

ПРИМЕНЕНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*д-р техн. наук Бестугин А. Р.
канд. техн. наук Филонов О. М.
канд. эконом. наук Киришина И. А.
Осколков Б. В.*

*Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Государственный
университет аэрокосмического приборостроения (Saint-Petersburg State*

***Abstract.** Grow requirements for precision measurements of various physical quantities, including microelectromechanical measurement devices, leading to the need to introduce in the applied processes allow additional operations lead product output parameters to values corresponding to a precision instrument traditional performance. The paper deals with the use of ion implantation, as the development of the electronics industry manufacturing operation, for modifying the elastic moduli and dependent elasticity coefficients of the mechanical part of the MEMS.*

It is shown that the range of possible changes in these ratios as high as 12%, which allows us to consider this method as a base for MEMS adjustments.

***Keywords:** Microelectromechanical systems, parametric correction, modulus of elasticity, stiffness coefficient, implantation.*

Поскольку достигнутый в настоящее время уровень размерной обработки элементов микроэлектромеханических систем (МЭМС) близок к физическим пределам планарной технологии, дальнейший прогресс в смысле повышения их метрологических показателей требует перехода от прямого технологического синтеза к технологическим маршрутам, в состав которых входят операции регулировки или параметрической коррекции.

Эффективность алгоритма регулировочной операции в первую очередь зависит от выбора корректируемого параметра изделия, чувствительность к изменению которого у регулируемых характеристик МЭМС будет максимальной, а инструментальное обеспечение операции в наибольшей степени согласуется с технологическими возможностями современных предприятий.

Для МЭМС таким параметром является коэффициент жесткости упругой системы, от которого непосредственно зависят статическая и динамическая характеристика изделия.

Коэффициент жесткости – это произведение модуля упругости конструкционного материала на осевой или полярный моменты инерции поперечного сечения упругого элемента.

$K_{из} = E \cdot J_0$ – коэффициент жесткости упругого элемента испытываемого в процессе работы деформации изгиба;

E – модуль упругости материала первого рода (растяжение-сжатие);

J_0 – осевой момент инерции поперечного сечения упругого элемента (относительно оси, лежащей в плоскости поперечного сечения).

$K_{кр} = G \cdot J_n$ – коэффициент жесткости упругого элемента, работающего на кручение (торсиона);

G – модуль упругости материала второго рода (сдвиг);

J_n – полярный момент инерции упругого элемента (относительно оси, перпендикулярной поперечному сечению).

Поскольку $K_{из}$ и $K_{кр}$ – это произведения множителей, зависящих только от геометрических параметров поперечных сечений, изменения их в процессе регулировки могут быть достигнуты либо коррекцией их размеров, либо модификацией модуля упругости.

Размерная обработка упругих элементов на завершающем этапе технологического процесса представляет применительно к МЭМС исключительно сложную техническую задачу и не приемлема как техническое решение в условиях серийного и массового производства.

В то же время опыт модификации свойств материалов методами ионной металлургии, например, ионной имплантацией, позволяет рассчитывать на успешное применение этой технологии в операциях параметрической коррекции некоторых типов микроэлектромеханических систем.

Суть этих технологий состоит в том, что внедрение в кристаллическую решетку инородных атомов, как в узлы, так и в междоузлия отражается на всех свойствах материала-мишени. Степень изменения этих свойств активно изучается многими группами специалистов. Результатом этих исследований должна стать разработка как методологического, так и инструментального обеспечения этих технологических операций с целью прогнозируемого управления интересующим разработчиков и технологов свойствами материалов, в том числе и для операции параметрической коррекции МЭМС. В нашем случае это относится к модулям упругости монокристаллического материала E , G и коэффициенту Пуассона.

Для локальной имплантации легирующих атомов в упругий элемент могут применяться как диафрагмирование коллимированных потоков ионов, так и зондовые методы имплантации.

Результаты экспериментальных исследований и моделирования упругих свойств монокристаллического кремния, имплантированного атомами бора (В), приведенные в [1], показывают, что повышение концентрации бора (при равномерном распределении атомов бора в решетке) до концентрации $N = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, уменьшает константы упругости кремния в среднем на 12%. Модули упругости E и G линейно зависят от констант упругости кремния.

Таким образом, становится возможным модифицировать модуль упругости монокристаллического кремния и коэффициент жесткости упругой системы в достаточно широких пределах (около 12%).

На рис. 1 представлено продольное сечение упругого элемента длиной l , с прямоугольным поперечным сечением шириной w и толщиной h . В зависимости от режима проведения операции

имплантации возможны различные варианты распределения примеси в объеме элемента.

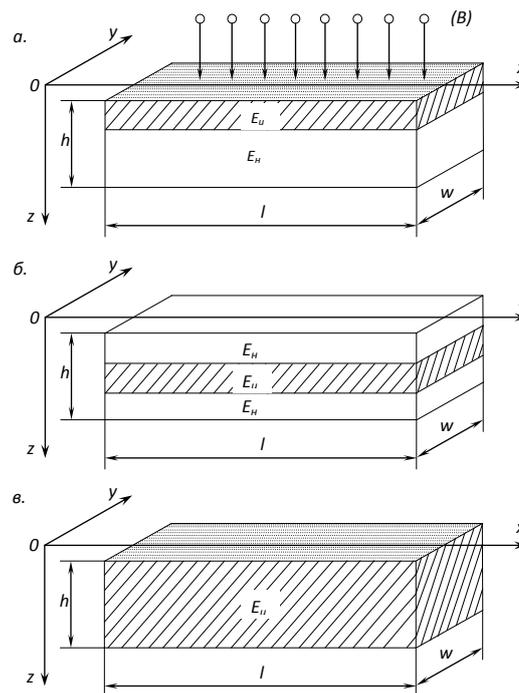


Рис. 1 Возможные расположения имплантированного слоя (бора) в объеме упругого элемента: а – двухслойная структура упругого элемента; б – трехслойная структура упругого элемента; в – полностью легированный упругий элемент. Ox , Oy , Oz – оси системы координат, связанные с продольным сечением упругого элемента. L , w , h – длина, ширина и толщина упругого элемента. E_u – модуль упругости имплантированного слоя. E_n – модуль упругости неимплантированного кремния.

На рис. 2 показано распределение имплантированных ионов по толщине упругого элемента.

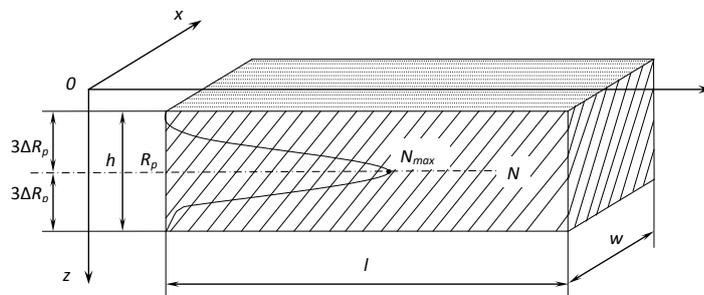


Рис. 2 Структура распределения примеси имплантированного слоя

Здесь $R_p = \frac{R}{1 + b \frac{M_2}{M_1}}$ [нм] – пробег Грюна – проекция полного пробега иона R в мишени

на направление его начальной скорости.

$R = 2 \cdot \sqrt{E_0(\text{эВ})}$ [нм] – длина полного пробега иона в кристалле

$b \approx \frac{1}{3}$ – коэффициент, учитывающий торможение ионов в кристалле.

E_0 – начальная энергия иона [эВ].

M_2 – атомная масса атома мишени (Si)

M_1 – атомная масса имплантируемого атома (B).

$\Delta R_p = \frac{2\sqrt{M_1 M_2}}{3M_1 + M_2} R_p$ – среднеквадратическое отклонение концентраций.

$N(z) = N_{max} e^{-\frac{(z-R_p)^2}{2\Delta R_p^2}}$ – распределение концентрации ионов по оси OZ .

Поскольку зависимости R от E_0 известны для большинства применяемых материалов [2], определение R_p и ΔR_p не составляет труда при решении конкретных задач.

Неравномерность концентрация примесей по толщине имплантированного слоя в упругом элементе может быть устранена тепловым перераспределением посредством лазерного нагрева поверхностей упругих элементов до температуры $T < 0.7 * T_{пл}$, где $T_{пл}$ – температура плавления кремния. Время рассчитывается из условия достижения равномерной концентрации в интервале $(R_p - 3\Delta R_p) \div (R_p + 3\Delta R_p)$.

Значение величины N_0 – равномерной концентрации имплантированных атомов в легированном слое найдем из условия

$$N_0 \cdot V = N_{MAX} \cdot l \cdot w \cdot \int_{R_p - 3\Delta R_p}^{R_p + 3\Delta R_p} e^{-\frac{(z-R_p)^2}{2\Delta R_p^2}} dz \quad (1)$$

где V – объем слоя.

Для первоначального распределения примеси, соответствующей нормальному закону, при $V = l \cdot w \cdot (6\Delta R_p)$, исходя из (1), получим

$$N_0 \cdot l \cdot w \cdot (6\Delta R_p) = N_{MAX} \cdot l \cdot w \cdot \int_{R_p - 3\Delta R_p}^{R_p + 3\Delta R_p} e^{-\frac{(z-R_p)^2}{2\Delta R_p^2}} dz \quad (2)$$

Тогда $N_{MAX} = N_0 \cdot \frac{6}{\sqrt{2\pi}} \approx N_0 \cdot 2.4$.

Максимальная концентрация примеси N_{MAX} ограничивается режимами проведения операции, исключаящими блистеринг – отслаивание поверхностного слоя монокристалла при ионной имплантации.

Комбинируя начальные энергии ионов и дозы имплантации при различных значениях h – толщины упругого элемента можно добиться изменения результирующего коэффициента жесткости упругой системы в достаточно широких пределах без применения экзотических технологий и внесения принципиальных изменений в существующие технологические процессы.

Рассмотрим в качестве примера упругий элемент из монокристаллического кремния толщиной $ht = 1 \text{ мкм}$ с ориентацией $\langle 100 \rangle$ с имплантированным поверхностным слоем при начальной энергии ионов бора $E_0 = 40 \text{ кэВ}$.

В соответствии с [2], толщина имплантированного слоя составит

$$h = 6\Delta R_p, R_p = 141,3 \text{ нм}, \Delta R_p \approx 44,3, h \approx 266 \text{ нм}$$

При концентрации равномерно распределенной примеси $N_0 = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, рассчитанное значения модуля упругости легированного слоя монокристаллического кремния $\langle 100 \rangle$ составит $E_{u\langle 100 \rangle} = E_{H\langle 100 \rangle} - 0,12 E_{H\langle 100 \rangle} = 114 \cdot 10^9 \text{ Па}$.

Толщина слоя нелегированного кремния: $h_n = h - h_i = 1000 - 266 = 734 \text{ нм}$.

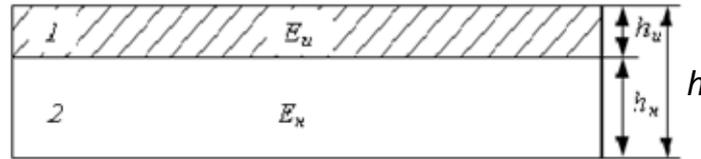


Рис. 3. Двухслойный кремниевый упругий элемент:
1 – легированный слой; 2 – нелегированный слой.

Двухслойный кремниевый упругий элемент приведен на рисунке 3.

В соответствии с [3] эквивалентный модуль двухслойного упругого элемента равен

$$E_{\text{экв}} = \frac{4 \cdot (E_u \cdot t_u^3 + E_n \cdot t_n^3)}{t^3} = \frac{4 \cdot (114,4 \cdot 10^9 \cdot (266 \cdot 10^{-9})^3 + 130 \cdot 10^9 \cdot (734 \cdot 10^{-9})^3)}{(1000 \cdot 10^{-9})^3} \approx 120 \cdot 10^9 \text{ Па.}$$

Таким образом, изменение модуля упругости кремния в рассмотренном примере составляет около 7% от исходного значения $E_{n<100>} = 130 \cdot 10^9 \text{ Па}$. Исходя из допусков на выходные параметры МЭМС, возможность варьирования главного конструктивного параметра в пределах $7 \div 10\%$ является более чем достаточной для создания МЭМС с прецизионными метрологическими характеристиками.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты № 15-07-00118-а; 15-07-00119-а; 15-07-00120-а; 15-07-00222-а; 16-07-00067-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бестугин А. Р., Киршина И. А., Филонов О. М., Окин П. А. Управляемое изменение механических свойств кремния при его легировании/ *European science review*, May-June, № 5-6/2014.Р. 43-46.
2. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии/ Пер. с англ. – М.: Мир. 1985. – 496 с.
3. Пономарёв С. Д., Андреева Л. Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. – М.: Машиностроение. 1980. – 326 с.