

07,08

Деформация германия в условиях совместного действия тока и магнитного поля

© А.Р. Велиханов

Институт физики ДагНЦ РАН, Махачкала, Россия

E-mail: art677@mail.ru

(Поступила в Редакцию 18 марта 2010 г.

В окончательной редакции 10 июня 2010 г.)

В низкоомных монокристаллах германия p -типа исследованы особенности поведения деформационных характеристик при различных комбинированных способах пластического деформирования и анизотропия сопротивления полученных образцов в продольном и поперечном направлениях. Наблюдалось как акцепторное, так и донорное действие дислокаций при движении носителей тока вдоль направления оси сжатия образца. В условиях совместного действия слабого магнитного поля и комбинированной пластической деформации обнаружено снижение эффектов макропластичности. Обнаружена анизотропия электросопротивления образцов p -Ge в продольном и поперечном направлениях. Наблюдаемым эффектам дано возможное объяснение.

1. Введение

В условиях традиционной горячей пластической деформации (ГПД) пластичность германия, близкая к металлической, наблюдаемая в работе [1], наступала при температуре $T = 0.6T_m$, где T_m — температура плавления. ГПД проводилась в условиях внешнего нагрева образца тепловым полем. При комбинированной пластической деформации (КПД) начало пластичности германия проявлялось при температурах $T = 0.5T_m$. Суть этого нового способа, который предложен в настоящей работе, состоит в том, что при пластическом деформировании в условиях внешнего нагрева тепловым полем через образец проходит постоянный электрический ток высокой плотности. Влияние электрического тока на кристалл под нагрузкой (электропластическая деформация) уже находит прикладное применение. Механизм этого явления, имеющий квазитермическую природу, связывается со срывом скоплений дислокаций под влиянием импульсов тока, а также с влиянием дрейфующих по решетке электронов на процесс размножения, движения и взаимодействия дислокаций [2]. Влияние магнитного поля на механические свойства полупроводниковых кристаллов в последнее время привлекает большой интерес. В работах [3,4] зафиксирован магнитопластический эффект в монокристаллическом кремнии, выражающийся в изменении скорости движения дислокационных полупетель при внешнем механическом воздействии после магнитной обработки. Движение дислокаций провоцировалось растягивающими напряжениями при изгибе относительно оси $[11\bar{2}]$ четырехопорным методом. Открепление закрепленных дислокаций от стопоров происходило за счет высокоэнергетических процессов локальной перестройки структуры и силовых полей в области закрепления. Влияние электрического тока ($J = 10^6$ А/м²), предварительной магнитной обработки ($B = 0.17$ Т) на деформацию под действием механических напряжений

растяжения кристаллов кремния с дефектами изучалось в [5]. Полученные в работе экспериментальные данные позволили установить ряд особенностей движения дислокационных сегментов в кристаллах кремния, которые прошли предварительную магнитную обработку так же, как и в работах [3,4]. Было также обнаружено, что предварительная магнитная обработка кристаллов кремния приводит к ослаблению электропластического эффекта.

В настоящей работе изучалось влияние постоянного тока при различных способах деформирования на пластические эффекты и электрические свойства полупроводникового германия p -типа.

2. Методика эксперимента

Объектом исследования служили образцы монокристаллов германия p -типа с удельным сопротивлением $\rho = 39$ Ω·см в виде параллелепипедов размером $15 \times 11 \times 4$ мм, ребра которых совпадали с кристаллографическими направлениями $[110]$, $[\bar{1}11]$, $[1\bar{1}2]$ соответственно. Использовалась камера, размещенная на установке прессового типа, в которой создавался вакуум и деформировался образец. Постоянное электрическое поле и ток, служившие для нагрева образца, обеспечивались источником постоянного напряжения. Электрический ток включался до нагружения образца, и после термостатирования осуществлялась механическая нагрузка. Вакуум позволял не только улучшить контакт между опорными элементами и образцом, но и исключить возможность загрязнения образца примесями, выделяемыми элементами конструкции, а также возможного окисления образца на воздухе. Постоянное магнитное поле прикладывалось перпендикулярно оси нагружения, а электрический ток пропусклся через образец вдоль направления оси нагружения. Деформация одноосным сжатием проводилась вдоль направления $[110]$ при температурах испытания $T = 590^\circ\text{C}$ в условиях нагрева-

ния постоянным током с одновременным подогревом внешней печкой сопротивления (КПД) и в условиях подогрева образца только внешней печкой сопротивления (ГПД). Механическое напряжение сжатия σ менялось от 0 до 80 МПа. Плотность тока составляла $J = 1.3 \cdot 10^6$ А/м², магнитная индукция $B = 0.015$ Т, падение напряжения на образце $U = 2$ В, выделяемая мощность электрического тока $P = 130$ Вт. Датчиком для записи величины механического напряжения служил динамометр давления, для линейной деформации ε — механический микрометр, который фиксировал деформацию с точностью ± 1 мкм. Изменение сопротивления вдоль и поперек образца фиксировалось по цифровому прибору Ц300, который входил в приборное обеспечение установки. Показания снимались до и после деформации Ge методом прижима. Для электронно-микроскопического исследования образцы сначала подвергались химическому травлению в течение 1–2 min, а затем полученные поверхностные микроструктуры на широкой грани образца исследовались с помощью металлографического агрегатного микроскопа ЕС МЕТАМ РВ-21. Основной задачей настоящей работы являлось выяснение влияния комбинированного и горячего способа деформирования на пластические свойства монокристаллов германия как в магнитном поле, так и при его отсутствии, а также выявление в связи с этим особенностей формирования поверхностных микроструктур.

3. Результаты эксперимента

Удивительная особенность для комбинированного способа при достижении плотности тока $J = 2.3 \cdot 10^6$ А/м² и температуры $T = 710^\circ\text{C}$ до приложения магнитного поля состоит в том, что образец стал деформироваться до приложения механической нагрузки при атмосферном давлении ($\sigma \approx 0.1$ МПа). Фактически образец начинает „плыть“ при температуре $T = 0.8T_m$ в режиме ползучести. В условиях же ГПД подобное

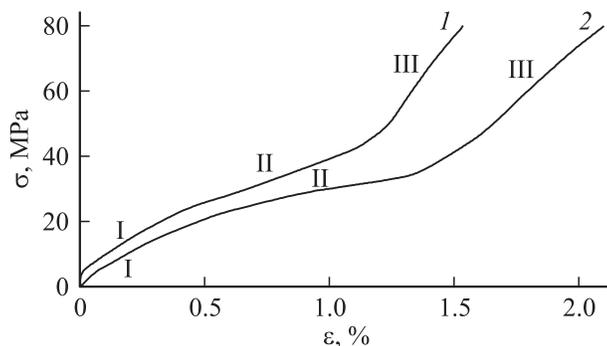


Рис. 1. Зависимость механического напряжения от величины деформации $\sigma(\varepsilon)$ при $T = 590^\circ\text{C}$ для различных способов деформирования. 1 — КПД в магнитном поле, 2 — КПД в отсутствие магнитного поля. Римскими цифрами I–III обозначены участки пластической деформации с различными коэффициентами упрочнения γ (табл. 1).

Таблица 1. Количественные параметры деформационного процесса

Номер образца	Способ деформации	Коэффициент упрочнения по участкам γ , 10^2 МПа		Величина деформации ε , %
		I	II	
1	КПД в магнитном поле	I	29.4	1.5
		II	20	
		III	56	
2	КПД в отсутствие магнитного поля	I	42.5	2.1
		II	17	
		III	120	

явление протекать не могло. Повышение пластичности и снижение сопротивления кристалла деформированию происходит прежде всего за счет нетермического в макроскопическом проявлении действия электрического тока [6]. Именно такое влияние тока позволило снизить температуру испытания и проводить таким образом низкотемпературную деформацию хрупкого p -Ge при температуре испытания $T = 590^\circ\text{C}$.

На рис. 1 приведены кривые деформирования монокристаллов германия при различных способах пластического деформирования, полученные при сжатии p -Ge в условиях КПД в магнитном поле (кривая 1) и в отсутствие магнитного поля (кривая 2). Видно, что кривая 2 в отличие от кривой 1 указывает на заметное снижение предела текучести p -Ge и увеличение общей величины деформации при напряжениях 80 МПа в 1.3 раза.

Кроме того, на кривых 1, 2 наблюдается наличие нескольких ступенчатых участков пластической деформации с различными коэффициентами упрочнения $\gamma = d\sigma/d\varepsilon$. Эти параметры, вычисленные из кривых 1, 2, сведены в табл. 1. Для ГПД p -Ge кривая сжатия на рис. 1 не приведена ввиду отсутствия заметной величины деформации при аналогичных условиях деформирования. Включение электрического тока, ориентированного вдоль направления сжатия, вызывает снижение механического напряжения в образце и увеличение скорости пластической деформации.

4. Обсуждение

Протекание через монокристалл тока плотность J_0 приводит к тому, что дислокации ускоряют свое движение под влиянием силы увлечения, которая в расчете на единицу длины дислокации записывается в виде

$$F = \frac{J_0 B}{ne}, \quad (1)$$

где B — коэффициент электрон-дислокационного взаимодействия, n — концентрация электронов проводимости, e — заряд электрона [7]. Значительное умень-

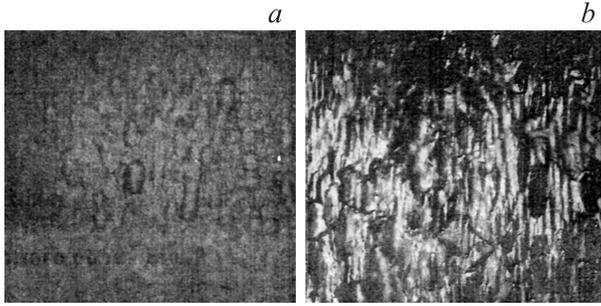


Рис. 2. Фотографии поверхностей монокристаллов германия, подвергнутых КПД ($\times 300$). *a* — в отсутствие магнитного поля, *b* — в магнитном поле.

шение подвижности дислокаций в германии при КПД в постоянном магнитном поле приводит к росту их плотности и формированию своего рода дислокационной субструктуры (рис. 2). Дислокации, содержащие атомы с „болтающимися“ связями, создают спин-зависимые рекомбинации свободных носителей. В магнитном поле при механической нагрузке и прохождении тока через образец изменяется энергетическое состояние ядра дислокации и точечных дефектов, что приводит к ослаблению их взаимодействия с электронной подсистемой в условиях механического активируемого движения. Это, по всей вероятности, является следствием „нейтрализации“ спиновых центров захвата и уменьшения вероятности рекомбинации [5]. Рост плотности дефектов и носителей тока в этом случае должен приводить к быстрому упрочнению кристалла.

При КПД при отсутствии воздействия постоянного магнитного поля на поверхности германия наблюдается заметное уменьшение плотности дефектов вследствие частичной аннигиляции дислокаций противоположных знаков в условиях захвата направленного движения дырок и электронов в высокоэнергетическом динамическом потоке. За счет высокоэнергетичных процессов локальной перестройки структуры в образцах монокристаллов германия происходит открепление некоторых дислокаций от стопоров. Скольжение облегчается, и деформация продолжает расти. На рис. 2, *b* структура поверхности монокристалла германия содержит отдельные упорядоченно расположенные дислокации. С дислокационно-

Таблица 2. Электросопротивление (в Ω) *p*-Ge после воздействия КПД

	Исходный образец	Деформированный образец	
		в магнитном поле	в отсутствие магнитного поля
Поперечное направление	73	19	33
Продольное направление	93	8.4	19

кинетической точки зрения все полученные структуры являются результатом процесса самоорганизации дислокаций, протекающих на тех или иных структурных уровнях [8].

Структурные изменения, вызванные КПД, привели к резкому изменению не только механических, но и электрических свойств германия [9]. Помимо изменений прочностных и пластических свойств *p*-Ge заметным образом изменяется и электросопротивление образца (табл. 2).

По сравнению с исходным *p*-Ge сопротивление образца, деформированного в магнитном поле вдоль оси сжатия (продольное направление), уменьшается в 11 раз, а в поперечном направлении — в 4 раза. Измеренное сопротивление деформированного *p*-Ge в отсутствие магнитного поля оказалось в 5 раз меньше в продольном направлении и в 2 раза меньше в поперечном направлении по сравнению с исходным образцом. Таким образом, из приведенных сравнений видно, что магнитное поле значительно понижает электрическое сопротивление образца германия.

Дополнительные измерения показали также, что после деформации сжатием в магнитном поле сопротивление в поперечном направлении в 2 раза превышает сопротивление в продольном направлении. При деформации в отсутствие магнитного поля эта разница составляет 1.7 раза. Увеличение электропроводности низкоомного *p*-Ge можно объяснить, по-видимому, созданием электрических активных центров как акцепторного, так и донорного типа. Анизотропию сопротивления в продольном и поперечном направлениях *p*-Ge, по всей вероятности, можно объяснить неравномерным распределением центров рекомбинаций в полупроводниковом кристалле. Таким образом, наблюдается анизотропия подвижности и концентрации носителей тока в образцах *p*-Ge в продольном направлении и поперечном с ориентированной дислокационной структурой.

5. Заключение

В результате проведенных исследований выявлены заметные различия в пластификации образцов германия, подвергнутых воздействию КПД в магнитном поле и в отсутствие его. Магнитное поле в условиях КПД влияет на стартовые напряжения и подвижность индивидуальных дислокаций в монокристаллах германия: в поперечном магнитном поле происходит значительное сопротивление пластическому деформированию, а при его отсутствии в монокристаллах германия пластическая деформация протекает более эффективно. Воздействие КПД на структуру полупроводника привело к уменьшению его электросопротивления по сравнению с исходным образцом. Причем в продольном направлении, т.е. в направлении оси сжатия образца, удельное сопротивление уменьшается сильнее, чем в поперечном направлении.

Список литературы

- [1] В.Г. Говорков, В.С. Папков. ФТТ **4**, 789 (1962).
- [2] О.А. Троицкий. ФТТ **13**, 185 (1971).
- [3] А.А. Скворцов, А.И. Орлов, Л.И. Гончар. ЖЭТФ **120**, 134 (2001).
- [4] М.В. Бадылевич, Ю.Я. Иунин, В.В. Кведер, В.И. Орлов, Ю.А. Осипьян. ЖЭТФ **124**, 664 (2003).
- [5] В.А. Макара, Л.П. Стебленко, Н.Я. Горидько, В.М. Кравченко, А.Н. Коломиец. ФТТ **43**, 462 (2001).
- [6] Ю.В. Баранов, О.А. Троицкий, Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. МГИУ, М. (2001). С. 10.
- [7] В.Я. Кравченко. ЖЭТФ **56**, 167 (1966).
- [8] Г.А. Малыгин. ФТТ **51**, 1709 (2009).
- [9] С.С. Горелик, М.Я. Дашевский. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. Металлургия, М. (1988). 574 с.