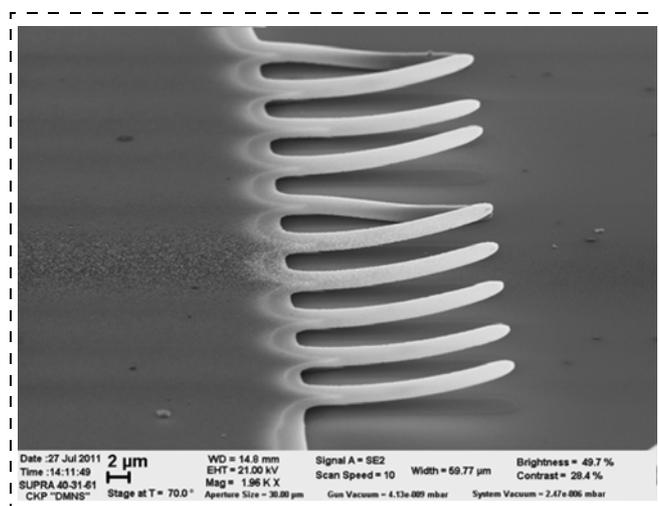


Рис. 1.

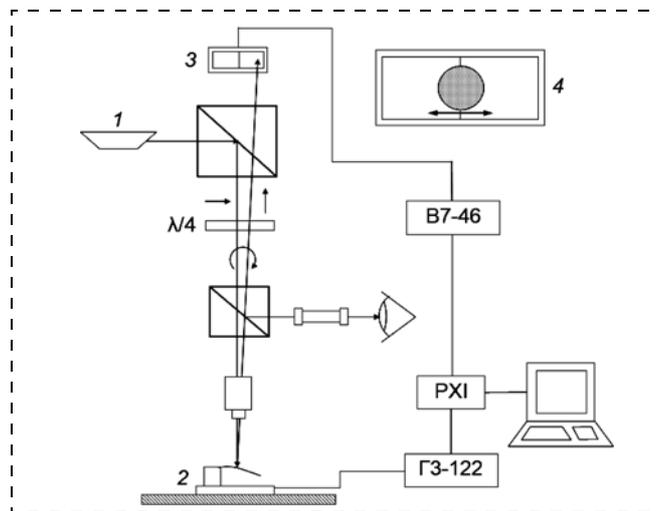


Рис. 2.

мент ФП — двухсекторный фотодиод 4. Сигналы с секторов фотодиода поступали на дифференциальный усилитель, так формировался выходной сигнал ФП.

Возбуждение колебаний балки осуществлялось подачей переменной разности потенциалов с помощью прецизионного генератора ГЗ-122 на металлическую площадку образца и на кремниевую подложку. Сигнал с выхода ФП поступал на вольтметр В7-46. Приборами ГЗ-122 и В7-46 управлял персональный компьютер через интерфейс КОП (канал общего пользования) с помощью модульной платформы PXI National Instruments и программного обеспечения, написанного в среде LabView. Был обеспечен автоматический съем резонансной кривой образца в заданном интервале частот с заданным шагом по частоте (максимальный диапазон частот — от 0 до 1 МГц, минимальный шаг по частоте — 0,001 Гц). По резонансной кривой определялись резонансные частоты балки. Измерения проводили в воздухе при нормальных условиях. Резонансная кривая балки размерами  $40 \times 4 \times 0,18$  мкм, снятая с шагом 1 кГц при амплитуде возбуждения 15 В, показана на рис. 3.

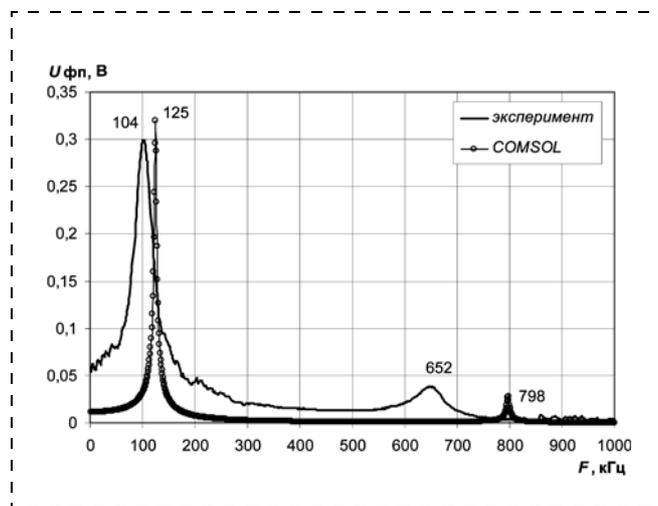


Рис. 3.

## Аналитический расчет

Резонансные частоты изгибных колебаний балки, имеющей длину  $L$ , ширину  $w$ , толщину  $t$  и состоящей в направлении оси  $z$  (по толщине) из  $N$  слоев с толщинами  $t_i$ , плотностями  $\rho_i$  и модулями Юнга  $E_i$ , без учета демпфирования задаются выражением [5]

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

где  $k_n$  — соответствующая  $n$ -й частоте постоянная ( $k_n \approx 1,8751, 4,6941, 7,8548, \dots$ ),  $z_0$  — положение нейтральной оси, т. е. линии, которая не меняет свою длину при изгибе балки. В нашем случае балка состояла из трех слоев (нм): ( $0 < z < x$ ) — Cr; ( $x < z < 11x$ ) — Al; ( $11x < z < 12x$ ) — Cr;  $t = 12x$  нм,  $z_0 = 6x$ . Используя эти данные, выражение (1) можно привести к виду

$$f_n = \frac{k_n^2}{24\pi L^2} t \left( \frac{91 E_{Cr} + 125 E_{Al}}{3(\rho_{Cr} + 5\rho_{Al})} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

Выражение (2) было использовано для расчета собственных частот исследуемых балок (использовались значения  $E_{Cr} = 279$  ГПа,  $\rho_{Cr} = 7150$  кг/м<sup>3</sup>,  $E_{Al} = 70$  ГПа,  $\rho_{Al} = 2700$  кг/м<sup>3</sup>,  $x = 5, 10, 15$  нм).

## Компьютерное моделирование

Колебания балок исследовали в воздухе при атмосферном давлении, поэтому необходимо было учитывать влияние воздушного демпфирования на резонансные характеристики балок. Режим, в котором находится исследуемая система, можно определить, рассчитав число Кнудсена [6]

$$Kn = \frac{\lambda}{w}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  — длина свободного пробега молекул газа;  $w$  — ширина балки. При длине свободного пробега молекул воздуха 70 нм (атмосферное давление) и ширине балки 2 мкм значение  $Kn \approx 0,03$ . Поэтому полагалось, что исследуемая система находится в вязкостном режиме (*viscous damping*) — затухание в системе обусловлено силами, действующими на движущуюся балку со стороны вязкой среды. В данном случае для нахождения сил, действующих на балку со стороны воздуха, необходимо решать уравнения Навье—Стокса и непрерывности [7]:

$$\rho_{gas} \left( \frac{\partial U}{\partial t} + (U \nabla) U \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 U + \frac{\eta}{3} \nabla(\nabla U); \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla(\rho_m U) = 0, \quad (5)$$

где  $\rho_{gas}$  и  $\eta$  — плотность и вязкость газа;  $U$  — скорость течения газа;  $p$  — давление;  $\nabla$  — оператор набла. Для решения этих уравнений была использована программа COMSOL Multiphysics (метод конечных элементов).

При моделировании в COMSOL задавалась идеальная форма балки — балка трехслойная, плоская, с прямоугольными краями. Изготовленные балки имели изогнутую форму (см. рис. 1), поэтому при моделировании в качестве значения воздушного зазора между балкой и

подложкой выбиралось среднее по длине изготовленных балок значение воздушного зазора, которое составляло около 3 мкм. На рис. 3 показана резонансная кривая, полученная моделированием в COMSOL при давлении воздуха 1 атм и воздушном зазоре 3 мкм. Видно, что экспериментально полученная и смоделированная резонансные кривые качественно схожи.

## Анализ полученных данных

На рис. 4 изображены зависимости 1-й и 2-й резонансных частот ( $f_1$  и  $f_2$ ) балок размерами  $40 \times 4$  мкм от толщины балки. Несмотря на то, что формула (1) не учитывает влияние воздушного демпфирования на резонансные частоты балок, значения резонансных частот, рассчитанные теоретически, не сильно отличались от значений, полученных в COMSOL. В работе [8] было показано, что в исследуемом режиме воздушное демпфирование не сильно влияет на резонансные частоты балок. Тем не менее, экспериментально полученные значения резонансных частот лежали, как правило, ниже соответствующих теоретических значений.

Согласно выражению (2), резонансные частоты балок должны линейно зависеть от величины  $t/L^2$ . Зависимости, полученные для 1-й и 2-й резонансных частот с помощью (2), а также экспериментальные данные, показаны на рис. 5. Экспериментальные данные хорошо ложились на теоретическую прямую в случае 1-й резонансной частоты. В случае 2-й резонансной частоты экспериментальные данные лежали ниже теоретической прямой.

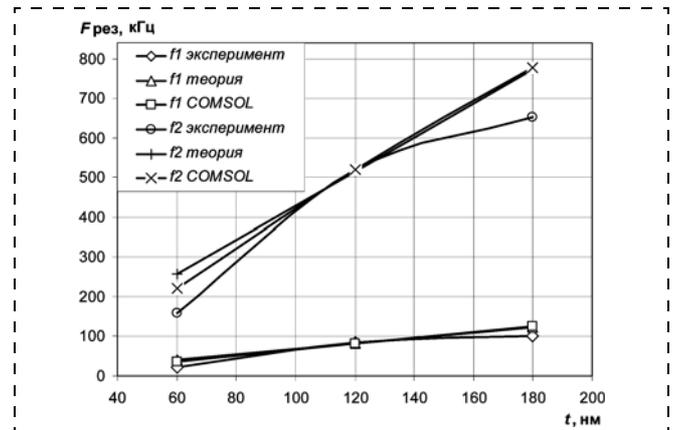


Рис. 4.

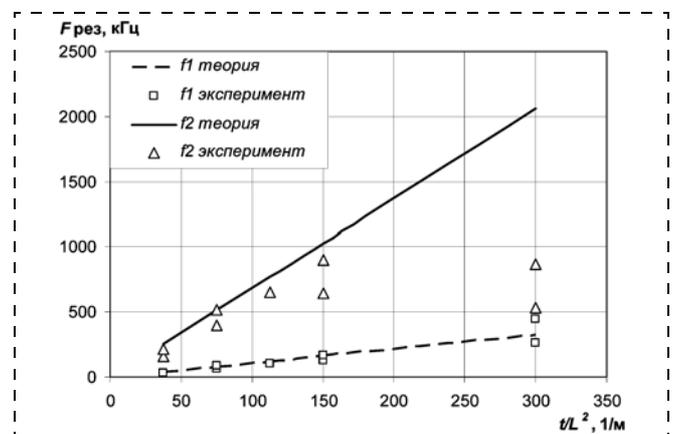


Рис. 5.

Расхождение экспериментальных данных с предсказаниями теории могло быть связано с несколькими эффектами, неучтенными в теоретических расчетах и в модели. Во-первых, балки приобрели изогнутую форму при освобождении внутренних напряжений в слоях металла, возникших в процессе изготовления [9]. Учесть влияние изгиба на резонансные частоты балки можно, задав в модели изогнутую форму балки. Моделирование в COMSOL показало, что подобный изгиб балки увеличивает ее резонансные частоты.

Во-вторых, изготовленные балки имели в местах крепления к опорной площадке непрямоугольные края. Неидеальное крепление балки к опорной площадке снижало резонансные частоты поперечных (изгибных) колебаний. Этот эффект рассмотрен в работе [10] с использованием моделирования методом конечных элементов.

В-третьих, в процессе изготовления жертвенный слой был удален не только из-под балок, но и частично из-под опорной площадки. Подтравы опорной площадки также снижали резонансные частоты, так как фактически увеличивали длину балок [10].

В-четвертых, рентгеновский энергодисперсионный анализ (анализатор INCA Energy) показал, что на поверхности балок содержание хрома было ниже, чем на поверхности опорных площадок. Это было связано с тем, что в процессе изготовления произошло частичное травление хрома с поверхности балок. По этой причине толщина изготовленных балок отличалась от номинальной, что снижало резонансные частоты балок (см. формулу (1)).

## Заключение

В работе были рассмотрены резонансные характеристики трехслойных металлических балок толщиной от 60 до 180 нм. Была исследована зависимость 1-й и 2-й резонансных частот балок от толщины. Изготовленные балки имели, как правило, более низкие резонансные частоты, чем было предсказано теорией. Это связано с тем, что форма изготовленных балок отличалась от иде-

альной: изогнутая форма балок, неидеальное крепление к опорной площадке, подтравы опорной площадки, а также частичное травление хрома с поверхности балок. Был выявлен характер влияния этих факторов на резонансные частоты. Точные количественные оценки сложно получить аналитически, требуется тщательное численное моделирование. Полученные в ходе работы данные будут полезны при проведении дальнейшей работы в области микро- и нанорезонаторов.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-07-00447-а.*

## Список литературы

1. **Datskos P. G., Thundat T., Lavrik N. V.** Micro and Nanocantilever Sensors // Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology. 2004. Vol. 5.
2. **Madinei H., Keyvani-Janbahan A., Atashparva M.** et al. Modeling of a Bio Sensor Based on Detection of Antigens Concentration Using an Electrically Actuated Micro Cantilever // Sensors & Transducers Journal. 2011. Vol. 125.
3. **Wong A.-C., Nguyen C. T.-C.** Micromechanical mixer-filters ("mixlers") // Journal of Microelectromechanical Systems. 2004. Vol. 13.
4. **Liu A. Q., Tang M., Agarwal A.** et al. Low-loss lateral micromachined switches for high frequency applications // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2005. Vol. 15.
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.
6. **Verbridge S. S., Ilic R., Craighead H. G.** et al. Size and frequency dependent gas damping of nanomechanical resonators // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 93.
7. **Senturia S. D.** Microsystem Design. Dodrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 689 p.
8. **Уваров И. В., Козин И. А., Амиров И. И.** Исследование влияния давления воздуха на динамику чувствительного элемента микромеханических устройств // Вестник ЯрГУ. 2010. № 2.
9. **Soma A., Ballestra A.** Residual stress measurement method in MEMS microbeams using frequency shift data // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2009. Vol. 19.
10. **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.