

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМООБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИНЭ.М.ГОДЖАЕВ¹, Р.К.ГУСЕЙНОВ², Ш.М.ГАСАНЛИ³, З.С.ГАСАНОВ²

*Азербайджанский Технический Университет¹
Гянджинский Государственный Университет²
Институт Физики НАН Азербайджана³*

В работе изучено влияние высокотемпературного отжига на механические характеристики кремниевых пластин р и n-типа с диаметром 76 и 100мм. Показано, что не зависимо от типа проводимости и диаметра пластин после процесса высокотемпературного отжига возникают пластическая деформация и связанная с нею дислокации. Установлены, температурные зависимости микротвердости и длина диагонали отпечатка. Из температурной зависимости микротвердости определена энергия активации движения дислокаций. Кроме этого, обнаружен разбег дислокаций от отпечатка при комнатной температуре. Полученные результаты хорошо объясняются термической активацией движения дислокаций и релаксацией упругих напряжений.

ВВЕДЕНИЕ

В процессах формирования интегральных схем и других полупроводниковых приборов пластины кремния подвергаются различным механическим и термическим воздействиям, в результате чего возникает большая опасность генерации на этих пластинах дислокаций и ухудшения их механической прочности. Поэтому изучение вопросов генерации дислокаций в полупроводниковых кристаллах в широком интервале температур носит актуальный характер, тем более, что дислокации и связанные с ними дефекты оказывают существенное влияние на характеристики полупроводниковых приборов. О генерации дислокаций под действием различных внешних факторов посвящены многочисленные работы [1-6], согласно которым [1,6] движение дислокаций под нагрузкой носит скачкообразный характер. По мнению авторов работы [1] после пробега нескольких периодов решетки дислокация самопроизвольно останавливается на некоторое время, другими словами блокируется, а затем процесс многократно повторяется. Качественная интерпретация явления основана на предположении о существовании у дислокационного ядра различных состояний, а именно, подвижного и неподвижного- с возможными переходами между ними (locking-unlocking transitions).

Предлагаемая работа посвящена исследованию влияния температурного отжига кремниевых пластин на их механические характеристики.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованы кремниевые пластины n и p-типа проводимости диаметром 76мм и 100мм, ориентации поверхности которых (111) и (100). В качестве характеристического параметров были использованы микротвердость (Н), длина канала отпечатки (d), скорость движения дислокаций и скорость механического изгиба.

Микротвердость определялась по результатам не менее 20 испытаний для каждого образца. Измерения микротвердости были выполнены с помощью прибора типа ПМТ-3. В качестве индентора была использована пирамида Виккерса. Термообработка исследованных образцов была осуществлена в атмосфере воздуха в интервале температур 25-1000⁰С. Для исключения прямого попадания тепловых лучей на пластины и равномерного их нагрева они были сверху защищены экранными пластинами. Нагрузка на индентор изменялась в пределах от 0.3 до 1.2 Н.

Расчеты микротвердости были проведены с помощью формулы[7]

$$H=1854 \times 10^7 P/d^2, \quad (1)$$

где P-приложенная нагрузка (Н), d-диагональ отпечатка(мкм), Н-микротвердость (МПа).

Эксперименты проводились при комнатной температуре. Погрешность измерений микротвердости составляла порядка 5%-ов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.

Результаты экспериментов приведены на рис.1-4, из которых видны следующие особенности полученных данных:

1. Независимо от диаметра (76,100 мм) пластин после процесса резки, полировки и эпитаксии с ростом температуры отжига изменяется форма их деформации, о чем свидетельствуют зависимости остаточного изгиба пластин от температуры отжига(рис.1.). В частности, из рис. 1 видно, что на пластинах с эпитаксиальным слоем и интегральной схемой величина остаточного изгиба пластин с ростом температуры отжига до 600⁰С уменьшается.

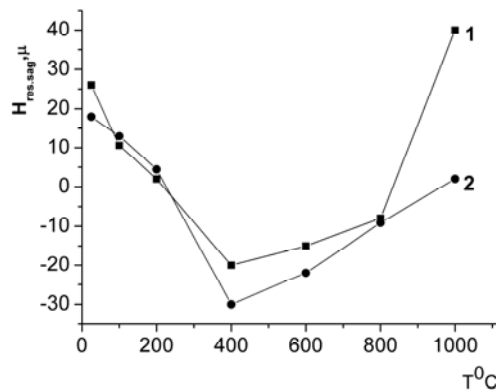


Рис.1. Зависимость механического изгиба от температуры отжига
1-эпитаксиальная пленка (100), 2-интегральная схема (111).

При этом алгебраически знак изгиба становится отрицательной, а с дальнейшим ростом температуры отжига величина остаточного изгиба растет, и знак изгиба становится положительным. Полученные результаты являются подтверждением того, что за счет термических напряжений, возникших в процессе температурного отжига, форма деформаций пластин изменяется.

2. Величина скорости механического изгиба с ростом температуры отжига растет, достигает максимума и дальнейшим ростом температуры отжига уменьшается (рис.2).

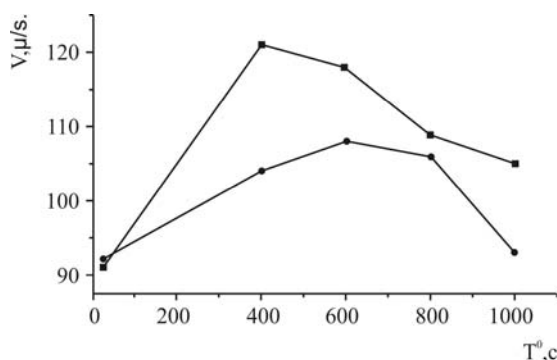


Рис.2. Зависимость скорости механического изгиба от температуры
1-монокристаллический кремний(111) после полировки,
2-эпитаксиальная пленка(100).

3. Зависимость микротвердости от температуры отжига (при $F(H)=const$) носит экспоненциальный характер, а именно, с уменьшением температуры отжига величина микротвердости резко растет в дальнейшем с выходом на монотонный рост(рис.3).

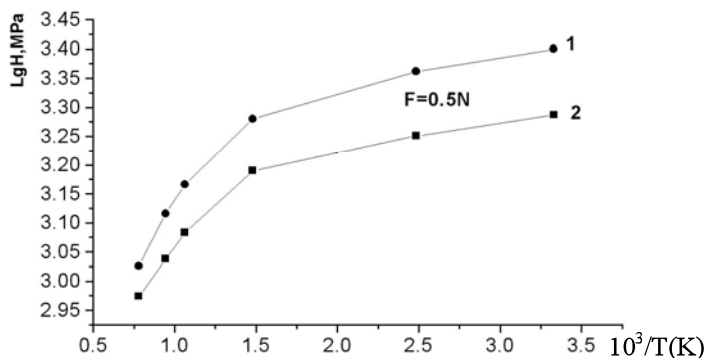


Рис.3. Зависимость микротвердости от температуры
1-для пластин с ориентацией(111), 2-для пластин с ориентацией(100).

4. С ростом температуры отжига длина диагонали отпечатка до $450^{\circ}C$ уменьшается(при $F(H)=const$), а затем с дальнейшим увеличением температуры

отжига резко увеличивается. Причем на краях пластин (зоны 1 и 4) при $T=250^{\circ}\text{C}$ и $T=1000^{\circ}\text{C}$ величина диагонали отпечатка канала больше, чем в середине пластин (рис.5).

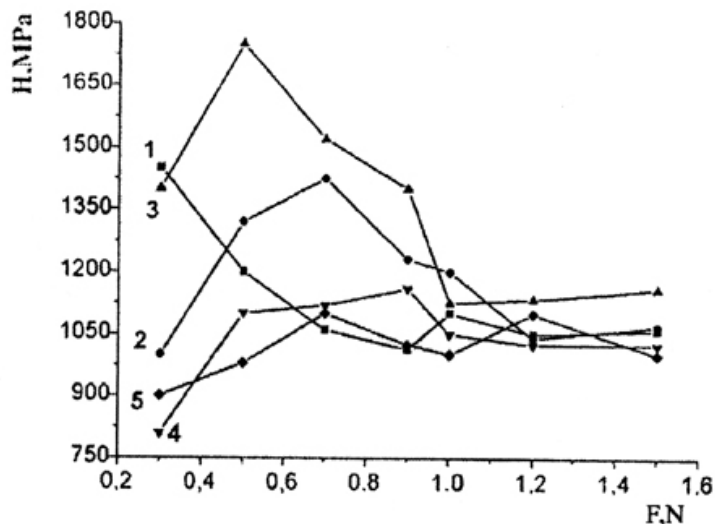


Рис.4. Зависимость длины диагонали отпечатки после температурного отжига.

Характер зависимостей длины отпечатков диагонали $d=f(T)$, величины остаточного изгиба $h=f(T)$, а также величины механического изгиба V_b свидетельствуют о существовании определенных стадий начало релаксаций термических напряжений. В частности, из рисунков 1,2,4 видны, что первая стадия релаксаций напряжений становится заметной в интервале температур $25-400^{\circ}\text{C}$, при этом d и h уменьшаются, а скорость механического изгиба увеличиваются, вторая стадия при $400-800^{\circ}\text{C}$, где наблюдается рост d и h , монотонное уменьшение скорости механического изгиба, третья стадия, соответственно, при $T > 800^{\circ}\text{C}$, где наблюдаются резкий рост длины диагонали канала отпечатка, величины остаточного изгиба (h) и резкое уменьшение скорости механического изгиба V_b .

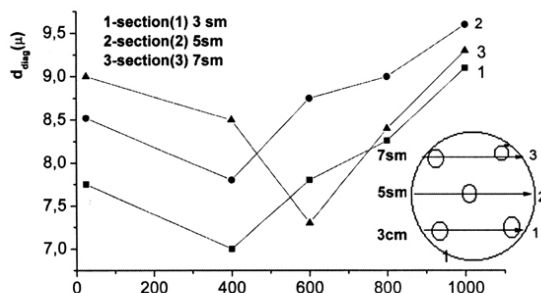


Рис.5. Зависимость длины диагонали отпечатки после температурного отжига.

Значения остаточного изгиба h_{ben} после различных процессов термообработки были определены из зависимостей механического изгиба $W(P)$ пластин от величины приложенной внешней силы. Исследования зависимости $W(P)$ были проведены с помощью полуавтоматической установки, изготовленной на основе метода осесимметричного изгиба жестких пластин [1,2], где подробно изложено описание нами использованной установки. Значения h_{ben} были определены путем аппроксимации линейной области кривых $W(P)$ на ось ордината при $F=0$.

Наблюдаемый остаточный прогиб пластин, по-видимому, является следствием механических напряжений, возникающих при проведении технологических операций. В частности, после процесса шлифовки за счет упругих напряжений полупроводниковая пластина изгибается выпукло к шлифованной стороне.

Необходимо отметить, что при высокотемпературной обработке полупроводниковая пластина пластически деформируется за счет преодоления дислокациями барьеров Пайлера.

Для анализа полученных экспериментальных результатов отметим следующее: во-первых, когда полупроводниковые пластины подвергаются обычной технологической высокотемпературной обработке даже бездефектной полупроводниковой пластине, возникают пластические деформации и как результат движение дислокаций. Причиной данного эффекта является температурные напряжения, которые возникают из-за градиента температур между центром и краем пластины [7-9]. Во-вторых, при приложении нагрузки на индентор вначале образуется под ним область упругих напряжений. При дальнейшем увеличении нагрузки кристалл под индентором пластически деформируется и в результате этого возникают дислокации. За счет движения дислокаций в определенных кристаллографических направлениях происходит их накопления. Из-за малой подвижности дислокаций после снятия нагрузки вокруг них возникает область упругих напряжений, а дальнейшее увеличение число дислокаций приводит к сложению этих областей и взаимодействию с аналогичными областями в соседних плоскостях скольжения. В результате этих взаимодействий в определенных кристаллографических направлениях могут возникнуть напряжения, которые могут превысить предел прочности кристалла в локальном объеме и в результате образоваться трещины. Дальнейший процесс механического разрушения поверхности кристаллов связан с кинетикой роста трещин и приложения нагрузки. При разных скоростях приложенных нагрузок процесс разрушения будет лимитироваться подвижностью дислокаций.

Согласно вышезложенным и с учетом того, что подвижность дислокаций вблизи поверхности выше, чем в объеме материала, наблюдаемый рост микротвердости с уменьшением нагрузки на индентор можно объяснить следующим образом. На начальном этапе вдавливания пирамиды (индентор) происходит с повышенной скоростью деформация и деформационное упрочнение материала под индентором. При этом чем меньше нагрузка, тем больше результирующее упрочнение материала в области отпечатка, что проявляется в росте величины микротвердости с уменьшением размера отпечатка(см.рис.4). С увеличением нагрузки на индентор более глубокие слои приповерхностного слоя пластины

подвергаются пластической деформации, в результате наряду с образованием новых дислокаций начинается процесс хрупкого разрушения.

Отжиг приводит к релаксации упругих напряжений и движению дислокаций. Подтверждением сказанного является экспериментально найденные температурные зависимости роста микротвердости, движения дислокаций, а также длины диагонали отпечатка с увеличением температуры отжига. Экспоненциальный характер этих зависимостей явным образом указывают на тесную связь между релаксацией упругих напряжений и термическими процессами (рис.3)

Согласно работам [8-9], в области высоких температур зависимость $H=F(1/T)$ достаточно хорошо описывается формулой

$$H = \sqrt[3]{\frac{2BkT}{V} \exp\left(\frac{E}{3kT}\right)}, \quad (2)$$

где E - энергия активации перемещения дислокаций; V – активационный объем; B – постоянная; k - коэффициент Больцмана; T - абсолютная температура. Используя уравнения (2) и зависимость $\lg H=f(1/T)$ была определена энергия активации перемещения дислокаций, которая равна 1.90 эВ, что хорошо согласуется с литературными данными [8].

Как зависимость длины диагонали канала отпечатка от температуры отжига (рис.5), так и разбег дислокаций от отпечатка индентора (рис.6) также являются подтверждением того, что при высокотемпературных отжигах происходит релаксация упругих напряжений.



Рис.6. Разбег дислокаций от диагонали отпечатка после температурного отжига.

Из рисунка 6 видно, что после отжига на окрестности отпечатка в процессе вдавливания индентора при комнатной температуре возможен разбег дислокаций. Причем этот разбег дислокаций происходит в определенном кристаллографическом направлении. Причиной этому, как уже указано выше, является релаксация упругих напряжений. Согласно работе [8], разбегание дислокаций у поверхности больше, чем в глубь кристалла. Это еще раз указывает на облегченность перемещения дислокаций вблизи поверхности пластины.

Наши данные, а также данные других авторов [8,9] показывают, что для пластин с диаметром больше 76 мм процессы нагрева и охлаждения должны

продолжаться достаточно медленно.

Таким образом, на основе анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- 1) Возникновение дислокаций в области низких температур (где термическая активация практически отсутствует) означает, что при локальном вдавливании в плоскости поверхности образца, возникают напряжения сдвига, превышающие величину напряжения Пайерлса.
- 2) Температурная зависимость микротвердости свидетельствует о том, что причиной возникновения, движения дислокаций и микропластической деформации является термически активные процессы. Из температурной зависимости микротвердости найдена величина энергии активации движения дислокаций.
- 3) При комнатной температуре разбег дислокаций от отпечатка после температурного отжига еще раз подтверждает о возможности релаксации упругих напряжений при комнатной температуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петухов Б.В. Статическая теория движения дислокаций при наличии спонтанных процессов блокирования –деблокирования. Физика твердого тела. 2001, т.43, вып.3, с.813.
2. Зуев Л.Б., Данилов В.И. и др. О новом типе волн пластической деформации твердых тел. Известия высших учебных заведений. Физика, 2000, №2, с.46.
3. Меженный М.В., Мильвидский М.Г., Павлов В.Ф. Динамические свойства дислокаций в термообработанных при низких температурах пластинах кремния. Физика твердого тела, 2001, т. 43, вып.1, с.47.
4. Герасимов А.Б., Чирадзе Г.Д., Кутивадзе Н.Г. О распределении величины микротвердости по глубине образца. Физика твердого тела, 1999, т.41, вып. 7, с.1225.
5. H.Bidadi, S.Sobhanian, M.Mazidi, Sh.Hasanli, S. Khorram. The peculiarities of mechanical bending of silicon wafers after diverse manufacturing operations. Microelectronics Journal, 2003, № 5-8, p.514.
6. Anstis G.R. et al. A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness.1. Direct crack measurements. Of the American ceramic society Journal, 1961, v.64, №9, p.533.
7. Lawn B.R. et al. Model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields. Journal of materials science, 1977, v.12, №11, p.2195.
8. Kontsevoy Yu.A. et al. Plasticity and durability of semiconductor materials and structures, 1982, p.103.
9. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука, 1983, 280 с.

TERMOİŞLƏMƏNİN SİLİSİUM LÖVHƏLƏRİNİN MEXANİKİ XARAKTERİSTİKALARINA TƏSİR PROSESİ

E.M.QOCAYEV, R.K.HÜSEYNOV, Ş.M.HƏSƏNLİ, Z.S.HƏSƏNOV

XÜLASƏ

İşdə 76 və 100 mm diametrli p və n–tip silisium lövhələrinin mexaniki xassələrinə yüksək temperaturu tablamanın təsiri öyrənilmişdir. Göstərilmişdir ki, keçiriciliyin tipindən və nümunənin diametrindən asılı olmayaraq, yüksək

temperaturlu tablamadan sonra onda plastik deformasiya və onunla əlaqədar dislokasiya baş verir. Mikrobərkliyin və yarıqların temperatur asılılıqları müəyyənləşdirilmiş, mikrobərkliyin temperatur asılılığına əsasən dislokasiyaların hərəkətlərinin aktivləşmə enerjiləri təyin edilmişdir. Bundan əlavə, otaq temperaturunda dislokasiyaların yarıqdan qaçışı aşkar edilib. Alınmış nəticələr dislokasiyaların yerdəyişməsinin termik aktivləşməsi və relaksasiyanın elastiki gərginliyi ilə lazımi səviyyədə izah edilmişdir.

INFLUENCE OF THE HEAT TREATMENT ON THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF SILICON PLATES

E.M.GODJAYEV, R.K.HUSEYNOV, Sh.M.HASANLI, Z.S.HASANOV

SUMMARY

The influence of the high-temperature annealing on mechanical characteristics of silicon plates of p and n -type with a diameter of 76 & 100mm is investigated in the article. After high-temperature annealing process the plastic deformation & dislocations arise independently of the conductivity type and the plate's diameter. The temperature dependences of microhardness and the length of imprint diagonal are determined. The energy activation of the dislocation movement is defined from the temperature dependence of microhardness. Besides, the acceleration of the dislocation from the imprint at a room temperature was found. The outcomes are well-explained by the thermal activation of dislocation movements and relaxation of elastic voltage.