

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРОБЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ ТОПОГРАФИИ

С.Ф. Сенько

Физико-технический институт НАН Беларуси
г. Минск, Республика Беларусь

Цель настоящей работы заключалась в оценке фактического распределения остаточных напряжений по площади полупроводниковой пластины на основе вновь разработанных методов контроля. Установлено, что на начальных этапах формирования полупроводниковой структуры фактическая форма ее изгиба зависит преимущественно от кристаллографической ориентации пластин кремния. Совокупность линий перегиба для пластин ориентации (111) представляет собой шестилепестковую розетку, а для пластин ориентации (001) – четырехлепестковую. Дальнейшее формирование функциональных слоев требуемой топологии приводит к перераспределению остаточных напряжений, а влияние ориентации подложки при этом уменьшается.

Ключевые слова: полупроводниковые пластины, оптическая топография, остаточные напряжения, методы контроля

THE STUDY OF WARPAGE OF SEMICONDUCTOR SILICON WAFERS BY THE MAKYOH TOPOGRAPHY

S.F. Sianko

Physical Technical Institute of the National Academy of sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

The purpose of this paper has been estimated of the actual distribution of residual stresses over the area of the semiconductor wafer on the basis of newly developed control methods. It is established that at the initial stages of formation of the semiconductor structure the actual form of its bending depends mainly on the crystallographic orientation of the silicon plates. The set of inflection lines for the orientation plates (111) is a six-lobe outlet and for orientation plates (001) – a four-lobe outlet. Formation of functional layers of the required topology leads to the redistribution of residual stresses. The effect of the orientation of the substrate decreases in this case.

Keywords: semiconductor wafers, Makyoh topography, residual stress, methods of measurements

E-mail: senkosf@tut.by

Введение

Практически с момента создания первых полупроводниковых приборов и до настоящего времени монокристаллический кремний является основным конструкционным материалом электроники. В основе массового производства сначала дискретных приборов, а затем и интегральных схем (ИС) лежит планарная технология, основанная на последовательном формировании на кремниевой пластине различных функциональных слоев требуемой топологии. При этом пластины подвергаются многократному нагреву до температур T вплоть до $1200\text{ }^\circ\text{C}$ с последующим охлаждением. Наличие температурных градиентов и функциональных слоев приводит к возникновению в формируемых структурах значительных механических напряжений.

Распределение остаточных напряжений в многослойной структуре носит сложный характер, обусловленный как свойствами формируемых слоев, так и историей термообработки. Эпитаксия и термическое окисление являются в подавляющем большинстве циклов изготовления ИС первой термической обработкой. Технологические слои на пластине еще не сформированы, что позволяет наиболее точно определить влияние режимов термообработки на возникновение механических напряжений и их распределение по площади пластины. До настоящего времени контроль остаточных напряжений в полупроводниковых пластинах ограничивался преимущественно измерением величины прогиба пластин как наиболее универсальной характеристики. При этом предполагалось, что пластина изогнута равномерно по сферической поверхности. Соответственно, все модели для расчета напряжений исходили из данного предположения. В действительности изгиб полупроводниковой пластины носит достаточно сложный характер. Его можно определить как совокупность вогнутых и выпуклых участков различного размера и радиуса кривизны.

В настоящей работе приведены результаты исследования реальной формы изгиба полупроводниковых пластин кремния под действием остаточных напряжений, что позволило определить их фактические значения и распределение по площади пластины.

Нагрев и охлаждение полупроводниковых пластин

Термообработка полупроводниковых пластин в настоящее время осуществляется преимущественно групповым методом. Пластины устанавливаются в кварцевую лодочку в вертикальном положении на относительно небольшом расстоянии друг от друга и помещаются в кварцевую трубу. Схема процесса охлаждения приведена на рис. 1.

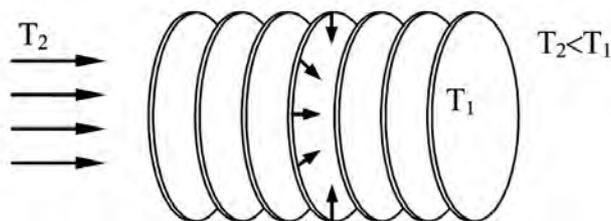


Рис. 1. Взаимное расположение полупроводниковых структур в процессе групповой обработки

По окончании процесса обработки полученные структуры охлаждаются в газовом потоке или на воздухе. Края пластин при этом охлаждаются быстрее центра, что приводит к возникновению градиентов напряжений в радиальном направлении, указанном стрелками. Если величина градиентов напряжения превышает некоторое критическое значение, то возникает деформация пластины, т.е. коробление.

При индивидуальной обработке наиболее распространенным методом нагрева является нагрев на горячем пьедестале (рис. 2). Пластина при этом контактирует с го-

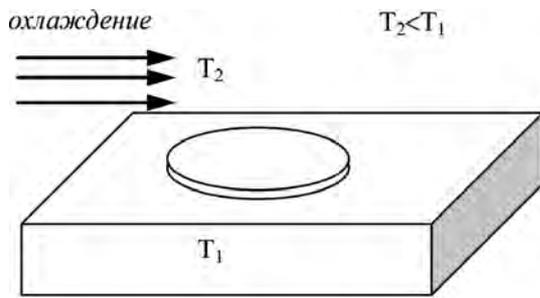


Рис. 2. Возникновение градиентов температуры при обработке на горячем пьедестале

рячим пьедесталом тыльной поверхностью. По окончании процесса в рабочую камеру подается газ, температура которого обычно ниже температуры пьедестала. При этом рабочая поверхность охлаждается и сжимается быстрее тыльной. Температурные градиенты в этом случае направлены по толщине пластины, поэтому характер их изгиба несколько отличается от предыдущего случая.

Фактическая форма изгиба зависит от величины градиентов, направле-

ния их действия, соотношения площадей упругих и пластических участков, геометрических параметров пластин, предыстории их обработки и ряда других факторов. Если в первом случае изгиб центральной части пластины возможен в любом направлении, то во втором случае рабочая поверхность пластины, как правило, получается вогнутой. При сравнительно невысоких градиентах температуры изгиб имеет преимущественно простую геометрическую форму без линий перегиба, например, сферическую или цилиндрическую. Повышение градиентов приводит к появлению линий перегиба и существенному усложнению формы изгиба.

Основы контроля остаточных напряжений в полупроводниковых структурах

Оценить величину термических напряжений σ в пластинах, изготовленных из однородного материала, в данном случае кремния, можно по классической формуле [1]

$$\sigma = \alpha E_s \Delta T, \quad (1)$$

где E_s – модуль Юнга материала пластины, ΔT – градиент температуры по пластине.

Расчет остаточных напряжений, как правило, проводят на основе измерения относительной деформации по формуле [2]

$$\sigma = -\frac{l-l_0}{l} \cdot \frac{E_f}{1-\mu_f}, \quad (2)$$

где l – размер контролируемого элемента до деформации; l_0 – размер после деформации; E_f , μ_f – модуль Юнга и коэффициент Пуассона пленки. Величину деформации $(l-l_0)$ для поверхностных слоев равномерно изогнутой круглой полупроводниковой пластины толщиной D в этом случае также можно рассчитать на основе измерения радиуса ее кривизны R

$$l-l_0 = \frac{\pi D \arcsin \frac{r}{R}}{360}, \quad (3)$$

где r – радиус пластины.

Радиус кривизны в простейших случаях для сферически изогнутых структур можно определить из соотношения [3]

$$R = \frac{r^2}{2\delta}, \quad (4)$$

где δ – стрела прогиба.

Более точные значения R можно получить интерферометрическими методами при формировании колец Ньютона, либо лазерными – на основании измерения сме-

щения Δx отраженного луча на экране при перемещении контролируемой пластины на расстояние x по формуле [1,4]

$$R = \frac{2hx}{\Delta x}, \quad (5)$$

где h – расстояние от пластины до экрана.

Существенным недостатком рассматриваемых методов является то, что они основаны на предположении о равномерном изгибе всей пластины и не учитывает реальную форму изогнутой поверхности. В итоге полученные усредненные результаты контроля величины напряжений могут отличаться от фактических на порядок и более. В связи с этим был разработан новый метод локального измерения деформаций на основе оптической топографии.

Определение изгиба полупроводниковой структуры и локальных напряжений

Реальную форму изгиба полупроводниковых структур можно легко определить методом оптической топографии, известным также как метод *Makyoh* топографии [4–9]. Оптическая схема контроля приведена на рис. 3. Свет от гомоцентрического источника 1 падает на поверхность контролируемой структуры 2, отражается от нее и попадает на экран 3, формируя на нем светотеневое изображение контролируемой поверхности.

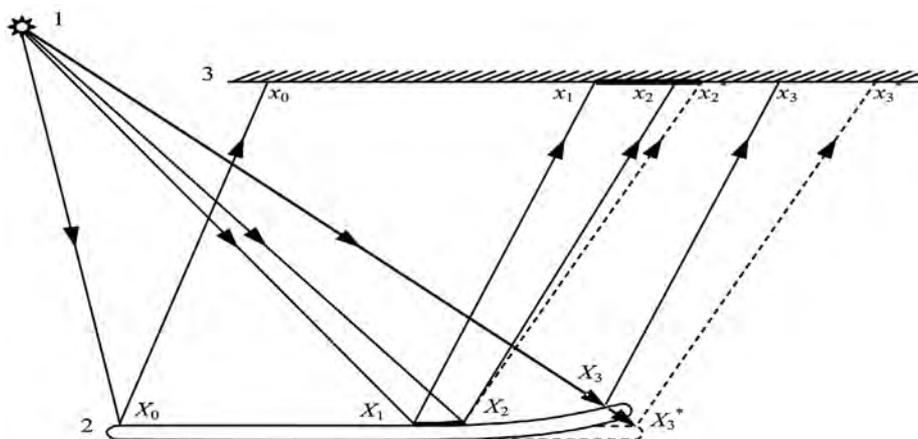


Рис. 3. Оптическая схема контроля поверхностей методом оптической топографии

Исходная структура 2 до деформации ($R_1 = \infty$) и ход отраженных от нее лучей изображены пунктирными линиями. Изображение всей поверхности структуры $X_0X_3^*$ и её фрагмента X_1X_2 в случае отсутствия коробления на экране 3 обозначены как $x_0x_3^*$ и $x_1x_2^*$. Коробление структуры приводит к смещению отраженных из точек x_3^* и x_2^* лучей в точки x_3 и x_2 , соответственно. Смещение $\Delta x_1 = (x_0x_3 - x_0x_3^*)$ в этом случае отражает коробление структуры в целом, а смещение $\Delta x_2 = (x_1x_2 - x_1x_2^*)$ – изгиб локального участка поверхности X_1X_2 . Радиус кривизны структуры в целом или ее выбранного фрагмента, как показано в работе [4], можно также определить с помощью выражения (5). Расчет напряжений в этом случае можно проводить в соответствии с выражениями (2), (3).

Очевидно, что значения R_2 , вычисленные для всей поверхности X_0X_3 и её фрагмента X_1X_2 на основании смещений Δx_1 и Δx_2 , будут значительно отличаться. Разрешающая способность метода оптической топографии по размерам дефектов в плане составляет доли мм, что позволяет получать с привлечением методов компьютерной диагностики радиусы кривизны практически любого достаточно малого участка поверхности.

Исследование уровня остаточных напряжений в реальных полупроводниковых структурах проводили как на пластинах, отобранных из запущенных в производство приборов партий пластин, так и на структурах со специально индуцированными в них остаточными напряжениями. Для создания напряжений использовали метод термоудара – нагрев структур до 1000 °С в диффузионной печи с последующим быстрым охлаждением на воздухе.

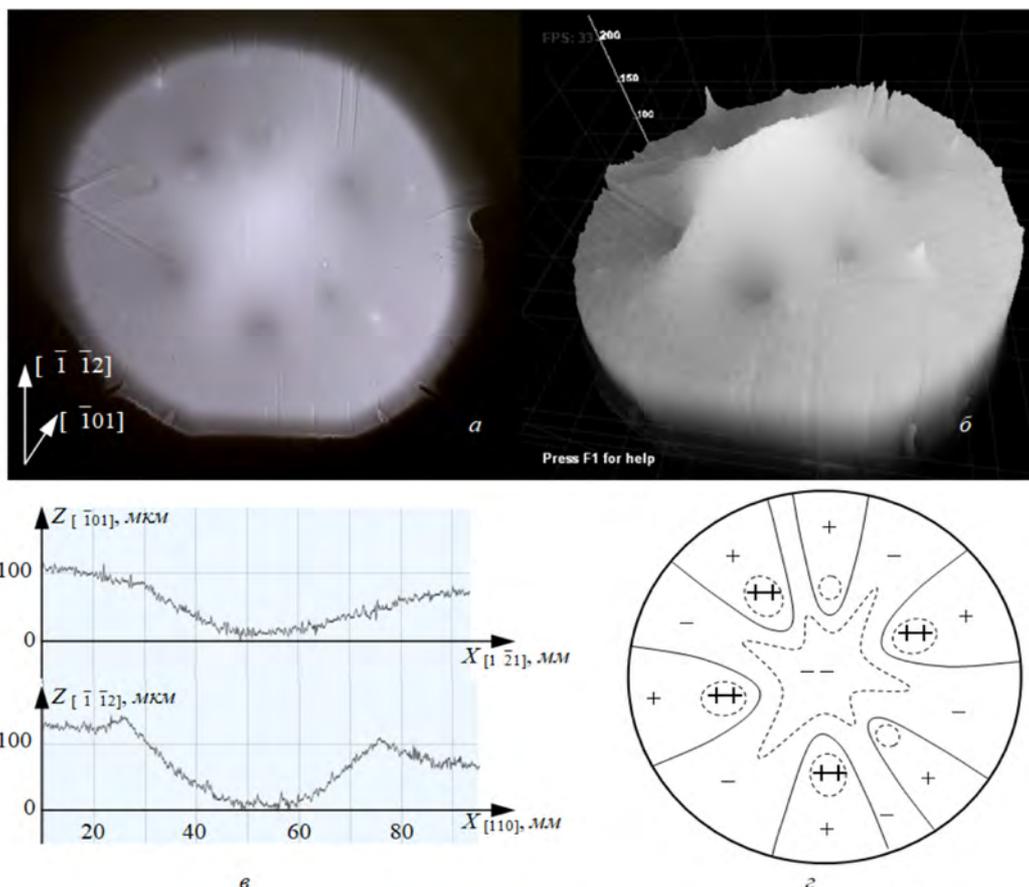


Рис. 4. Оптическая топограмма эпитаксиальной структуры после термообработки (а), 3D-изображение ее реплики (б), ее геометрические профили (в) и распределение вогнутых «-» и выпуклых «+» участков по площади структуры (г)

На рис. 4, а приведена топограмма деформированной эпитаксиальной структуры (ЭС-кремниевая пластина с выращенной на ней эпитаксиальной пленкой) ориентации (111). Базовый срез в плоскости $(1\bar{1}2)$ расположен в нижней части изображения. На рис. 4, б приведено 3D-изображение ее реплики, полученное методами компьютерной диагностики, на рис. 4, в – геометрические профили этой ЭС вдоль кристаллографических направлений $[\bar{1}01]$ и $[\bar{1}\bar{1}2]$, полученные методами компьютерной диагностики, а на рис. 4, г – распределение вогнутых и выпуклых участков по площади ЭС. Вогнутые участки отмечены знаком «-», а выпуклые – знаком «+». Линии перегиба (границы вогнутых и выпуклых областей) обозначены сплошными линиями, а области максимальной деформации, помеченные знаками «-» и «+», выделены пунктирными линиями.

Из приведенных данных видно, что ЭС изогнута в виде розетки, при этом характер изгиба вдоль направлений типа $\langle 110 \rangle$ и $\langle 112 \rangle$ существенно отличается. Линии перегиба достаточно симметричны относительно центра пластины и в совокупности образуют шестилепестковую розетку. Наблюдаемая картина изгиба обусловлена сжа-

тием холодного и упругого края ЭС при еще горячем и пластичном ее центре. Вдоль направлений типа $\langle 110 \rangle$ ЭС вогнута по дуге без точек перегиба и имеет стрелу прогиба, равную 90 мкм, а вдоль направлений типа $\langle 112 \rangle$ изгиб характеризуется наличием двух выпуклостей с максимумами, расположенными на расстоянии половины радиуса от центра ЭС, и двух точек перегиба. Высота выпуклостей в направлении $[\bar{1} 2 \bar{1}]$ составляет ~140 и ~100 мкм. Расчет радиусов кривизны в центре ЭС дает значения 6,8 м вдоль направления $[\bar{1} 0 1]$ и 1,7 м вдоль направления $[\bar{1} 2 \bar{1}]$. Соответствующие этим значениям R остаточные напряжения, вычисленные по формулам (2) и (3), составляют 5,5 и 25,1 МПа, соответственно.

Таким образом, несмотря на изотропность значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона для кремния ориентации (111), фактическое распределение остаточных напряжений имеет выраженную анизотропную картину: в направлениях типа $\langle 112 \rangle$ уровень остаточных напряжений существенно выше, чем в направлениях типа $\langle 110 \rangle$.

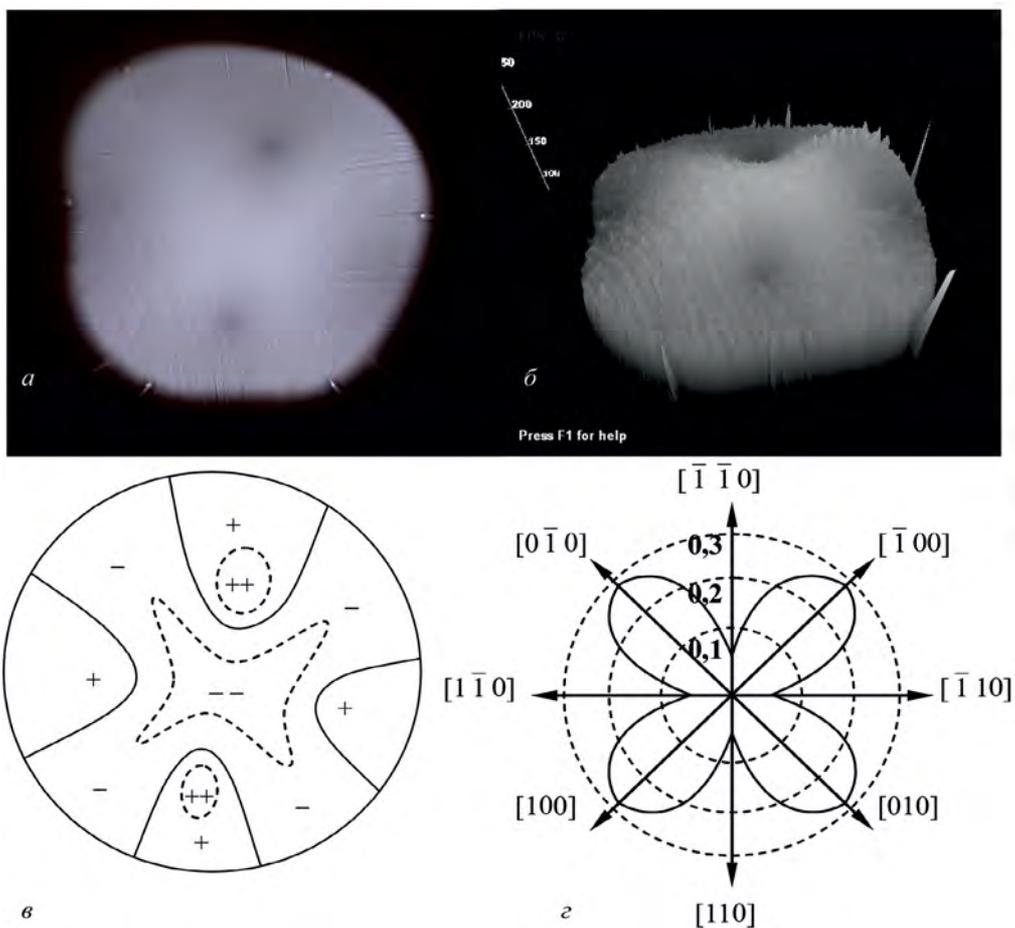


Рис. 5. Коробление ЭС ориентации (001)

На рис. 5 приведены топограмма ЭС ориентации (001) (а), 3D-изображение ее реплики (б), полученное методами компьютерной диагностики, распределение вогнутых «-» и выпуклых «+» участков по площади структуры (в) и азимутальная диаграмма распределения значений коэффициента Пуассона $[10]$ для кремния ориентации (001) (г). Базовый срез в плоскости (110) расположен в нижней части изображения.

Из приведенных данных видно, что коробление структур ориентации (001) также зависит от кристаллографического направления: в направлениях типа $\langle 110 \rangle$ радиус

кривизны структуры меньше, следовательно, уровень остаточных напряжений в этих направлениях максимален, а в направлениях типа $\langle 100 \rangle$ радиус кривизны максимален и уровень остаточных напряжений ниже. Такое распределение согласуется с азимутальным распределением коэффициента Пуассона μ_s для кремния ориентации (001), при этом увеличению μ_s соответствует увеличение радиуса кривизны. Расчет остаточных напряжений на основании радиусов кривизны для этой структуры дал значения 37,2 МПа в направлении [110] и 6,9 МПа в направлении [100]. Совокупность линий перегиба в этом случае образует четырехлепестковую розетку. Незначительная асимметрия розетки обусловлена, вероятно, различиями по толщине подложки и другими факторами.

Приведенные примеры наглядно демонстрируют зависимость характера изгиба структур от кристаллографической ориентации подложки. Кажущееся различие в том, что для пластин ориентации (111) в направлениях типа $\langle 110 \rangle$ радиус кривизны максимален, а для пластин ориентации (001) радиус кривизны в таких же направлениях минимален, объясняется довольно просто. Направления типа $\langle 112 \rangle$ в пластинах ориентации (111) и направления типа $\langle 110 \rangle$ в пластинах ориентации (001) являются линиями пересечения рабочей поверхности с плоскостями одного и того же типа {110}, энергия деформации в которых минимальна. Именно в этих направлениях, как видно из приведенных рисунков, расположены линии скольжения.

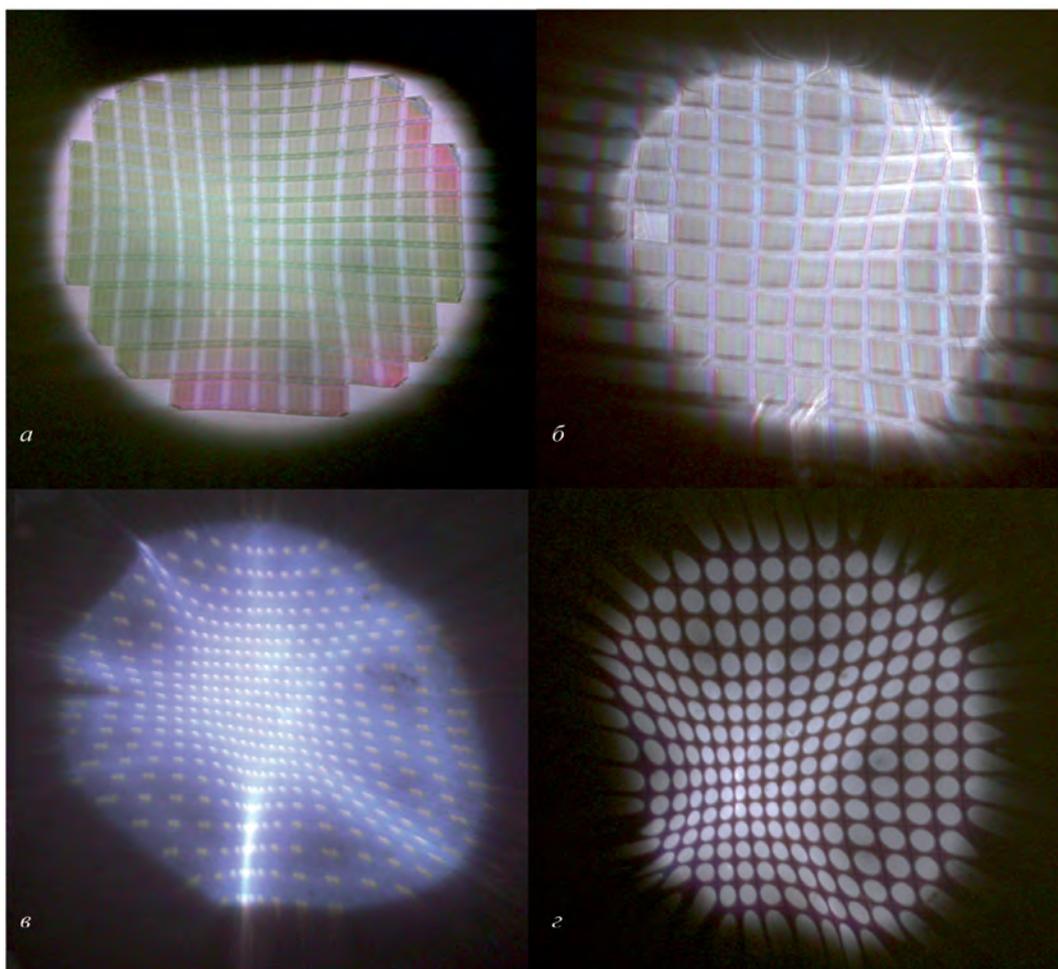


Рис. 6. Топограммы полупроводниковых структур на различных этапах изготовления ИС

Топограммы полупроводниковых структур на более поздних этапах формирования ИС приведены на рис. 6, а–г. Так, на рис. 3, а приведена топограмма КМДП-структуры на подложке ориентации (001) на стадии формирования локального оксида кремния. Тенденция расположения линий перегиба сохранилась, однако коробление имеет чуть более сложный характер по сравнению со структурой, приведенной на рис. 5, а, что можно объяснить влиянием перераспределения остаточных напряжений, обусловленных формированием новых слоев.

На рис. 6, б приведена топограмма структуры на пластине ориентации (111) на стадии формирования контактных окон к активным элементам. Анализ изображения показывает, что в данном случае коробление структуры совершенно не связано с кристаллографическими направлениями, что можно объяснить большим количеством нанесенных слоев. Влияние ориентации подложки еще больше нивелируется при изготовлении тестовых структур по нестандартной технологии. Топограммы такой структуры приведена на рис. 6, в. Ее коробление характеризуется множеством «лепестков», которые достаточно сложно привязать к кристаллографическим направлениям, хотя известно, что структура сформирована на подложке ориентации (001). В то же время коробление структуры ориентации (001), топограмма которой приведена на рис. 6, г, даже на стадии формирования металлизации протекает в форме выраженной четырех лепестковой розетки, что в данном случае связано, вероятно, с небольшим количеством технологических слоев.

Выборочный контроль радиусов кривизны исследованных структур дает значения R от 0,65 до 48,50 м, что соответствует уровням остаточных напряжений в подложке от 1,5 до 85 МПа и свидетельствует о сильной неравномерности их распределения по площади одной и той же пластины.

Приведенные данные иллюстрируют разнообразие форм изгиба и коробления полупроводниковых структур и их зависимость как от кристаллографической ориентации, так и от особенностей формирования слоев полупроводникового прибора.

Заключение

Развитые методики контроля остаточных напряжений в полупроводниковых кремниевых пластинах позволяют учесть характер и форму их изгиба. Приведены примеры расчета уровня остаточных напряжений в реальных пластинах и структурах на различных этапах изготовления ИС. Показано, что распределение остаточных напряжений по площади полупроводниковой структуры зависит от кристаллографической ориентации, но по мере формирования функциональных слоев эта зависимость ослабевает. Величина локальных остаточных напряжений неоднородна по площади пластины, может отличаться на порядок и менять знак на противоположный.

Полученные результаты могут быть использованы как в исследовательских целях, так и в условиях серийного производства для оперативного контроля напряжений и устранения причин их возникновения.

ЛИТЕРАТУРА

1. VLSI Technology. Edited by S.M.Sze. Bell Laboratories, Incorporated Murray Hill, New Jersey. 1983.
2. Hoffman, R.W. The Mechanical Properties of Thin Condensed Films \ R.W.Hoffman. – P. 211–274. In: Physics of Thin Films. Advances in Research and Development. Edited by G.Haas and R.E.Thun. Vol.3. Academic Press. New York and London. 1966. 318 p.
3. Напряжения и деформации в элементах микросхем \ В.С.Сергеев [и др.]. – М.: Радио и связь, 1987. – 88 с.
4. Сенько, С.Ф. Оценка размеров топографических дефектов полупроводниковых кремниевых структур. Приборы и методы измерений \ С.Ф. Сенько, В.А. Зеленин.– 2018. – Т. 9, №1. С.74–84.
5. Сенько, С.Ф. Особенности формирования изображений дефектов при контроле поверхностей методом оптической топографии \ С.Ф. Сенько. – «Микроэлектроника», 2003, том 32, №6, с. 448–458.

6. Kugimiya, K. "MAKYOH": The 2000 year old technology still alive / K.Kugimiya // Journal of Crystal Growth. 1990. V. 103. N 1–4. – P. 420–422.
7. Characterization of mirror-like wafer surfaces using magic mirror method / S. Hahn [et al.]. – J. of Crystal Growth, 1990, V. 103, N 1–4. – P. 423–432.
8. Ferenc Riesz. Geometrical optical model of the image formation in Makyoh (magic-mirror) topography. J. Phys. D: Appl. Phys. 33 (2000) 3033–3040.
9. Riesz, F. Makyoh Topography for the Study of Large-Area Extended Defects in Semiconductors / F. Riesz // Phys. Stat. Sol. (a) 1999, 171, No. 1, 403–409.
10. Brantley, W.A. Calculated elastic constants for stress problems associated with semiconductor devices / W.A. Brantley. – J. Appl. Phys., 1973, v.44, No 1. – P. 534–535.

REFERENCES

1. VLSI Technology. Edited by S.M.Sze. Bell Laboratories, Incorporated Murray Hill, New Jersey. 1983.
2. Hoffman R.W. The Mechanical Properties of Thin Condensed Films. P. 211–274. In: Physics of Thin Films. Advances in Research and Development. Edited by G.Haas and R.E.Thun. Vol.3. Academic Press. New York and London. 1966. 318 p.
3. Sergeev V.S., Kuznetsov O.A., Zaharov N.P., Letyagin V.A. Napryajeniya i deformatsii v elementah mikroshem [Stresses and deformations in elements of integrated circuits]. Moscow, Radio i svyaz, 1987, 88 p. (in Russian).
4. Sianko S.F., Zelenin V.A. Ocenka razmerov topograficheskikh defektov poluprovodnikovyyh kremnievyyh struktur. Pribory i metody izmerenij [Estimation of topographic defects dimensions of semiconductor silicon structures]. Devices and Methods of Measurements. 2018, vol. 9, no. 1, pp. 74–84. (in Russian).
5. S.F.Senko. Osobennosti formirovaniya izobrazhenij defektov pri kontrole poverhnostej metodom opticheskoy topografii [Peculiarities of forming of defects images under surface control by optical topography]. Mikroelektronika [Microelectronics], 2003, v 32, no 6, pp. 375–385. (in Russian).
6. K.Kugimiya. "MAKYOH": The 2000 year old technology still alive // Journal of Crystal Growth. 1990. V. 103. N 1–4. P. 420–422.
7. Hahn S., Kugimiya K., Yamashita M., Blaustein P.R., Takahashi K. Characterization of mirror-like wafer surfaces using magic mirror method. J. of Crystal Growth, 1990, V. 103, N 1–4, pp. 423–432.
8. Ferenc Riesz. Geometrical optical model of the image formation in Makyoh (magic-mirror) topography. J. Phys. D: Appl. Phys. 33 (2000) 3033–3040.
9. F. Riesz. Makyoh Topography for the Study of Large-Area Extended Defects in Semiconductors. Phys. Stat. Sol. (a) 1999, 171, No. 1, 403–409
10. Brantley W.A. Calculated elastic constants for stress problems associated with semiconductor devices. – J. Appl. Phys., 1973, v.44, No 1, pp. 534–535.

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 28.05.18