

Д. ф.-м. н. Ф. Д. КАСИМОВ, А. Э. ЛЮТФАЛИБЕКОВА

Азербайджан, г. Баку, ОКБ космического приборостроения
E-mail: anasa.ssddb@azeuro.net

Дата поступления в редакцию
07.02 2002 г.

Оппонент к. т. н. А. Г. ШАЙКО-ШАЙКОВСКИЙ
(ЧНУ им. Ю. Фельдовича, г. Черновцы)

РАСЧЕТ УПРУГИХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

Возникающие в пленке механические напряжения пропорциональны ее толщине и температуре осаждения и обратно пропорциональны толщине подложки.

Многослойные полупроводниковые структуры, широко применяемые в современной микроэлектронике, представляют собой неоднородные тела как по сечению, так и по площади [1, 2]. Вследствие этого в микроэлектронных изделиях в процессе изготовления возникают упругие механические напряжения, величина и характер распределения которых оказывают значительное влияние на электрические характеристики приборов [3].

Например, известно, что в термически выращенных пленках двуокиси кремния существуют неоднородно распределенные по толщине механические напряжения [4], приводящие к сдвигу пика ионной компоненты полного тока по оси напряжений [5].

При формировании и обработке тонких пленок SiO₂ наиболее современным способом — быстрой термической обработкой некогерентным ИК-излучением [6] — вследствие различия оптических и упругих постоянных в структуре генерируются поля термоупругих напряжений сложной формы [7].

При выращивании локальных пленок моно- и поликристаллического кремния в едином технологическом процессе [1] на кремниевой пластине *p*-типа проводимости создаются локальные области SiO₂, покрытые затравочными поликремниевыми слоями, на которых в ходе эпитаксиального наращивания монокристаллической пленки *n*-типа проводимости формируются пленки поликристаллического кремния (ППК). В результате получаются структуры, неоднородные как по сечению, так и по площади, вследствие чего в монокристаллических островках возникают механические напряжения, возрастающие при приближении к их периферии, т. е. к границе раздела монопленки с ППК [8].

Поэтому при проектировании ИС важное значение имеет знание величины и характера распределения механических напряжений в зависимости от топологических и конструктивно-технологических параметров образца.

Нами проведен расчет механических напряжений для наиболее распространенной в технологии ИС двухслойной структуры, представляющей собой кремни-

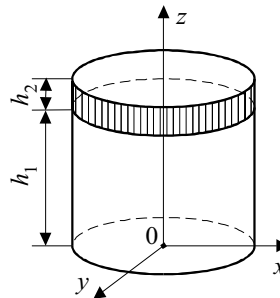


Рис. 1. Двухслойная эпитаксиальная структура

вую эпитаксиальную пленку, выращенную на подложке противоположного типа проводимости (рис. 1).

Обозначим через $h_1, \nu_1, \alpha_1, E_1$ и $h_2, \nu_2, \alpha_2, E_2$ толщину, коэффициент Пуассона, температурный коэффициент расширения и модуль Юнга для подложки и пленки, соответственно.

Решалась система уравнений термоупругости с соответствующими граничными условиями:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial z} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где σ_{ij} — нормальные напряжения.

Внешние силы, приложенные непосредственно к поверхности тела, входят в граничные условия уравнениями равновесия:

$$P_i = \sigma_{ik} n_k. \quad (2)$$

Если на рассматриваемое тело действует только температурное поле $T(Z)$ и, следовательно, поверхность тела свободна от нагрузки, то на всей поверхности должны выполняться условия

$$\begin{cases} \sigma_{11} n_1 + \sigma_{12} n_2 + \sigma_{13} n_3 = 0; \\ \sigma_{21} n_1 + \sigma_{22} n_2 + \sigma_{23} n_3 = 0; \\ \sigma_{31} n_1 + \sigma_{32} n_2 + \sigma_{33} n_3 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

На нижней и верхней поверхностях ($Z=0, h$) составляющие нормали $n_1=n_2=0$, а $n_3=1$, и из условия (3) вытекает, что

$$\sigma_{13} = \sigma_{31} = \sigma_{23} = \sigma_{32} = \sigma_{33} = 0. \quad (4)$$

На боковой поверхности $n_1 \neq 0, n_2 \neq 0, n_3 = 0$, и, следовательно:

$$\begin{cases} \sigma_{11} n_1 + \sigma_{12} n_2 = 0; \\ \sigma_{21} n_1 + \sigma_{22} n_2 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Запишем обобщенный закон Гука —

$$\begin{cases} \varepsilon_{11} = E^{-1}[\sigma_{11} - \nu(\sigma_{22} + \sigma_{33})] + \alpha\Delta T; \\ \varepsilon_{22} = E^{-1}[\sigma_{22} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33})] + \alpha\Delta T; \\ \varepsilon_{ij} = (1 + \nu)E^{-1}\sigma_{ij}, \text{ при } i \neq j \end{cases} \quad (6)$$

и условия совместимости:

$$\frac{d^2\varepsilon_{11}}{dz^2} = 0; \quad \frac{d^2\varepsilon_{22}}{dz^2} = 0; \quad \frac{d^2\varepsilon_{12}}{dz^2} = 0. \quad (7)$$

Здесь ε_{ij} — относительные деформации. Из (6), с учетом (4), имеем:

$$\begin{cases} \varepsilon_{11} = E^{-1}(\sigma_{11} - \nu\sigma_{22}) + \alpha\Delta T; \\ \varepsilon_{22} = E^{-1}(\sigma_{22} - \nu\sigma_{11}) + \alpha\Delta T; \\ \varepsilon_{12} = E^{-1}(1 + \nu)\sigma_{12}. \end{cases} \quad (8)$$

Подставляя выражения ε_{ij} из (8) в уравнения (7), интегрируя и разрешая относительно σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} , находим:

$$\begin{cases} \sigma_{11} = E(1 - \nu^2)^{-1}[(a_1 + \nu a_2)z + b_1 + \nu b_2 - (1 + \nu)\alpha\Delta T]; \\ \sigma_{22} = E(1 - \nu^2)^{-1}[(a_2 + \nu a_1)z + b_2 + \nu b_1 - (1 + \nu)\alpha\Delta T]; \\ \sigma_{12} = E(1 + \nu)^{-1}(a_3z + b_3), \end{cases} \quad (9)$$

где a_i, b_i — постоянные интегрирования.

В силу изотропности $\sigma_{11} = \sigma_{22}$, а $\sigma_{12} = 0$, из чего следует, что $a_1 = a_2 = a$; $b_1 = b_2 = b$. Следовательно,

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = E(1 - \nu)^{-1}(az + b - \alpha\Delta T) \quad (10)$$

Значения коэффициентов a и b можно найти используя граничные условия на боковых поверхностях, которые удовлетворим интегрально:

$$\int_0^{h_1} \sigma_{11}(z) dz = 0; \quad \int_0^{h_2} z\sigma_{11}(z) dz = 0. \quad (11)$$

Подставляя в (11) выражение для σ_{11} из (10), находим:

$$\begin{cases} E(1 - \nu)^{-1} \int_0^{h_1} (az + b - \alpha\Delta T) dz = 0; \\ E(1 - \nu)^{-1} \int_0^{h_2} (az^2 + bz - \alpha\Delta Tz) dz = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Интегрируя и проведя несложные преобразования, получаем значения коэффициентов:

$$a = \frac{6\Delta T(\alpha_1 - \alpha_2)}{3h_1 - 4h_2}; \quad b = \frac{\Delta T(3\alpha_2h_1 - 4\alpha_1h_2)}{3h_1 - 4h_2}. \quad (13)$$

Разделив числитель и знаменатель выражения для b на h_1 и учитывая, что $h_1 \gg h_2$, получаем упрощенное выражение для b :

$$b = \alpha_2\Delta T. \quad (14)$$

Подставляя значения коэффициентов a и b в формулу (10) и учитывая, что $z = h_2$, получаем окончательное выражение для $\sigma(z)$ в тонкой пленке:

$$\sigma(z) = \frac{6E_2(\alpha_1 - \alpha_2)h_2\Delta T}{(1 - \nu_2)(3h_1 - 4h_2)}. \quad (15)$$

Из полученной формулы видно, что возникающие в тонкой пленке механические напряжения пропор-

циональны ее толщине и температуре осаждения, что согласуется с экспериментальными данными, имеющимися в литературе. Как показано в [9, с. 216], величина механических напряжений, экспериментально измеренная в тонких поликристаллических пленках кремния (в диапазоне 0,05—10 мкм), осажденных на кремниевые подложки, зависит от толщины пленки, соотношения толщин пленки и подложки, температуры осаждения и других технологических факторов (рис. 2).

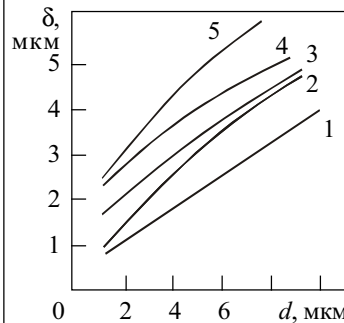


Рис. 2. Зависимость прогиба (δ) структур Si—Si₃N₄—poly-Si от толщины поликристаллической пленки (d) на подложках с ориентацией (111) толщиной 300 (3, 4), 400 (2, 5) и 500 мкм (1). Температура осаждения 1023 К (1—3) и 1123 К (4, 5)

Из рис. 2 видно, что величина прогиба пленок (соответствующая величине упругих механических напряжений в них) пропорциональна толщине пленки и температуре осаждения и обратно пропорциональна толщине подложки, что также следует и из выведенной нами формулы.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Abdullyev A. G., Kasimov F. D., Mamikonova V. M. The simultaneous growth of monocrystalline and polycrystalline silicon films with controlled parameters // *Thin Solid Films*.—1984.—Vol. 115, N 3.— P. 237—243.
2. Заика В. В., Касимов Ф. Д., Мехтиев А. Т. Многослойная МДП-структура в качестве фильтра низких частот системы ФАПЧ // *Тр. 3-й междунар. НТК «Микроэлектронные преобразователи и приборы на их основе»*.— Баку—Сумгаит.— 2001.— С. 64—65.
3. Hezel R., Hearn E. Mechanical stress and electrical properties of MNOS devices, as a function of the nitride deposition temperature // *J. Electrochem. Soc.*—1978.—Vol. 125, N 11.— P. 1848—1852.
4. Соколов В. И., Федорович Н. А. Релаксация механических напряжений в окисных пленках на кремнии // *Физика твердого тела*.— 1982.— Т. 24, № 5.— С. 1440—1441.
5. Романов В. П., Золочевский Ю. Б., Ларчиков А. В., Сапольков А. Ю. Влияние механических напряжений в диэлектрике на динамические вольт-амперные характеристики МДП-структур // *Известия вузов. Электроника*.— 1997.— Т. 2, № 6.— С. 37—43.
6. Светличный А. М., Агеев, О. А., Шляховой Д. А. Особенности получения тонких пленок SiO₂ методом быстрой термической обработки // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2001.— № 4—5.— С. 38—43.
7. Сеченов Д. А., Светличный А. М., Соловьев С. И. и др. Моделирование температурных полей в полупроводниковых структурах при быстром термическом отжиге // *Физика и химия обработки материалов*.— 1994.— № 2.— С. 33—38.
8. Касимов Ф. Д., Исмаилова С. А. Исследование механических напряжений в эпитаксиальных датчиках Холла различной конфигурации // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2001.— № 1.— С. 35—37.
9. Колешко В. М., Ковалевский А. А. Поликристаллические пленки полупроводников в микроэлектронике.— Минск: Наука и техника, 1978.