

## ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ

УДК 621.315.592

### О СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ПЛАСТИЧНОСТЬ КРЕМНИЯ

© 2013 г. А. Р. Велиханов

Институт физики Дагестанского научного центра РАН, Махачкала  
E-mail: art677@mail.ru

Поступила в редакцию 17.01.2012 г.

Исследованы особенности деформационного поведения в низкоомных монокристаллах кремния  $p$ -типа при нетрадиционных способах пластического деформирования. В условиях совместного действия слабого магнитного поля и постоянного электрического тока в процессе активного деформирования кремния обнаружено заметное снижение его пластичности по сравнению с деформированием в отсутствие магнитного поля. Обнаружено увеличение электропроводности образцов Si, подвергнутых активной пластической деформации, и проведено сравнение с данными, полученными ранее для монокристаллического Ge. Дано возможное объяснение наблюдаемым эффектам.

DOI: 10.7868/S0023476113030260

Электропластические эффекты исследуются в различных твердых телах около полувека и находят практическое применение [1–3]. Интенсивно исследуется и влияние магнитного поля (МП) на прочностные и пластические свойства немагнитных кристаллов. Первые эксперименты в немагнитных кристаллах Zn и Al выполнены в [4, 5]. В последнее время заметный интерес представляет комбинированное действие магнитного и электрического поля (ЭП) на объект как под воздействием нагрузки [6], так и без нее [7]. В [6] исследовалось совместное действие постоянного МП ( $B = 0.1–0.4$  Тл) и ЭП ( $E = 0–5$  кВ/м) на макропластическую деформацию кристаллов NaCl при сжатии с постоянной скоростью относительной деформации  $\dot{\epsilon}$  от  $5 \times 10^{-5}$  до  $2 \times 10^{-3}$  с $^{-1}$ . Включение ЭП приводило к дополнительному разупрочнению с одновременным увеличением скорости деформационного упрочнения и плотности дислокаций.

В монокристаллическом кремнии в отсутствие внешней нагрузки обнаружено повышение электростимулированной подвижности дислокаций при включении МП с индукцией  $B = 0.05–1$  Тл [8, 9]. В [9] магнитный эффект был выявлен методом акустической эмиссии, а позднее избирательным травлением [8]. Установлено, что при плотности тока  $3 \times 10^5$  А/м $^2$  МП с индукцией 1 Тл пробеги дислокаций в  $n$ -Si увеличиваются до 40 раз. Предварительная магнитная обработка в [10] приводила к закреплению дислокаций и уменьшению скорости их движения в поле внешних механических напряжений. Пропускание электрического тока плотностью  $10^6$  А/м $^2$  одновременно с механическим нагружением ( $\sigma = 63.5$  МПа) необработанных кристаллов привело к росту скорости дис-

локаций в них в 15 раз, а в обработанных МП – только в 5 раз.

Цель настоящей работы – выяснение совместного влияния слабого постоянного МП и постоянного электрического тока на пластичность Si в процессе его деформации сжатием с постоянной скоростью нагружения.

Объектом исследования служили образцы монокристаллов  $p$ -Si с удельным сопротивлением  $\rho = 10$  Ом см в форме параллелепипедов размером  $9 \times 7 \times 4$  мм, ребра которых совпадали с кристаллографическими направлениями [110],  $[\bar{1}11]$ ,  $[\bar{1}1\bar{2}]$  соответственно. Камера, в которой под вакуумом  $p = 8 \times 10^{-2}$  мм рт. ст. деформировался образец, была размещена в установке прессового типа. Постоянное ЭП и ток, нагревающие образец, обеспечивались источником постоянного напряжения. Постоянное МП прикладывалось перпендикулярно оси нагружения, а электрический ток пропускаться через образец вдоль направления оси нагружения. Деформация проводилась как в МП с индукцией  $B = 0.015$  Тл, так и без него в условиях одновременного действия постоянного электрического тока и нагрева в печи в течение 10 мин. Ток включался до нагружения образца после его прогрева в печи. После термостатирования осуществлялась механическая нагрузка. Температура образца измерялась хромель-алюмелевой термопарой с точностью  $\pm 3^\circ\text{C}$ . Образец сжимался при температуре испытания  $T = 760^\circ\text{C}$ .

Механическая нагрузка  $P$  прикладывалась вдоль кристаллографического направления [110] (рис. 1) и напряжение сдвига  $\sigma$  менялось от 0 до 80 МПа. Плотность тока составляла  $j = 0.8 \times 10^6$  А/м $^2$  при падении напряжения на образце  $U = 5$  В и вы-

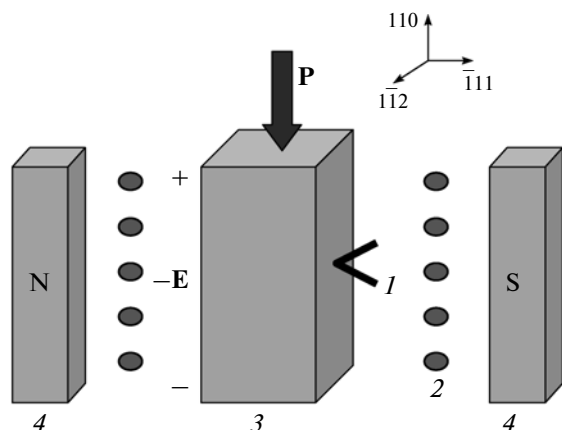


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — хромель-алюмелевая термопара, 2 — печь, 3 — образец, 4 — постоянные магниты, P — нагрузка, E — электрическое поле.

деляемой мощности электрического тока  $P = 110$  Вт. Датчиком механического напряжения служил динамометр давления, линейная деформация  $\varepsilon$  измерялась механическим микрометром, фиксировавшим деформацию с точностью  $\pm 1$  мкм. Изменение сопротивления вдоль образца фиксировалось цифровым прибором ШЗ00, входящим в комплектацию установки. Показания снимались до и после деформации Si методом прижима. Поверхности деформированных образцов после химического травления в течение 1–2 мин исследовались с помощью металлографического агрегатного микроскопа серии ЕС МЕТАМ РВ-23.

Для проведения деформации Si в МП и без него важно было подобрать нужную температуру деформирования. В связи с этим для начала была выбрана температура, близкая к температуре плавления кремния ( $T_{пл} = 1400^\circ\text{C}$ ). Любопытной особенностью в условиях одновременного нагрева в печи и действия постоянного электрического тока при сжатии Si явилось то, что деформация образца пошла под атмосферным давлением ( $\sim 0.1$  МПа). Эта деформация в режиме ползучести длилась в течение 3 мин при температуре  $T = 1100^\circ\text{C}$ , плотности тока  $j = 220$  А/см<sup>2</sup> и достигла величины  $\varepsilon = 0.3\%$ . В температуру образца

Таблица 1. Количественные параметры деформационного процесса

Образец	Температура деформации $T, ^\circ\text{C}$	Деформация при механическом напряжении $\sigma = 80$ МПа $\varepsilon, \%$	
		в магнитном поле	без магнитного поля
p-Si	760	2.2	2.3
p-Ge	590	1.5	2.1

при деформации вклад тока составлял  $450^\circ\text{C}$ , а печи —  $650^\circ\text{C}$ .

Детальное изучение влияния постоянного электрического тока показало, что температуру при деформации можно значительно понижать вплоть до  $T = 0.5 \times T_{пл}$  в отличие от [11], где указывалось, что пластичность Si, близкая к металлической, наступала при температуре  $T = 0.6 \times T_{пл}$ . Новый цикл экспериментов в динамическом режиме состоял в проведении деформации Si в условиях совместного действия слабого МП и электрического тока при  $T = 760^\circ\text{C}$ . Сходное совместное действие печи и тока на пластичность было изучено и на образцах p-Ge [12]. Нагрев только печью до той же температуры деформации  $T = 760^\circ\text{C}$  с последующим сжатием Si при тех же механических напряжениях от 0 до 80 МПа показывает, что образец практически не деформируется. Поэтому данные для этого случая в табл. 1 не приведены.

Из табл. 1 видно, что дополнительное действие слабого МП заметно влияет на общую величину деформации Si и Ge — она уменьшается. Величина деформации  $\varepsilon$  определялась по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \times 100\%, \quad (1)$$

где  $L$  — первоначальная длина образца,  $\Delta L$  — разница между первоначальной и конечной длиной образца.

Разница между величиной деформации Si в МП и без него составляет 0.1%, а для Ge — 0.6%. Такое сильное различие, вероятно, объясняется тем, что в монокристаллах полупроводников с более высоким удельным сопротивлением пластическая деформация протекает заметно эффективней [13].

Возможным объяснением наблюдаемым закономерностям изменения пластичности Si и Ge является следующее. Процесс захвата электронов (или дырок) дислокационными оборванными связями (ДОС) является спин-зависимым процессом. При этом вероятность захвата зависит от поляризации спиновой цепочки ДОС и направления спина электрона [14]. По-видимому, действие МП приводит к изменению поляризации парамагнитного спинового центра и к уменьшению вероятности захвата. В результате уменьшается рекомбинация носителей, что, видимо, должно приводить к эффектам упрочнения [9].

Другим объяснением снижения пластичности Si в МП может являться снос носителей заряда на поверхность образца вследствие эффекта Холла. Средняя часть образца тогда останется менее прогретой из-за того, что большая часть плотности тока будет идти по его краю.

Дополнительные измерения показали, что удельное электрическое сопротивление вдоль оси

сжатия в пластически деформированных полупроводниках по-разному уменьшается в сравнении с исходным (недеформированным, находящимся при комнатной температуре) кристаллом: в 45 раз у Si, деформированного в МП, и в 10 раз у Si, деформированного в отсутствие МП. Измерения, выполненные на германии, также обнаружили сходные закономерности. Сопротивление образца *p*-Ge после одноосного сжатия в условиях одновременного нагрева в печи и действия постоянного электрического тока оказывается значительно меньше, чем у исходного образца: в МП вдоль оси сжатия уменьшается в 11 раз, а в отсутствие МП оказывается в 5 раз меньше (табл. 2). Большее изменение удельного сопротивления Si по сравнению с Ge можно объяснить, по-видимому, тем, что в объеме монокристаллического Ge с более высоким исходным удельным сопротивлением имеется меньшее число неосновных носителей. После пластической деформации в обоих монокристаллах количество электрических активных центров акцепторного типа преобладает по сравнению с донорным. Это, вероятно, должно приводить к росту возникновения центров рекомбинации в объеме полупроводникового кристалла, в результате чего в образце Ge число неосновных носителей будет уменьшаться быстрее, чем в образце Si. Поэтому эффект снижения удельного сопротивления сильнее проявляется у кремния, чем у германия. Как видно из табл. 2, дополнительно приложенное МП этот эффект усиливает, возможно, вследствие разной магнитной восприимчивости Si и Ge.

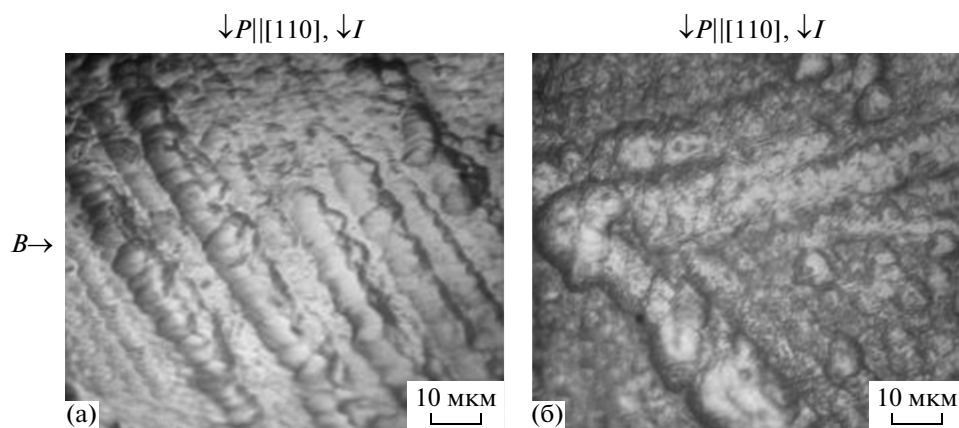
На рис. 2 показано формирование поверхностного рельефа исследуемых образцов. Поверхность образца монокристалла Si в условиях дополнительного воздействия МП покрыта упорядоченными системами полос скольжения — следами плоскостей продольного скольжения

**Таблица 2.** Сопротивление полупроводников, измеренное вдоль оси сжатия

Образец	Удельное сопротивление $\rho$ , Ом см		
	исходный образец	деформированный образец	
		в магнитном поле	без магнитного поля
<i>p</i> -Si	10	0.22	0.99
<i>p</i> -Ge	39	3.5	8

(рис. 2а). Морфология и характер распределения дефектной структуры образца монокристалла Si без дополнительного воздействия МП несколько иные. Здесь наблюдается наличие продольно-поперечных следов скольжения (рис. 2б), т.е. сдвиг в кристалле происходил по взаимно пересекающимся системам плоскостей. В обоих случаях видно и расположение дислокаций вдоль следов плоскостей скольжения, но их наибольшая плотность заметна на рис. 2а, что, вероятно, указывает на увеличение роста упрочнения кристалла.

Таким образом, закрепление дислокаций в МП вблизи стопоров, создаваемых в результате взаимодействия заряженных дислокаций и точечных дефектов, приводит к уменьшению скорости движения дислокаций в поле механических напряжений. В монокристаллах кремния в поперечном МП наблюдается заметное сопротивление пластическому деформированию, а в его отсутствие пластическая деформация протекает более эффективно. Комбинированное воздействие на структуру полупроводника привело к уменьшению его удельного электросопротивления по сравнению с недеформированным образцом. Различие в количественном изменении удельного электросопротивления между исходными и де-



**Рис. 2.** Травленные поверхности образцов кремния *p*-типа, полученные после их деформации в условиях совместного нагрева в печи и электрическим током ( $I$ ) до  $T = 760^\circ\text{C}$  в магнитном поле (а) и в отсутствие магнитного поля (б).

формированными в МП образцами Si и Ge можно по всей вероятности объяснить их различной магнитной восприимчивостью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуев Л.Б. Физика электропластичности щелочно-галогенидных кристаллов. Новосибирск: Наука, 1990. 120 с.
2. Электронные свойства дислокаций в полупроводниках / Под ред. Осипьяна Ю.А. М.: Эдиториал УРСС. 2000. 320 с.
3. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. М.: МГИУ – ИМАШ РАН, 2001. 844 с.
4. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Гектина И.В., Лаврентьев Ф.Ф. // Кристаллография. 1990. Т. 35. Вып. 4. С. 1014.
5. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Петржик Е.А. // ФТТ. 1992. Т. 34. Вып. 1. С. 155.
6. Урусовская А.А., Альшиц В.И., Беккауэр Н.Н., Смирнов А.Е. // ФТТ. 2000. Т. 42. Вып. 2. С. 267.
7. Pinchook A.I. // J. Appl. Phys. 2002. V. 92. P. 2343.
8. Скворцов А.А., Орлов А.И., Гончар Л.И. // ФТТ. 2003. Т. 45. Вып. 9. С. 1603.
9. Скворцов А.А., Орлов А.М., Фролов В.А. и др. // ФТТ. 2000. Т. 42. Вып. 10. С. 1814.
10. Макара В.А., Стебленко Л.П., Горидько Н.Я. // ФТТ. 2001. Т. 43. Вып. 3. С. 462.
11. Горелик С.С., Дашевский М.Я. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. М: Металлургия, 1988. 574 с.
12. Велиханов А.Р. // ФТТ. 2011. Т. 53. Вып. 3. С. 504.
13. Велиханов А.Р. // Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44. Вып. 2. С. 145.
14. Кведер В.В., Осипьян Ю.А., Шалькин А.И. // ЖЭТФ. 1982. Т. 85. Вып. 2(8). С. 699.