

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИК И УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНОГО СОВЕРШЕНСТВА КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР

Предлагаются методики и устройства контроля структурного совершенства кремниевых эпитаксиальных структур. Показывается, что деформации структур, которые возникают в процессе шлифовки или вследствие значительных температурных градиентов, приводят к появлению внутренних напряжений и областей с высокой плотностью дислокаций. Предполагаемые авторами методы и устройства позволяют контролировать величину деформации КЭС и их зависимость от кристаллографических направлений. Делается вывод о том, что высокие температурные градиенты приводят к потере устойчивости КЭС и образованию у неё «антикластического» изгиба.

### 1. Введение

Проблеме исследования напряжений и деформаций в кремниевых эпитаксиальных структурах (КЭС) не уделялось достаточно большое внимание из-за отсутствия надежных высокопроизводительных методов контроля величины и характера сложных форм внутренних напряжений и деформаций. Деформации изгиба (выпучивание) появляются в пластинах, поверхность которых обрабатывается абразивными порошками, при образовании эпитаксиальных или диффузионных слоев, при наличии значительных температурных градиентов. Это приводит к появлению на поверхности КЭС значительных областей с недопустимо высоким уровнем плотности дислокаций, других структурных нарушений, приводящих к дальнейшему браку в производстве интегральных микросхем и других полупроводниковых приборов.

Из сказанного можно сделать вывод, что разработка моделей расчета внутренних напряжений и сложных форм деформаций, а также методик контроля этих параметров при производстве КЭС является весьма актуальной задачей.

### 2. Анализ проблемы и постановка задачи.

Известно, [1] что если пластина деформируется малыми усилиями, то до некоторого значения усилий её плоская форма является единственно возможной, а равновесие устойчивым. При критическом напряжении первоначальная плоская форма может оказаться неустойчивой и под действием ничтожно малых возмущений пластина перейдет к новой устойчивой форме равновесия с искривлённой срединной поверхностью.

Если принять, что  $W$  - изгиб пластины толщиной  $h$ , то радиусы изгиба  $R_x$  и  $R_y$  могут быть определены из следующих соотношений [1]:

$$\frac{1}{R_x} = -\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \quad \text{и} \quad \frac{1}{R_y} = -\frac{\partial^2 W}{\partial y^2}. \quad (1)$$

С учетом [1] получим для плоскости (111) значение плоских напряжений:

$$\sigma_x = -\frac{E_{(111)}Z}{1-\nu_{(111)}^2} \left( \frac{1}{R_x} + \nu \frac{1}{R_y} \right), \quad (2)$$

$$\sigma_y = -\frac{E_{(111)}Z}{1-\nu_{(111)}^2} \left( \frac{1}{R_y} + \nu \frac{1}{R_x} \right)$$

и для плоскости (100) в направлении  $\langle 100 \rangle$

$$\sigma_x = \frac{E_{\langle 100 \rangle (001)}Z}{1-\nu_{\langle 100 \rangle (001)}^2} \left( \frac{1}{R_x} + \nu \frac{1}{R_y} \right); \quad (3)$$

$$\sigma_y = \frac{E_{\langle 100 \rangle \langle 001 \rangle} Z}{1 - \nu_{\langle 100 \rangle \langle 001 \rangle}^2} \left( \frac{1}{R_y} + \nu \frac{1}{R_x} \right).$$

Введем жесткость пластины из [1], которая определяется как

$$D = -\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}. \quad (4)$$

Введем также изгибающие моменты  $M_x$  и  $M_y$ :

$$M_x = -D \left( \frac{1}{R_x} + \nu \frac{1}{R_y} \right) = -D \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right), \quad (5)$$

$$M_y = -D \left( \frac{1}{R_y} + \nu \frac{1}{R_x} \right) = -D \left( \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right).$$

Из условия равновесия  $M_y=0$  получим из (5)

$$\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = -\nu \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}, \quad (6)$$

т.е. пластина имеет в изогнутом состоянии две кривизны в противоположном направлении (антикластический изгиб).

В начальном, безмоментном состоянии, внутренние тангенциальные силы уравновешиваются внешними усилиями, приложенными к пластине.

Для изотропной круглой термоупругой пластины (КЭС) дифференциальное уравнение, определяющее изгиб пластины, имеет вид [2]:

$$\nabla \nabla W + \mu^2 \nabla W = 0, \quad (7)$$

где

$$\mu = -\frac{\rho}{D}, \quad (8)$$

$$\rho = -\frac{F}{\pi d}, \sigma_R = -\frac{\rho}{h}, \quad (9)$$

здесь  $F$  – сила, равномерно приложенная к периметру пластины;  $\sigma_R$  – радиальное (сжимающее) напряжение за счет внешней силы;  $d$  – диаметр пластины;  $\nabla$  – оператор Лапласа.

В результате решения уравнения (7) с введением граничных условий получим выражение для критического напряжения:

$$\sigma_n^{кр} = \frac{D}{d^2 h} \mu_{0n}^2. \quad (10)$$

Величина  $\mu_{0n} = \mu_n d$  определяется из трансцендентного уравнения:

$$\mu_0 J_n(\mu_0) - (1-\nu) J_{n+1}(\mu_0) = 0. \quad (11)$$

Для пластины жестко закрепленной по контуру:

$$J_{n+1}(\mu_0) = 0. \quad (12)$$

Здесь  $J_n$  и  $J_{n+1}$  функции Бесселя действительного аргумента. Определяя из (11) и (12) величину  $\mu_0$  для коэффициента Пуассона  $\nu = 0,358$  (плоскость кремния (111) из [3]) находим из графического решения уравнения (11)  $\mu_0 = 2,077$ , а из (12)  $\mu_0 = 3,832$  и подставляя вместо  $D$  его значение (4), получаем:

$$\sigma_{кр} = \frac{E}{12(1-\nu^2)} \mu_0^2 \left( \frac{h}{d} \right)^2. \quad (13)$$

Критическое значение внутреннего напряжения может создаваться при наличии радиального градиента температур  $\Delta T$ . Предположим, что при резком охлаждении вблизи края пластины температура понижается. В этом случае периферийный слой, температура которого отличается от температуры пластины на  $\Delta T$ , выступает как внешняя сжимающая сила. Учитывая, что  $\varepsilon = \alpha \Delta T$  и  $\sigma = E\varepsilon$ , и подставляя эти значения в (13), получаем:

$$\Delta T_{кр} = \frac{\sigma_{кр}}{\lambda E} = \frac{\mu_0^2}{12\lambda(1-\nu^2)} \left( \frac{h}{d} \right)^2. \quad (14)$$

Величины  $\mu_0$  были вычислены нами для плоскости (111), где  $\mu_0 = 2,077$ , а также для плоскости (100). При этом так как для анизотропной КЭС, изготовленной из кремниевой пластины (100), решение уравнения (7) отсутствует, мы рассмотрели два случая:

- 1) вся КЭС (100) имеет плоскость, совпадающую с плоскостью изотропной пластины, имеющей упругие константы  $E_{<100>}$  и  $\nu_{<100>}$ ;
- 2) вся КЭС (100) имеет жесткость, совпадающую с жесткостью изотропной пластины, имеющей упругие константы  $E_{<110>}$  и  $\nu_{<110>}$ .

Результаты расчетов приведены в таблице для  $h = 0,002d$  и  $\alpha_{1000^\circ C} = 1 \times 10^{-6}$ .

Расчетные значения радиального градиента температур

| КЭС                                  | $\mu_0$ | $\mu_0^2 / (1 - \nu^2)$ | $\Delta T_{кр} ^\circ C$ |
|--------------------------------------|---------|-------------------------|--------------------------|
| (111)                                | 2,077   | 4,94                    | 41                       |
| (100), $E_{<100>}$ , $\nu_{<100>}$ ; | 2,034   | 4,58                    | 37,3                     |
| (100), $E_{<110>}$ , $\nu_{<110>}$ ; | 1,9     | 3,63                    | 31,6                     |

Таким образом, видно, что для КЭС диаметром 60 мм при толщине  $h = 300$  мкм. критическое охлаждение периферии, при котором КЭС теряет устойчивость, составляет при  $1000^\circ C - 30 \div 40^\circ C$ . До потери устойчивости градиент температуры уравнивается внутренними напряжениями сжатия, которые однородны по всей толщине пластины. Эти напряжения могут быть ниже предела пластичности и при дальнейшем остывании КЭС вплоть до комнатной температуры они исчезают, не оставляя никаких следов. При этом, в конечном счете, изгиб будет отсутствовать.

В момент потери устойчивости КЭС изгибается и вместо однородных по толщине напряжений сжатия возникают неоднородные по толщине напряжения изгиба, максимальная величина которых может превышать значения напряжения сжатия и, следовательно, может превышать предел пластичности. Возникает пластическая деформация, приводящая к сложным формам изгиба после окончания охлаждения КЭС.

Учитывая зависимость модуля Юнга  $E$  и коэффициента Пуассона  $\nu$  от кристаллографических направлений в пластине кремния, ориентированной в плоскости (100), которая приведена на рис. 1 и построена нами по данным работы [3], а также зависимость  $\sigma_{кр}$  и  $T_{кр}$  от анизотропии упругих свойств и диаметра пластины, необходимо разработать методику прецизионного контроля изгибов КЭС в зависимости от кристаллографических направлений в плоскости (100), а также методику контроля внутренних напряжений в зависимости от кристаллографических направлений.

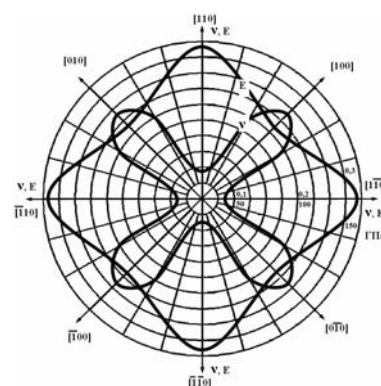


Рис. 1. Зависимость модуля Юнга  $E$  и коэффициента Пуассона  $\nu$  от кристаллографических направлений в пластине кремния (100)

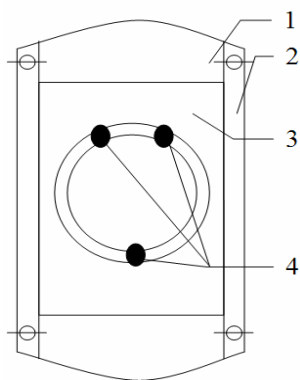


Рис. 1. Манипулятор для снятия топограмм: 1 – основание; 2 – направляющая; 3 – измерительный столик; 4 – корундовые наконечники

### 3. Разработка методики измерений и обсуждение результатов

Для измерения сложных форм изгиба КЭС и их зависимости от кристаллографических направлений в плоскости кремниевой пластины нами был разработан манипулятор, общий вид которого показан на рис.2. Основание манипулятора 1 вкручивается вместо штатного столика микроинтерферометра МИИ-4. Перемещение головки МИИ-4 контролируется с помощью индуктивного датчика перемещения, связанного с измерительным блоком (рис.3). Контролируемая КЭС устанавливается на измерительный столик 3 на корундовые наконечники 4, расположенные вдоль кристаллографического направления КЭС. Перемещая вручную КЭС вокруг корундовых наконечников на  $360^\circ$ , а с помощью столика 3 линейно по диаметру пластины, можно снять топограмму изгиба КЭС. Эпюры деформации КЭС в 3D формате приведены на рис.4. Ориентация КЭС – (100). С помощью разработанной нами [4] установки «Полярон-2», имеющей возможность по программе измерять сложные формы внутренних напряжений, нами были измерены внутренние напряжения в той же КЭС ориентации (100). Эпюры напряжений представлены на рис.5.

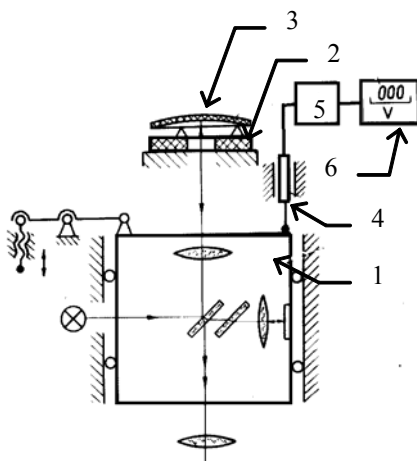


Рис. 2. Установка для снятия эпюр изгибов КЭС. 1 – микроинтерферометр МИИ-4; 2 – измерительное кольцо; 3 – образец; 4 – индуктивный датчик; 5 – измерительный блок; 6 – индикаторное устройство

Как видно из рисунков, эксперимент подтвердил наши выводы о потере устойчивости КЭС и образовании у неё «антикластического» изгиба.

### 4. Выводы

1. На основании теории статической устойчивости тонких пластинок (что представляет собой КЭС) был предложен новый механизм, приводящий к новым формам изгиба КЭС ориентации (100).

2. Впервые были предложены выражения для определения критических напряжений  $\sigma_{кр}$  и критического радиального градиента температур  $T_{кр}$  и определена взаимосвязь этих выражений с диаметром и толщиной КЭС и упругими постоянными  $E$  и  $\nu$ .

3. Экспериментальные исследования изгиба КЭС с ориентацией (100) показали, что в пластине (100) возникает сложный изгиб, эпюры которого имеют экстремум в одном из кристаллографических направлений  $\langle 100 \rangle$ ,

тогда как КЭС, изготовленные из пластин ориентации  $\langle 111 \rangle$ , в большинстве случаев имеют чисто сферический изгиб.

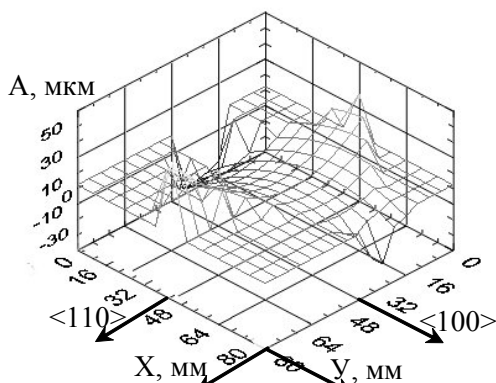


Рис. 4. Эпюры деформации пластины КЭС, вызванные «антикластическим» изгибом

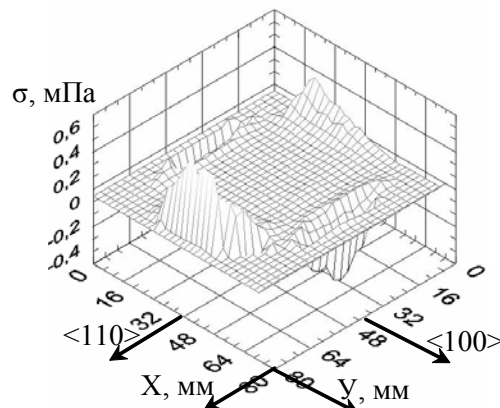


Рис. 5. Эпюры внутренних напряжений в КЭС

**Список литературы:** 1. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости: Пер. с англ. под ред. Шапиро Г.С. М.: Наука, 1979. С. 34-53. 2. Амбарцумян С.А. Теория анизотропных пластин. М.: Наука, 1967. 227 с. 3. Wortman J.J. and Evans R.A. Young's modulus, shear's modulus and poisson's ratio in silicon and germanium // J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36, №1. P. 153. 4. Оксанич А. П. Автоматизований комплекс вимірювання внутрішньої напруги в пластинах GaAs / А. П. Оксанич, С. Е. Притчин, В. Є. Краскевич, В. В. Батареев // Складні системи і процеси. 2006. № 2 (10). С. 40-50.

*Поступила в редколлегию 12.06.2011*

**Оксанич Анатолий Петрович**, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. информационно-управляющих систем, директор НИИ технологии полупроводников и информационно-управляющих систем Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского. Научные интересы: методы и аппаратура контроля структурно-совершенных полупроводниковых монокристаллов. Адрес: Украина, 39600, Кременчуг, ул. Первомайская, 20, тел.: (05366) 30157. E-mail: oksanich@kdu.edu.ua.

**Притчин Сергей Эмильевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры информационно-управляющих систем Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского. Научные интересы: автоматизация процессов управления производством полупроводниковых материалов. Адрес: Украина, 39600, Кременчуг, ул. Первомайская, 20. E-mail: pritchin@knu.edu.ua.

**Седин Евгений Александрович**, старший преподаватель кафедры технической кибернетики Криворожского института экономики, информационных технологий и управления. Научные интересы: методы и аппаратура контроля структурно-совершенных полупроводниковых монокристаллов. Адрес: Украина, 50048, Кривой Рог, ул. Революционная, 5, тел. (097) 9002078. E-mail: e.a.sedin@gmail.com.