

УДК 539.67

В.И. Обухов, Р.А. Денисов

ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексева

Рассмотрены теоретические аспекты температурных и структурных деформаций в кристаллах чувствительных элементов интегральных датчиков. На основе проведенного анализа определены возможные температурные напряжения в чувствительных элементах и погрешности выходных характеристик интегральных датчиков, выполненных на основе полупроводникового кремния. Предложен инженерный метод расчета температурных погрешностей интегральных датчиков.

Ключевые слова: интегральный датчик, температурные деформации, структурные деформации, полупроводниковый кремний, чувствительный элемент, температурные погрешности, двухслойная система, прогиб пластины, упругий подвес, мембрана.

В процессе производства интегральных датчиков (ИД) на поверхности полупроводникового кремния как основного конструкционного материала создаются как микромеханические, так и пассивные и активные элементы микроэлектронных структур (МЭМС). У микромеханических элементов это могут быть упругие подвесы и чувствительные массы акселерометров, мембраны с жестким центром или без – для датчиков давлений. Для микроэлектронных структур к таким элементам могут быть отнесены токоведущие дорожки и контактные площадки, резисторы, тензорезисторы, «n-p-n» и «p-n-p» переходы, «стоп-слои» и др. Толщина или глубина залегания таких элементов может составлять от долей до нескольких микрометров, и они формируют специфические области. Структурное состояние измененных слоев может существенно отличаться от структуры исходного материала. Такие структуры получают путем напыления материала в вакууме, диффузией, ионным легированием примесных атомов или эпитаксией. Структурные изменения в материале, в результате диффузии точечных атомов (атомы внедрения и замещения, вакансии), могут быть существенными [4] и могут носить как локальный характер в пределах чувствительных элементов (ЧЭ) ИД, так и тотальный по всей площади исходной пластины, например при ее окислении. Окисные пленки полупроводникового кремния при толщине около одного микрометра имеют существенно измененную структуру.

Полупроводниковый кремний характеризуется как идеальный упругий материал [1], деформируется, точно следуя за приложенным напряжением в соответствии с законом Гука. Другими словами, в этом законе отсутствует фактор времени, т.е. практически в материале отсутствует гистерезис. Полупроводниковый кремний имеет малый коэффициент температурного расширения. Тем не менее, в нем могут формироваться структурные, термические и механические напряжения в силу особенностей технологических операций. Температурные напряжения могут быть обусловлены разностью коэффициентов температурного расширения кремния и новой образованной структурой на его поверхности (окисная пленка, токопроводящий слой, «стоп-слой» и т.п.). Если на пластине кремния толщиной h_1 при температуре ΔT формируется слой SiO_2 толщиной h_2 , то при охлаждении на ΔT в слоях SiO_2 возникают напряжения сжатия [2]:

$$\sigma_2 = (\alpha_{si} - \alpha_{sio_2}) \Delta T E_2 / (1 - \mu_2), \quad (1)$$

где $(\alpha_{si} - \alpha_{sio_2})$ - разность коэффициентов линейного температурного расширения кремния

и диоксида кремния; E_2 - модуль упругости первого рода (Юнга) диоксида кремния (SiO_2); μ_2 - коэффициент Пуассона SiO_2 .

Практически речь идет о двухслойной системе, работающей по аналогии с биметаллами. В зависимости от способа закрепления пластины при окислении подложка может оказаться деформированной по цилиндру или по сфере. На основании теории упругости для двухслойной системы [2]

$$\sigma_{\max} = \frac{E_1}{6(1-\mu_1)} \frac{h_1^2}{h_2} \frac{1}{R_k}, \quad (2)$$

где E_1 и μ_1 - модуль упругости Юнга и коэффициент Пуассона для кремниевой пластины; h_2 - толщина окисленного слоя (диоксид кремния). Обычно $h_2 = 0,4 \dots 0,8$ мкм.

Температурные напряжения вызывают прогиб t , величина которого пропорциональна изменению температуры и разности коэффициентов температурного расширения кремниевой пластины и вновь образованного слоя на ней. Для пластин диаметром 76 мм и толщиной 0,38 мм величина прогиба может составлять более 10 мкм.

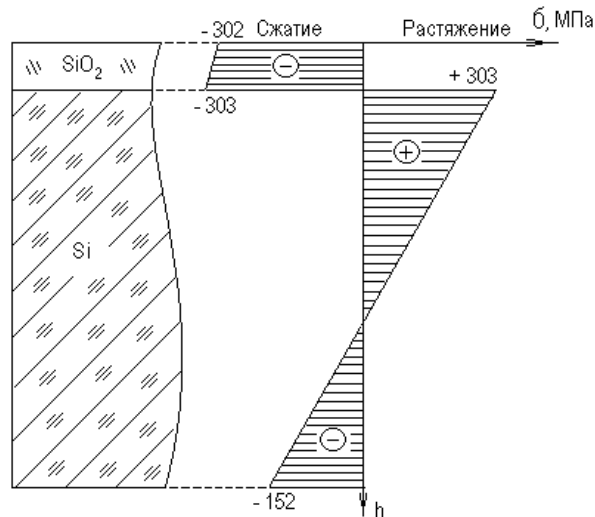


Рис. 1. Распределение напряжений в окисной пластине и кремнии

Структурные напряжения в естественных условиях склонны к релаксации в течение длительного времени. Для ускорения этого процесса проводится интенсивная релаксация (термообработка). Интенсивность релаксации зависит от величины структурных напряжений, времени термического воздействия, температуры и состава газовой среды. Как показывает анализ и практика, после каждого выполнения операции диффузии, эпитаксии, окисления необходим отжиг для снятия структурных напряжений.

Величина прогиба пластины, деформированной за счет структурных напряжений, может быть измерена инструментально. Прогиб круглой пластины (в центре) диаметром $D_{пл}$ может быть вычислен по формуле

$$t = \frac{3h_2\sigma_2^{\max}(1-\mu_1)}{E_1h_1^2}. \quad (3)$$

Для пластины с $h_1 \leq 0,2$ мм и толщиной окисленного слоя $h_2 = 0,8$ мкм величина прогиба может составлять 10...15 мкм.

При изготовлении акселерометров, датчиков давления, их упругие подвесы и мембраны могут иметь толщину от 10 до 50 мкм и более. В случае одностороннего расположения окисной пленки температурные напряжения могут существенно деформировать упругий подвес, мембрану.

Рассмотрим обобщенную схему ЧЭ акселерометра с емкостным преобразователем перемещения, представленную на рис. 2. Чувствительная масса 1 ЧЭ выполняет функцию подвижной обкладки, закрепленной на упругом подвесе 3. На упругий подвес по всей его длине и ширине нанесен токопроводящий слой. Величину прогиба подвеса за счет температурных напряжений в нем можно определить [5]

$$\Delta z_n = (\alpha_m - \alpha_{si}) \Delta T \frac{3l_n^2}{4(h_1 + h_2)}, \quad (4)$$

где α_m - коэффициент температурного расширения токопроводящего материала; l_n , h_1 , h_2 - длина, толщина упругого подвеса и толщина пленки соответственно.

Для емкостного преобразователя перемещение подвижной обкладки 1 (рис. 2) вызовет изменение зазора между неподвижными обкладками 2 и изменение емкости C_0 . Величину изменения емкости преобразователя можно определить по выражениям:

$$\begin{aligned} C_0 - \Delta C &= \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{z + \Delta z}, \\ C_0 + \Delta C &= \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{z - \Delta z}, \end{aligned} \quad (5)$$

где z - начальный зазор между подвижной и неподвижной обкладками при нейтральном положении подвижной обкладки 1; S - площадь обкладок 1, 2; $\varepsilon \varepsilon_0$ - диэлектрическая проницаемость среды между обкладками; C_0 - емкость преобразователя перемещения при зазоре z между обкладками; ΔC - изменение емкости преобразователя перемещения за счет изменения положения подвижной обкладки 1 на величину Δz .

Изменение зазора между обкладками Δz может быть определено с учетом равенства (4) следующим образом:

$$\Delta z = \frac{\Delta z_n}{l_n} (l_n + 0,5l_m), \quad (6)$$

где Δz_n - величина прогиба конца упругого подвеса о - о'; l_m - длина подвижной обкладки.

Для инженерных расчетов температурную погрешность емкостного датчика перемещения с учетом (4) и (6) можно оценить по формуле

$$\Delta C = C_0 \left[\pm \frac{4z(h_1 + h_2)}{3\Delta T(\alpha_m - \alpha_{si})l_n(l_n + 0,5l_m)} \right]. \quad (7)$$

Учитывая, что произведение l_n^2 - величина малая, ею можно пренебречь. Уравнение (7) в этом случае можно преобразовать к следующему виду:

$$\Delta C = C_0 \left[\pm \frac{4z(h_1 + h_2)}{3\Delta T(\alpha_m - \alpha_{si})l_n(0,5l_m)} \right] \quad (8)$$

Прикидочные расчеты для упругого подвеса длиной $l_n = 0,8$ мм, толщиной $h_n = 0,01$ м, шириной $b_n = 0,6$ мм и металлизацией его алюминием толщиной слоя $h_2 = 0,8$ мкм и $\alpha_{Al} = 2,5 \cdot 10^{-5}$ /град показывают, что температурная погрешность ЧЭ ИД прямого измерения может достигать 3% при изменении температуры в пределах 40°C .

Изгибные деформации исходных пластин (подложек) возникают из-за градиента внутренних сил в результате нарушенных слоев вблизи их поверхности при выполнении заключительных операций шлифования и полирования. Выполняя такие операции, как фотолитография, эпитаксия, диффузия, окисление, необходимо помнить о влиянии изгибных деформаций на точность их выполнения.

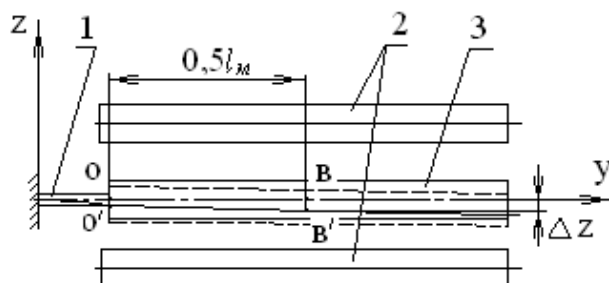


Рис. 2. Кинематическая схема преобразователя перемещения ЧЭ ИД:

1 – упругий подвес; 2 – неподвижные обкладки; 3 – подвижная обкладка

Рассмотрим ЧЭ интегрального датчика давления (ИДД) с емкостным датчиком перемещения. Кинематическая схема датчика приведена на рис. 3.

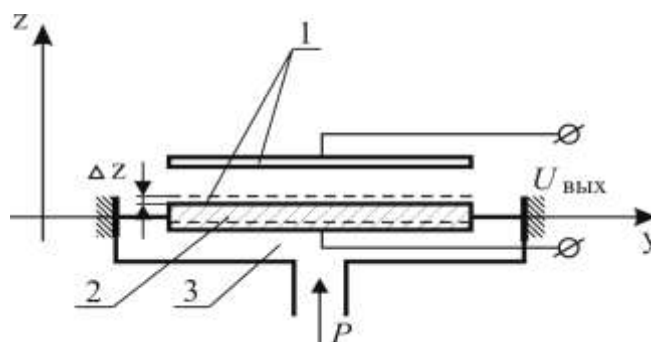


Рис. 3. Кинематическая схема емкостного ЧЭ ИДД:

1 – обкладки конденсатора; 2 – мембрана с жестким центром; 3 – камера с измеряемым давлением

Измеряемое давление P поступает в камеру 3. Под его действием мембрана с жестким центром 2 изменяет свое положение и, как следствие, изменяется зазор между обкладками конденсатора 1. Изменение емкости может быть мерой действующего давления.

Мембрана ИДД на своей поверхности может иметь металлизированную поверхность или внедренные примесные атомы для обеспечения соответствующей электропроводности. В этом случае мембрана представляет собой биматериал с толщиной пленки h_2 и толщиной мембраны h_1 . При изменении температуры из-за разности коэффициентов температурного расширения проводящего слоя и мембраны в ней возникают температурные напряжения. Температурные напряжения вызовут изменение исходного положения мембраны

$$\Delta z = f(\sigma_T), \quad (9)$$

где $\sigma_T = f(h_1, h_2, \alpha_1, \alpha_2, \Delta T)$ – величина температурного напряжения в структуре ЧЭ ИДД для двухслойной системы.

Для круглой мембраны с жестким центром величина Δz может быть определена с помощью выражения [5]

$$\Delta z = A_p \frac{\sigma_T R^4}{Eh^3}, \quad (10)$$

где $A_p = R/r_0$ – коэффициент, зависящий от отношения рабочего полного радиуса мембраны R к радиусу жесткого центра мембраны r_0 ; r_0 – радиус жесткого центра мембраны; R – полный радиус мембраны; E – модуль упругости Юнга; $h = h_1 + h_2$ – толщина жесткого центра мембраны; h_1 , h_2 – толщина металлической пленки или глубина диффузионного слоя и кремниевого основания.

Величина Δz для квадратной или прямоугольной мембраны с жестким центром может быть определена на основании уравнения [1], которое можно преобразовать в виде

$$\Delta z = \frac{\sigma_T AB}{G}, \quad (11)$$

где A , B – длина и ширина мембраны; G – жесткость мембраны. Подставив формулы (9), (10) в равенство (5), получим:

- для круглой мембраны

$$\Delta C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{z \mp A_p \frac{\sigma_T R^4}{Eh^3}}, \quad (12)$$

- для мембраны квадратной или прямоугольной формы

$$\Delta C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{z \mp \frac{\sigma_T AB}{G}}. \quad (13)$$

Для пластины, окисленной с двух сторон, прогиб может составлять около 5 мкм. Этот прогиб обусловлен неравномерностью толщины полученных слоев и неодинаковыми локальными дефектами на пластине. При стравливании окисла с одной стороны, прогиб может возрасти почти в два раза. В результате загонки фосфора прогиб пластин может быть больше, чем при загонке бора [4].

На упругих подвесах, толщина которых на порядок меньше, чем толщина пластины, этот прогиб может иметь еще большую величину, и его влияние на выходные характеристики ИД может быть значительным.

Результаты исследований указывают на возможные изменения модуля упругости полупроводникового кремния при изменении его структуры. Выводы, приведенные в статье [3], должны нацеливать конструкторов интегральных датчиков на учет реального модуля упругости в измененных структурах кремния. После каждой операции, которая может приводить к структурным изменениям поверхностного слоя полупроводникового кремния, необходимы меры к устранению структурных напряжений как причины, вызывающей погрешности ЧЭ ИД. Основной способ устранения структурных напряжений – отжиг. При этом для каждого случая структурных напряжений необходимо определить режимы отжига. В каждом конкретном случае он будет разным по температуре, времени, по среде, в которой должен проходить отжиг.

В процессе проектирования технологии изготовления ЧЭ ИД и ее реализации следует учитывать влияние структурных и температурных напряжений на их выходные характеристики. Для этого необходимо:

- подбирать материалы с коэффициентами температурного расширения, близкими или равными коэффициенту температурного расширения полупроводникового кремния;

- по возможности проектировать упругие подвесы с максимально возможной толщиной за счет уменьшения ширины и минимальной длины;
- наносить с противоположной стороны подвеса такой же слой, с теми же свойствами, что и с лицевой стороны, если это допускается конструкцией и технологией;
- каждый раз после выполнения операций окисления, эпитаксии, диффузии назначать интенсивную релаксацию, задавая необходимую температуру, время и газовую среду отжига.

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики / В.Д. Вавилов. – Н. Новгород: НГТУ, 2003.
2. **Михайлов, И.Ф.** Термическая и структурная деформация в системе кремний-окисел / И.Ф. Михайлов, Ю.М. Спалек, А.Г. Федоров // Микроэлектроника. 1986. Т. 15. Вып. 4.
3. **Обухов, В.И.** Влияние технологических факторов на изменение упругих свойств кремния в производстве интегральных датчиков // Датчики и системы. 2001. №2.
4. **Перевощиков, В.А.** Геттерирование примесей и дефектов в полупроводниках / В.А. Перевощиков, В.Д. Скупов. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ. 2002.
5. Расчет упругих элементов машин и приборов / С.Д. Пономарев [др.]. – М. Машиностроение, 1980.

*Дата поступления
в редакцию 16.02.2010*

V.I. Obuchov, R.A. Denisov

ENGINEERING METHODS OF CALCULATING THE TEMPERATURE ERROR OF INTEGRATED SENSORS

The theoretical aspects of thermal and structural deformation in the crystals of sensitive elements of integrated sensors. Based on the analysis performed by the identification of possible thermal stresses in the sensitive elements and the error of the output characteristics of integrated sensors, made on the basis of semiconductor silicon. The engineering calculation of temperature errors of integral sensors is offered.

Key words: integrated sensor, thermal deformation, structural deformation, semiconductor silicon, sensing element, temperature error, bilayer system, deflection plates, elastic suspension, membrane.