

Г.Е. АЙВАЗЯН, А.А. ВАРДАНЯН, А.А. ЧОМОЯН, А.Г. БАХШЕЦЯН

## ДЕФОРМАЦИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН С ПРИПОВЕРХНОСТНЫМ ПОРИСТЫМ СЛОЕМ

Նետազոտվել է ճեղքը միջազայրուս բարձրջերմաստիճանային մշակման ազդեցությունը ծակոտվեն սիլիցիումի (ՄՍ) ենթամակերևութային շերտով սիլիցիումային բիբլեների դեֆորմացիայի վրա: Ցույց է տրված, որ դեֆորմացիան ունի անիզոտրոպ բնույթ և նրա մեծությունը կախված է ՄՍ-ի կառուցվածքի փոփոխությունների միջև եղած կապից:

Исследовано влияние высокотемпературного отжига в нейтральной атмосфере на деформацию кремниевых пластин с приповерхностным слоем пористого кремния (ПК). Показано, что деформация носит анизотропный характер, а ее величина зависит от формирования слоя ПК и последующего отжига. Обсуждена связь деформации пластин и структуры ПК.

Ил. 4. Библиогр.: 9 назв.

The influence of treatment on the deformation of the porous silicon (PS) waters with a subsurface layer has been investigated under high temperature in a neutral atmosphere. It is shown that the deformation has an anisotropic nature and its magnitude depends on the forming conditions of the PS layer and the subsequent heat treatment. The link between the water deformation and the structural changes of PS is discussed.

Ил. 4. Ref. 9.

При анодной поляризации монокристаллического кремния на его поверхности формируется слой пористого кремния (ПК), толщина и объемная плотность которого определяются режимами анодирования, типом проводимости и уровнем легирования кремния [1]. Возрастающий интерес к ПК обусловлен тем, что благодаря наличию пор он обладает высокой химической активностью, вследствие чего значительно ускоряется протекание различных физико-химических процессов микроэлектронной технологии в первую очередь, диффузия, окисление, эпитаксия и геттерирование [1-3].

Исследования, посвященные ПК, показывают, что оптимальные условия для осуществления упомянутых процессов достигаются при температурах 800...1200°С. С другой стороны, высокотемпературные обработки приводят к нежелательной деформации пластин и образованию механических напряжений в слое ПК и окисла на его основе.

Деформация пластин, в свою очередь, влияет на качество проведения фотолитографических операций, в значительной степени определяет равномерность фронта диффузии, однородность и равнотолщинность тонких пленок и эпитаксиальных слоев [4,5]. Наблюдаемые в настоящее время тенденции развития полупроводниковых приборов и ИС, в частности, уменьшение размеров элементов и увеличение диаметра пластин, еще более обостряют проблему деформации.

В [6] исследована деформация кремниевых пластин при термическом окислении слоя ПК.

Между тем, большинство термообработок, связанных с использованием ПК, осуществляются в воздухе и нейтральной атмосфере. Отдельные сведения о деформации пластин в таких условиях, но при более низких температурах (200...800°C), представлены в [7], где предполагается, что деформация обусловлена поверхностным натяжением, образованием вторичных фаз и газообменом слоя ПК со средой.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния высокотемпературного отжига в нейтральной атмосфере на деформацию кремниевых пластин с приповерхностным слоем ПК.

**Образцы и методы исследования.** Исходными образцами служили первоначально недеформированные полированные пластины бездислокационного кремния с удельным сопротивлением 35 Ом·см (легирующая добавка - фосфор). Кремний с кристаллографической ориентацией в плоскости {111} был выращен методом Чохральского. Диаметр пластин составлял 76 мм, толщина - 300 мкм. Слои ПК создавали анодной обработкой в 48%-ом водном растворе плавиковой кислоты с использованием традиционной аппаратуры и методики [1]. ПК толщиной до 15 мкм и объемной плотностью 1,18...2,1 г/см<sup>3</sup> формировали при плотностях анодного тока 10...50 мА/см<sup>2</sup> в условиях интенсивного освещения источником белого света. Отжиг проводили в "мягких режимах" в атмосфере очищенного азота при температурах 800...1200 С в течение 30 мин.

Объемную плотность ПК находили из гравиметрических данных на основе расчета общего объема пор, пропорционального количеству растворившегося кремния при формировании ПК. Толщину слоя ПК определяли методом шар-шлифа. Структуру ПК исследовали на поверхности и поперечных сколах пластин с помощью растрового электронного микроскопа.

Деформацию пластин измеряли лазерным интерферометром с призмой полного внутреннего отражения. Чувствительность интерферометра составляла 1,2 мкм<sup>-1</sup>.

**Результаты исследования.** На рис. 1 представлена микрофотография поверхности и скола исходного слоя ПК. Видно, что на поверхности поры имеют исчеткую треугольную форму. Диаметр микропор составляет 1...3 мкм, а их плотность - 10<sup>6</sup> см<sup>-2</sup>. На поперечном сколе каналы пор выстраиваются в правильный геометрический рисунок: они направлены в глубину пластины под углом к поверхности -70° (плоскости скольжения {111}) и пересекают поверхность по кристаллографическим направлениям типа <110>, соответствующим наикратчайшим векторам трансляции в решетке монокристаллического кремния. Граница между пористым и монокристаллическим кремнием ровная.

В результате высокотемпературного отжига происходит фундаментальная перестройка структуры и уменьшение объема слоя ПК, что обусловлено протеканием процессов рекристаллизации и спекания [8]. Эти процессы сопровождаются укрупнением пор за счет "захлопывания" более мелких. При этом первоначальный кристаллографический характер распределения каналов пор сохраняется. Наши наблюдения и результаты работы [8] показывают, что изменение структуры и объема слоя ПК усиливается с

увеличением температуры отжига, однако его интенсивность независимо от исходной плотности слоя ПК резко снижается при температурах отжига 1000...1200 С.

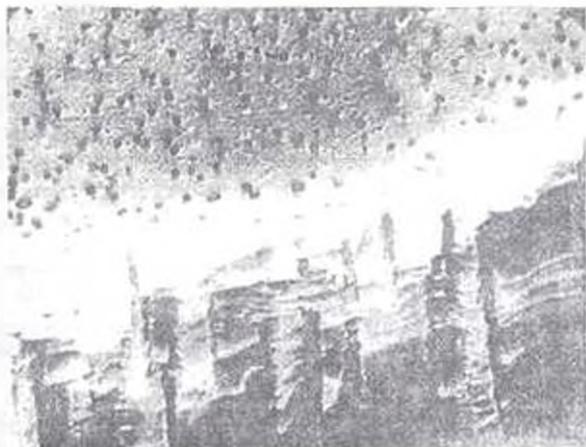


Рис. 1. Микрофотография структуры поверхности и скола слоя ПК (1000 $\times$ )

В ходе проведенных исследований было найдено, что непосредственно сам процесс анодной обработки не приводит к каким-либо заметным деформациям пластин. Однако после высокотемпературного отжига пластины изгибаются вогнуто в сторону слоя ПК и получают эллипсоидную форму деформации, типичная интерферограмма которой представлена на рис. 2. Установлено, что главная ось эллипсоидной деформации близка к одному из кристаллографических направлений типа  $\langle 110 \rangle$ . Вторая ось совпадает, естественно, с перпендикулярным к оси  $\langle 110 \rangle$  кристаллографическим направлением типа  $\langle 211 \rangle$ .



Рис. 2. Типичная интерферограмма формы деформации пластин

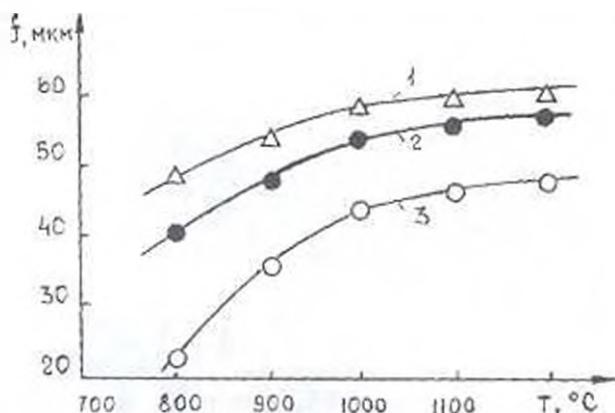


Рис. 3. Зависимость деформации пластин с объемной плотностью слоя ПК 1,18 (1); 1,19(2) и 1,21(3) г/см<sup>3</sup> от температуры отжига

На рис. 3 приведены температурные зависимости максимальных значений деформации пластин со слоем ПК с различной объемной плотностью. Зависимость деформации от толщины слоя ПК показана на рис. 4.

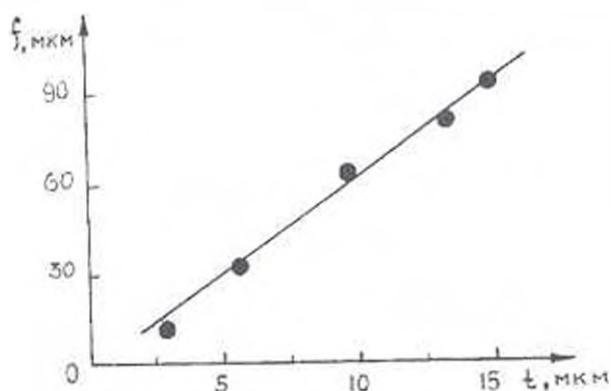


Рис. 4. Зависимость деформации пластин от толщины слоя ПК

Из полученных экспериментальных данных следует, что по мере увеличения температуры отжига и уменьшения исходной плотности слоя ПК деформация пластин сначала существенно возрастает, затем при высоких температурах ( $\geq 1000$  С) наступает определенное насыщение. Зависимость деформации пластин от толщины слоя ПК имеет четко выраженный линейный характер.

**Обсуждение результатов.** Известно, что деформация системы пленка-подложка определяется двумя компонентами внутренних напряжений: термическими, обусловленными различием коэффициентов температурного расширения (КТР) материала пленки и подложки, и собственными напряжениями пленки, связанными с процессом ее роста и структурным упорядочением [5]. Зависимость деформации  $f$  пластин с внутренним напряжением  $\sigma$  описывается так называемой уточненной формулой Стоуни [9]:

$$f = 3\sigma_{tr}^2(1-\nu)/Ed^2, \quad (1)$$

где  $E, \nu$  - соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона кремния;  $d$  - толщина подложки;  $t$  - толщина пленки;  $r$  - радиус подложки.

Для рассматриваемой нами системы "кремниевая пластина - слой ПК" термические напряжения отсутствуют, т.к. КТР монокристаллического и пористого кремния одинаковы. Поэтому деформация пластин будет полностью определяться растягивающими собственными напряжениями в слое ПК, обусловленными исключительно его структурным упорядочением (уплотнением) при высокотемпературном отжиге. С этой точки зрения, вышеописанные особенности строения структуры ПК и ее изменения при отжиге полностью объясняют наблюдаемые зависимости деформации (рис.3). В частности, анизотропность деформации связана с кристаллографическим характером распределения пор в слое ПК. Если считать, что процесс упорядочения слоя ПК, тем самым и собственные напряжения в нем, не зависят от толщины слоя ПК, то, исходя из формулы (1), объясняется обнаруженный линейный рост деформации с увеличением толщины слоя ПК (рис. 4).

В заключение отметим, что независимо от условий формирования ПК и последующего отжига после химико-механического удаления слоя ПК пластины возвращаются в исходное недеформированное состояние, что свидетельствует об упругом характере деформации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев К.П., Немировский Л.Н. Особенности получения и области применения пористого кремния в электронной технике // Обзоры по электронной технике. Сер. Полупроводниковые приборы. - 1989. - Вып. 9(1506). - С. 3-60.
2. Wong-Leung J., Ascheron C.E., Petravic M., Elliman R.G., Williams J.S. Getting of copper to hydrogen-induced cavities in silicon // Appl. Phys. Lett. - 1995. - V. 66. - P. 1231-1234.
3. Бондаренко В.П., Яковцева В.А., Долгий Л.Н. и др. КНИ-структуры на основе окисленного пористого кремния // Микроэлектроника. - 1994. - Т. 23. - Вып. 6. - С. 61-65.
4. Айвазян Г.Е., Багдасарян А.Б., Варданян А.А. Об определении механических напряжений в диффузионных слоях // Изв. АН Армении. Сер. ТН. - 1993. - Т. 46, № 6. - С. 34-38.
5. Напряжения и деформации в элементах микросхем / В.С. Сергеев, О.А. Кузнецов, Н.П. Захаров, В.А. Летягин.-М.: Радио и связь.-1987.- 88 с.
6. Barla K., Herino R., Bomchil G. Stress in Oxidized Porous Silicon Layers // J. Appl. Phys. - 1986. - V. 59, № 2. - P. 439-441.
7. Bai G., Kim Kun Ho, Nicolet Marc - A. Strain in Porous Si Formed on a Si (100) Substrate // Appl. Phys. Lett. - 1990. - V. 57, № 21. - P. 2247-2251.
8. Labunov A., Tabullina L., Bondarenko V., Gllnenko L., Dorofeev A. Heat Treatment Effect on Porous Silicon // Thin Solid Films. - 1986. - V. 137. -P 123-127.
9. Айвазян Г.Е., Скворцов А.М. Осевая деформация структуры подложка-пленка // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника. - 1987, Вып. 3. - С. 107 - 112.