УДК 621.865.8

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 автоматики» 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, термонапря-жения, а также практический интерес значения термонапряжений, существующих в струк-турах «монокремний–поликремний» («МК–ПК»), используемых в настоящее время для изготовления высокотемпературных МЭД.

Ключевые слова: полупроводники, микромеханический датчик, кремниевый чувствитель-ный 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 деградационных 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 *(σ_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).

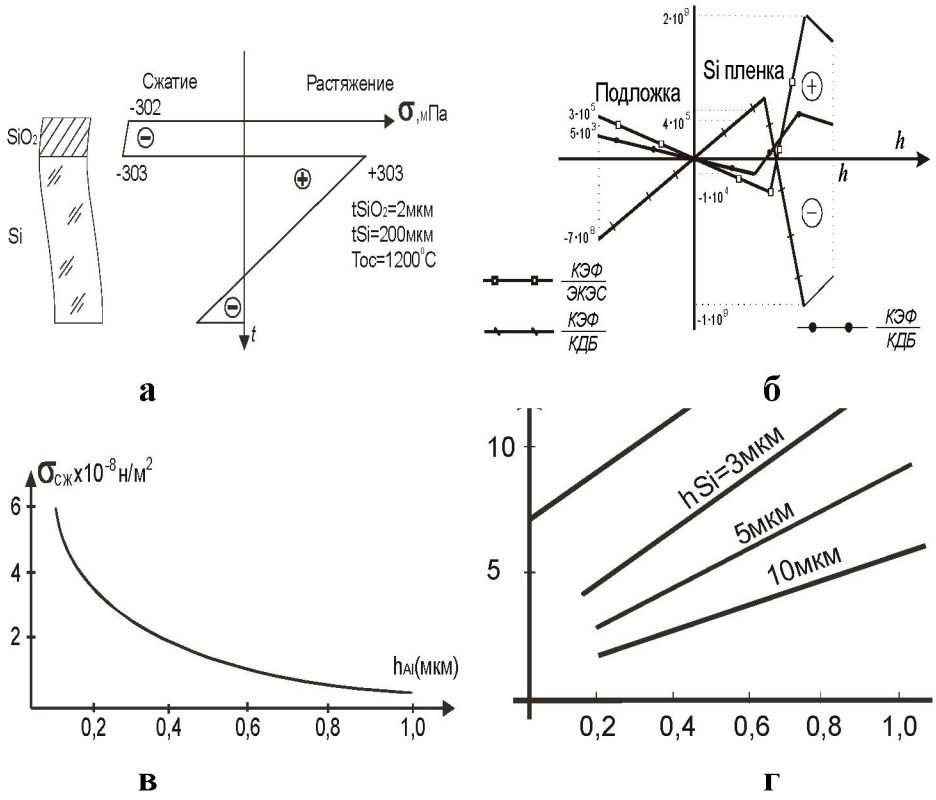

Рисунок 2 – Графические модели внутренних механических напряжений в тонких пленках и полупроводниковых структурах МЭД: а – напряжения в системе SiO_2 – Si;

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 σ_C:

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

$$\sigma_C = \frac{E_S}{6(1-\mu_S)} \cdot \frac{l_S^2}{l_f} \cdot \frac{1}{R_C}; \tag{2}$$

$$\sigma_C = \frac{4}{3} \cdot \frac{E_S}{1-\mu_S} \cdot \frac{t_S^2 \cdot b}{t_f \cdot d^2}, \tag{3}$$

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:

$$\sigma_C = \gamma \frac{C_S}{1-\mu}\left[erfc \frac{d-z}{(4Dt)^{1/2}} - \frac{2\sqrt{\pi Dt}}{\pi d} \right], \tag{4}$$

где γ – 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 $\sigma_1|Z|$:

$$\sigma_1|Z| = -\sigma_{0S}\left[\frac{h_2}{h_1+h_2} + 6\frac{h_2 Z}{(h_1+h_2)^2} \cdot \left(1 - \frac{h_2}{h_1+h_2}\right)\right], \tag{5}$$

а напряжение в пленке $\sigma_2|Z|$:

$$\sigma_2 = -\sigma_{0S}\left[1 - \frac{h_2}{h_1-h_2} - 6\frac{h_2 Z}{(h_1+h_2)^2} \cdot \left(1 - \frac{h_2}{h_1-h_2}\right)\right], \tag{6}$$

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

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 $a = 0{,}542$ *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

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

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

$$|\sigma_1|Z||=|\sigma_2|Z||=\sigma_{0S} \qquad \text{при} \quad h_1=h_2 \tag{9}$$

б) термонапряжения σ_T: