

УДК 621.315.592

КОНТРОЛЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТРУКТУРАХ Si-SiO₂

В.А. ЗЕЛЕНИН

*Физико-технический институт НАН Беларуси
Купревича, 10, Минск, Беларусь**Поступила в редакцию 10 мая 2012*

Рассмотрены пути повышения точности контроля величины остаточных напряжений в структурах диоксид кремния-монокристаллическая кремниевая подложка. Приведены результаты определения уровня остаточных напряжений в структурах Si-SiO₂.

Введение

В [1] было показано, что уровень напряжений в оксидных пленках более чем в 10² раз превышает уровень напряжений в кремниевых пластинах. Однако вскрытие окон в SiO₂ приводит к перераспределению напряжений. Уровень напряжений в пластинах зависит от топологии микросхем, в ряде случаев их величина может значительно превысить уровень первоначальных напряжений в оксидной пленке. Остаточные напряжения в кремниевых структурах существенно влияют на процент выхода годных кристаллов и на надежность интегральных микросхем (ИМС).

Методы расчета величин локальных напряжений в элементах микросхем в настоящее время отсутствуют. В связи с этим большое внимание уделяется развитию экспериментальных методов контроля остаточных напряжений.

В статье рассмотрены пути повышения точности контроля величины остаточных напряжений в структурах диоксид кремния-монокристаллическая кремниевая подложка (основа). Приведены полученные с их помощью результаты определения уровня остаточных напряжений в структурах Si-SiO₂.

Совершенствование метода контроля остаточных напряжений

Анализ методов определения остаточных напряжений, возникающих в структурах Si-SiO₂ при высокотемпературном окислении кремниевой пластины, последующем охлаждении и травлении пленки диоксида с обратной (нерабочей) ее стороны, приведен в [2, 3]. Показано, что используемые в настоящее время экспериментальные методы контроля остаточных напряжений являются интегральными, т.е. позволяют получать значения напряжений, усредненные по площади структуры.

Измерение напряжений в структуре пленка-подложка, как правило, проводят путем определения радиуса кривизны структур вследствие изгиба, обусловленного осаждением или выращиванием пленки на одной стороне подложки-основы. Напряжения σ в пленке обратно пропорциональны радиусу кривизны:

$$\sigma = \frac{E \cdot d^2}{6(1 - \mu)\rho h}, \quad (1)$$

где E , μ – модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала подложки; d – толщина подложки; ρ – радиус кривизны; h – толщина пленки.

Для определения локальных напряжений в структурах Si-SiO₂ предложены методы, включающие селективное подтравливание кремния у краев оксидной пленки, определение от-

носительного удлинения свободного края оксида по распределению интерференционных максимумов [4, 5]. Величину напряжений в оксиде определяют по формуле:

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

где l – длина свободного края оксида; l_0 – исходная длина оксидной пленки до ее отделения; E_f , μ_f – модуль Юнга и коэффициент Пуассона пленки.

Эти методы позволяют исследовать остаточные напряжения в реальных рабочих кремниевых структурах. Отделение пленки от подложки проводят через окна в исследуемой пленке, вскрываемые методом фотолитографии по рабочим фотошablонам изготавливаемых ИМС. Интерференционная картина в структуре Si-SiO₂ и схема изгиба края оксида кремния приведены на рисунке.

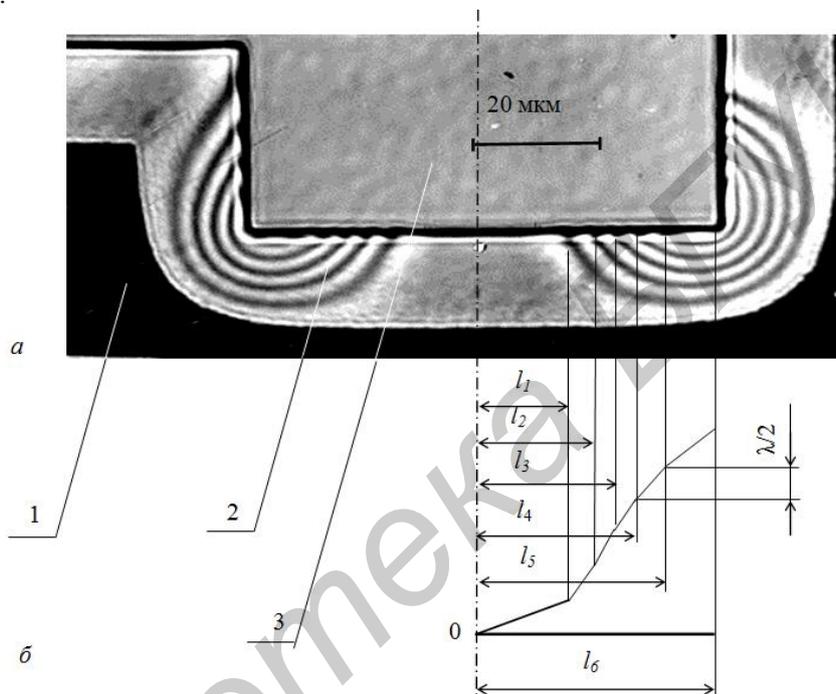


Рис. 1. Интерференционная картина (а) и схема изгиба края SiO₂ (б):
1 – структура Si-SiO₂, 2 – отделенная полоска SiO₂, 3 – окно в SiO₂

Конечную длину края отделенной пленки в соответствии с рис. 1,б определяют по формуле:

$$l = \sqrt{l_1^2 + \frac{\lambda^2}{4}} + \sum_{i=2}^n \sqrt{l_i - l_{i-1}}^2 + \frac{\lambda^2}{4}, \quad (3)$$

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).

Итоговая формула для расчета напряжений с учетом (2) и (3) имеет вид:

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

Примеры интерференционных картин, наблюдаемых вокруг окон различной конфигу-

рации в термическом диоксиде кремния, приведены на рисунке.

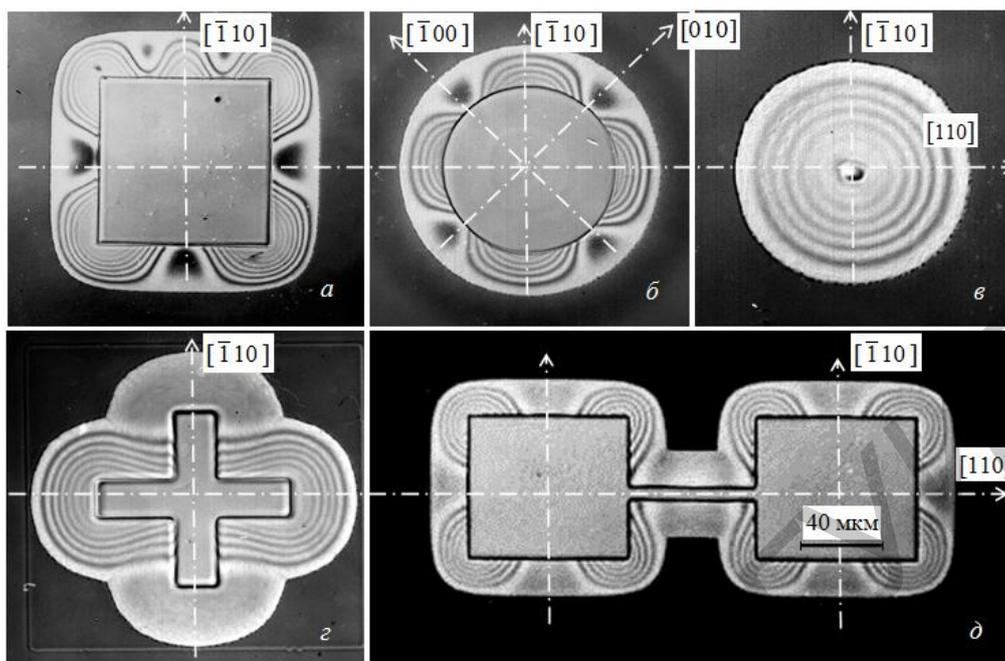


Рис. 2. Интерференционные картины, возникающие в структурах Si-SiO₂ при отделении края оксидной пленки от основы

Однако получаемая интерференционная картина не всегда отражает истинные значения остаточных напряжений в системе покрытие–основа. Это связано с тем, что кроме точного определения относительного удлинения свободного края отделенной от основы полоски покрытия, необходимо еще создать условия для полного снятия напряжений в свободном крае отделенной полоски.

Отделенная от основы вдоль границы окна полоска покрытия одним краем остается связанной с основой, и в ней сохраняется исходный уровень остаточных напряжений. Для системы Si-SiO₂ в оксидной пленке, как правило, эти напряжения являются сжимающими. По мере увеличения ширины отделяемой от основы полоски уровень остаточных напряжений в ней постепенно снижается. В свободном крае отделенной полоски эти напряжения снижаются быстрее, в остальных, параллельных границе окна сечениях, – медленнее. В связи с этим свободный край отделенной полоски удлиняется больше и приобретает форму дуги, приподнимаясь над основой. В остальных, параллельных границе окна сечениях отделенной полоски покрытия, стрела прогиба дуг меньше.

Если размеры окна, например, квадратной формы невелики, то наблюдаются эффекты взаимного влияния прогибов пленки, отделяемых вдоль соседних границ окна. В результате более стабильной оказывается конфигурация отделенной полоски, при которой наибольшие зазоры между основой и пленкой образуются по углам окна, а в серединах сторон окна полоска прижимается к основе (рис. 2, а).

В случае круглого окна отделенный край покрытия представляет собой замкнутую, стесненную примыкающим к основе контуром тонкостенную оболочку, уровень остаточных напряжений в которой достаточно высок (рис. 2, б).

Во всех случаях малых размеров окон отделенную полоску пленки можно рассматривать как тонкую оболочку, уровень напряжений в которой разный в различных ее сечениях, но считать, что напряжения в свободном крае отделенной полоски близки к нулю нельзя, поскольку тонкие оболочки отличаются большой жесткостью и устойчивостью к внешним нагрузкам за счет трехмерной их конфигурации и сложного напряженного состояния (рис. 2, б–д).

Таким образом, рассмотренные выше способы позволяют определить только знак напряжений в диоксиде кремния SiO₂, но не позволяют с достаточной точностью определить ве-

личину остаточных напряжений в нем, поскольку неизвестны остаточные напряжения в свободном крае отделенной от основы полоски.

В соответствии с [6], по условию минимума свободной энергии край отделенной полоски покрытия должен принимать форму волны с осью симметрии, лежащей в срединной плоскости покрытия. Однако, поскольку прогиб полоски возможен только в одну сторону, то свободный край полоски изгибается по некоторой, как правило, несимметричной волнообразной кривой, смещенной вверх от основы. Волнообразный изгиб свободного края покрытия сопровождается потерей его жесткости, присущей оболочкам, а отделенную от основы полоску покрытия с этого момента можно рассматривать как тонкую пластинку нулевой толщины, защемленную по краю, противоположному свободному. Термин пластинка нулевой толщины означает, что изменением напряжений по ее поперечному сечению, т.е. напряжениями растяжения со стороны выпуклостей и напряжениями сжатия со стороны вогнутостей, можно пренебречь [6].

Анализ интерференционных картин, образующихся в структурах Si-SiO₂, показал, что отличить состояние тонкой оболочки отделенной полоски покрытия от ее состояния в виде пластинки нулевой толщины легко по виду интерференционной картины. В состоянии тонкой оболочки отделенная полоска покрытия изгибается вдоль прямой стороны окна в виде одной полуволны или, в случае наложения эффектов взаимного влияния соседних сторон окна, – в виде одной целой волны. При переходе полоски в состояние пластинки нулевой толщины количество волн ее изгиба вдоль стороны окна равно или больше 2.

Интерференционная картина, возникающая при отделении полоски диоксида кремния шириной 24 мкм вокруг окна прямоугольной формы размерами 120×120 мкм при толщинах покрытия 0,8 мкм и основы 460 мкм, представлена на рисунке.

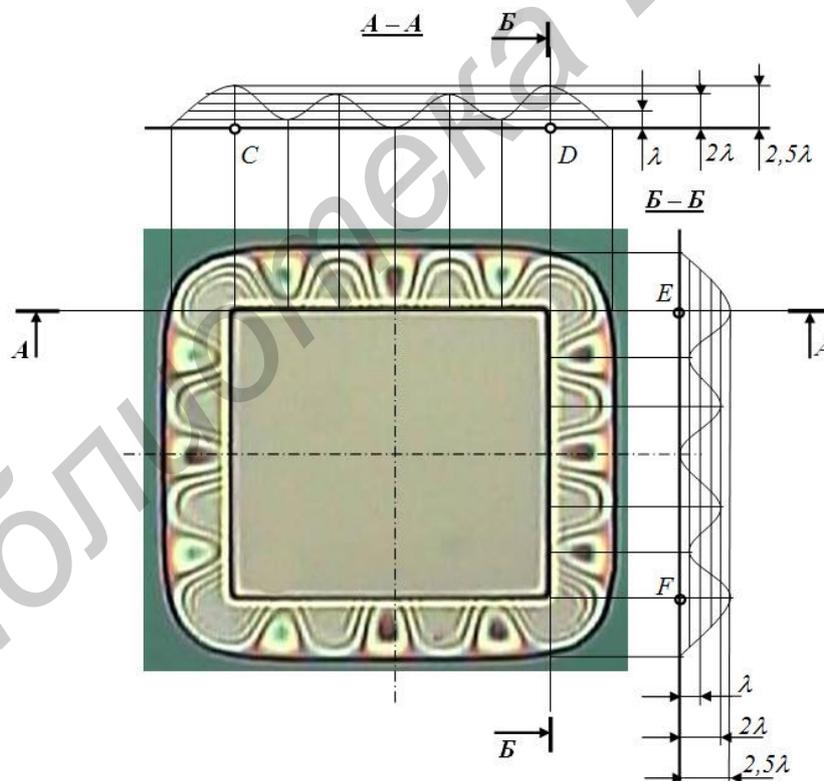


Рис. 3. Интерференционная картина, возникающая при отделении полоски диоксида кремния шириной 24 мкм от основы вокруг окна размерами 120×120 мкм

Приведенные на рис. 3 поперечные сечения *A-A* и *B-B* системы Si-SiO₂ свидетельствуют о том, что на участках *CD* и *EF* свободные края отделенного от основы покрытия имеют волнообразную форму, что, как было показано выше, свидетельствует о потере устойчивости оболочки, приводящей к минимизации уровня напряжений в свободном крае отделенного покрытия.

На участке CD уложилось две волны синусоиды с амплитудой 2λ и одна полная волна с амплитудой $1,5\lambda$. Длина четвертой части синусоиды определяется интегралом [7]:

$$\frac{1}{4}l = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{[y' \varphi]^2 + [x' \varphi]^2} d\varphi, \quad (5)$$

где $y = b \sin \varphi$, $y' = b \cos \varphi$, $x = 2a\varphi/\pi$, $x' = 2a/\pi$, a и b – четверть длины волны и амплитуда синусоиды.

При подстановке в (5) значений y' и x' , получаем

$$\frac{1}{4}l = \frac{2a}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 + k^2 \cos^2 \varphi} d\varphi, \quad (6)$$

где $k = \pi b/2a$.

Этот интеграл можно вычислить только приближенными методами, например, по формуле Симпсона [7]. При делении промежутка интегрирования на 6 равных частей, имеем

$$\frac{1}{4}l = \frac{2a}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 + k^2 \cos^2 \varphi} d\varphi = \frac{a}{18} [y_0 + y_6 + 2 y_2 + y_4 + 4 y_1 + y_3 + y_5] \quad (7)$$

где $y_i = \sqrt{1 + k^2 \cos^2 \varphi_i}$

Экспериментальные исследования

С помощью усовершенствованного метода проведены исследования и определены величины и распределение остаточных напряжений в структурах Si–SiO₂, которые были изготовлены стандартными методами окисления, фотолитографии и травления. В качестве подложек-основ использовали полупроводниковые пластины кремния диаметром 100 мм ориентаций (001) и (111). Толщина высокотемпературного диоксида кремния составляла 0,8 мкм.

Требуемые размеры вскрываемых в SiO₂ окон задавали с помощью специально подобранных рабочих фотошаблонов. Интерференционные картины наблюдали в диапазоне температур от комнатной до 420 К с помощью микроскопа Neophot 2. Требуемую температуру структур Si–SiO₂ поддерживали с помощью пленочного нагревательного устройства, смонтированного на предметном столике микроскопа, с точностью ± 2 К.

При расчетах остаточных напряжений значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона пленки принимали равными: $E_f = 75$ ГПа и $\mu_f = 0,17$ [2].

Значения остаточных напряжений в SiO₂, рассчитанные по интерференционным картинам, возникающим по контурам окон различной формы, сведены в таблицу. Из таблицы видно, что остаточные напряжения в SiO₂, рассчитанные по формуле (2), при определении входящей в нее длины свободного края отделенной полоски l методом Симпсона (формула (7)), при использовании окна квадратной формы при комнатной температуре составили 205 МПа.

Установлено, что остаточные напряжения в диоксиде с ростом температуры структуры снижаются по закону, близкому к линейному, и при температуре системы 420 К их величина в SiO₂ составляет 160 МПа. Вид интерференционной картины, полученной при температуре структуры 420 К, представлен на рис. 4. По сравнению с исходной конфигурацией изгиба свободного края оксидной пленки при комнатной температуре (рис. 3) количество волн изгиба уменьшилось.

Величины остаточных напряжений в SiO₂, рассчитанные по интерференционным картинам, возникающим у границ круглого окна $\varnothing 120$ мкм при температурах от комнатной до 370 К, составили 140 МПа, а при температурах выше 400 К – 135 МПа. Более низкие значения напряжений и практически постоянная их величина во всем исследованном диапазоне температур структур свидетельствует о том, что отделенная от основы полоска покрытия испытывает в

этом случае напряжения сжатия. Их величина в свободном крае полоски при комнатной температуре составляет порядка 65 МПа, поскольку именно на эту величину отличаются расчетные значения остаточных напряжений от тех, которые были получены при использовании окна квадратной формы.

Влияние конфигурации окон в SiO₂ на расчетные значения

Температура структуры, К	Форма окна	Размеры окна, мкм	Величина напряжений в SiO ₂ , МПа	Примечание
290	квадрат	120×120	205	При повышении температуры напряжения в SiO ₂ снижаются
320			195	
350			185	
370			175	
400			170	
420			160	
290	круг	Ø120	140	Напряжения в SiO ₂ не зависят от температуры
320			140	
350			140	
370			140	
400			135	
420			135	

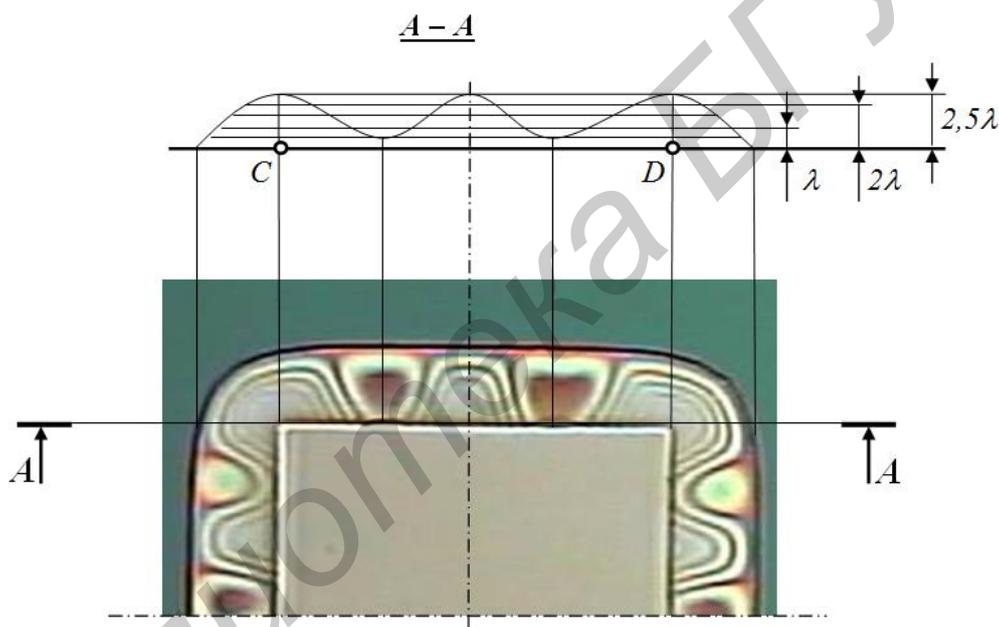


Рис. 4. Изменение интерференционной картины при нагреве структуры Si-SiO₂ до 420 К

При нагреве структур за счет большей величины температурного коэффициента линейного расширения основы ($\alpha_1 = 4,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) по сравнению с диоксидом ($\alpha_2 = 0,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) происходит снижение уровня напряжений в SiO₂. Однако в свободном крае отделившейся от основы полоски при температуре 420 К в случае круглого окна он остается еще достаточно высоким и составляет порядка 25 –30 МПа. О практически полном отсутствии остаточных напряжений в свободном крае отделившейся вдоль квадратного окна полоски при комнатной температуре свидетельствует то, что уже при нагреве структуры до 320 К произошло изменение интерференционной картины и величина остаточных напряжений снизилась с 205 до 195 МПа.

Таким образом, погрешность определения уровня напряжений в SiO₂ при использовании окон круглой формы составила в нашем случае 65 МПа, т.е. более 30 % от истинного значения.

Заключение

Повышена точность контроля уровня остаточных напряжений в системе Si-SiO₂, что позволяет избежать ошибок при определении уровня напряжений как за счет создания условий

для полного снятия остаточных напряжений в свободном крае отделенной от основы полоске оксидной пленки, так и за счет более точного расчета его длины с использованием метода Симпсона.

Использование полученных результатов при разработке тестовых структур на кристаллах ИС позволит проводить межоперационный контроль уровня остаточных напряжений в структурах Si-SiO₂ без ущерба для их качества.

CONTROL OF RESIDUAL STRESSES IN STRUCTURES SI-SIO₂

V.A. ZELENIN

Abstract

The consideration is made of the ways leading to increasing the control of residual stresses in structures such as silicon dioxide-monocrystal silicon substrate. The results concerning the determination of the level of residual stresses in structures Si-SiO₂ are presented.

Список литературы

1. Зеленин В.А. // Матер. II Межд. науч.-техн. конф. «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств». Новополоцк, 2002. С. 88–91.
2. Сергеев В.С., Кузнецов О.А., Захаров Н.П., и др. Напряжения и деформации в элементах микросхем. М., 1987.
3. Айвазян Г.Е., Скворцов А.М. // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 1986. Вып. 1(117). С. 117–120.
4. Федорович Н.А., Соколов В.И., Шеленикевич В.А. // ФТТ. 1975. Т.17, вып. 3. С. 919–921.
5. Сенько С.Ф., Зеленин В.А. А.с. СССР 1729253 от 22.12.91 г. Способ контроля величины локальных механических напряжений в структурах пленка – подложка.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Б.И. Теоретическая физика. В 10-ти т. Т.VII. Теория упругости. М.: Наука. 1987.
7. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления для ВТУЗов. М., 1963.