

*П. Г. \* МИХАЙЛОВ, К. А. \*\* ОЖИКЕНОВ*

*\* (доктор технических наук, профессор Пензенского государственного технологического университета, Пенза, Россия)*

*\*\* (кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Робототехника и технические средства автоматизи-  
Институт информационных и телекоммуникационных технологий, Казахский национальный технический  
университет им. К.И. Сатпаева, Алматы)*

## **МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ В МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ СЕНСОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**Аннотация.** Статья посвящена ключевой проблеме деградации характеристик приборов или к разрушению пластин и отдельных полупроводниковых чувствительных элементов (ПЧЭ) микроэлектронных датчиков (МЭД). Рассмотрены структурные напряжения, термонапряжения, а также практический интерес значения термонапряжений, существующих в структурах «монокремний–поликремний» («МК–ПК»), используемых в настоящее время для изготовления высокотемпературных МЭД.

**Ключевые слова:** полупроводники, микромеханический датчик, кремниевый чувствительный элемент, ионный ток, поликремний.

**Тірек сөздер:** жартылай өткізгіштер, микромеханикалық сезгіш, кремнийлік сезгіш элемент, иондық ток, поликремний.

**Key words:** semiconductors, a micromechanical sensor, the silicon sensor, the ion current, polysilicon.

Как показала практика, около 50% отказов микроэлектронной аппаратуры вызвано механическими воздействиями, возникающими в процессе производства, испытания и эксплуатации [1]. Причиной такого рода отказов являются механические напряжения, возникающие в элементах микроэлектронной аппаратуры, при этом напряжения присутствуют на всех стадиях производства, начиная с операций изготовления кремниевых пластин и заканчивая операциями герметизации. Величина и градиент механических напряжений могут быть такими, что при проведении, например, высокотемпературных физико–термических операций (диффузия, окисление, эпитаксия и т.д.), они могут привести к деградации характеристик приборов или к разрушению пластин и отдельных полупроводниковых чувствительных элементов (ПЧЭ) микроэлектронных датчиков (МЭД).

В информационно–энергетическом плане действие механических напряжений проявляется в возникновении дополнительных нестационарных погрешностей, имеющих аддитивный и

мультипликативный характер, а также в усилении деградиционных явлений, приводящих в конечном итоге к отказу датчика в процессе его эксплуатации (рисунок-1).

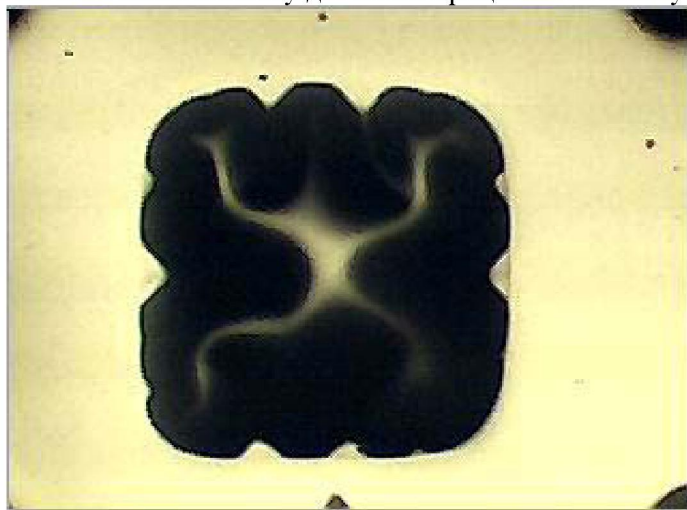


Рисунок 1.– Вид деформированной тонкой мембраны чувствительного элемента датчика давления

Внутренние механические напряжения ( $\sigma_M$ ), возникающие в полупроводниковых структурах обуславливаются структурными –  $|\sigma_c|$  и температурными  $|\sigma_m|$  напряжениями:

$$\sigma_M = \sigma_c + \sigma_T. \quad (1)$$

Структурные напряжения возникают в процессе формирования сенсорных элементов и систем ПЧЭ (диффузионных пьезорезисторов, контактной металлизации, изолирующих пленок) и их величина и знак зависят от материала элемента и пластины, условий формирования, структуры материала (моно– или поликристаллический, аморфный), конструкции ПЧЭ (рисунок-2).

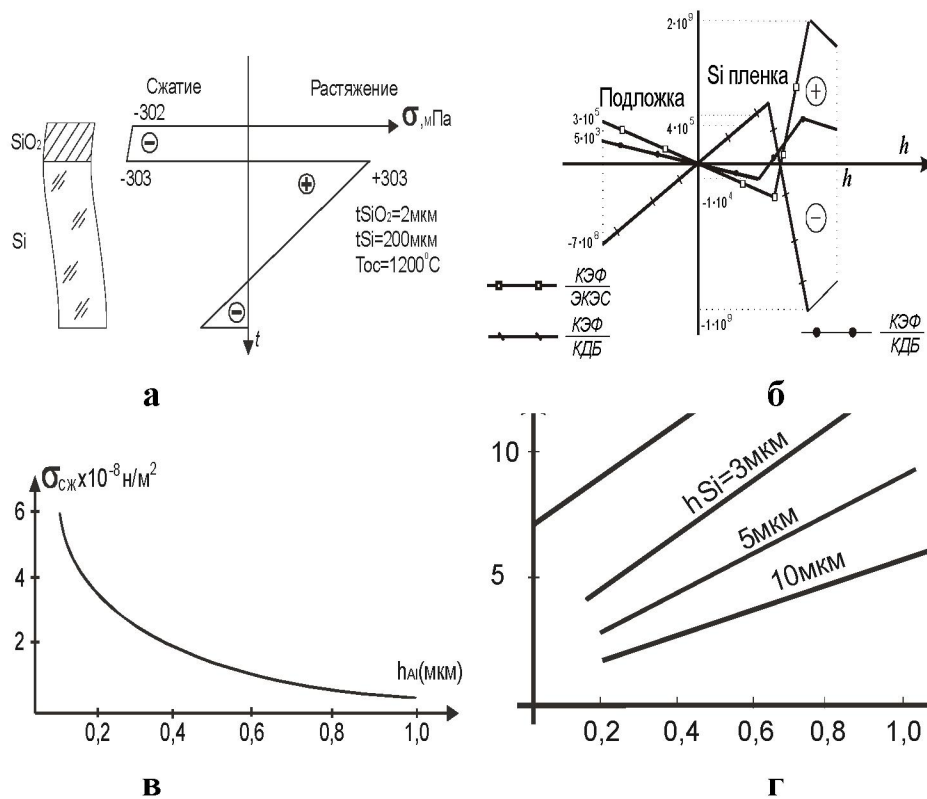


Рисунок 2 – Графические модели внутренних механических напряжений в тонких пленках и полупроводниковых структурах МЭД: а – напряжения в системе SiO<sub>2</sub> – Si;

б – напряжения в различных эпитаксиальных структурах; в – напряжения в алюминиевых пленках, сформированных магнетронным методом; г – напряжения в эпитаксиальных пленках различной толщины

Рассмотрим более подробно составляющие механических напряжений:

а) структурные напряжения  $\sigma_c$ :

– для пленочных структур, применяемых в металлопленочных и кремниевых датчиках, используется формула Стоуни в двух формах:

$$\sigma_c = \frac{E_s}{6(1-\mu_s)} \cdot \frac{l_s^2}{l_f} \cdot \frac{1}{R_c}; \quad (2)$$

$$\sigma_c = \frac{4}{3} \cdot \frac{E_s}{1-\mu_s} \cdot \frac{t_s^2 \cdot b}{t_f \cdot d^2}, \quad (3)$$

где  $l_s, l_f$  – соответственно толщины подложки и пленки;  $R_c$  – радиус изгиба структуры;  $d$  – диаметр структуры (подложки);

– для локальных диффузионных, в частности, пьезорезистивных областей:

$$\sigma_c = \gamma \frac{C_s}{1-\mu} \left[ \operatorname{erfc} \frac{d-z}{(4Dt)^{1/2}} - \frac{2\sqrt{\pi Dt}}{\pi d} \right], \quad (4)$$

где  $\gamma$  – коэффициент сжатия (растяжения) решетки диффузантом (справочная величина),  $D$  – коэффициент диффузии;  $C_s$  – поверхностная концентрация;  $d$  – толщина пластины;  $t$  – время диффузии;

– для эпитаксиальных структур напряжение в подложке  $\sigma_1|Z|$ :

$$\sigma_1|Z| = -\sigma_{os} \left[ \frac{h_2}{h_1+h_2} + 6 \frac{h_2 Z}{(h_1+h_2)^2} \cdot \left( 1 - \frac{h_2}{h_1+h_2} \right) \right], \quad (5)$$

а напряжение в пленке  $\sigma_2|Z|$ :

$$\sigma_2 = -\sigma_{os} \left[ 1 - \frac{h_2}{h_1-h_2} - 6 \frac{h_2 Z}{(h_1+h_2)^2} \cdot \left( 1 - \frac{h_2}{h_1-h_2} \right) \right], \quad (6)$$

$$\sigma_{os} = \frac{E\beta(c_1-c_2)}{1-\mu}, \quad (7)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – концентрация атомов примеси соответственно в подложке и в эпитаксиальном слое;  $\beta=(\Delta a/a)_c$  – коэффициент деформации решетки примесью;  $a$  – параметр решетки (для монокремния  $a = 0,357 \text{ нм}$ )

Из (5-7) следует, что характер напряжений в структурах зависит от знака множителя  $\beta(c_1-c_2)$ :

– если  $\beta(c_1-c_2) > 0$ , то напряжения будут сжимающими в подложке и растягивающими в пленке;

– если  $\beta(c_1-c_2) < 0$ , то напряжения будут сжимающими в пленке и растягивающими в подложке.

– самым благоприятным условием для ПЧЭ является равенство  $\beta(c_1-c_2)=0$ , что может быть в двух случаях, если

$$\beta=(\Delta a/a)_c=0, \text{ т.е. } \Delta a=0 \text{ или } c_1=c_2 \quad (8)$$

Из (5-7) так же следует условие максимума структурных напряжений (самый неблагоприятный случай):

$$|\sigma_1|Z| = |\sigma_2|Z| = \sigma_{os} \quad \text{при } h_1=h_2 \quad (9)$$

б) термонапряжения  $\sigma_T$ :

В отличие от структурных, термические напряжения напрямую зависят от температуры эксплуатации МЭД, поэтому их влияние может привести к деградации параметров или к разрушению кристаллов ПЧЭ.

Формулы расчета термических напряжений для элементов и структур ПЧЭ, в большинстве своем основываются на расчете изгиба биметаллических пластин [2]:

$$R = \frac{1}{6} h \left[ 3 \left( 1 + h_1/h_2 \right)^2 + \left( 1 + E_1 h_1 / E_2 h_2 \right) \left( h_1^2 / h_2^2 + E_2 h_2 / E_1 h_1 \right) \right] / (\alpha_1 - \alpha_2) (T - T_0) \left( 1 + h_1/h_2 \right), \quad (10)$$

где  $h = h_1 + h_2$ ;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – ТКЛР пленки и подложки;  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $E_1$  и  $E_2$  – толщины и модули Юнга соответственно пленки и подложки.

Для наиболее распространенных в ПЧЭ сочетаний структурных элементов «пленка – подложка»:  $SiO_2 - Si$ , имеем:  $E_1 \approx E_2$ , а  $h_1 = h_{SiO_2} \ll h_1 = h_{Si}$ , при этом (10) может быть значительно упрощена:

$$R = \frac{E_2 \cdot h_2^2}{6 (\alpha_1 - \alpha_2) (T - T_0) E_1 h_1}, \quad (11)$$

где  $T_0$  – температура окисления.

Напряжения, возникающие от изгиба структуры в подложке ( $Si$ ) и в пленке ( $SiO_2$ ), могут быть оценены по формулам (2) и (11):

$$\sigma_{Si}^{\max} = \frac{\frac{E_1 h_1^3}{1 - \mu_1} + \frac{E_2 [h_2^3 + 3h_2^2 (h_1 + h_2)]}{1 - \mu_2}}{6 R h_2 (h_1 + h_2)}; \quad (12)$$

$$\sigma_{SiO_2}^{\max} = \frac{\frac{E_1 h_2^3}{1 - \mu_2} + \frac{E_1 [h_1^3 + 3h_1^2 (h_1 + h_2)]}{1 - \mu_1}}{6 R h_1 (h_1 + h_2)}. \quad (13)$$

Учитывая, что  $h_1 \ll h_2$ , получаем

$$\sigma_{Si}^{\max} = \frac{2 E_2 h_2}{3 R (1 - \mu_2)} = c_2 \cdot \frac{h_2}{R}; \quad (14)$$

$$\sigma_{SiO_2}^{\max} = \frac{E_2 h_2^2}{6 R h_1 (1 - \mu_2)} = c_1 \cdot \frac{h_2^2}{R h_1}. \quad (15)$$

Используя справочные данные приведенные в [3, 4] для кремния и окисла, находим, что  $c_1 = 0,3 \cdot 10^5$  МПа,  $c_2 = 0,91 \cdot 10^5$  МПа.

Подставляя в выражение (11) значения  $\alpha_{SiO_2} = 0,55 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ,  $\alpha_{Si} = 4 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ,  $\Delta T = (1473 - 293) K = 1180 K$ ,  $E_1 = 0,8 \cdot 10^5$  МПа для ( $SiO_2$ ),  $E_2 = 1,3 \cdot 10^5$  МПа для ( $Si$ ),  $\mu_1 = 0,18$ ,  $\mu_2 = 0,25$  и, учитывая, что  $h_1 \ll h_2$  получаем

$$R \approx -1 \cdot 10^2 h_2^2 / h_1 \quad (16)$$

Знак минус в (16) указывает на выпуклость композиционной структуры  $Si-SiO_2$ .

Для  $h_{SiO_2} = 1$  мкм и кремниевой подложки толщиной  $H_{Si} \approx 200$  мкм, что характерно для ПЧЭ МЭД, имеем  $|R| \approx 2$  м.

Подставляя упрощенное выражение (16) в (14) и (15), получаем численные значения термических напряжений:

$$\sigma_{Si} = -\frac{C_2 h_1}{1 \cdot 10^{-2} h_2} \approx 5 \text{ МПа}; \quad (17)$$

$$\sigma_{SiO_2} = -\frac{C_1}{1 \cdot 10^{-2}} \approx -3 \cdot 10^{-2} \text{ МПа.} \quad (18)$$

Исходя из полученных значений МН для структур «МК – окисел», можно утверждать, что:

- термонапряжения в окисной пленке – сжимающие, а в подложке – растягивающие;
- напряжение в  $Si$  растут с ростом толщины  $SiO_2$ ;
- напряжения в  $SiO_2$ , наоборот, уменьшаются с ростом толщины  $SiO_2$ .

Представляют значительный практический интерес значения термонапряжений, существующих в структурах «монокремний–поликремний» («МК–ПК»), используемых в настоящее время для изготовления высокотемпературных МЭД.

Для структур с уменьшенной толщиной, предназначенных для ПЧЭ, имеем:  $T_0 = T_{0 \text{ осаж}} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_{ПК} = 3,82 \cdot 10^{-6}$ ,  $E_{ПК} \approx E_{МК}$ ,  $\mu_{ПК} \approx \mu_{МК}$ ,  $h_{ПК} \approx 1,0 \text{ мкм}$ ,  $h_{МК} = 200 \text{ мкм}$ ;

$$R \approx h_2^2 / 6(\alpha_{ПК} - \alpha_{МК}) \cdot \Delta T \cdot h_1 \approx 92 \text{ м.} ; \quad (19)$$

$$\sigma_{ПК} = E \frac{h_2^2}{6R h_1 (1 - \mu)} \approx -12 \text{ МПа;} \quad (20)$$

$$\sigma_{МК} \approx 0,7 \cdot \frac{E h_2}{R(1 - \mu)} \approx 2,5 \text{ МПа.} \quad (21)$$

Таким образом, в структурах «МК–ПК», поликремниевая пленка находится в сжатом состоянии, а монокремниевая подложка – в растянутом.

С целью оптимизации электрофизических характеристик ПЧЭ и МЭД, можно управлять величиной и знаком внутренних механических напряжений, как отдельных пленок, так и пленочных композиций путем изменения технологических режимов формирования пленок [5].

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Чернышов А.И. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных схем. – М.: «Радио и связь», 1988.
- 2 Проектирование датчиков для измерения механических величин под ред. Е.П. Осадчего. М.: Машиностроение, 1979.
- 3 Баранский П.П. и др. Полупроводниковая электроника. Справочник/Киев.: Наукова думка, 1975.
- 4 Ваганов В.И. Интегральные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
- 5 Михайлов П.Г., Сергеев Д.А., Михайлова В.П. Управление структурами микроэлектронных датчиков // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: Труды МНПК «Шляндинские чтения – 2010» – Пенза: ПГУ, 2010.

#### REFERENCES

- 1 Chernyshev A.I. Basics reliability of semiconductor devices and integrated circuits. – М.: "Radio and Communications", 1988.
- 2 Designing sensors for measurement of mechanical quantities ed. Osadchy E.P./M.: Engineering, 1979.
- 3 Baranskii P.P. and other semiconductor electronics. Directory/Kiev. Naukova Dumka, 1975.
- 4 Vaganov V.I. Integrated converters. – Energoatomizdat, 1983.
- 5 Mikhailov P.G., Sergeev D.A., Mikhailov V.P. Management structures of microelectronic sensors//Methods, tools and technologies for production and processing of measurement information: Proceedings of IRTC "Shlyandinskies Readings. – 2010". – Penza: PSU, 2010.

#### Резюме

*P. G. Mikhailov \* , K. A. Ozhikenov \*\**

\* (Doctor of Technical Sciences, professor of Penza State Technological University, Penza, Russian)

\*\* (Candidate of Technical Sciences, Head of the Department Robotics and Engineering Tools of Automation, Institute of Information and Telecommunication Technologies, Kazakh National Technical University after K.I. Satpayev, Almaty)

MECHANICAL AND THERMAL DEFORMATION IN THE STRUCTURE  
OF THE SENSORY MICROMECHANICAL ELEMENTS

Article devoted to the key instrument performance degradation or destruction of individual semiconductor wafers and sensitive elements (RPO) microelectronic sensors (EDR). The structural stress, thermal stresses, as well as practical interest values of thermal stresses, existing structures "monosilicon-polysilicon" ("МК-РС"), currently used for the production of high-dose rate.

**Key words:** semiconductors, a micromechanical sensor, the silicon sensor, the ion current, polysilicon.

**Резюме**

*П. Г. Михайлов \* , Қ. Ә. Әжікенов \*\**

\* (техника ғылымдарының докторы, Пенза мемлекеттік технологиялық университетінің профессоры, Пенза, Ресей)

\*\* (техника ғылымдарының кандидаты, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті, Ақпараттық және телекоммуникациялық технологиялары институты, «Роботты техника және автоматиканың техникалық құралдары» кафедрасының меңгерушісі, Алматы)

СЕНСОРЛЫҚ ЭЛЕМЕНТТЕРДІҢ МИКРОМЕХАНИКАЛЫҚ  
ҚҰРЫЛЫМДАРЫНДАҒЫ МЕХАНИКАЛЫҚ  
ЖӘНЕ ЖЫЛУЛЫҚ ДЕФОРМАЦИЯЛАРЫ

Мақала аспап сипаттамалары төмендеуінің немесе микроэлектронды датчиктердің (МЭД) пласти-налары мен жекелей жартылай өткізгіштік сезімтал элементтерінің (ЖСЭ) бүлінуінің мәселелеріне арналған. Құрылымдық кернеуліктер мен терموкернеуліктер, сонымен қатар «монокремний–поликремний» («МК–ПК») құрылымдырында қазіргі заманғы қолданылатын жоғары температуралық ЖСЭ-лерді терموкернеулік мәндерінің қолданушылық мәселелері қарастырылған.

**Тірек сөздер:** жартылай өткізгіштер, микромеханикалық сезгіш, кремнийлік сезгіш элемент, иондық ток, поликремний.