

05;11

## Особенности электродиффузионно-пластической деформации кремния

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

Институт физики ДНЦ РАН, Махачкала  
E-mail: Kamilov@datacom.ru

Поступило в Редакцию 22 августа 2001 г.

Исследовано влияние изменения электронной подсистемы полупроводникового кристалла кремния, а именно воздействия электропереноса примесных атомов на особенности протекания явления электропластической деформации. Этот новый способ воздействия на движение дислокаций выявил значительное понижение предела текучести, существенное увеличение общей величины пластичности по сравнению с традиционными способами деформации. Предложены возможные механизмы объяснения наблюдаемых эффектов.

Изменения физико-механических свойств кристаллов в заданном направлении возможно осуществить только в неравновесных условиях, в частности при различных способах пластической деформации [1].

Пластически деформируемый кристалл под воздействием различных внешних параметров возбуждения, в котором одновременно реализованы и диффузионно-электропереносные процессы, является открытой самоорганизующейся системой [2]. Кремний 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, даже по плоскости (III). Практическое использование высоких прочностных свойств атомарных полупроводников ограничено из-за низкотемпературной их хрупкости [3].

Поэтому поиски различных способов повышения пластичности, при как можно более низких температурах, изучение связи "структура–

свойства” кристаллов являются задачей, актуальной как с теоретической, так и с практической точек зрения.

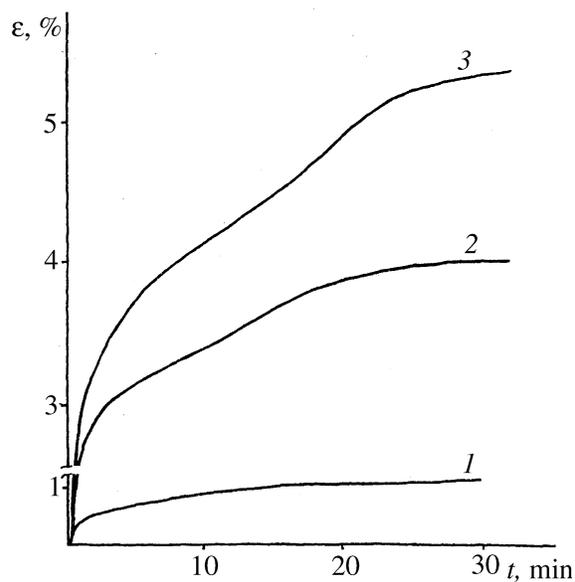
С другой стороны, изучение диффузионных, деформационных и дислокационных явлений не дало ответа на многие вопросы, возникающие при анализе структурно-чувствительных свойств кристаллов [4–6].

Благодаря новому технологическому подходу [7] имеется возможность объединить вышеуказанные самостоятельно исследуемые физические явления в одном эксперименте и реализовать их на одной установке. Как было обнаружено впоследствии, спектр влияния нового технологического подхода при структурировании кристаллов на их физические свойства, становится значительно богаче и информативнее, хотя его экспериментальная реализация была неизмеримо усложнена [8].

Известно также, что по мере увеличения числа параметров, воздействующих на деформируемый кристалл, соответственно возрастает и число дефектных структур, отличающихся по своим свойствам [9].

Важным фактором для обеспечения генерации дислокации путем разрыва электронных связей является также возможность существенного понижения температуры деформации, ибо в кристаллах кремния, деформируемых при  $T > 800$  К, не удастся обнаружить парамагнитные центры [10].

Объектом исследования были монокристаллы кремния дырочного типа проводимости, в виде параллелепипеда размерами  $15 \times 10 \times 5$  мм, ребра которых совпадали с кристаллографическими направлениями  $[110]$ ,  $[\bar{1}\bar{1}0]$ ,  $[112]$ , отклоненными на  $10^\circ$  от оси деформации соответственно. Образец разрезался на две равные части — анодную и катодную, а диффузانت наносился на очищенные торцевые грани термическим испарением в глубоком вакууме и как источник диффузии соответствовал условию бесконечного тонкого слоя. Образцы торцевыми широкими поверхностями с напыленным слоем диффузанта — индия складываются попарно и зажимаются между пуансонами деформационной установки прессового типа. Электродиффузию проводили вдоль кристаллографического направления  $[110]$ , которое служило одновременно и направлением сжатия кристалла. Плотность тока, проходящая по образцу в зависимости от температуры деформации, менялась в пределах  $1.0 \cdot 10^8 \div 1.5 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup>. Падение напряжения на образце при этом составляло  $1.0 \div 0.6$  В. Мощность, выделяемая на образце, доходила до 100 W.



**Рис. 1.** Зависимость величины деформации от времени  $\epsilon(t)$  при  $T = 750^\circ\text{C}$  и напряжении  $\tau = 30\text{ МПа}$ , 1 — ТПД-способ, 2 — ЭПД-способ, 3 — ЭДПД-способ.

Суть нового способа пластического деформирования полупроводниковых кристаллов, названного нами электродиффузионно-пластической деформацией (ЭДПД-способ) заключается в том, что наряду с нагревом образца постоянным электрическим током высокой плотности и созданием электрического поля одновременно реализуется и электродиффузия примесных атомов вдоль поля, в случае ЭПД-способа диффузия примесных атомов протекает с боковой поверхности, вдоль преимущественного выхода дислокации, т.е. поперек электрического поля.

Деформацию можно провести как в динамическом, так и в статическом режимах с записью на двухкоординатном самописце. Датчиками служат для записи усилия — тензодинамометр, для перемещения — индуктивный преобразователь.

На рис. 1 приведены характерные кривые зависимости величин сдвиговой деформации от времени  $\epsilon(t)$  для трех различных способов

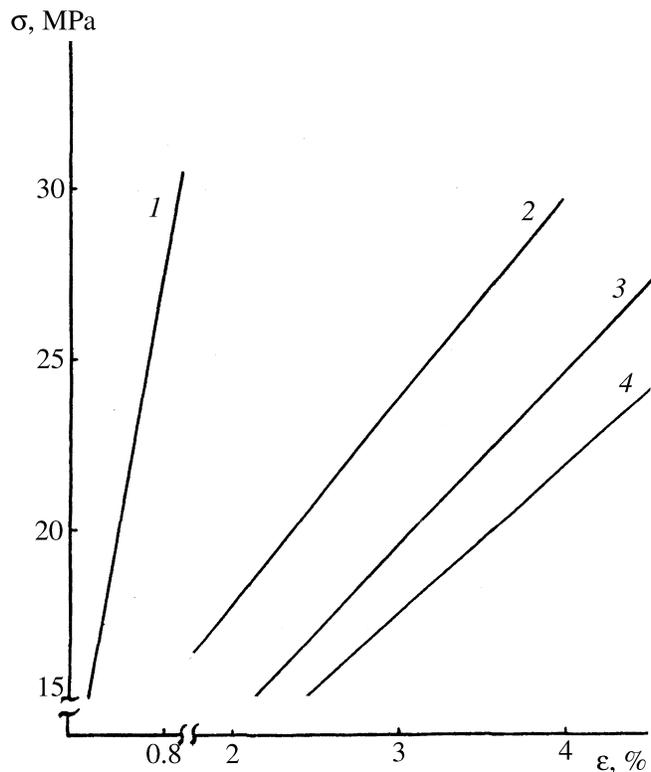
деформации; термопластической (ТПД), электропластической (ЭПД) и электродиффузионно-пластической (ЭДПД). В случае ТПД-способа данные получены при температуре деформации  $T_D = 800^\circ\text{C}$ , ввиду того, что при более низких температурах кристалл практически не деформировался на заметную величину при используемых для ЭДПД-способа величинах напряжения и времени.

Начальный линейный участок всех кривых характеризует режим нагружения в процессе деформации, по величине окончания которых можно судить о различии каждого способа. Как видно из рис. 1 (кривые 1–3), ЭДПД-способ отличается от других не только скоростью роста деформации при нагружении, но и большей величиной деформации, достигнутой при одинаковых условиях эксперимента. По истечении первых пяти минут нагружения наблюдаем выход всех кривых на режим стационарной ползучести. По наклону кривых 1–3 (рис. 1) видна незавершенность пластического течения образцов за время испытания. Ввиду обнаружения значительного преимущества ЭДПД-способа перед другими, представляется интересным раздельное определение вкладов в пластичность анодной и катодной частей образца. С этой целью наряду с записью  $\varepsilon(t)$  в режиме ползучести для ЭДПД-способа применяли и "метод" раздельного определения пластичности как для анодной, так и для катодной частей образца по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \cdot 100\%,$$

где  $\Delta L$  — разница длины образца до и после деформации;  $L$  — начальная длина образца. Данные о величине деформации анодной и катодной частей кристаллов, полученные по формуле (1), сведены в табл. 1.

На рис. 2 (кривые 1–4) приведены зависимости  $\sigma(\varepsilon)$ , полученные по нескольким усредненным точкам для всех способов деформации. Деформация в электрическом поле с одновременным протеканием электродиффузии примесных атомов индия, как оказалось, идет гораздо эффективнее, поэтому ее исследование представляет специальный интерес. Следует отметить, что для получения каждой точки на кривых  $\sigma(\varepsilon)$  деформирование осуществлялось при постоянной нагрузке в течение 30 min. Как видно из рис. 1 (кривые 1–3), выход на стационарную ползучесть характеризуется различными скачками и скоростями деформирования. Обращает на себя внимание разница в поведении в ходе кривых  $\sigma(\varepsilon)$  для анодной и катодной частей образца. Анодная



**Рис. 2.** Зависимость напряжение–деформация  $\sigma(\epsilon)$  при  $T = 750^\circ\text{C}$  для различных способов деформации: 1 — ТПД, 2 — ЭПД, 3 — ЭДПД (катод), 4 — ЭДПД (анод).

часть образца намного эффективнее деформируется, чем катодная. Если посмотреть на прямолинейные участки рис. 2 (кривые 1–4), можно заметить, что поведение деформации в зависимости от нагрузки может быть представлено приблизительно в виде формулы

$$\epsilon = K\sigma + \epsilon^*, \quad (2)$$

где  $K$  — коэффициент податливости,  $\epsilon^*$  — эффективная деформация. Сопоставление различных параметров  $K$  и  $\epsilon^*$  по формуле (2), получен-

Таблица 1.

№	Способ деформации	Температура деформации $T$ , °С	Усилие, МПа	Величина деформации		
				Общая	Анод	Катод
1	ЭПД	750	15	2.25	2.4	2.1
2	ЭПД	750	20	3.30	3.54	3.06
3	ЭДПД	750	25	4.35	4.66	4.04
4	ЭДПД	750	30	5.30	5.80	4.80

Таблица 2.

№	Способ деформации	Температура деформации $T$ , °С	Коэффициент податливости $K$	Эффект. Значения деформации $\epsilon^*$	Интервал изменения усилий, МПа
1	ТПД	800	0.4	-0.6	15-30
2	ЭПД	750	1.66	-0.98	10-30
3	ЭДПД(анод)	750	2.3	-1.10	10-30
4	ЭДПД(катод)	750	2.0	-0.90	10-30

ной по экспериментальным данным, позволяет проследить различие в изменении величин пластичности. Полученные по формуле (2) результаты приведены в табл. 2. При этом наблюдается достаточно большое значение величины  $K$  для ЭДПД-способа по сравнению с другими. Следует отметить и наличие значительных отрицательных величин  $\epsilon^*$ . Наблюдаемые особенности поведения пластичности кристаллов кремния в случае ЭДПД-способа объясняются, на наш взгляд, следующими факторами.

При деформации кристаллов в электрическом поле на заряженные дислокации помимо механических напряжений будет действовать дополнительная сила, равная  $e^*E$ , где  $e^*$  — эффективный заряд дислокаций,  $E$  — напряженность электрического поля [11]. При наличии вышеперечисленных условий эксперимента, возможно, реализуются следующие ситуации: дислокации заряжаются и приобретают преимущественное направление перемещения с более высокой подвижностью, чем нейтральные [12]. В условиях реализации диффузионного электропереноса может произойти перераспределение примесных ионов в окрестности

дислокаций и по эффекту преимущественного их увлечения в сторону анода воздействовать на динамику последних [13]. Необходимо отметить, что все участвующие в диффузионно-деформационном процессе структурные частицы (примесные и собственные атомы, заряженные носители подсистемы — дырки и одновременно генерируемые дислокации) взаимодействуют между собой в динамическом потоке и в определенном направлении движения. Таким образом, при ЭДПД-режиме условия деформации кристалла облегчены присутствием дополнительного фактора возмущения дислокационной системы в виде электродиффузии примесных ионов. При больших плотностях тока, проходящих через деформируемые образцы, стимулирующих перемещение заряженных дефектов, деформация вполне может ускориться, что и наблюдается в нашем эксперименте. И наконец, при определенных интенсивностях потоков энергии и веществ (допированная примесь) в деформируемых ЭДПД-способом кристаллах могут функционировать процессы, поддерживающие активные режимы самосогласованных автокаталитических или когерентных коллективных движений [14].

Мы надеемся, что предложенный новый метод многопараметрического воздействия на электронную подсистему деформируемого кристалла окажется удобным инструментом управления структурой и свойствами полупроводниковых кристаллов.

## Список литературы

- [1] *Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах: От диссипативных структур к упорядочению через флуктуации. М.: Мир, 1979. 512 с.
- [2] *Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж.* Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.
- [3] *Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Гриднева И.В.* // Неорганические материалы. 1984. Т. 20. № 6. С. 958–966.
- [4] *Корнюшин Ю.В.* Явления переноса в реальных кристаллах во внешних полях. Киев: Наук. думка, 1986. 126 с.
- [5] *Макушок Г.М.* Самоорганизация деформационных процессов. Минск: Наука и техника, 1991. 272 с.
- [6] *Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции* / Под ред. Дж. Поут. Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 575 с.

- [7] *Алиев М.А., Селезнев В.В.* Электропластический способ деформации полупроводниковых кристаллов. Препринт ИФ ДНЦ РАН. Махачкала, 1989. 6 с.
- [8] *Алиев М.А., Алиев Х.О., Селезнев В.В.* // ФТТ. 1999. Т. 41. В. 6. С. 1028–1029.
- [9] *Малыгин Г.А.* // УФН. 1999. Т. 69. В. 9. С. 979–1008.
- [10] *Wöhler F.D., Alexander H., Sander W.* // J. Phys. Chem. Sol. 1970. V. 31. P. 1381–1383.
- [11] *Конторова Г.А.* // ФТТ. 1967. Т. 9. В. 4. С. 1235–1241.
- [12] *Вдовин Е.Е., Касумов А.Ю.* // ФТТ. 1988. Т. 30. В. 1. С. 311–314.
- [13] *Болтакс Б.И.* Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. Л.: Наука, 1972. 382 с.
- [14] *Олемский А.И., Скляр И.А.* // УФН. 1992. № 162. С. 29–79.