

УДК 548.4

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ И МЕТАЛЛИЗАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРОЦЕСС ОТКРЕПЛЕНИЯ ДИСЛОКАЦИЙ ОТ ПРИМЕСНЫХ ЦЕНТРОВ В КРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ

Н. Я. Горидько, В. А. Макара, Н. Н. Новиков, Л. П. Стебленко

Исследовано изменение динамического поведения дислокаций под влиянием термообработки образцов кремния и металлизации их поверхности. Определенные в работе параметры открепления дислокаций от центров их закрепления (энергия и активационный объем процесса открепления) свидетельствуют о том, что нанесение твердотельных покрытий на поверхность образцов кремния с введенными дислокационными петлями, а также дополнительная высокотемпературная термообработка образцов сопровождается формированием вокруг дислокаций атмосфер комплексных дефектов, которые в значительной степени влияют на кинетику срыва дислокаций со стартовых положений и динамику их последующего движения.

Работы [1-8], выполненные в последние годы, привлекли внимание к вопросу учета влияния локальных дефектов кристаллической решетки на динамическое поведение дислокаций в кристаллах. При этом, согласно [5], подвижность дислокаций лимитируется либо совместным действием рельефа решетки и локальных препятствий, создаваемых при-

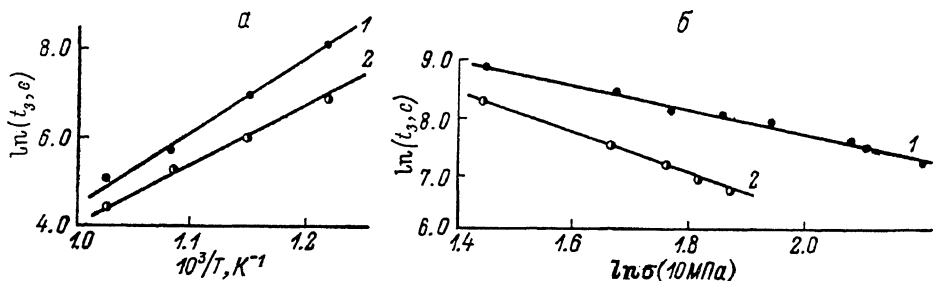


Рис. 1. Зависимость времени задержки  $t_3$  в начале движения коротких 60-градусных дислокационных сегментов от температуры испытания и внешнего напряжения в кристаллах кремния с твердым покрытием меди (а) и никеля (б).

а: 1 —  $\sigma=63.5$ , 2 — 53.0 МПа; б: 1 — 823, 2 — 873 К.

месями и другими точечными дефектами, либо достаточно мощные дефекты полностью маскируют кристаллический рельеф и играют преобладающую роль в закреплении дислокаций.

Изменение концентрации точечных дефектов в кристаллах с высокими барьерами Пайерлса в соответствии с [2] должно проявляться в изменении времени задержки начала движения дислокаций. В области напряжений, близких к стартовым, оно, в частности, может быть существенно увеличено при возрастании разности концентраций точечных дефектов  $\Delta C$  в первоначальной и соседней долинах кристаллического рельефа вследствие влияния этого параметра на вероятность  $P$  того, что после образо-

вания двойного перегиба его энергия при дальнейшей эволюции не превысит своего первоначального значения.

Представляло интерес экспериментально проверить эти теоретические выводы, определив влияние термообработки и металлизации образцов кремния и связанного с этими процессами изменения концентрации точечных дефектов вблизи дислокации на механизм торможения дислокаций, т. е. на значение параметра  $P$ .

Использованная в данной работе методика введения коротких дислокаций в кристаллы кремния и определения скорости их движения,

а также методики термообработки и металлизации образцов не отличались от описанных в работах [9, 10].

Полученные зависимости времени задержки дислокаций  $t_s$  от температуры  $T$  и напряжения  $\sigma$  приведены на рис. 1. Тем-

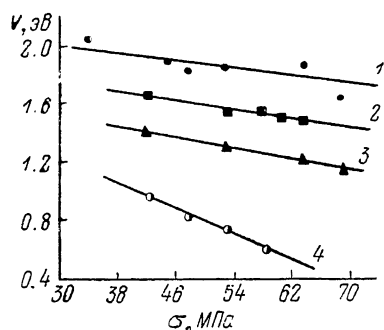


Рис. 2. Зависимость энергии открепления дислокаций от примесных центров от величины внешнего напряжения для кристаллов кремния: исходных (1), с твердым покрытием никеля (2) и меди (3) и термообработанных (4).

пературная зависимость времени задержки имеет типичный для термоактивируемых процессов экспоненциальный характер

$$t_s = t_s^0 \sigma^{-m} \exp [V(\sigma)/kT], \quad (1)$$

где  $k$ ,  $m$ ,  $t_s^0$  — постоянные для данной температуры величины. Последнее позволяет определить из экспериментальных данных энергию активации  $V(\sigma)$  процесса открепления дислокаций от примесных центров. Значения  $V(\sigma)$  рассчитывались по температурной зависимости времен задержек для всего диапазона рабочих напряжений (рис. 2).

Как видно из рис. 2, зависимость  $V(\sigma)$  может быть аппроксимирована выражением вида

$$V = V_0 - \gamma\sigma, \quad (2)$$

где  $V_0$  — высота барьера, препятствующего термическому отрыву дислокации с примесных центров в отсутствие внешних, действующих на кристалл напряжений, которую можно считать равной энергии открепления дислокаций от этих центров;  $\gamma$  — активационный объем процесса открепления.

#### Параметры открепления дислокаций от центров их закрепления

Образец	$V_0$ , эВ	$\gamma \cdot 10^{-27}$ , м <sup>3</sup>	Образец	$V_0$ , эВ	$\gamma \cdot 10^{-27}$ , м <sup>3</sup>
Исходный	2.2	1.0	Металлизированный никелем	2.0	1.3
Термообработанный	1.9	3.5		Металлизированный медью	1.8

Приведенные на рис. 2 результаты путем аппроксимации зависимости  $V(\sigma)$  на  $\sigma \rightarrow 0$  позволяют определить параметр  $V_0$  для исследованного в работе диапазона температур (823—973 К).

В таблице приведены значения параметра  $V_0$ , а также значения активационного объема процесса открепления дислокаций от закрепляющих центров, соответствующие как исходному кремнию, так и образцам кремния, прошедшим различные обработки (термообработку и металлизацию). Данные таблицы позволяют утверждать, что нанесение твердых окисных и металлических покрытий на образцы кремния с выведенными на старт дислокациями понижает высоту барьера  $V_0$ . Последнее может быть обус-

ловлено трансформацией центров закрепления в ядре дислокации — изменением их концентрации и размеров, — сопровождающейся понижением энергии взаимодействия закрепляющих центров с дислокациями. При этом дополнительная высокотемпературная термообработка образцов кремния на воздухе с выведенными на старт дислокациями без приложения напряжений приводит, по-видимому, к укрупнению центров закрепления, что обуславливает увеличение активационного объема  $\gamma$  процесса открепления. Последний результат находится в хорошем соответствии с данными работы [11]. В то же время покрытия никеля и меди практически не изменяют величины активационного объема.

На рис. 3 представлены зависимости времени задержки от скорости  $v$  последующего (после открепления от стопоров) установившегося движения дислокаций. В соответствии с работой [12]

$$t_2 \sim \frac{1}{p} \frac{a}{v} - b, \quad (3)$$

где  $a$  — расстояние между долинами потенциального рельефа;  $b$  — параметр, смысл которого ясен из рис. 3. Выражение (3) позволяет по при-

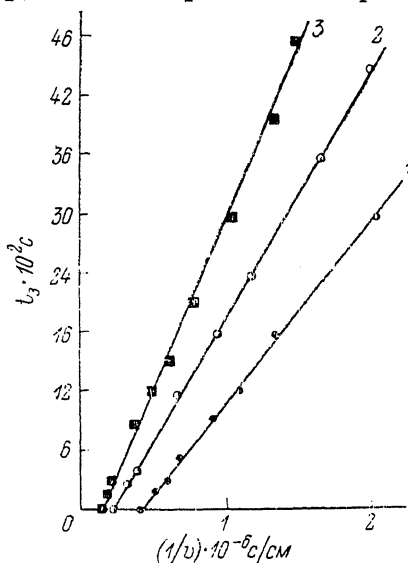


Рис. 3. Зависимость времени задержки от обратной скорости последующего движения коротких 60-градусных дислокаций в кристаллах кремния с твердым покрытием меди.

$T, K: 1 - 823, 2 - 873, 3 - 973.$

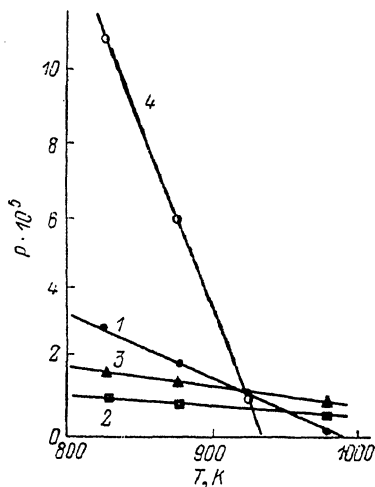


Рис. 4. Температурная зависимость параметра  $P$  для кристаллов кремния: исходных (1), с твердым покрытием никеля (2) и меди (3) и термообработанных (4).

веденным экспериментальным данным определить вероятность и ее зависимость от температуры испытания (рис. 4). Как видно из этого рисунка, для всех типов исследованных образцов наблюдается линейное уменьшение параметра  $p$  с ростом температуры.

Термообработка образцов кремния (температура 1100 °С, время отжига 3 ч) приводит к существенному возрастанию наклона указанной зависимости. В то же время в образцах кремния, покрытых медью, наклон этой зависимости уменьшается примерно в пять раз по сравнению с исходными кристаллами, где параметр  $P$  в том же температурном интервале уменьшается на порядок. Незначительно изменяется с повышением температуры параметр  $P$  и в кристаллах кремния с никелевым покрытием.

Уменьшение параметра  $P$  в области пониженных температур испытания для образцов кремния с нанесенными твердофазными металлическими покрытиями по сравнению с исходными и термообработанными образцами можно в соответствии с выводами [2] объяснить возрастанием при

этом либо разности концентраций  $\Delta C$  в первоначальной и соседней долине кристаллического рельефа, либо связанным с дефектом изменением энергии дислокации или совместным действием обеих факторов.

Представленные данные свидетельствуют о значительном влиянии точечных дефектов на динамическое поведение дислокаций даже в кристаллах с экстремально высокими значениями напряжения Пайерлса. Процесс вывода дислокаций в положение старта, а также дополнительные термообработки, обусловленные использованием данного метода изучения динамического поведения дислокаций (повторное избирательное травление образцов до и после их нагружения), сопровождаются формированием вокруг дислокаций атмосфер комплексных дефектов, которые в значительной степени влияют на кинетику срыва дислокаций со стартовых положений и динамику их последующего движения. Здесь уместно высказать соображение о том, что величина стартовых напряжений для движения дислокаций в кристаллах в значительной степени определяется конкретными условиями вывода дислокаций в стартовые положения, а также разгрузки образцов после вывода дислокаций в стартовые положения, наличием или отсутствием их термоциклирования перед приложением рабочей нагрузки и другими факторами. Нанесение твердотельных покрытий на поверхность образцов с введенными дислокационными петлями, а также дополнительная высокотемпературная термообработка образцов приводят к заметным изменениям в структуре дефектов, формирующих атмосферу. Полученные результаты позволяют наметить способы целенаправленного изменения динамического поведения дислокаций и механических характеристик ковалентных кристаллов путем их термообработки и металлизации поверхности образцов.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Бондаренко И. Е., Никитенко В. И. Проблемы прочности и пластичности твердых тел. Л.: Наука, 1979. С. 244.
- [2] Петухов Б. В. // ФТТ. 1982. Т. 24. № 2. С. 439—442.
- [3] Sumino K. // Defects in semiconductors. Symposium, 2. Boston, Mass. 1983. V. 14. P. 307—321.
- [4] Макара В. А. Препринт ИЭС им. Е. О. Патона. Киев, 1986. 52 с.
- [5] Петухов Б. В. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1987. Т. 51. № 4. С. 708—714.
- [6] Бондаренко И. Е., Якимов Е. Б. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1987. Т. 51. № 4. С. 703—707.
- [7] Никитенко В. И., Фарбер Б. Я., Иунин Ю. Л. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1987. Т. 51. № 4. С. 715—721.
- [8] Винокур В. М., Иоффе Л. Б., Сагдеев И. Р. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1987. Т. 51, № 4. С. 763—767.
- [9] Горидько Н. Я., Макара В. А., Новиков Н. Н., Стебленко Л. П. // Укр. физ. журн. 1984. Т. 29. № 6. С. 880—883.
- [10] Горидько Н. Я., Новиков Н. Н., Стебленко Л. П. // Изв. вузов, физика. 1984. № 5. С. 110—111.
- [11] Sato M., Sumino K. // Jamada Conf. IX on dislocation in solids. Japan, Tohoku University. Abstracts, 1984. P. 79.
- [12] Горидько Н. Я., Макара В. А., Новиков Н. Н., Стебленко Л. П. // ФТТ. 1983. Т. 25. № 9. С. 2598—2601.

Киевский государственный  
университет им. Т. Г. Шевченко  
Киев

Поступило в Редакцию  
1 августа 1988 г.