

05;06;12

Влияние особенностей конструирования дефектных структур кристаллов германия на его пластические свойства

© М.А. Алиев, Б.Г. Алиев, Х.О. Алиева, А.Р. Велиханов, Ш.Р. Муталибов, В.В. Селезнев

Институт физики Дагестанского научного центра РАН,
367003 Махачкала, Россия
e-mail: kamilov@datacom.ru

(Поступило в Редакцию 9 декабря 2003 г.)

Предложена новая технология конструирования структур полупроводниковых кристаллов пластическим деформированием в электрическом поле, приведена установка, реализующая предложенный способ, позволяющая изучить идею самоорганизации дислокационных, диссипативных структур.

Введение

Практическое использование высоких прочностных свойств атомарных полупроводников ограничено из-за низкотемпературной их хрупкости [1]. Германий относится к классу веществ, обладающих максимально высокими значениями теоретической прочности на отрыв и сдвиг, что обусловлено высокой степенью направленности ковалентной связи между атомами и обуславливает высокое сопротивление решетки скольжению дислокаций [2]. Поэтому и по многим другим причинам поиски различных способов повышения пластичности при как можно низких температурах и изучение взаимосвязи между структурой и свойствами полупроводниковых кристаллов являются задачей актуальной как с теоретической, так и прикладной точек зрения [3].

Известно, что монокристаллы являются примером организации структуры, процесса, который не несет информации об эволюции структуры кристаллов в целом. Критерием перехода от организации к самоорганизации структуры служит обеспечение протекания процесса в условиях, далеких от термодинамического равновесия, наличие признаков неустойчивости и открытости [4].

В настоящей работе использован синергетический способ воздействия на кристалл, обеспечивающий условия неравновесности созданием естественных градиентов давления, температуры и концентрации. Этим условиям удовлетворяет пластически деформируемое твердое тело (ПДТТ), по которому проходит постоянный ток высокой плотности (в электрическом поле), где реализована одновременно с деформацией электродиффузия атомов. Состояние энергетического спектра электронов в кристаллах полупроводников легко можно изменить при наложении на него постоянного или переменного электрического поля, при одновременной реализации взаимодействия собственных и примесных атомов с генерируемыми дислокациями. Движущиеся дислокации, взаимодействуя с атомной и электронной подсистемами монокристаллов, меняют динамику своего скольжения и характеристики пластической деформации кристалла. Совместное многопараметрическое воздействие на

кристалл в присутствии катализатора обнаруживает его уникальные свойства [5].

Методика эксперимента

Пластическую деформацию производили тремя способами: в условиях внешнего нагрева образца печкой сопротивления — термопластическая деформация (ТПД), в условиях прохождения электрического тока высокой плотности через образец — электропластическая деформация (ЭПД) и в условиях одновременной с деформацией реализации электропереноса примесных и собственных атомов на анодно-катодных частях образца — электропереносно-пластическая деформация (ЭППД) [6].

Деформацию производили в камере, размещенной на установке прессового типа, позволяющей производить все способы, деформации в динамическом и статическом режимах с записью на самописце. Датчиками для записи усилия служит тензодинамометр, для перемещения — индуктивный преобразователь. Установка позволяет также деформировать кристаллы в широких пределах температур, усилий, скорости нагружения как в динамическом, так и в статическом режимах. Основная цель постановки эксперимента заключалась в выяснении зависимости пластических свойств монокристаллов германия от способов деформирования и закономерности их изменения под воздействием различных временных режимов. В результате применения нового способа пластического деформирования выявлены факты существенного различия как в способах деформирования, так и режимах. Перед известным термопластическим методом (ТПД способ) новые электропластические ЭПД и ЭППД способы имеют ряд преимуществ. Во-первых, значительно уменьшается возможность загрязнения образца примесями, выделяемыми элементами конструкций и материалом печи. Во-вторых, известно, что электроны, приобретающие направленное движение в постоянном электрическом поле, могут влиять на характер движения и взаимодействия дислокаций и примесей. Выяснены и другие преимущества нового в изучении

богатой возможностями физических игр сложной, комплексной примесно-электронно-дислокационной системы, приводящей к интересным практическим эффектам. Другим важным преимуществом нового метода является возможность изучения и объединения нескольких изучаемых ранее самостоятельно направлений исследования, причем на одной установке и на одном образце. Есть предпосылки, что будут обнаружены и другие преимущества нового подхода к структуроформированию в кристаллических телах вплоть до управляемой когерентной перестройки частиц на микроуровне, которая сулит огромные энергетические выгоды.

Объектами исследования были монокристаллы германия, компенсированные золотом до концентрации $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, ориентированные вдоль кристаллографических осей $[1\bar{1}0]$ $[001]$ $[110]$, размером $5 \times 10 \times 15 \text{ mm}$.

Плотность тока, проходящая по образцу в зависимости от температуры деформации, менялась в пределах $2.0 \cdot 10^6 - 2.5 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$. Падение напряжения на образце при этом составляло $1.0 - 0.6 \text{ V}$. Мощность, выделяемая на образце, доходила до 100 W .

Результаты эксперимента

В настоящей работе изучены зависимости коэффициента упрочнения, величины деформации, скорости деформирования, упругой области от скорости нагружения деформируемого кристалла в динамическом и статическом режимах нагружения. На рис. 1, 2 (кривые 1–3) приведены зависимости напряжение–деформация $\sigma(\epsilon)$ и деформация–время $\epsilon(t)$ для трех образцов монокристаллического германия p -типа проводимости с тремя различными скоростями нагружения. Как видно из рис. 1, 2 (кривые 1–3), с увеличением скорости нагружения уменьшается не только продолжительность преодоления упругой области, но и сама величина предела

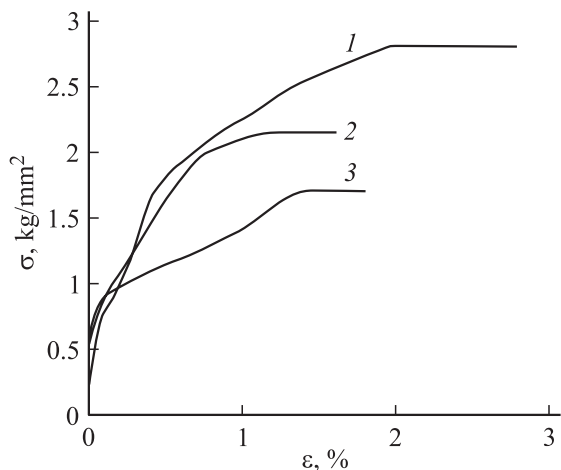


Рис. 1. Зависимость сдвиговое напряжение–деформация $\sigma(\epsilon)$ при $T_D = 650^\circ\text{C}$ и скорости нагружения: 1 — 71, 2 — 150, 3 — 590 g/s.

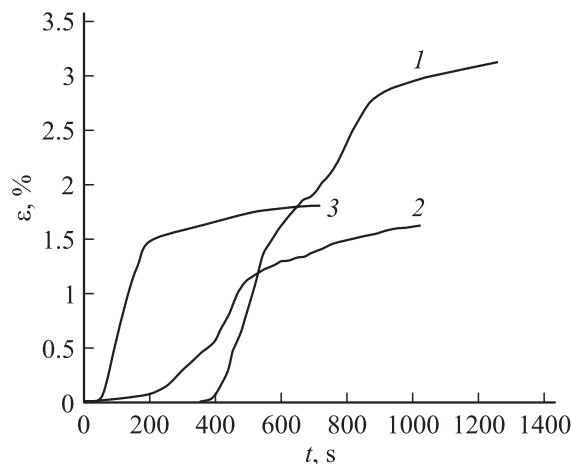


Рис. 2. Зависимость деформация–время $\epsilon(t)$ в динамическом и статическом режимах деформирования при сдвиговых напряжениях $\sigma = 2.8$ (1), 2.1 (2), 1.7 kg/mm² (3).

текучности. Вычисленные из кривых 1–3 (рис. 1, 2) параметры деформационного процесса приведены в таблице. Анализируя ход кривых на рис. 1 в динамической области нагружения, замечаем, как изменяется коэффициент упрочнения в зависимости от скорости нагружения. При малых скоростях нагружения коэффициент упрочнения не только самый большой на первом участке ступенчатого его поведения, но и самый малый на втором участке разупрочнения. Обращает на себя внимание отсутствие „участков упрочнение–разупрочнение“ на кривой 3 (рис. 1), полученной при самой большей скорости нагружения. Его упрочнение характеризуется значением промежуточного коэффициента между двумя участками первых двух.

Следует отметить, что отсутствие ступенчатости упрочнения на кривой 3 (рис. 1) может быть связано и с двумя другими, отличными от первых факторами. Во-первых, время динамического нагружения ($t = 150 \text{ s}$) было малое, во-вторых, усилие незначительное ($\sigma = 1.7 \text{ kg/mm}^2$). Среди особенностей, присущих поведению образца, деформированного с большей скоростью, замечаем его высокую податливость. Как видно из рис. 1 (кривая 3), при усилии $\sigma = 1.5 \text{ kg/mm}^2$ величина деформации $\epsilon = 1\%$, тогда как для кривых 1, 2 $\epsilon = 0.5\%$.

На рис. 2 приведены кривые зависимости $\epsilon(t)$, записанные на самописце, охватывающие все три области деформирования в последовательности: упругая, динамическая, статическая. Если динамическая область характеризуется изменяющимся усилием во времени, то статическая область деформирования характеризуется постоянным значением усилия во времени. Из рис. 2 (кривые 1–3) видно, что, несмотря на малые значения усилия, во всех случаях наблюдали незавершенность деформационного процесса. Из рис. 2 (кривые 1–3) также следует, что величина деформации сильно подвержена в своих изменениях внешним воздействиям. В динамической области скорость деформирования $\dot{\epsilon} = \partial\epsilon/\partial t$ как

№ объекта	Скорость нагружения в областях V_H , g/s		Сдвиговое напряжение в областях σ , g/mm ²			Время деформирования в областях t , s			Величина деформации в областях, ε , %		Коэффициент упрочнения $\gamma = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$	Скорость деформации в областях, $\dot{\varepsilon}$, m/s	
	упругая	динамическая	упругая	динамическая	статическая	упругая	динамическая	статическая	динамическая	статическая		динамическая	статическая
1	71	180	0.87	2.8	2.8	360	360	540	1.9	1.1	Кривая 1 — 2.48 Кривая 2 — 0.66	Кривая 1 — 1 Кривая 2 — 0.42	Кривая 1 — 1.55 Кривая 2 — 0.12
2	150	162	0.74	2.1	2.1	195	340	480	1.12	0.4	Кривая 1 — 2.43 Кривая 2 — 0.92	Кривая 1 — 0.42	Кривая 1 — 0.1
3	590	220	0.5	1.7	1.7	60	150	510	1.4	0.3	Кривая 1 — 0.804	Кривая 1 — 2	Кривая 1 — 0.093

при малых скоростях нагружения, так и при больших набирает величину порядка $\dot{\varepsilon} = 1.5 \mu\text{m/s}$ в абсолютных и $\dot{\varepsilon} = 1.3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ в относительных единицах. Правда, скорости нагружения в динамической области не так сильно различаются (см. таблицу), как в упругой области. Изменения угла наклона к оси времени характеризует ступенчатость, прерывистость процесса и подтверждает смену упрочнения на разупрочнение. Даже в статической области, где малые усилия и большие времена деформирования, наблюдаются две ступени с различными скоростями деформирования (рис. 2, кривая 1 и таблица).

На рис. 3 приведены характерные кривые зависимости $\sigma(\varepsilon)$ для монокристаллов германия деформированных тремя различными способами: термопластическим (ТПД — кривые 1, 2), электропластическим (ЭПД — кривые 3, 4) и электропереносно-пластическим (ЭППД — кривая 5). Как видно из рис. 3 (кривая 2), для

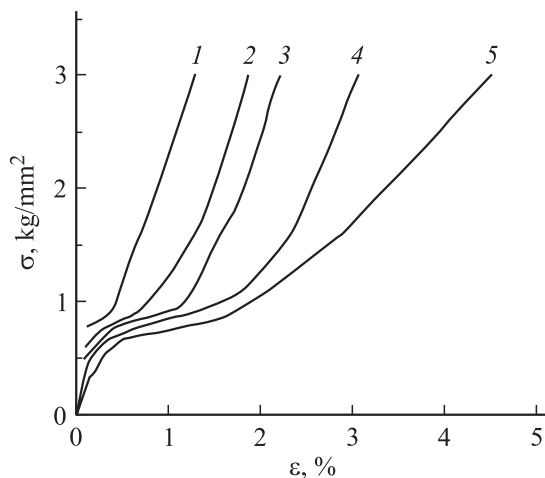


Рис. 3. Зависимость сдвиговое напряжение–деформация $\sigma(\varepsilon)$ для различных способов и режимов деформирования монокристаллов p -германия при $T = 750^\circ\text{C}$. 1 — ТПД, 2 — ТПД + In, 3 — ЭПД, 4 — ЭПД + In, 5 — ЭППД.

ТПД способа характерно наличие упругой области, хотя температура деформации его выше, чем для ЭПД способа, так как при более низких температурах кристалл при ТПД практически не деформируется. Хорошей иллюстрацией различия способов и режимов деформирования служат кривые 2, 4 и 5, полученные при одновременной диффузии индия. В этом случае эффект проявляется в резком разупрочнении кристалла. Как видно из рис. 3 (кривая 5), наиболее благоприятным режимом деформирования оказался ЭПД способ, где одновременно реализованы деформированно-электродиффузионные процессы. Скорости деформирования при ТПД и ЭПД способах в режиме стационарной ползучести различаются на порядок.

Резюмируя вышеперечисленные особенности поведения механических свойств монокристаллов германия заметим, что на их структурообразование влияет любой фактор воздействия, в особенности многопараметрический (синергетический). В нашем эксперименте дополнительными факторами возмущения дислокационной системы являются электрический ток высокой плотности, проходящий по образцу, электродиффузия собственных и примесных атомов, различные скорости нагружения.

Обсуждение результатов

Применение нетрадиционного нового методико-технологического способа к проблеме пластичности при изучении взаимосвязи между структурой, составом и свойствами в алмазоподобных полупроводниковых структурах позволило получить результаты, существенно отличающиеся от термопластического способа деформирования. В частности, ЭПД и ЭППД способы позволили значительно понизить температуру деформирования, стартовые напряжения, верхний предел текучести, а также привели к увеличению общей величины пластичности при значительно меньших параметрах воздействия. Обнаружено появление ступенчатости протекания

деформационного процесса, а также и появление новых участков упрочнения и разупрочнения. Спектр проявления структур в неравновесных условиях шире, чем в равновесных, особенно при многопараметрическом (синергетическом) подходе к деформационным процессам. При обсуждении полученных результатов прежде всего обращает на себя внимание существенное различие формы кривых сжатия, приведенных на рис. 1–3. Полученное различие, естественно, связано с особенностями условий нагружения и, как следствие, возможно, с особенностями дефектной структуры кристаллов, получаемых под их воздействием. Полученные результаты имеют качественный характер и не позволяют на данном этапе произвести прямое количественное сопоставление теории и эксперимента. В наших экспериментах наблюдается суммарное действие двух конкурирующих механизмов влияния на возникновение внутренних напряжений в кристалле. Первый за счет температуры стремится к уменьшению, а второй — за счет повышения скорости деформирования к увеличению внутренних напряжений. В результате появляются групповые скорости дислокаций, превышающие скорость одиночных, что может послужить причиной появления кинетических коллективных эффектов. В наших экспериментах преобладал атермический путь преодоления препятствий движению дислокации. Следует подчеркнуть, что статический режим нагружения был реализован вслед за динамическим одновременно. Если в процессе термопластической деформации полупроводниковых кристаллов электрон-фононное и электрон-дислокационное взаимодействия присутствуют как независимые факторы, то в случае электропластической деформации все структурные носители перестраиваются в динамические потоки и силы определенного направления. При деформации кристаллов в электрическом поле на заряженные дислокации помимо механических напряжений будет действовать дополнительная сила, равная $F = e^*E$, где e^* — эффективный заряд дислокаций, E — напряженность электрического поля [7]. При наличии выше перечисленных условий эксперимента, возможно, реализуются следующие ситуации: дислокации заряжаются и приобретают преимущественное направление перемещения с более высокой подвижностью, чем нейтральные [8]. В условиях реализации диффузионного электропереноса может произойти перераспределение примесных ионов в окрестности дислокаций и по эффекту преимущественного их увеличения в сторону анода воздействовать на динамику последних [9]. При больших плотностях тока, проходящих через деформируемые образцы ($j > 1.5 \cdot 10^6$ А/м²), стимулирующих перемещение заряженных дефектов, деформация вполне может ускориться, что и наблюдается в эксперименте. И наконец, при определенных интенсивностях потоков энергии и веществ (допированная примесь) в деформируемых ЭППД способом кристаллах могут функционировать процессы, поддерживающие активные режимы самосогласованных автокаталитических или когерентных коллективных движений [10].

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что при равных с ЭПД и ЭППД режимами условиях по нагрузке и температуре добиться заметной величины пластичности в процессе ТПД невозможно. Выявлены экспериментально возможности существенного понижения величин стартового напряжения сдвига, уменьшения упругой области в зависимости от размерных факторов и степени компенсации. Показано проявление разупрочнения в компенсированных кристаллах германия при прохождении по нему электрического тока высокой плотности при постоянных величинах сдвигового напряжения и температуры. Экспериментально изучены закономерности влияния на пластические свойства германия различных режимов деформирования — динамического и статического при изменении скорости нагружения и деформирования. Простота управления и незначительность энергетических затрат делают существенно неравновесные системы весьма перспективными для технологии будущего.

Список литературы

- [1] Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Гриднева И.В. // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. 1984. Т. 30. № 6. С. 958.
- [2] Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р. Физика процессов эволюции. Пер. с нем. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 328 с.
- [3] Иванова В.С., Баланкин А.С., Букин И.Ж. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.
- [4] Судзуки Т., Есинага Х., Такеути С. Динамика дислокаций и пластичность. М.: Мир, 1989. 294 с.
- [5] Малыгин Г.А. // УФН. 1999. Т. 69. № 9. С. 979–1008.
- [6] Алиев М.А., Селезнев В.В. Препринт Института физики ДНЦ РАН. Махачкала, 1989. 6 с.
- [7] Конторова Г.А. // ФТТ. 1967. Т. 9. Вып. 4. С. 1235–1241.
- [8] Фикс В.Б. // ЖЭТФ. 1981. Т. 80. Вып. 6. С. 2313–2316.
- [9] Кравченко В.Я. // ЖЭТФ. 1966. Т. 51. Вып. 4. С. 1676–1679.
- [10] Олемский А.И., Скляр И.А. // УФН. 1992. Т. 162. Вып. 6. С. 29–79.