

И. А. ГИНДИН, И. М. НЕКЛУДОВ, И. И. СОЛОШЕНКО, С. А. ХИЖКОВАЯ

О ВЛИЯНИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ПЛАСТИЧНОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ

(Представлено академиком Г. В. Курдюмовым 11 X 1971)

Основным препятствием для движущихся дислокаций в полупроводниках, характеризующихся ковалентным типом связи, являются высокие барьеры Пайерлса — Набарро. Изменение направления и разрыв межатомных связей при сдвиге в ковалентных кристаллах сопровождается резким повышением внутренней энергии системы (^{1, 2}).

Сильная зависимость скорости дислокаций в полупроводниках от температуры указывает на то, что преодоление препятствий движению дислокаций в них осуществляется главным образом благодаря термически активационным процессам. При температурах выше критической термические флуктуации достаточны для преодоления барьеров Пайерлса — Набарро, вследствие чего дислокации перемещаются на большие расстояния, обеспечивая релаксацию высоких локальных напряжений. При низких температурах подвижность дислокаций резко снижается и создаются благоприятные условия для концентрации напряжений и образования микротрещин, приводящих к хрупкому разрушению (³).

Заметная пластическая деформация монокристаллов германия при сжатии и растяжении наблюдается лишь при температурах выше 450°С (^{4, 5}). Однако в особых условиях в тонком приповерхностном слое возможно образование и перемещение дислокаций при комнатной и более низкой температурах (^{6, 7}).

Ранее (^{8, 9}) на металлических кристаллах, также обладающих высокими барьерами Пайерлса — Набарро, была показана возможность снижения температуры порога хрупкости (T_k) путем предварительного деформирования выше T_k и охлаждения с соблюдением условий, не допускающих блокирования дислокаций внедренными атомами. Поскольку диффузионная подвижность у германия низка и процессы закрепления свежих дислокаций из-за высокой чистоты затруднены (¹⁰), можно ожидать, что эффект пластификации монокристаллов германия путем предварительного деформирования будет проявляться в большой мере.

В настоящей работе приведены некоторые результаты исследования влияния предварительного деформирования кристаллов германия при температурах выше порога хрупкости на их пластичность при более низких температурах. Образцы размером $2 \times 2 \times 5$ мм вырезались алмазным кругом из монокристалльного слитка p -германия, легированного галлием, с удельным сопротивлением 10 ом·см. После шлифовки порошками карбида кремния образцы химически полировались в теплом растворе СР-4А, а затем травились на дислокации в кипящем ферроцианидном составе в течение 1 мин. Плотность дислокаций исходных монокристаллов $10^2 - 10^3$ см⁻².

Предварительное деформирование осуществлялось сжатием при 550°С со скоростью 10^{-3} сек⁻¹. Затем после разгрузки и охлаждения снимались диаграммы сжатия монокристаллов при температурах 350 и 400°С с той же скоростью деформации. Ось сжатия монокристаллов совпадала с направлением $[110]$.

Как видно из рис. 1б, исходные кристаллы германия при температуре 400°С разрушаются хрупко. Разрушающие напряжения при этом состав-

ляют примерно 30 кг/мм^2 . Сжатие монокристаллов германия при 550°C сопровождается пластической деформацией, достигающей перед разрушением 15%.

На рис. 1б, в представлены кривые сжатия монокристаллов германия при 350 и 400°C после деформирования до различных степеней при 550°C . Величины конечной нагрузки и деформации предварительного деформирования отмечены на диаграмме сжатия исходного образца (рис. 1а). Видно, что предварительная деформация монокристаллов германия в области температур выше порога хрупкости существенно влияет на пластичность образцов и разрушающие напряжения при 350 и 400°C . Эффект пластификации зависит от степени предварительной деформации и температуры повторного испытания. С повышением степени предварительной деформации (0,2—5%) степень пластификации увеличивается. Этот эффект более выражен по мере приближения к температуре хрупкости (T_k). Ранее Патель (¹¹) наблюдал зависимость предела текучести монокристаллов германия от плотности дислокаций при температурах выше 600°C , где германий пластичен. Возникшие от термических напряжений или в процессе изгиба дислокации заметно уменьшали предел текучести монокристалла и увеличивали область пластического течения при высокотемпературных испытаниях.

Полученные нами данные свидетельствуют о том, что введение свежих дислокаций при высокотемпературном сжатии способствует не только уменьшению напряжения течения и увеличению пластичности при 550°C , но и заметно снижает температурный порог хрупкости. Предварительно деформированные на 0,2—5% монокристаллы обладают при 400°C пластичностью, характеризуемой степенью сжатия, достигающей 1—13%.

Сравнивая дислокационную конфигурацию, образующуюся в результате деформации при 550°C (рис. 2а), с картиной при последующем сжатии при 440°C этого же образца (рис. 2б), можно сделать вывод, что течение при $T \leq T_k$ не может быть обеспечено лишь выходом дислокаций, возникших при предварительном деформировании. Рост плотности дислокаций указывает, что, помимо смещения ранее возникших дислокаций, в пластическую деформацию при 400°C вносят вклад дислокации, генерируемые источниками в процессе сжатия при этой температуре.

Согласно исследованиям (^{3, 12}) основным механизмом перемещения дислокаций в ковалентных кристаллах является образование и распространение двойных перегибов. Энергия активации движения дислокаций при этом расходуется на процесс переброса отрезка дислокации через барьер Пайерлса — Набарре в соседнюю потенциальную яму и на расширение двойного перегиба вдоль дислокации. Основная часть энергии активации движения дислокаций в германии и кремнии идет на образование двойных перегибов. Поэтому можно предположить, что кристаллы с определенной плотностью свежих дислокаций будут более пластичными при низких температурах.

Подобные эффекты снижения порога хрупкости германия наблюдались нами также в процессе приложения к монокристаллу плавновозрастающей нагрузки. Так, при нагружении германия со скоростью 350 г/мм^2 в час

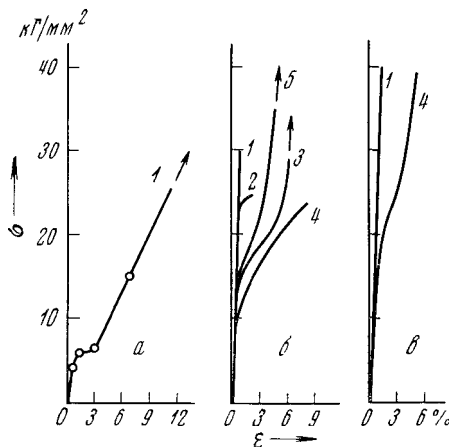


Рис. 1. Кривые сжатия монокристаллов германия при различных температурах: а — 550° , б — 400° , в — 350°C в исходном состоянии (1) и после предварительной деформации при 550°C в упругой области (2), до 0,5% (3); 2% (4); 5% (5)

при 400°C можно достичь 22% деформации без его разрушения; при деформировании предварительно медленно нагруженных кристаллов в макроупругой области; после многократного нагружения кристаллов в этой же области. Во всех случаях зарождение в объеме и на поверхности кристалла дислокаций способствует снижению напряжения течения и увеличению

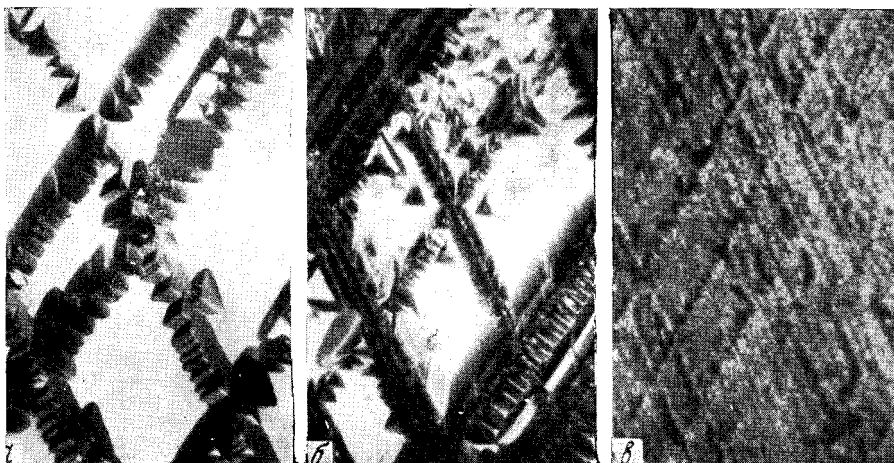


Рис. 2. Фигуры травления поверхности монокристалла германия после сжатия при 550°C (а) до 0,2% и последующего деформирования при 400°C до 1,5% (б) и 5% (в)

пластичности. При этом в кристаллах с ковалентными связями напряжения начала работы источников дислокаций и сопротивление перемещению дислокаций, обусловленные наличием барьеров Пайерлса — Набарро, преодолеваются гораздо легче возникшими свежими дислокациями и дислокационными перегибами, чем дислокациями роста.

Харьковский государственный педагогический институт
им. Г. С. Сковороды

Поступило
7 X 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. И. Трефилов, Ю. В. Мильман, Вопросы физики металлов, № 16, Киев, 1963.
- ² И. В. Гриднева, Ю. В. Мильман, В. И. Трефилов, Матер. Всесоюз. совещ. по дефектам структуры и полупроводникам, ч. 2, Новосибирск, 1970.
- ³ В. И. Никитенко, Дислокации и механические свойства полупроводников, «Наука», 1967.
- ⁴ В. Г. Говорков, В. Р. Регель, ФТТ, 3, 5, 1524 (1961).
- ⁵ J. R. Patel, P. E. Freeland, J. Appl. Phys., 38, № 8, 3087 (1967).
- ⁶ В. П. Алехин, О. В. Гусев и др., ДАН, 188, № 3, 548 (1969).
- ⁷ В. П. Алехин, О. В. Гусев и др., ДАН, 188, № 2, 326 (1969).
- ⁸ И. А. Гиндин, ФММ, 9, 3, 447 (1960).
- ⁹ H. Wain, F. Henderson et al., J. Inst. Metals, 86, 281 (1958).
- ¹⁰ В. Г. Говорков, В. Л. Инденбом и др., ФТТ, 6, 4, 1039 (1964).
- ¹¹ J. R. Patel, A. R. Chaudhuri, J. Appl. Phys., 34, 9, 2788 (1963).
- ¹² А. П. Казанцев, В. Л. Покровский, Матер. Всесоюз. совещ. по дефектам структуры в полупроводниках, ч. I, Новосибирск, 1969.