

УДК 621.3.049.77.001.2

Е.А. Рындин, Н.К. Приступчик

**ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ТУННЕЛЬНЫЙ
АКСЕЛЕРОМЕТР НА ОСНОВЕ НАПРЯЖЕННЫХ СЛОЕВ GaAs/InAs**

Описан принцип построения микромеханического туннельного акселерометра. Предложена конструкция, упрощенная модель самосборки сенсорного элемента, а также модель передачи движения.

Конструкция; микроэлектромеханические системы; сенсор; акселерометр.

E.A. Ryndin, N.K. Pristupchik

**INTEGRATED MICROMECHANICAL TUNNELING ACCELEROMETER
BASED ON DRIVEN SELF-ASSEMBLY OF STRAINED GaAs/InAs
LAYERS**

Principle of operation and design of multi-axis micromechanical tunneling accelerometer based on driven self-assembly of strained GaAs/InAs layers is described. Simplified driven self-assembly and motion models are developed.

Design; microelectromechanical systems; sensor; accelerometer.

Широкий спектр задач мониторинга параметров окружающей среды и динамических характеристик подвижных объектов предполагает эффективное решение, благодаря применению специализированных диагностических комплексов, содержащих элементы нано- и микросистемной техники, в частности, интегральные микромеханические акселерометры [1].

Для решения задачи анализа траектории и параметров движения макроскопических подвижных объектов возникает потребность в регистрации линейных ускорений, в общем случае произвольно ориентированных относительно базы измерительного комплекса [2]. В настоящее время известны два принципиально различных подхода к решению этой задачи.

Существует возможность восстановления полной информации о параметрах движения объекта путем обработки результатов измерения, поступающих от нескольких дискретных сенсорных устройств, каждое из которых обладает лишь одной осью чувствительности. Соответствующим образом размещенные и ориентированные относительно осей симметрии исследуемого объекта такие устройства обеспечивают решение указанной задачи, определяя проекции внешнего ускорения на оси чувствительности преобразователей перемещения. Таким образом, для измерения внешнего воздействия требуется минимум три сенсорных элемента, работающих в режиме прямого измерения и обеспечивающих регистрацию трех взаимно перпендикулярных проекций ускорения.

В общем случае, измерительный комплекс, построенный на основе дискретных сенсорных устройств, может быть весьма громоздким, что не всегда допустимо. Технология формирования микросборок позволяет улучшить массо-габаритные показатели посредством размещения необходимого числа одноосевых микросенсоров на общей основе. Вместе с тем, указанный метод требует прецизионных операций позиционирования и инсталляции микросистем, что снижает процент выхода годных изделий и увеличивает их стоимость.

Другая возможность заключается в формировании необходимого числа многоосевых сенсоров, а также необходимых систем обработки информации в едином технологическом процессе с использованием групповых методов обработки. Таким образом, измерительный комплекс, оснащенный, при необходимости, цифровым интерфейсом может быть выполнен в виде интегральной микросхемы, поэтому в целом указанная возможность решения рассматриваемой задачи представляется более перспективной.

Следует отметить, что применяемая в настоящее время планарная технология формирования микромеханических акселерометров на основе жертвенных слоев накладывает ограничения на возможные композиции функциональных элементов, предназначенных, в частности, для передачи движения, и приводит к обособлению оси чувствительности перпендикулярной плоскости подложки [3]. В этой связи разработка конструкций микромеханических систем, обеспечивающих одинаковую чувствительность по трем взаимно перпендикулярным осям, представляет собой актуальную конструкторскую задачу.

Целью настоящей работы является построение конструкций, математических моделей и методик моделирования интегральных микромеханических акселерометров, содержащих высокотехнологичные наноразмерные автоэмиссионные преобразователи перемещения. Обеспечение одинаково высокой чувствительности по трем взаимно перпендикулярным осям является основным требованием. На рис. 1 представлена гетероструктура, содержащая напряженные слои GaAs/InAs. Постоянные решеток слоев GaAs и InAs значительно различаются: $\Delta a/a = 7,2\%$. В процессе эпитаксиального выращивания данных слоев, например, на InP подложке образуется напряженная гетеропленка, в которой решетки материалов подстраиваются под решетку подложки, и слой InAs оказывается сжат, а слой GaAs растянут. При освобождении от связи с подложкой пленки GaAs/InAs межатомные силы будут стремиться увеличить расстояние между атомами в сжатом слое InAs и уменьшить их в растянутом слое GaAs. Возникающие в слоях InAs и GaAs силы межатомного взаимодействия противоположно направлены и создают момент сил, изгибающий пленку GaAs/InAs. Для освобождения от связи с подложкой пленки GaAs/InAs необходимо селективное травление жертвенного слоя AlGaAs, дополнительно выращенного между пленкой и подложкой [4].

Предлагаемая конструкция сенсорного элемента, обеспечивающего чувствительность к внешнему линейному ускорению, приведена на рис. 2,а. Данный элемент составлен из двух взаимодополняющих друг друга структур. При возникновении линейного ускорения подложки в направлении, обозначенном a_{x+} , инерционная масса отклоняется в направлении a_x , вследствие чего изменяется расстояние между подвижным и неподвижным электродами, что, в конечном итоге, вызывает изменение туннельного тока.

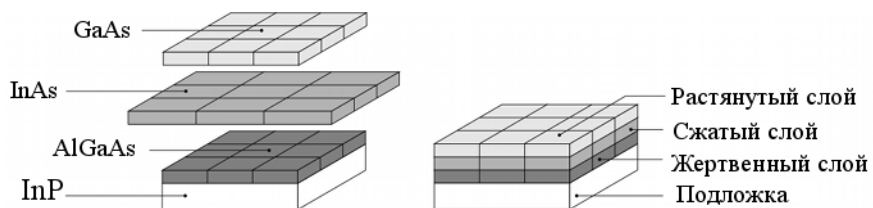


Рис. 1. Формирование эпитаксиальных слоев с различными постоянными решетки с целью создания внутренних механических напряжений

Подвижный электрод закреплен на инерционной массе, а неподвижный электрод представляет собой незавершенную нанотрубку, получившуюся в результате селективного травления жертвенного слоя. Таким образом, сила туннельного тока будет возрастать в том случае, когда инерционная масса приближается к катоду. С целью обеспечения симметрии измерительного процесса предлагается на каждую ось чувствительности формировать две структуры, различающиеся относительным расположением катода и инерционной массы. На рис. 2,б представлена структура аналогичного элемента, обеспечивающая максимум чувствительности в направлении a_y , перпендикулярном направлению a_x . Таким образом, структуры, приведенные на рис. 2, представляют собой микромеханический акселерометр с двумя осями чувствительности. Представляется возможным использовать предложенные элементы в качестве базиса для построения многоосевого микроакселерометра.

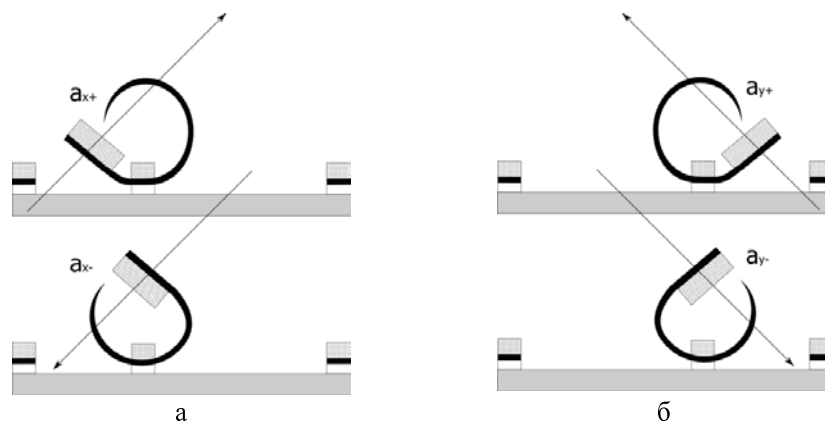


Рис. 2. Схематическое изображение чувствительных элементов многоосевого акселерометра: а – элементы, обеспечивающие чувствительность вдоль оси X ; б – элементы, обеспечивающие чувствительность вдоль оси Y

На рис. 3 представлена параметрическая модель структуры и топологии сенсора. Функциональные элементы передачи движения представлены торсионами, сформированными в напряженном слое. Такой выбор элементов передачи движения обусловлен необходимостью компенсации перекрестной чувствительности, возникающей в балочном подвесе. Следует отметить, что положение туннельных контактов, образованных инерционными массами и

поверхностями незавершенных нанотрубок-эмиттеров, определяется геометрией подтравливаемого напряженного слоя.

Поскольку инерционная масса создает момент сил, препятствующий самосборке рассматриваемой структуры, представляется оправданным оценить порядки моментов сил, возникающих в процессе самоорганизации. Для решения этой задачи была построена упрощенная физическая модель, представленная на рис. 4. Инерционная масса принимается точечной и отстоит от плоскости приложения момента M_I на расстояние $L/2$.

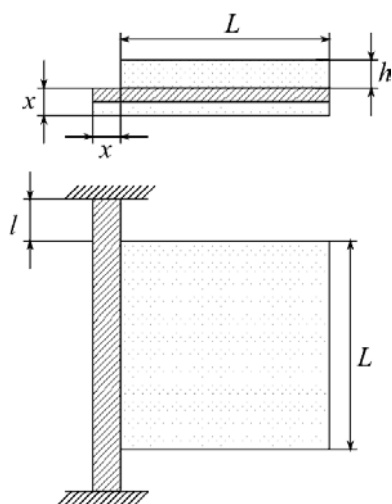


Рис. 3. Схематическое изображение сенсора на основе напряженных слоев GaAs/InAs: а – структура; б – топология; в – параметрическая модель преобразователя перемещения

Закон Гука для механически напряженного слоя может быть записан следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma = \frac{\Delta a}{a} = \frac{1}{E} \frac{F}{S}. \quad (1)$$

Предполагая, что $F_1 = F_2 = F$, выразим формирующую силу:

$$F = \frac{\Delta a}{a} ES, \quad (2)$$

где E – модуль Юнга, $S = \frac{x}{2} L$ – площадь сечения напряженного слоя,

$\frac{\Delta a}{a} = 0,072$ – относительное сжатие (растяжение), выраженное через постоянную решетки.

Принимая плечо равным расстоянию между центральными сечениями напряженных слоев, выразим момент пары сил, формирующий структуру:

$$M_1 = F \frac{x}{2}, \quad (3)$$

Препятствующий формированию структуры момент может быть выражен следующим образом:

$$M_2 = mg \frac{L}{2}. \quad (4)$$

Точечная инерционная масса, рассчитываемая по формуле:

$$m = \rho V = \rho L^2 (h + x). \quad (5)$$

В том случае, когда $M_1 > M_2$, структура сенсорного элемента, приведенная на рис. 3, может быть сформирована посредством управляемой самоорганизации напряженных слоев GaAs/InAs, в противном случае необходимая конфигурация электродов не может быть получена в результате самоформирования. Принимая $L = 5$ мкм, $h = 600$ нм, $x = 25$ нм, $\rho = 5680$ кг·м⁻³, $g = 10$ м·с⁻², получим:

$$M_1 = 9,7 \cdot 10^{-12} \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad M_2 = 2,2 \cdot 10^{-18} \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

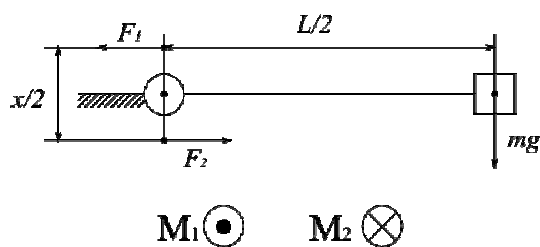


Рис. 4. Упрощенная физическая модель процесса самосборки сенсорного элемента на основе напряженных слоев GaAs/InAs

Таким образом, подобранные параметры обеспечивают процесс самоформирования сенсорного элемента. Рассмотрим далее модель передачи движения в преобразователе перемещения. Для того, чтобы определить угол, на который повернется пластина подвижного электрода при воздействии внешнего ускорения, воспользуемся уравнением, описывающим кручение упругого стержня [5]:

$$\varphi = \frac{M_{кр} l}{GJ_p}, \quad (6)$$

где $M_{кр}$ – крутящий момент, l – длина торсионов, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – модуль сдвига (коэффициент Пуассона $\nu = 0,31$), $J_p = 0,141 \cdot x^4$ – момент инерции относительно оси вращения торсиона, для квадратного сечения. Фактически пластина поворачивается на угол $\varphi/2$, поскольку закреплена на двух торсионах.

Линейное перемещение точек, лежащих на поверхности подвижного электрода и отстоящих от оси вращения торсионов на расстояние y , определяется из выражения:

$$d = y \cdot \tan(\varphi / 2). \quad (7)$$

Для того, чтобы рассчитать отклонение пластины под действием силы тяжести, подставим уравнение (4) с учетом уравнения (5) в уравнение (6). Далее из выражения (7) находим искомое перемещение. Для случая, когда $y = L/2$ имеем $d = 1,5$ нм, что является достаточным для регистрации внешнего воздействия посредством туннельного преобразователя перемещения.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать заключение о возможности построения предлагаемых сенсорных элементов посредством управляемой самоорганизации напряженных слоев GaAs/InAs, а также возможности применения подобных структур для построения интегральных многоосевых микромеханических акселерометров, содержащих наноразмерные преобразователи перемещения на основе туннельного эффекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бабаевский П.Г., Резниченко Г.М., Жуков А.А., Жукова С.А., Гринькин Е.А.* Электромеханические преобразователи сенсорных микро- и наносистем: физические основы и масштабные эффекты. Часть 1. Чувствительные механические элементы и актуаторы // Нано- и микросистемная техника. – 2008. – №11. – С. 32-44.
2. *Распопов В.Я.* Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение. – 2007. – 400 с.
3. *Коноплев Б. Г., Приступчик Н. К., Рындин Е. А.* Автоэмиссионный акселерометр с тремя осями чувствительности // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – №3. – С. 36–39.
4. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике / Отв. ред. А. Л. Асеев. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. – 368 с.
5. *Зозуля В.В., Мартыненко А.В., Лукин А.Н.* Механика материалов. - Харьков: Изд-во Национ. ун-та внутр. дел, 2001. – 404 с.

Рындин Евгений Адальбертович

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: ryn@fep.tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 8(8634)311-584.

Приступчик Никита Константинович

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: nix@fep.tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 8(8634)311-584.

Ryndin Eugene Adalbertovich
Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: ryn@fep.tsure.ru.
44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.
Phone: 8(8634)311-584.

Pristupchik Nikita Konstantinovich
Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”

E-mail: nix@fep.tsure.ru.
44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.
Phone: 8(8634)311-584.

УДК 001.89: 539.2 (621.382.132)

О.А. Агеев, Ю.В. Сюрик, В.С. Климин, А.А. Федотов

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ, НА ОСНОВЕ НАНОФАБ НТК-9

Целью работы является отработка методик изготовления нанокompозитных полимерных материалов, модифицированных углеродными наноструктурами, для создания структур микро- и наносистемной техники и солнечных элементов на основе использования многофункционального кластерного сверхвысоковакуумного нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9.

Нанотехнологии; полимерные нанокompозиты; углеродные нанотрубки; солнечные элементы; наносистемная техника.

O.A. Ageev, Yu.V. Syurik, V.S. Klimin, A.A. Fedotov

PRODUCTION OF NANOCOMPOUND POLYMERIC MATERIALS BASED ON MULTIFUNCTIONAL MODULAR NANOTECHNOLOGICAL PLATFORM NANOFAB NTK-9

The work's idea is a development of production methods of nanocompound polymeric materials, modified by carbon nanostructures, for manufacturing of micro- and nanosystem technique's structures and solar elements based on high-vacuum multifunctional modular nanotechnological platform NANOFAB NTK-9.

Nanotechnology; polymeric nanocompound; carbon nanotubes; solar cell; nanosystem technique.

Полимерные нанокompозиты (НКПМ) – материалы, состоящие из двух или более различных фаз, одной из которых является полимерная основа, а другой наноразмерные частицы, создаваемые в целях получения специальных свойств (магнитных, оптических, диэлектрических, радиопоглощающих, по-