

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ И ИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАСТИН КРЕМНИЯ

М. В. Меженный¹, В. Я. Резник¹, В. С. Просолович², А. И. Простомолотов³

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Технологический институт сверхтвёрдых и новых углеродных материалов", тутмез@rambler.ru

²Белорусский государственный университет, prosolovich@bsu.by

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, prosto@ipmnet.ru

ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пластины для исследований вырезали из полученных методом Чохральского бездислокационных монокристаллов кремния диаметром 150 мм (удельное сопротивление 5 Ом см, дырочный тип проводимости, содержание кислорода $\sim (7-8) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$), выращенных в "вакансационном" режиме в направлении [001]. Термообработку пластин проводили в режимах: 1000°C/15мин + 450°C/16час (пластинка 1) и 1000°C/15мин + 650°C/1час (пластинка 2). Для сравнения исследовали также образцы, вырезанные из пластины непосредственно после выращивания (пластинка 3).

Образцы для механических испытаний вырезали из пластин в форме параллелепипедов размером 25x4x0,7 мм с плоскостью большой грани {100}, длинная сторона образца была ориентирована вдоль направления (100). Образцы химически полировали в кислотной смеси HF: HNO₃ = 1:6 в течение 5 мин. При этом с поверхности удалялся слой толщиной ~ 40 мкм. Далее на исследованную поверхность образца наносились несколько отпечатков индентором Кнуппа (нагрузка на индентор составляла 0,25 Н, время выдержки под нагрузкой 15с). После этого исследуемый образец помещался в устройство для четырехточечного изгиба, в котором деформирование образцов осуществляли при температурах 600 и 800°C. Сторона образца, на которой располагались отпечатки индентора, подвергалась растяжению.

Имплантация ионами B⁺ (энергия E = 500 кэВ в пластины КЭФ4,5(100)) и P⁺ (E = 1000 кэВ в пластины КДБ-12(100)) дозами $\Phi = 5 \cdot 10^{12} - 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ осуществлялась при комнатной температуре на ускорителе ионов DTL. Плотность ионного тока составляла 0,3 мкА/см². Распределение внедренных примесей, определенное методом масс-спектрометрии вторичных ионов, имело нормальных (гауссов) характер. Проектированный пробег ионов составлял ~ 1 мкм. Измерения микротвердости (Н) проводились на приборе ПМТ-3. Нагрузка (P) на индентор варьировалась в пределах от 20 до 200 г. При каждом измерении на поверхность образца наносилось не менее 50 отпечатков, и проводилась обработка результатов измерений с использованием методов математической статистики.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В ГЕНЕРАЦИИ И ДВИЖЕНИИ ДИСЛОКАЦИЙ

На рис. 1 показана зависимость скорости движения дислокаций в термообработанных образцах при 600° С от величины приложенных сдвиговых напряжений. Для сравнения на этом же рисунке приведены аналогичные зависимости для образцов, вырезанных из пластины 3 (постротовое состояние).

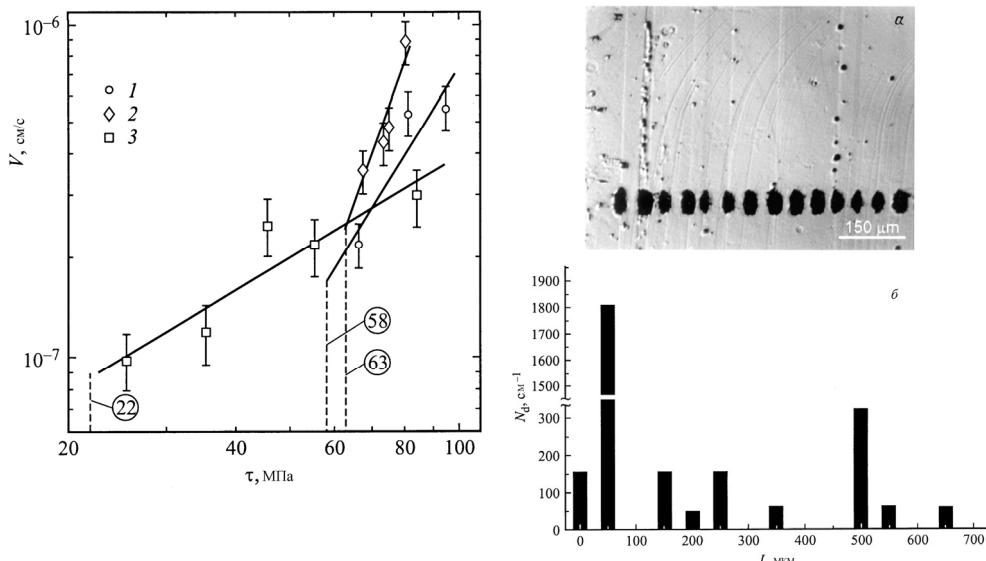


Рис. 1. Зависимость скорости движения дислокаций при 600°C в пластинках кремния от величины приложенных напряжений (вертикальные штриховые линии — стартовые напряжения начала движения дислокаций в исследуемых образцах). Номера криевых соответствуют номерам пластин

Рис. 2. Пространственная неоднородность в генерации и распространении дислокаций от отпечатков индентора. а — картина селективного травления образцов после их изгиба, б — гистограмма распределения линейной плотности дислокаций в полосах скольжения, формирующихся вокруг отдельных отпечатков индентора

Сопоставление полученных результатов показывает, что скорости движения дислокаций в образцах после низкотемпературных термообработок выше, чем в образцах непосредственно после выращивания. Существенно большие величины стартовых напряжений начала движения дислокаций обнаружены в термообработанных образцах пластин 1 и 2: 58 и 63 МПа, соответственно, против 22 МПа в образцах пластины 3. При напряжениях ~ 80-90 МПа во всех образцах наблюдалась массовая генерация дислокационных полос скольжения от посторонних источников. При температуре испытаний 800°C в образцах пластин 1 и 2 значения стартовых напряжений составляли 25 и 43 МПа, а пластический изгиб образцов наблюдался при 45 и 50 МПа, соответственно. Критические напряжения начала движения дислокаций в об-

разцах пластины 3 при температуре 800°C составляли 12 МПа, а напряжения, приводящие к пластическому изгибу — 25 МПа. Заметим, что при изгибе образцов при температуре 800°C наблюдался большой разброс в значениях величин критических напряжений начала движения дислокаций, а также величин напряжений, при которых происходит массовая генерация дислокаций от посторонних источников, приводящая к пластическому изгибу образцов. Можно констатировать, что скорости движения дислокаций во всех исследованных образцах достаточно близки. Однако в образцах после низкотемпературных отжигов при 450 и 650°C наблюдается сильное возрастание стартовых напряжений начала движения дислокаций. Это объясняется образованием кислородных кластеров при низкотемпературных термообработках, которые являются стопорами для начала движения дислокаций и не являются препятствиями для уже движущихся дислокаций.

Характерной особенностью образцов после низкотемпературных термообработок является четко выраженная пространственная неоднородность в генерации и распространении дислокаций от отпечатков индентора при одинаковых значениях сдвиговых напряжений. В качестве примера на рис. 2а показаны типичные картины разбега дислокаций от расположенных рядом отпечатков индентора в процессе изгиба при 800° С. Вокруг отдельных отпечатков дислокационные полосы скольжения вообще не образуются, а там, где эти полосы формируются, линейная плотность дислокаций в них для отдельных близко расположенных отпечатков может различаться почти на 2 порядка. На рис. 2б представлена гистограмма распределения линейной плотности дислокаций в полосах скольжения, образующихся от расположенных на одинаковых расстояниях друг от друга отпечатков индентора. Прослеживается четко выраженная периодическая неоднородность в распределении линейной плотности дислокаций в полосах скольжения, формирующихся вокруг индивидуальных отпечатков.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ

Установлено, что при использовавшихся в работе энергиях ионов B⁺ и P⁺ имел место эффект приповерхностного упрочнения монокристаллического кремния. В имплантированных образцах микротвердость при малых нагрузках (20-50 г) существенно возрастила (40-50 %), а при нагрузках 200 г и выше – ее изменения не превышали 3 – 5 %, что близко к погрешности измерений. Указанный эффект более выражен при внедрении ионов бора, чем при имплантации фосфора. В имплантированных образцах при малых нагрузках (20-50 г) наблюдалось уширение (в 3-4 раза) случайного распределения величин микротвердости. Это свидетельствует о формировании в процессе имплантации вблизи поверхности кремния скоплений дефектов с размерами сравнимыми с размерами отпечатка при указанных нагрузках (0,5 – 1 мкм). При проведении БТО профили распределения примесей существенно не изменились. Достижение заданных уровней легирования имело место при длительностях БТО не более 30 с. После отжига наблюдалось резкое снижение микротвердости в приповерхностной области монокристалла на глубинах до 1 мкм и увеличению трещиностойкости при малых нагрузках. Экспериментальные результаты и механизм приповерхностного радиационного упрочнения кремния объяснены с учетом генерации вакансий в процессе быстрого термического отжига.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ
ПРОЧНОСТИ ПЛАСТИН ПРИ БТО**

Ввиду особенности крепления пластины в процессе БТО возникают большие локальные напряжения и изгиб в окрестности опор пластин большого диаметра. Поэтому было рассчитано 3-х мерное напряженно-деформированное состояние пластины монокристаллического кремния с учетом его анизотропии и кристаллографической ориентации. Исследованы различные способы крепления пластин кремния большого диаметра (200 и 300 мм): на 3-х и 4-х игольчатых опорах и различной их расстоянии от центра пластины, учитывающие материал, форму и площадь контакта с опорой. Анализ возникающих напряжений в местах контакта пластина-опора позволил выбрать оптимальные условия проведения БТО, позволяющие предотвратить возможность зарождения и распространения дислокаций по плоскостям скольжения.