

УДК 621315592

Электропластичность чистого и легированного кремния

© А.Р. Велиханов[†]Институт физики Дагестанского научного центра Российской академии наук,
367003 Махачкала, Россия

(Получена 2 июня 2009 г. Принята к печати 11 июля 2009 г.)

Предложена новая технология формирования дислокационных диссипативных структур в чистых и легированных полупроводниковых кристаллах комбинированным деформированием, которая позволяет управлять их упругопластическими свойствами. Обнаружены новые макропластические свойства этих кристаллов. Из полученных диаграмм сжатия определены различные деформационные параметры и изучены поверхностные микроструктуры полученных деформированных образцов. Предложены возможные физические объяснения наблюдаемому явлению.

1. Введение

В последнее десятилетие большое внимание привлекает эффект электропластичности в кристаллах ввиду его широкого прикладного значения [1]. Значительный вклад в электропластичность металлов дает тепловой импульс, локально повышающий температуру и приводящий к подвижности дислокаций. Электрический ток, применяемый во время деформации образцов, оказывает не только тепловое действие на кристаллическую решетку, но и специфическое влияние на структурные дефекты [2]. Поэтому электропластическая деформация — это прежде всего повышение пластичности и снижение сопротивления кристалла деформированию, возникающему за счет нетермического действия тока на пластическую деформацию кристалла [3]. Исследования величины электропластического эффекта, где наблюдаемая в опытах плотность тока достигает до 1000 А/мм^2 , интенсивно продолжаются [4,5]. В связи с этим представляется важным изучение аналогичных эффектов, обнаруженных на полупроводниках. Эффект электропластичности, обнаруженный на монокристаллах германия, рассмотрен в работе [6]. В данной работе сходный эффект изучен уже на монокристаллах кремния.

2. Методика эксперимента

Объектами исследования были выбраны чистые и легированные бором образцы монокристаллов кремния p -типа проводимости с удельными сопротивлениями $\rho_1 = 35 \text{ кОм} \cdot \text{м}$ и $\rho_2 = 17 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ в виде параллелепипедов размером $15 \times 9 \times 6 \text{ мм}$. Одна грань была параллельна плоскости (110), а две другие отклонены на 10° от плоскостей (111) и (112). Деформация осуществлялась вдоль направления (110) одноосным сжатием в вакууме при $T = 750^\circ\text{C}$ в режиме динамического нагружения и режиме ползучести. Напряжение сдвига изменялось от 0 до 25 МПа. Образцы нагревались пропусканием

постоянного тока с одновременным подогревом внешней печкой сопротивления (комбинированная пластическая деформация — КПД). Плотность тока составляла $0.5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$. Падение напряжения на образце составляло 3 В. Выделяемая мощность электрического тока составляла 100 Вт. Для электронно-микроскопического исследования образцы вначале подвергались химическому травлению в течение 1–2 мин, а затем полученные поверхностные микроструктуры на широкой грани образца исследовались сканирующим электронным микроскопом SEM LEO 1450. В работе изучались макропластические свойства чистого и легированного кремния при КПД и выявление в связи с этим особенностей формирования поверхностных микроструктур. Кроме того, задачей данного исследования являлось также выяснение влияния КПД на электрические свойства образцов p -Si.

3. Результаты

На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости величины деформации от сдвигового напряжения $\sigma(\varepsilon)$ для чистого и легированного кремния, полученные при КПД в динамическом режиме. Из этих зависимостей

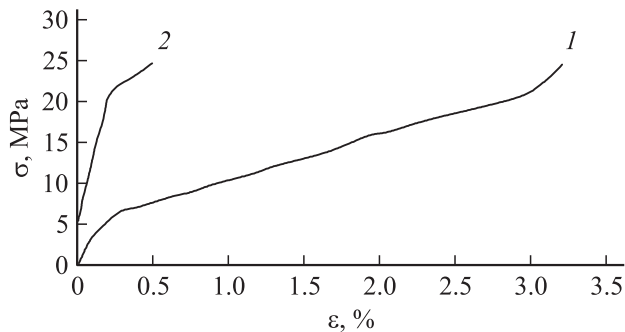


Рис. 1. Зависимости величины сдвигового напряжения σ от величины деформации ε в условиях комбинированной пластической деформации при $T = 750^\circ\text{C}$ для различных образцов монокристаллов кремния p -типа: 1 — чистого, 2 — легированного.

[†] E-mail: art677@mail.ru

Количественные характеристики деформационного процесса

Образец	Коэффициент упрочнения по участкам зависимости $\sigma(\varepsilon)$, $\gamma = d\sigma/d\varepsilon$, МПа%		Скорость деформирования по участкам зависимости $\sigma(\varepsilon)$, $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$, с ⁻¹		Величина деформации ε , %	
					Динамический режим	Режим ползучести
Чистый	1	16	1	$2.4 \cdot 10^{-5}$	3.2	2.3
	2	5.3	2	$7.8 \cdot 10^{-5}$		
	3	12				
Легированный	1	73	1	$4.8 \cdot 10^{-6}$	0.5	0.4
	2	14.6	2	$2.3 \cdot 10^{-5}$		

видно, как качественно различается ход кривых. Для легированного образца характерно значительное сопротивление кристалла деформированию (см. кривую 2 на рис. 1). Различие образцов по чистоте сказывается также на деформационных параметрах, таких как предел упругости, предел текучести и общая величина деформации. Характерной особенностью влияния чистоты образца на деформационные характеристики, как видно из зависимостей $\sigma(\varepsilon)$, является наличие нескольких ступенчатых участков пластической деформации с различными коэффициентами упрочнения γ (см. таблицу). При этом наблюдается их четкое чередование. Для легированного образца постоянный коэффициент упрочнения на начальном участке 1 ступенчато уменьшается на участке 2 (см. кривая 2 на рис. 1). С чистым образцом наблюдается несколько иная картина — возрастающий γ на 1-м участке сменяется падающим γ на 2-м, а затем снова возрастающим γ на 3-м участке (см. таблицу). Кроме этого, величина деформации чистого образца намного превышает величину деформации легированного образца. На рис. 2 приведены величины приращения линейных размеров ΔL при деформировании в зависимости от времени t для кремния p -типа. Величины деформации ε на той же шкале определялись по формуле, где L —

первоначальная длина образца:

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

Величина скорости деформации $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$ выражается в единицах [с⁻¹]. Перемещение на величину $\Delta L = 300$ мкм для кривой 1 (рис. 2) дает величину деформации $\varepsilon = 2\%$. Кривые 1 и 2 зависимости $\Delta L(t)$ (рис. 2) получены одновременно с кривыми зависимости $\sigma(\varepsilon)$ в диапазоне 0–25 МПа. Как видно из рис. 2, деформационное поведение кристалла также характеризуется ступенчатым поведением. Отношение скоростей деформирования для разных участков кривой 1 достигает 3, а для кривой 2, полученной для легированного образца, это отношение равно ~ 4.8 (см. таблицу). Если сравнивать максимальные скорости деформирования между зависимостями 1 и 2, то различие составляет ~ 3.5 раза. В легированных кристаллах процесс превращения неподвижных дислокаций в подвижные, который ускоряется одновременно в режиме токового воздействия, приводит к скачкообразному изменению плотности дислокаций. Рост плотности дислокаций приводит к замедлению движения вследствие взаимодействия с близлежащими разноименными дислокациями и примесями. У чистых кристаллов резкого роста плотности дислокаций не наблюдается и поэтому быстрого упрочнения не наступает.

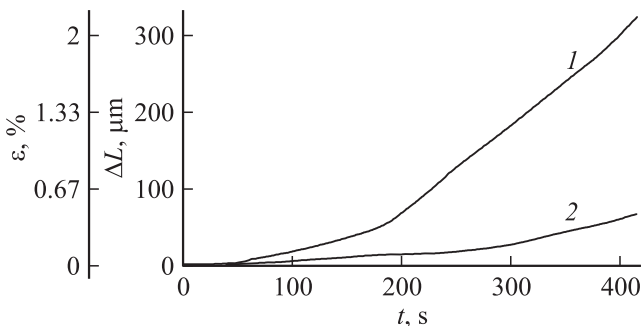


Рис. 2. Величины приращения линейных размеров ΔL в зависимости от времени t в условиях комбинированной пластической деформации при $T = 750^\circ\text{C}$ и сдвиговом напряжении $\sigma = 0\text{--}25$ МПа для образцов: 1 — чистого, 2 — легированного. На шкале ординат приведены величины деформации, определяемые по формуле (1).

4. Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные зависимости характеризуются низким напряжением течения, изменяющимся коэффициентами деформационного упрочнения и скоростями деформирования на различных участках, а также отсутствием „высокотемпературного зуба текучести“ в отличие от работы [7], где образцы кремния деформировались в условиях только горячей пластической деформации (ГПД). Общая величина деформации для образцов кремния, подвергнутых воздействию КПД в данной работе, заметно превышает величину деформации для тех же образцов в условиях ГПД. Постоянный электрический ток, примененный в данной работе, вызывает разрядку неравновесных групп дислокаций (заторможенные дислокационные скопления, перестройка

скоплений в линии скольжения, закрепление примеси на дислокациях), что сопровождается макропластической деформацией. Плотность постоянного тока стимулирует перемещение заряженных дислокаций, захвативших свободные электроны. Однако чувствительность к электрическому полю при КПД разных образцов оказывается различной. Плавная форма кривой сжатия чистого кремния может быть связана с постепенным распространением деформации по объему кристалла [8]. У легированного кремния наблюдается резкий переход от линейного участка сжатия к области зависимости, соответствующей интенсивной деформации. На микрокопическом уровне это будет означать переход от единичного скольжения к множественному, сопровождающемуся генерацией, аннигиляцией и диффузией дефектов в режиме направленного высокоэнергетического потока.

Особенности структурного рельефа, сформированного в объеме образца деформационными дефектами, отображающие закономерности формирования волновых пластических фронтов, приведены на рис. 3. Поверхность чистого образца характеризовалась наличием одной системы полос скольжения (рис. 3, *a*). У легированного образца на поверхности наблюдаются взаимно ортогональные системы полос скольжения (рис. 3, *b*). Их проницаемость указывает на то, что дислокации начинают выступать в роли источников деформационного упрочнения. В ходе исследований определены также различные количественные характеристики: направление скольжения первичных и вторичных полос, расстояние между зонами скольжения. Эти характеристики вполне позволяют судить о том, как формируются зоны кристаллографического сдвига в процессе деформации. Ширина полос составляет около 40 мкм, направление их первичного скольжения ориентировано под углом 75° к оси сжатия для обоих образцов, а для легированного ориентация вторичного скольжения продолжается под углом 55° по отношению к направлению первичного скольжения (рис. 3, *b*). Образование больших кристаллографических сдвигов в деформируемых кристаллах представляет собой пример динамической диссипативной системы сильно взаимодействующих дислокаций, в эволюции которой проявляются эффекты пространственной и временной самоорганизации [9]. Вследствие захвата отдельными вакансиями примесей в легированном монокристалле происходит их исчезновение [10]. Из-за недосыщения вакансиями кристалла дислокации вынуждены переползать, и винтовые дислокации при таком процессе становятся геликоидальными (рис. 4).

Структурные изменения, вызванные пластической деформацией при различных скоростях нагружения, привели также и к резкому изменению физических свойств. Деформация приводит к смещению энергетических уровней полупроводника, к перераспределению носителей заряда между ними и в конечном счете к изменению электрических характеристик полупроводни-

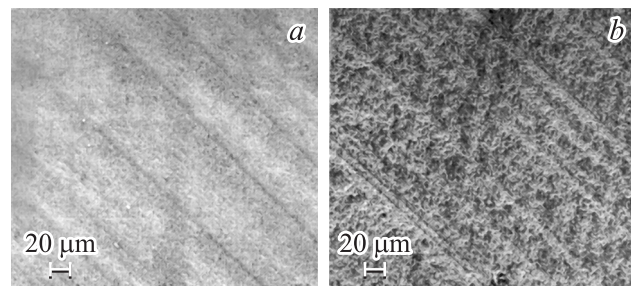


Рис. 3. Фотографии поверхностей образцов кремния *p*-типа в условиях комбинированной пластической деформации: *a* — чистого, *b* — легированного.

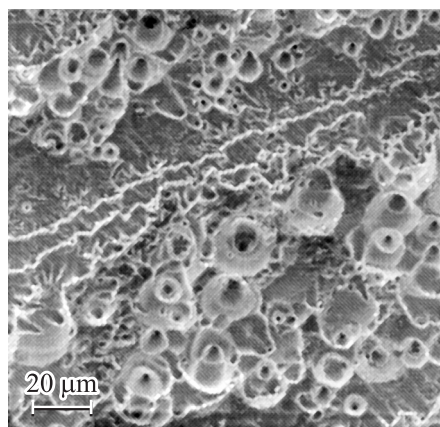


Рис. 4. Геликоидальные дислокации, проходящие вдоль направления [110] в монокристалле легированного кремния *p*-типа.

ка [11]. Как показали измерения, удельное сопротивление в пластически деформированных полупроводниках увеличивается по-разному по сравнению с исходным кристаллом: в 25 раз у чистого образца кремния и в 5 раз у легированного. И у чистого, и у легированного кремния замечена одна особенность — удельное сопротивление, измеренное вдоль оси сжатия, оказывается меньше удельного сопротивления, измеренного в поперечном направлении. Так, например, у чистого образца эта разница составляет 12 раз, а у легированного — 5 раз. Видно, что с ростом деформации эта разница между удельными сопротивлениями вдоль и поперек оказывается больше у чистых образцов почти в 2.5 раза. Это определяет анизотропные свойства такого кристалла. Время жизни неосновных носителей тока сильнее уменьшается в чистых образцах, чем в легированных. Дислокации, проявляющие акцепторные свойства и одновременно увлекаемые динамическим потоком электронов, успевают создавать центры рекомбинаций, благодаря чему время жизни неосновных носителей тока уменьшается.

5. Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что невозможно добиться заметной величины деформации в условиях горячей пластичной деформации (ГПД) при равных с комбинированной пластической деформацией (КПД) величинах температуры и давления. Появилась возможность существенного понижения величин сдвигового напряжения, уменьшения упругой области при КПД в отличие от ГПД. Выявлены заметные различия в пластификации чистых и легированных образцов кремния, подвергнутых воздействию КПД. В легированном монокристалле происходит значительное сопротивление пластическому деформированию, а в чистых монокристаллах кремния пластическая деформация протекает более эффективно. Воздействие КПД на структуру полупроводника привело к увеличению его удельного сопротивления по сравнению с исходным образцом. Причем в продольном направлении, т.е. в направлении оси сжатия образца, удельное сопротивление уменьшается сильнее, чем в поперечном направлении. По-видимому, такой механизм структуроформирования вполне может найти перспективу в развитии технологий низкотемпературной обработки полупроводниковых кристаллов для создания, например, полупроводниковых датчиков давления.

Работа выполнена с использованием оборудования Аналитического центра коллективного пользования ДНЦ РАН.

Список литературы

- [1] В.И. Спицын, О.А. Троицкий. Электропластическая деформация металлов (М., Наука, 1985) с. 8
- [2] С.В. Лоскутов, В.В. Левитин. ЖТФ, **72** (4), 133 (2002).
- [3] Ю.В. Баранов, О.А. Троицкий, Ю.С. Аврамов, А.Д. Шляпин. *Физические основы электроимпульсной и электростатической обработок и новые материалы* (М., МГИУ, 2001) с. 10.
- [4] А.М. Рощупкин, И.Л. Батаронов. Изв. вузов. Физика, **39** (3), 57 (1996).
- [5] В.Е. Громов, Л.Б. Зуев, В.И. Базайкин, В.Я. Целлермайер. Изв. вузов. Физика, **39** (3), 66 (1996).
- [6] М.А. Алиев, Б.Г. Алиев, Х.О. Алиева, А.Р. Велиханов, Ш.Р. Муталибов, В.В. Селезнев. ЖТФ, **74** (8), 58 (2004).
- [7] В.Г. Говорков. Кристаллография, **5** (6), 789 (1961).
- [8] А.А. Урусовская, В.Г. Говорков. Кристаллография, **10** (4), 528 (1965).
- [9] Г.А. Малыгин. УФН, **69** (9), 79 (1999).
- [10] С. Амеликс. *Методы прямого наблюдения дислокаций* (М., Мир, 1968) с. 61.
- [11] А.Л. Полякова. *Деформация полупроводниковых приборов* (М., Энергия, 1979) с. 8.

Редактор Т.А. Полянская

Electroplasticity of pure and doped silicon

A.R. Velikhanov

Institute of Physics, Daghestan Scientific Center
of the Russian Academy of Sciences,
367003 Makhachkala, Russia

Abstract A novel technology of the pure and doped crystal semiconductor for dissipative structures formation has been proposed that allowed controlling their elastic-plastic properties subjected to multifunction deformation. The new macroplastic properties of these crystal have been discovered. From diagrams of the compression was determined the different deformation parameters and studied surface microstructure of deformed sample. That was made the possible suggestions about physical explanations to observed phenomena.