

06;08;12

## Анизотропный пьезоэффект в микроэлектромеханических системах на основе эпитаксиальных гетероструктур $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{AlAs}$

© Е.А. Вopilкин, В.И. Шашкин, Ю.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, А.Ю. Климов, В.В. Рогов, И.Ю. Шулешова

Институт физики микроструктур РАН,  
603950 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: vopilkin@ipm.sci-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 1 октября 2008 г.)

Изготовлена микроэлектромеханическая система (МЭМС), представляющая собой консольно закрепленную микробалку сечением несколько квадратных микрометров. Система создана из эпитаксиальных слоев  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$  на поверхности  $\text{GaAs}(001)$  методом селективного химического вытравливания из-под балки слоя  $\text{AlAs}$ . Исследованы две микроконсоли, расположенные на одной пластине  $\text{GaAs}(001)$  и направленные по ортогональным диагональным осям  $[110]$  и  $[\bar{1}\bar{1}0]$ . С помощью оптической интерферометрии белого света исследованы статические и динамические характеристики систем. В статическом режиме проведены измерения отклонения балок в зависимости от приложенного напряжения.

Прямым доказательством работы такого микродвигателя на основе пьезоэффекта служит взаимно противоположное смещение ортогональных микроконсолей при подаче одинакового напряжения. Рассчитанные параметры МЭМС – чувствительность и собственная частота — достаточно хорошо совпадают с измеренными значениями.

PACS: 77.65.-j, 85.85.+j

### Введение

В последние годы разрабатываются многочисленные варианты микроэлектромеханических систем (МЭМС). В частности, перспективными считаются биморфные монокристаллические МЭМС на основе  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ , использующие пьезоэффект в активном слое [1–3]. При подаче электрического напряжения консольно закрепленная микробалка сечением несколько квадратных микрометров обратимо изгибается, что в перспективе может позволить создать на основе таких МЭМС малоинерционный пьезоэлектрический движитель с небольшими токами утечки, работающий на высоких частотах вплоть до нескольких мегагерц.

Измерения на микросистемах обычно связаны с экспериментальными трудностями и могут иметь неоднозначную интерпретацию. Например, наблюдаемое колебание микроконсолей на собственной частоте механического резонанса не дает строгого доказательства пьезоэлектрической природы возбуждения колебаний, поскольку собственная частота связана лишь с механическими свойствами консольно закрепленной балки. Несмотря на достаточно большое число работ, посвященных устройствам этого типа, в литературе не было описано статических измерений, однозначно доказывающих пьезоэлектрическую природу движения микробалки.

В настоящей работе описан эксперимент с одновременным расположением на пластине двух микроконсолей, ориентированных по ортогональным диагональным направлениям  $[110]$  и  $[\bar{1}\bar{1}0]$  на поверхности  $\text{GaAs}(001)$ . С помощью оптической интерференционной системы в статическом режиме проведены измерения взаимно противоположного отклонения микробалок при приложении напряжения. Данные эксперимента согласуются

с теоретическими оценками и служат доказательством того, что природой движения консолей является пьезоэффект в  $\text{AlGaAs}$ . С помощью той же интерференционной системы оценена резонансная частота колебаний микробалок.

### Экспериментальная часть

В качестве материала для изготовления микроконсоли использована гетероструктура  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}/\text{AlAs}$ . На подложку  $\text{GaAs}$  методом металлоорганической газовой эпитаксии был нанесен слой  $\text{AlAs}$ . Затем были выращены слои легированного  $\text{GaAs}$  с  $n$ -типом проводимости и нелегированного  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ . Толщина всех слоев — около  $1\ \mu\text{m}$ . Согласно данным рентгенодифракционных исследований, слои монокристаллические, с когерентным сопряжением решеток на гетерограницах.

На рис. 1 схематически показана структура микроконсоли. Верхний контакт формировался термическим напылением на поверхность слоя золота толщиной  $100\ \text{nm}$ . Мезоструктура будущей консоли формировалась методом фотолитографии и жидкостного травления. Ширина рабочей области —  $10\ \mu\text{m}$ , длина —  $100\ \mu\text{m}$ . Селективное вытравливание „жертвенного“ слоя  $\text{AlAs}$  из-под консоли проводилось в растворе HF. Операция удаления жидкости из-под балки во избежание залипания производилась после травления и промывки деионизованной водой и ацетоном в системе критического высушивания CPD-13200 фирмы SPI путем замены ацетона на  $\text{CO}_2$  и перехода за критическую точку  $\text{CO}_2$ . Детали формирования одиночной консоли описаны в работе [4]. В отличие от [4], активным пьезоэлектрическим слоем является нелегированный слабо проводящий слой  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ .

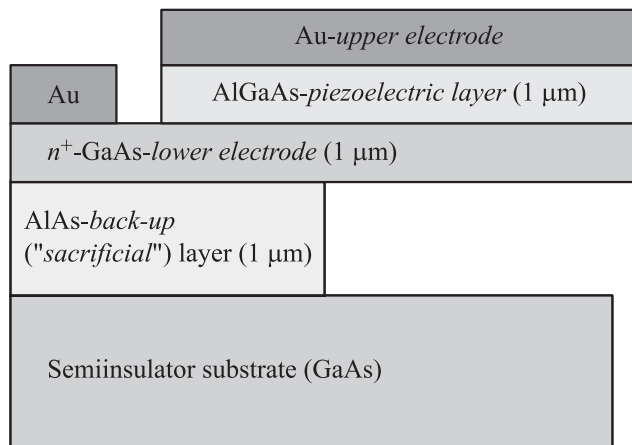


Рис. 1. Схема поперечного сечения гетероструктуры.

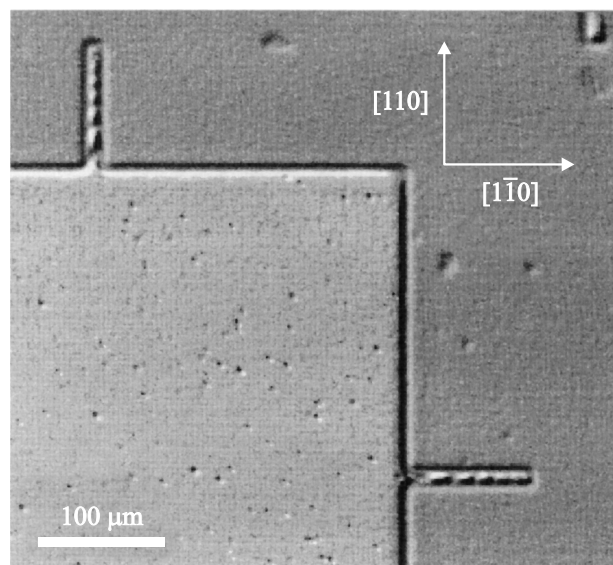


Рис. 2. Вид микросистемы в интерференционном микроскопе. Вертикальное направление —  $[110]$ , горизонтальное —  $[1\bar{1}0]$ .

Нижним электродом служит проводящий слой GaAs, в верхнем — слой металла. При приложении к верхнему металлическому электроду отрицательного смещения в нелегированном слое  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  создается электрическое поле, которое экранируется в нижнем слое  $n\text{-GaAs}$ . Ток при этом остается пренебрежимо малым вплоть до пробоя контакта Мотта.

С целью прямого сравнения работы микроконсолей двух направлений ориентации, I —  $[110]$  и II —  $[1\bar{1}0]$ , оба типа были сформированы на одной пластине, (см. их вид на рис. 2). Это обеспечило одинаковую толщину слоев и одинаковое приложенное напряжение, необходимые для количественного сравнения результатов.

Пространственное положение микроконсолей регистрировалось при помощи оптической интерферометрической системы Talysurf CCI 2000 (интерферометр белого света). Рис. 2 получен на этом приборе в режиме микроскопа, рис. 3 показывает трехмерное изображение

балки, полученное прибором в результате обработки серии изображений при движении объектива.

На электроды подавалось постоянное смещение величиной до  $10\text{ V}$ , и проводилась съемка с восстановлением трехмерной поверхности при каждом из напряжений. Для количественного измерения отклонений на каждом кадре выбирался одиночный профиль, идущий вдоль консоли с одними и теми же координатами (пунктир) на рис. 3.

На рис. 4 приведено отклонение свободного конца микроконсолей двух типов в зависимости от приложенного напряжения. Отсчет идет от их положения при нулевом смещении. Видно, что наклон этих зависимостей для консолей I и II противоположен по направлению и близок по абсолютной величине. Определенная из наклона чувствительность системы составляет около  $5.7\text{ nm/V}$ . Несмотря на достаточно большое число работ, посвященных МЭМС этого типа [1–3], в литературе не

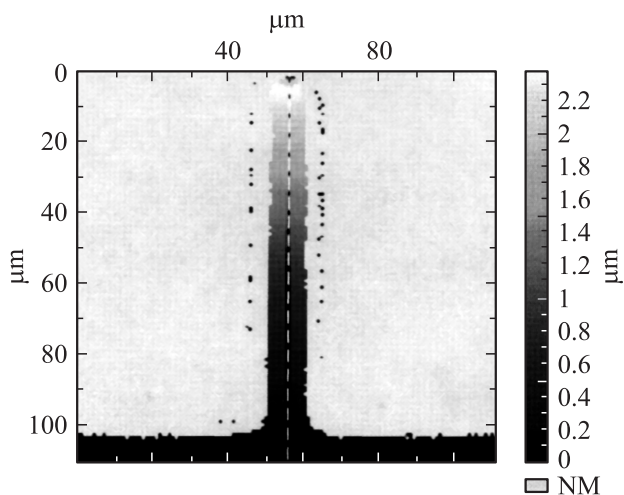


Рис. 3. Изображение микроконсоли в интерферометре.

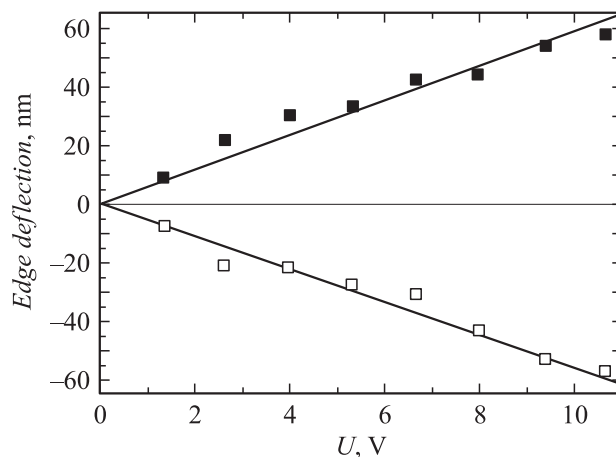
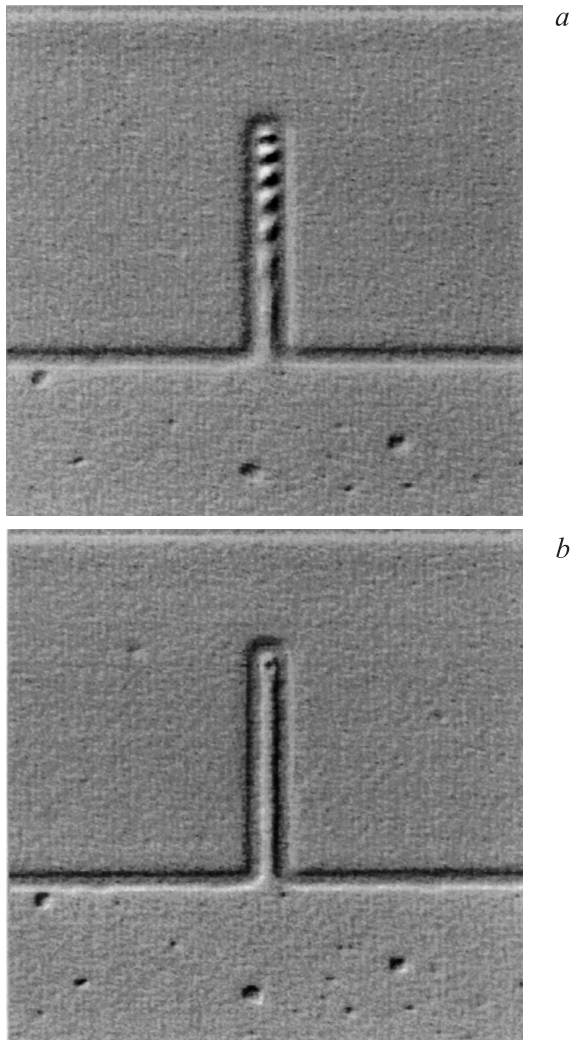


Рис. 4. Измеренное отклонение концов двух консолей от исходного состояния в зависимости от приложенного напряжения. ■ — консоль I, ориентированная вдоль  $[110]$ , вверх, □ — консоль II, ориентированная вдоль  $[1\bar{1}0]$ , отклоняется вниз.



**Рис. 5.** Изображение микроконсоли: *a* — вне резонанса, *b* — в резонансе, полученное в режиме микроскопа на интерферометре Talysurf CCI 2000.

было прямых наблюдений взаимно противоположного отклонения ортогональных консолей.

Собственная частота низшей моды механических колебаний микроконсолей измерялась также с помощью интерферометра Talysurf CCI 2000. Регистрация одного кадра системы включает пошаговое перемещение объекта и обработку полного набора изображений. По времени она занимает около 1 min, что много больше периода колебаний микроконсоли. Для поиска частоты резонансного раскачивания микробалки использован тот факт, что амплитуда качаний в резонансе становится столь большой, что размываются интерференционные полосы на изображении балки при неподвижном объективе — в режиме микроскопа.

Методом наклона устанавливалось положение образца, при котором на консоли наблюдались поперечные полосы (рис. 5, *a*). На электроды подавалось переменное напряжение с генератора амплитудой 1 V и проводилось сканирование по частоте, которая измерялась частотоме-

ром. При совпадении частоты генератора с собственной частотой низшей моды консоли наблюдаемая картина менялась: исчезали полосы на консоли (рис. 5, *b*). Резонансные частоты, измеренные таким образом в воздухе, составили 160 и 150 kHz для двух ориентаций. Данный метод не позволяет точно измерить добротность консоли, давая возможность лишь грубо оценить ее по ширине резонанса. Такая оценка дает значение  $Q \sim 100$ . Как показывают результаты работы [5], более точные измерения добротности без вакуумирования системы не добавляют информации о свойствах самой консоли, так как измеренная на воздухе добротность определяется не ее качеством, а вязким трением о воздух.

## Описание работы устройства

Описание работы МЭМС основано на уравнениях обратного пьезоэффекта в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и уравнениях механического равновесия многослойной структуры. Электрическое поле, приложенное к кристаллу GaAs или AlAs, ведет к деформации кристалла, поскольку кристалл нецентросимметричный и обладает прямым и обратным пьезоэффектом, см. [6]. Обратный пьезоэффект описывается уравнением:

$$\varepsilon_{jk} = d_{ijk}E_i, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{jk}$  — тензор деформации,  $d_{ijk}$  — тензор пьезоэлектрических модулей,  $E_i$  — вектор напряженности приложенного электрического поля, индексы  $ijk = 1, 2, 3$ .

В матричных обозначениях с индексом  $m = 1-6$  уравнение (1) записывается в виде:

$$\varepsilon_m = d_{im}E_i, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_m$  — коэффициенты, связанные с компонентами тензора деформации:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} = \varepsilon_1; \quad \varepsilon_{22} = \varepsilon_2; \quad \varepsilon_{33} = \varepsilon_3; \quad \varepsilon_{23} = \varepsilon_4/2; \\ \varepsilon_{13} = \varepsilon_5/2; \quad \varepsilon_{12} = \varepsilon_6/2; \end{aligned} \quad (3)$$

$d_{im}$  — матрица пьезоэлектрических модулей, коэффициенты которой связаны с компонентами тензора пьезомодулей:

$$\begin{aligned} d_{ijk} = d_{im}, \quad \text{если } m = 1, 2, 3; \\ d_{ijk} = d_{im}/2, \quad \text{если } m = 4, 5, 6. \end{aligned} \quad (4)$$

Вид матрицы определяется симметрией кристалла. Для кристалла с точечной группой симметрии  $\bar{4}3m$  матрица в кристаллографических координатных осях имеет вид:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где единственный независимый коэффициент  $d_{14} = -2.69 \cdot 10^{-12}$  m/V для GaAs и  $d_{14} = -3.82 \cdot 10^{-12}$  m/V

для AlAs [7–9]. В случае твердого раствора обычно используют линейную зависимость от  $x$  [7], тогда для  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  получим  $d_{14} = -3.26 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$ .

Если электрическое поле с напряженностью  $E$  приложено вдоль оси  $z$  кристалла,  $E_i = (0, 0, E)$ , то из (2) имеем единственную ненулевую компоненту

$$\varepsilon_6 = d_{36}E_3 = d_{14}E,$$

что приводит к тензору деформации следующего вида:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & \varepsilon_{12} & 0 \\ \varepsilon_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_6/2 = d_{14}E/2. \quad (7)$$

Деформация (6) — это чистый сдвиг, при котором изменяется лишь угол между осями  $x$  и  $y$  [6]. Если поворотом на  $45^\circ$  вокруг оси  $z$  перейти к диагональным осям

$$x' = (x - y)/\sqrt{2} \text{ — направление } [1\bar{1}0],$$

$$y' = (x + y)/\sqrt{2} \text{ — направление } [110],$$

то в этих осях деформация будет иметь характер „растяжение–сжатие“. Действительно, матрица преобразования системы координат имеет вид

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 0 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Преобразование тензора  $\varepsilon_{ij}$  к новым осям

$$\varepsilon'_{ij} = A_{ij}A_{ik}\varepsilon_{kj}$$

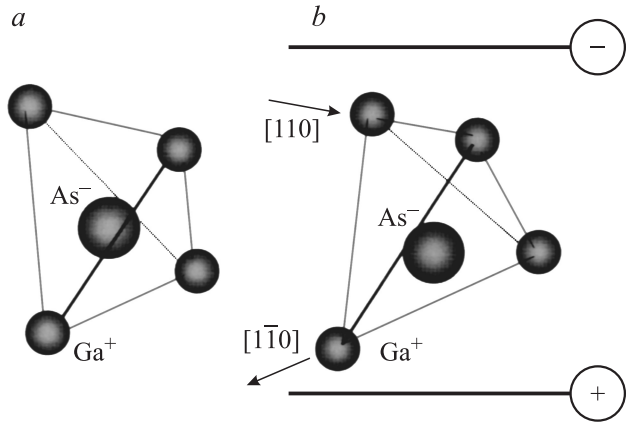
приводит к виду

$$\varepsilon'_{ij} = \begin{pmatrix} -\varepsilon_{12} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

что означает при отрицательном значении  $\varepsilon_{12}$  растяжение по направлению  $[1\bar{1}0]$  и сжатие по  $[110]$ .

Характер деформации отличается от обычных биметаллических систем и гетероэпитаксиальных композиций тем, что знаки деформации (и знаки радиусов изгиба) различны в двух ортогональных направлениях. Этот вывод предсказывает взаимно противоположное движение микроконсольей, направленных по двум ортогональным диагональным направлениям на поверхности подложки GaAs(001). За счет пьезоэффекта возникает дополнительное рассогласование периодов решетки двух слоев AlGaAs и GaAs, что создает скачок упругих деформаций на границе. При сжатии верхнего слоя AlGaAs на рис. 1 вдоль вытянутости консоли консоль изогнется вверх, при растяжении — вниз.

Результат легко объясняется исходя непосредственно из расположения атомов в структуре GaAs. Каждый



**Рис. 6.** Схема, иллюстрирующая природу деформации кристалла GaAs в электрическом поле, направленном по оси  $z$ .

анион ( $\text{As}^-$ ) окружен четырьмя катионами  $\text{Ga}^+$  (с частичным замещением на  $\text{Al}^+$  в случае твердого раствора), координационный полиэдр — правильный тетраэдр (рис. 6). В электрическом поле, направленном по оси  $z$ , анион смещается относительно центра тетраэдра катионов в направлении к нижнему ребру тетраэдра, „расталкивая“ атомы Ga нижнего ребра. Нижнее ребро растягивается, верхнее сжимается. Все тетраэдры этого типа ориентированы в кристалле одинаково, что приводит к сжатию кристалла в направлении  $[110]$ , растяжению по  $[1\bar{1}0]$  и отсутствие осевых деформаций вдоль осей  $x$  и  $y$ .

Величина результирующего изгиба системы из двух слоев, один из которых деформирован, определяется условиями механического равновесия системы и граничными условиями. Верхний металлический контакт в нашем приближении — очень тонкий слой, не влияющий на деформацию балки. Уравнения баланса сил и моментов по глубине структуры [10], позволяют рассчитать равновесную кривизну системы и отклонение конца микроконсоли ( $\Delta$ ) в зависимости от приложенного напряжения ( $U$ ).

Результирующее выражение в приближении одинаковых упругих модулей слоев имеет вид [4]:

$$\Delta = 3UL^2d_{14}/(16h^2),$$

где  $L$  — длина микроконсоли,  $h$  — толщина каждого из слоев GaAs/AlGaAs.

При  $U = 1 \text{ V}$ ,  $d_{14} = -3.26 \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$  и размерах использованных консолей  $L = 100 \mu\text{m}$ ,  $h = 1 \mu\text{m}$  получим  $x \approx 6 \text{ nm}$ , что хорошо согласуется с экспериментально измеренной чувствительностью микросистемы.

Частота низшей моды такой консоли в приближении одинаковых упругих модулей слоев определяется по формуле [11]:

$$\omega_0 \frac{3.52}{L^2} \sqrt{\frac{EI_y}{\rho S}}, \quad (10)$$

где  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $S = 2ha$  — площадь сечения,  $a$  — ширина балки,  $I_y = a(2h)^3/12$  — момент инерции сечения.

Подставив в формулу (10) получим:

$$f_0 = \frac{0.88(2h)}{\pi L^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho}}, \quad (11)$$

где  $\rho = 4.56 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  — плотность  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ ;  $E = 121 \text{ GPa}$  — модуль Юнга для одноосной деформации  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  в направлении  $[110]$  или  $[1\bar{1}0]$  при свободных от нагрузок боковых поверхностях микробалки, рассчитанный по методу [12]. Подставив эти значения в формулу (10), получим для обеих микроконсолей  $f_0 \approx 166 \text{ kHz}$ . Таким образом, вычисленное значение собственной частоты колебаний консоли с хорошей точностью совпадает с измеренными значениями.

## Заключение

Выполнен эксперимент с одновременным расположением на пластине  $\text{GaAs}(001)$  двух консольно закрепленных микробалок, созданных из эпитаксиальных слоев  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  и направленных по ортогональным диагональным осям  $[110]$  и  $[1\bar{1}0]$ . В статическом режиме проведены измерения отклонения балок в зависимости от приложенного напряжения. Показано взаимно противоположное движение микроконсолей, что служит доказательством работы устройства на основе пьезоэффекта в  $\text{AlGaAs}$ . Вычисленные параметры системы, чувствительность и собственная частота достаточно хорошо совпадают с измеренными значениями.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 08-02-97022p\_поволжье\_a.

## Список литературы

- [1] *Masmanidis S.C., Karabalin R.B., De Vlaminck I., Borghs G., Freeman M.R., Roukes M.L.* // Science. 2007. Vol. 317. P. 780–783.
- [2] *Ongkodjodjo A., Eng Hock Tay F., Akkipeddi R.* // MEMS. 2005. Vol. 14. N 3. P. 610–618.
- [3] *Kumar P., Li L., Calhoun L., Boudreaux P., DeVoe D.* // Sensor. Actuat. A. Phys. 2004. Vol. 115. P. 96–103.
- [4] *Vopilkin E.A., Shashkin V.I., Drozdov Y.N., Daniltsev V.M., Gusev S.A., Shuleshova I.Yu.* // J. Micromech. Microeng. 2008. Vol. 18. N 9. P. 095 006.
- [5] *Abadal G. et al.* // Nanotechnology. 2001. Vol. 12. P. 100–104.
- [6] *Най Дж.* Физические свойства кристаллов. Пер. с англ. М.: Мир, 1967. 386 с.
- [7] *Adachi S.* // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 58. N 3. P. R1–R30.
- [8] *Hjort K., Soderkvist J., Schweitz J.A.* // J. Mecromech. Microeng. 1994. Vol. 4. P. 1–13.
- [9] *Madelung O.* Semiconductors: Data Handbook. 3<sup>rd</sup> ed. NY: Springer-Verlag, 2003. 691 p.
- [10] *Тхорик Ю.А., Хазан Л.С.* Пластическая деформация и дислокации несоответствия в гетероэпитаксиальных системах. Киев: Наук. думка, 1983. 304 с.
- [11] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория упругости. М.: Наука, 1965. 2004 с.
- [12] *Brantley W.A.* // J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. N 1. P. 534–535.