

УДК 621.382.8.002

Измерение локальных остаточных напряжений в полупроводниковых кремниевых структурах

Сенько С.Ф., Зеленин В.А.

Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси,
ул. Купревича, 10, г. Минск 220141, Беларусь

Поступила 08.06.2018

Принята к печати 01.08.2018

Распределение остаточных напряжений в многослойной полупроводниковой структуре носит сложный характер и оказывает существенное влияние на характеристики и выход годных приборов. В связи с этим их исследование является одной из актуальных задач современного приборостроения. Цель настоящей работы заключалась в разработке методов оценки фактического распределения остаточных напряжений как по площади полупроводниковой структуры, так и в ее элементах.

Оценку распределения остаточных напряжений по площади структуры проводили на основе определения локальной деформации отдельных участков этой структуры методом оптической топографии. В основу методики положено последовательное измерение интенсивности элементов светотеневого изображения структуры вдоль выбранного направления с последующим расчетом микрогеометрического профиля и радиуса кривизны. Оценку остаточных напряжений в топологических элементах системы Si–SiO₂ проводили путем расчета интерференционных картин, полученных в зазоре пленка–подложка после отделения края пленки от подложки по периметру вскрытого окна.

С привлечением метода конечных элементов получены аналитические выражения, связывающие характеристики изображений полупроводниковых структур с величиной их деформации, что позволяет с привлечением известных соотношений вычислить локальные механические напряжения выбранного участка структуры. Приведены примеры расчета реальных структур.

Предложенные методики расчета остаточных напряжений в полупроводниковых кремниевых структурах позволяют учитывать характер и форму изгиба подложек, а также оценить их величину в топологических элементах реальных полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: полупроводниковые структуры, оптическая топография, остаточные напряжения, методы контроля.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-3-254-262

Адрес для переписки:

Сенько С.Ф.
Физико-технический институт Национальной академии наук
Беларуси,
ул. Купревича, 10, г. Минск 220114, Беларусь
e-mail: senkosf@tut.by

Address for correspondence:

Sianko S.F.
Physical Technical Institute of the National Academy of sciences
of Belarus
Kuprevich str., 10, Minsk 220141, Belarus
e-mail: senkosf@tut.by

Для цитирования:

Сенько С.Ф., Зеленин В.А.
Измерение локальных остаточных напряжений
в полупроводниковых кремниевых структурах.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 3. – С. 254–262.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-3-254-262

For citation:

Sianko S.F., Zelenin V.A.
[Control of local stress in semiconductor silicon structures].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 3, pp. 254–262 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-3-254-262

Control of local stress in semiconductor silicon structures

Sianko S.F., Zelenin V.A.

Physical Technical Institute of the National Academy of sciences of Belarus,
Kuprevich str., 10, Minsk 220141, Belarus

Received 08.06.2018

Accepted for publication 01.08.2018

Abstract

Residual stress distribution in multilayer semiconductor structure is complicated and has a significant impact on device characteristics and yield, therefore their study is one of the actual tasks of modern device engineering. Purpose of the present work was to develop methods of estimation of actual residual stress distribution at the whole area of semiconductor structure and its elements as well.

The estimation of residual stress distribution at the area of semiconductor structure was carried out on the basis of determining of local deformation of some areas of the structure by Makyoh topography. This method is based on consequent measurements of intensity of Makyoh image elements of the structure along the chosen direction followed by calculation of micro-geometrical profile and curvature radius.

The estimation of residual stress of topological elements Si–SiO₂ system was carried out by means of calculation of interference pictures obtained in a film-substrate gap after separating of film edge from substrate along open window perimeter.

Analytical expressions relating semiconductor structure image characteristics with their deformation were developed by means of finite elements method. The expressions allow determining of local residual stress of chosen area of the structure. The examples of stress calculations in real structures are given.

Proposed residual stress calculation methods allow to take into consideration character and curvature form of substrate, and also to estimate their magnitude in real topological elements of semiconductor circuits.

Keywords: semiconductor structures, Makyoh topography, residual stress, methods of measurements.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-3-254-262

Адрес для переписки:

Сенько С.Ф.
Физико-технический институт Национальной академии наук
Беларуси,
ул. Купревича, 10, г. Минск 220114, Беларусь
e-mail: senkosf@tut.by

Address for correspondence:

Sianko S.F.
Physical Technical Institute of the National Academy of sciences
of Belarus
Kuprevich str., 10, Minsk 220141, Belarus
e-mail: senkosf@tut.by

Для цитирования:

Сенько С.Ф., Зеленин В.А.
Измерение локальных остаточных напряжений
в полупроводниковых кремниевых структурах.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 3. – С. 254–262.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-3-254-262

For citation:

Sianko S.F., Zelenin V.A.
[Control of local stress in semiconductor silicon structures].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 3, pp. 254–262 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-3-254-262

Введение

В основе массового производства кремниевых интегральных схем (ИС) лежит планарная технология, основанная на многократном и последовательном формировании на кремниевой пластине различных функциональных слоев требуемой топологии. Система Si–SiO₂ на всех этапах развития электроники всегда являлась объектом особого внимания исследователей [1, 2]. Одной из причин этого является тот факт, что формирование пленок SiO₂ проводится при температурах T вплоть до 1200 °С, а их обработка, в частности, формирование топологического рисунка, при температурах, близких к комнатной. При этом вследствие наличия градиентов температуры, различия температурных коэффициентов линейного расширения α пленки и подложки, а также существенного отличия в их толщинах, при нагреве или охлаждении в изготавливаемых структурах возникают механические напряжения σ . Пластическая деформация материалов, структурно-фазовые превращения в пленке и образование дефектов в подложке приводят к изменению значений σ . Формирование топологического рисунка в нанесенной пленке приводит к нарушению ее сплошности и существенному перераспределению остаточных напряжений с их концентрацией по границам вскрытых областей. При высокотемпературном формировании последующего слоя возникшие в структуре остаточные напряжения частично релаксируют, но при охлаждении до комнатной – повышаются и перераспределяются в соответствии с температурным коэффициентом линейного расширения вновь нанесенного слоя и сформированным в нем топологическим рисунком.

Таким образом, итоговое распределение остаточных напряжений в многослойной структуре носит сложный характер, обусловленный как свойствами формируемых слоев, так и особенностями топологического рисунка в них. Превышение величины остаточных напряжений сверх некоторого критического уровня приводит к возникновению различного рода дефектов, например, микротрещин, дислокаций в материале подложки, закороток и обрывов металлизации, и т. д., что существенно ухудшает параметры изготавливаемых структур и снижает выход годных приборов [3–8]. В связи с этим оценка величины локальных остаточных напряжений в элементах ИС и их распределения по площади

полупроводниковой пластины является одной из актуальных задач современного приборостроения.

Цель настоящей работы заключалась в разработке методов контроля фактического распределения остаточных напряжений как по площади структуры, так и в отдельных ее элементах.

Основы контроля остаточных напряжений в полупроводниковых структурах

Расчет напряжений в однородном материале можно осуществить на основе измерения его относительной деформации по формуле [3]:

$$\sigma = -\frac{l-l_0}{l} \cdot \frac{E}{1-\mu}, \quad (1)$$

где l – размер контролируемого элемента до деформации; l_0 – размер после деформации; E , μ – модуль Юнга и коэффициент Пуассона исследуемого материала.

Наличие остаточных напряжений в полупроводниковой пластине приводит к ее изгибу. В случае равномерного изгиба пластины толщиной D величину деформации $(l-l_0)$ для ее поверхностных слоев можно рассчитать на основе измерения радиуса ее кривизны R :

$$l-l_0 = \frac{\pi D \arcsin \frac{r}{R}}{360}, \quad (2)$$

где r – радиус пластины. Для сферически изогнутых структур радиус кривизны R можно определить из соотношения [4]:

$$R = \frac{r^2}{2\delta}, \quad (3)$$

где r – радиус структуры; δ – стрела прогиба. Величину R можно также определить интерферометрическими методами при формировании колец Ньютона, либо лазерными – на основании измерения смещения Δx отраженного луча на экране при перемещении контролируемой пластины на расстояние x по формуле [1]:

$$R = \frac{2hx}{\Delta x}, \quad (4)$$

где h – расстояние от пластины до экрана.

подавляющее большинство методов контроля остаточных напряжений в структурах пленка–подложка основаны на измерении их упругой деформации, в частности радиуса кривизны R структур с последующим расчетом напряжений с использованием формул Стоуни [4–8]. В зависимости от способа определения R различают дисковый метод, метод изгиба стержня и др.

Измерение напряжений в структуре круглая полупроводниковая подложка–пленка, как правило, проводят дисковым методом на основе определения изменения радиуса кривизны R структур вследствие изгиба, обусловленного осаждением или выращиванием пленки на одной стороне подложки–основы. Остаточные напряжения σ в пленке в этом случае определяют по формуле [4]:

$$\sigma = \frac{E_s D_s^2}{6(1 - \mu_s) R t}, \quad (5)$$

где E_s , μ_s – модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала подложки; D_s – толщина подложки; t – толщина пленки.

Для учета первоначального прогиба структур измерения проводят до (R_1) и после (R_2) проведения технологической операции осаждения пленки в одних и тех же точках на пластине. В этом случае выражение (5) преобразуется к следующему виду:

$$\sigma = \frac{E_s D_s^2 (R_1 - R_2)}{6(1 - \mu_s) R_1 R_2 t}. \quad (6)$$

Данное соотношение удобно также использовать для расчета суммарных напряжений в пленках. В этом случае радиус кривизны измеряют до и после удаления исследуемой пленки.

Существенным недостатком рассматриваемых методов является то, что они основаны на предположении о равномерном изгибе всей пластины, не учитывают реальную форму изогнутой поверхности, перераспределение остаточных напряжений по площади структуры и их концентрацию по границам вскрытых в SiO_2 окон. В итоге полученные усредненные результаты контроля величины напряжений в пленках могут отличаться от локальных на порядок и более. В связи с этим были разработаны новые методы контроля остаточных напряжений, основанные на локальном измерении деформаций.

Определение изгиба полупроводниковой структуры и локальных напряжений в пределах одного кристалла

Реальную форму изгиба полупроводниковых структур можно легко определить методом оптической топографии, известным также как метод *Макуо* топографии [9–11]. Оптическая схема контроля приведена на рисунке 1.

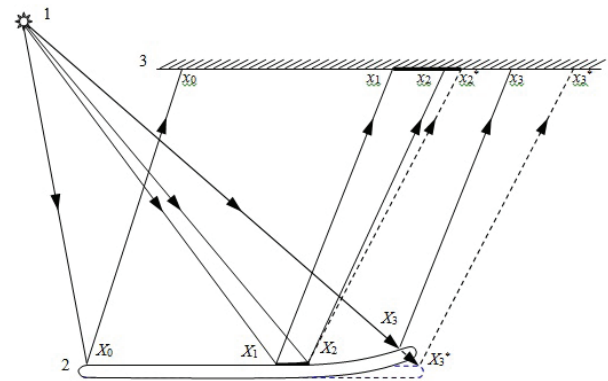


Рисунок 1 – Оптическая схема контроля поверхностей методом оптической топографии: 1 – источник света; 2 – контролируемая структура; 3 – экран

Figure 1 – Scheme of Makyoh topography imaging: 1 – light source; 2 – target structure; 3 – screen

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. Исходная структура 2 до деформации ($R_1 = \infty$) и ход отраженных от нее лучей изображены пунктирными линиями. Изображение всей поверхности структуры $X_0 X_3^*$ и её фрагмента $X_1 X_2$ в случае отсутствия деформации на экране 3 обозначены как $x_0 x_3^*$ и $x_1 x_2^*$. Изгиб структуры приводит к смещению отраженных из точек x_3^* и x_2^* лучей в точки x_3 и x_2 , соответственно. Смещение $\Delta x_1 = (x_0 x_3 - x_0 x_3^*)$ в этом случае отражает деформацию структуры в целом, а смещение $\Delta x_2 = (x_1 x_2 - x_1 x_2^*)$ – деформацию локального участка поверхности $X_1 X_2$. В первом приближении радиус кривизны структуры в целом или ее выбранного фрагмента, как следует из работы [11], можно также определить с помощью выражения (4). При этом очевидно, что значения R_2 , вычисленные для всей поверхности $X_0 X_3$ и её фрагмента $X_1 X_2$ на основании смещений Δx_1 и Δx_2 , будут значительно отличаться.

Обширные исследования деформации полупроводниковых пластин и структур показали, что радиус кривизны при движении вдоль выбранного направления на поверхности является постоянно меняющейся величиной. В наиболее общем случае можно говорить лишь о радиусе кривизны и механических напряжениях в выбранной точке поверхности в выбранном направлении. Разрешающая способность метода оптической топографии по размерам дефектов в плане составляет доли мм, что для исходных полупроводниковых пластин позволяет выделить области контроля площадью порядка 10^{-2} мм². Для пластин со сформированными на них структурами (топологическими элементами ИС) контролируемая область локализована в пределах одного кристалла ИС. В работе [11] нами приведено выражение для профиля контролируемой поверхности вдоль выбранного направления X , полученное путем последовательного вычисления отклонения элементов поверхности от идеальной плоскости на основе измерения относительной интенсивности соответствующих им элементов изображения:

$$Z_n = \frac{x^2}{4khJ_0} \left[\sum_{i=1}^n J_i + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \left(\sqrt{J_i} \sum_{l=i+1}^n \sqrt{J_l} \right) - \sqrt{J_0} \sum_{i=1}^n (2i-1) \sqrt{J_i} \right], \quad (7)$$

где Z_n – отклонение высоты профиля для n -го элемента поверхности; x – размер элемента изображения вдоль выбранного направления X ; k – общее увеличение изображения, обусловленное ходом лучей; h – расстояние от контролируемой поверхности до экрана; J_0 – среднее значение интенсивности изображения вдоль выбранного направления X ; J_i и J_l – значение интенсивности изображения контролируемой поверхности для i -го и l -го элемента вдоль выбранного направления X ; n – количество элементов изображения.

Разработанное программное обеспечение контроля позволяет получать профили контролируемой поверхности в соответствии с выбранным направлением. На основании полученных профилей проводится расчет радиуса кривизны поверхности и величины механических напряжений в соответствии с выражениями (1) и (2).

На рисунке 2а приведена топограмма исходной эпитаксиальной структуры (ЭС – кремниевая пластина с выращенной на ней эпитаксиальной пленкой) ориентации (111), а на рисунке 2б – ее топограмма после термообработки. Базовый срез в плоскости (112) расположен в нижней части изображения. На рисунке 2с приведены геометрические профили этой ЭС вдоль

кристаллографических направлений $[\bar{1}01]$ и $[\bar{1}\bar{1}2]$ полученные методами компьютерной диагностики в соответствии с выражением (7), а на рисунке 2д – 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.

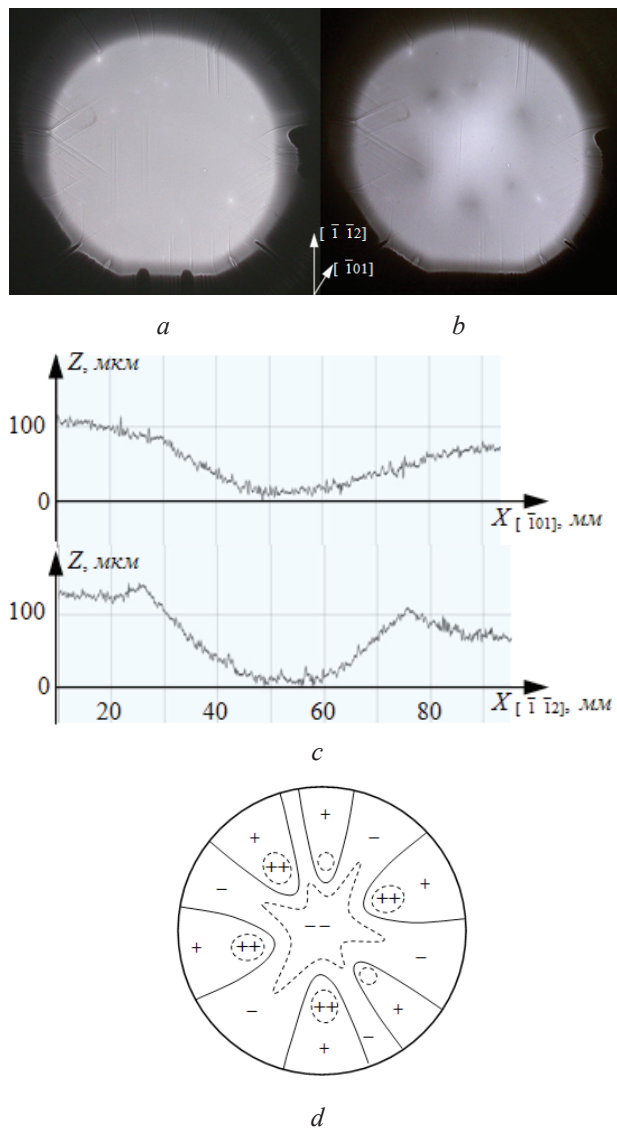


Рисунок 2 – Оптическая топограмма эпитаксиальной структуры до (а) и после (б) термообработки, ее геометрические профили (с) и распределение вогнутых «–» и выпуклых «+» участков по площади структуры (д)

Figure 2 – Makyoh topogram of epitaxial structure before (a) and after (b) heat treatment, its geometrical profile (c) and distribution of concave (–) and convex (+) zones by structure area (d)

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 сжатием холодного края ЭС при еще горячем 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 $[\bar{1}\bar{1}2]$ составляет приблизительно 140 и 100 мкм. Расчет радиусов кривизны в центре ЭС дает значения 6,8 м вдоль направления $[\bar{1}01]$ и 1,7 м вдоль направления $[\bar{1}\bar{1}2]$. Соответствующие этим значениям R остаточные напряжения, вычисленные по формулам (1) и (2), 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 $\langle 110 \rangle$.

Приведенный пример наглядно демонстрирует возможности метода оптической топографии для контроля механических напряжений в полупроводниковых пластинах и структурах. В частности, он позволяет установить особенности и характер деформации полупроводниковых структур. Так, в приведенном примере для пластин ориентации (111) в направлениях типа $\langle 110 \rangle$ радиус кривизны максимален, а для направлений типа $\langle 112 \rangle$ минимален. Это можно объяснить тем, что направления типа $\langle 112 \rangle$ в пластинах ориентации (111) являются линиями пересечения рабочей поверхности с плоскостями типа $\{110\}$, энергия деформации в которых минимальна. Именно в этих направлениях, как видно из приведенного рисунка, расположены линии скольжения.

Контроль остаточных напряжений в топологических элементах

Основной вклад в величину остаточных напряжений кремниевых структур вносят напряжения, возникающие в системе Si–SiO₂.

Именно границы вскрытых окон в SiO₂ являются источниками дислокаций в кремнии, которые в дальнейшем приводят к деградации изготавливаемых приборов. Это связано с тем, что, несмотря на хорошую совместимость, кремний и его диоксид имеют различные значения α . Так, $\alpha_{\text{Si}(100)}$ составляет $2,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а $\alpha_{\text{SiO}_2} = 1,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что с учетом использования температур формирования SiO₂ до 1200°C приводит к возникновению высоких остаточных напряжений при последующем охлаждении. Их релаксация через дефектообразование в кремнии и полиморфные превращения в SiO₂ определяется кинетикой данных процессов и зависит от режимов проведения различных технологических операций и взаимного влияния топологических слоев. Поэтому фактические значения напряжений можно определить только экспериментальным путем.

Определение локальных напряжений в структурах Si–SiO₂ базируется на методах, включающих селективное травление границы их раздела по краю вскрытых окон, определение относительного удлинения свободного края оксида по распределению интерференционных максимумов [2]. Интерференционная картина в структуре Si–SiO₂ и схема изгиба края диоксида кремния приведены на рисунке 3.

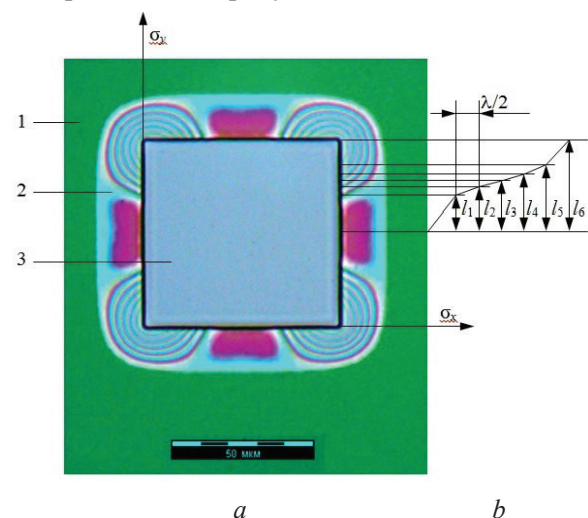


Рисунок 3 – Интерференционная картина в зазоре Si–SiO₂ (a) и схема изгиба края диоксида кремния (b): 1 – пленка диоксида кремния; 2 – отделенный от кремниевой подложки край диоксида кремния; 3 – окно в диоксиде кремния

Figure 3 – Interference picture in Si–SiO₂ gap (a) and scheme of silicon dioxide bend edge (b): 1 – silicon dioxide film; 2 – separate edge of silicon dioxide from silicon substrate; 3 – window in a silicon dioxide

Конечную длину края отделенной пленки в соответствии с рисунком 3 определяют по формуле:

$$l = \sqrt{l_1^2 + \frac{\lambda^2}{4}} + \sum_{i=2}^n \sqrt{(l_i - l_{i-1})^2 + \frac{\lambda^2}{4}}, \quad (8)$$

где l_1 – расстояние от точки отсчета до первой линии интерференции; i – номер линии; n – количество линий; $(l_i - l_{i-1})$ – расстояние между двумя линиями интерференции с номерами i и $(i-1)$; λ – длина волны света, в котором наблюдалась интерференционная картина (для зеленого $\lambda = 0,54$ мкм). Величину напряжений в оксиде определяют по формуле (1). Итоговая формула для расчета напряжений с учетом (8) имеет вид:

$$\sigma = \pm \left(1 - \frac{l_0}{\sqrt{l_1^2 + \frac{\lambda^2}{4}} + \sum_{i=2}^n \sqrt{(l_i - l_{i-1})^2 + \frac{\lambda^2}{4}}} \right) \times \frac{E_f}{1 - \mu}. \quad (9)$$

Расчет остаточных напряжений в топологическом элементе, приведенном на рисунке 3, дает значения 51 МПа. Визуальная экспресс-оценка величины локальных остаточных напряжений при этом может быть проведена путем сравнения плотности интерференционных линий, наблюдаемых по контурам окон различной конфигурации и размеров – при уменьшении расстояния между интерференционными максимумами величина напряжений возрастает.

Так, на рисунке 4а–с приведены изображения топологических элементов кремниевой структуры с отделенными по границам окон краями оксидной пленки толщиной 0,8 мкм, полученной на подложке ориентации (001). Интерференционные картины в регулярной структуре тестовых элементов (рисунок 4с) в смежных окнах чередуются в шахматном порядке, однако регулярность чередования периодически нарушается. Исследование расположения таких нарушений регулярности при помощи оптической топографии показало, что они, как правило, совпадают с направлениями линий перегиба подложки. Расчет значений остаточных напряжений в изображенных элементах дал величины от 23 до 75 МПа.

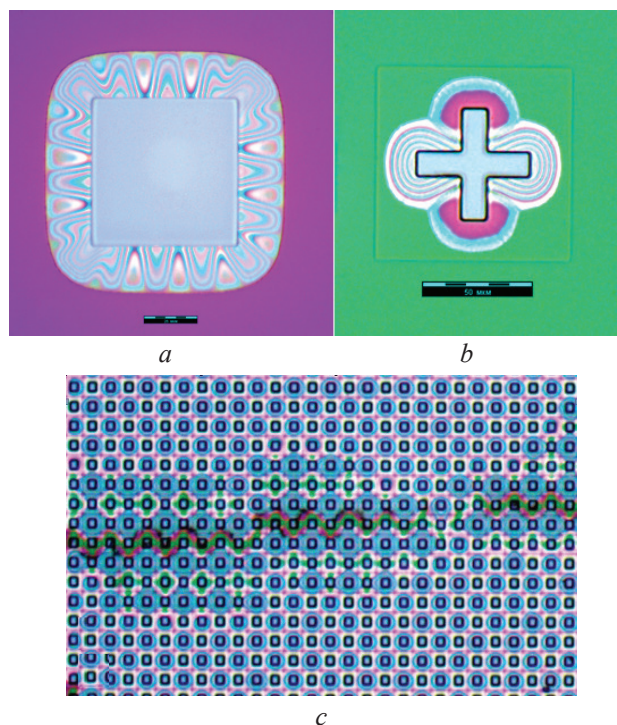


Рисунок 4 – Интерференционные картины в зазоре Si–SiO₂ в зависимости от формы топологических элементов

Figure 4 – Interference pictures in Si–SiO₂ gap depending on topological elements shape

На рисунке 5а приведена оптическая топограмма деформированной полупроводниковой структуры, а на рисунке 5б – результаты расчета остаточных напряжений в однотипных топологических элементах квадратной формы (рисунок 3) по всей ее площади в форме карты напряжений. Для наглядности области относительно невысоких значений напряжений даны оттенками коричневого, а области повышенных значений – оттенками синего. Расчет же значений напряжений в зависимости от формы элементов в пределах одного кристалла дал величины от 15 до 350 МПа. Анализ характера коробления структуры показывает, что выпуклым областям структуры, для которых свойственны напряжения растяжения в подложке, соответствуют пониженные значения σ в пленке SiO₂, а вогнутым областям структуры с напряжениями сжатия в подложке – повышенные напряжения в пленке. Рассчитанные на основании измерения радиуса кривизны подложки после удаления оксидной пленки в соответствии с соотношением (6) напряжения в подложке составили при этом от +18 до –7 МПа.

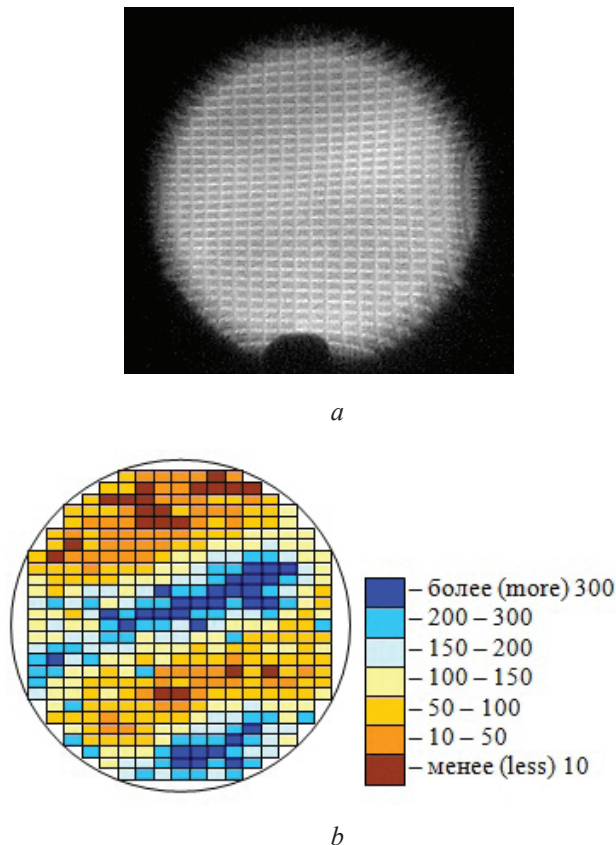


Рисунок 5 – Топограмма пластины с КМДП структурами (а) и диагностическая карта распределения механических напряжений (b)

Figure 5 – Topogram of wafer with CMOS structures (a) and diagnostic card of residual stress distribution (b)

Таким образом, рассмотренные методы контроля величины локальных остаточных механических напряжений являются взаимодополняющими и позволяют получить наиболее полную картину их распределения по площади полупроводниковой структуры.

Заключение

Предложены методики расчета остаточных напряжений в полупроводниковых кремниевых структурах, учитывающие характер и форму изгиба подложек, а также форму вскрытых в оксидной пленке окон. Получены аналитические выражения, связывающие искажение изображения элементов структуры на топограммах с остаточными напряжениями, усредненными по площади этих элементов, а также выражения для расчета остаточных напряжений в топологических элементах полупроводниковых структур. Приведены примеры расчета уровня остаточных

напряжений в реальных структурах. Показано, что распределение остаточных напряжений по площади полупроводниковой пластины, рассчитанное на основании локального изгиба структуры, преимущественно совпадает с распределением остаточных напряжений, рассчитанных в отдельных элементах. При этом остаточные напряжения в пределах одного и того же кристалла на различных топологических элементах могут отличаться на порядок и более.

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

Список использованных источников

1. Яцунский, И. Влияние окисления на дефектообразование в легированном кремнии : монография / И. Яцунский, О. Кулинич, В. Смынтына. – Lambert Academic Publishing, 2011. – 188 с.
2. Зеленин, В.А. Новые методы и приборы контроля в технологии микроэлектроники / В.А. Зеленин, С.Ф. Сенько // Технологии Физтеха. Юбилейный сборник трудов : в 2 т. / коллектив авторов ; общ. ред. академик НАН Беларуси С.А. Астапчик. – Т. 1. – Минск : Экоперспектива, 2003. – С. 234–253.
3. Сенько, С.Ф. Количественный контроль топографических дефектов полупроводниковых пластин кремния / С.Ф. Сенько, А.С. Сенько, В.А. Зеленин // Доклады БГУИР. – 2018. – № 5 (115). – С. 12–18.
4. Касимов, Ф.Д. Расчет упругих механических напряжений в неоднородных полупроводниковых структурах / Ф.Д. Касимов, А.Э. Лютфалибекова // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2002. – № 2. – С. 13–14.
5. Айвазян, Г.Е. Об определении внутренних напряжений в системе пленка – подложка / Г.Е. Айвазян // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2000. – Т. LIII, № 1. – С. 63–67.
6. Ayvazyan, G.E. Anisotropic Warpage of Wafers with Anodized Porous Silicon Layers / G.E. Ayvazyan // Phys. Stat. Sol. (a). – 1999. – Vol. 175. – P. 7–8.
7. Ullman, J. Reduction of Intrinsic Stress in Cubic Boron Nitride Films / J. Ullman, A.J. Kellock, J.E. Baglin // Thin Solid Films. – 1999. – Vol. 341. – P. 238–245.
8. Дюжев, Н.А. Методика измерения механических напряжений в тонких пленках на пластине с помощью оптического профилометра / Н.А. Дюжев, А.А. Дедкова, Е.Э. Гусев, А.В. Новак // Известия вузов. Электроника. – 2016. – № 4. – С. 367–372.
9. Riesz, F. Geometrical optical model of the image formation in Makyoh (magic-mirror) topography /

F. Riesz // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2000. – Vol. 33. – P. 3033–3040.

10. Riesz, F. Makyoh Topography for the Study of Large-Area Extended Defects in Semiconductors / F. Riesz // Phys. Stat. Sol. (a). – 1999. – Vol. 171, no. 1. – P. 403–409.

References

1. Yazhunskiy I., Kulinich O., Smyntyna V. *Vliyanie okisleniya na defektoobrazovanie v legirovannom kremnii* [Influence of oxidation on defects formation in doped silicon]. Lambert Academic Publishing, 2011, 188 p. (in Russian).

2. Zelenin V.A., Senko S.F. [New methods and control devices in microelectronics]. *Tekhnologii Fiz-tekha. Yubileinyi sbornik trudov*. [FTI Technology. Jubilee collection works]. In 2 parts. Part. 1. Under red. academician S.A. Astapchik, Minsk, Ekoperspektiva Publ., 2003, pp. 234–253.

3. Sianko S.F., Sianko A.S., Zelenin V.A. [Quantitative characterization of topographic defects of semiconductor silicon wafers]. *Doklady BGUIR*, 2018, vol. 115, no. 5, pp. 12–18 (in Russian).

4. Kasimov F.D., Lyutfalibekova A.E. [Calculation of elastic stresses in heterogeneous semiconductor structures]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2002, no. 2, pp. 13–14 (in Russian).

5. Ayvazyan G.E. [About the determination of internal stress in the film – substrate system]. *Izv. NAN RA I GIUA. Ser. TN*, 2000, vol. LIII, no. 1, pp. 63–67 (in Russian).

6. Ayvazyan G.E. Anisotropic Warpage of Wafers with Anodized Porous Silicon Layers. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 1999, vol. 175, pp. 7–8.

7. Ullman J., Kellock A.J., Baglin J.E. Reduction of Intrinsic Stress in Cubic Boron Nitride Films. *Thin Solid Films*, 1999, vol. 341, pp. 238–245.

8. Dyuzhev N.A., Dedkova N.A., Gusev E.E., Novak A.V. [The method of measurement of mechanical stresses in thin films on the plate using an optical profilometer]. *Izvestiya vuzov. Elektronika*, 2016, no. 4, pp. 367–372 (in Russian).

9. Riesz, F. Geometrical optical model of the image formation in Makyoh (magic-mirror) topography. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2000, vol. 33, pp. 3033–3040.

10. Riesz F. Makyoh Topography for the Study of Large-Area Extended Defects in Semiconductors. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 1999, vol. 171, no. 1, pp. 403–409.