

PACS: 61.82.Fk, 62.20.-x, 81.40.Lm

А.Р. Велиханов

## О ВЛИЯНИИ ТОКА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Институт физики Дагестанского научного центра РАН  
ул. М. Ярагского, 94, г. Махачкала, 367003, Россия  
E-mail: art677@mail.ru

*Показано, что протекание электрического тока плотностью  $j \sim 10^4 - 10^5$  А/см<sup>2</sup> через полупроводник со значительной концентрацией дефектов приводит к существенному увеличению пластической деформации в результате локального перегрева образца в области дефектов.*

**Ключевые слова:** пластическая деформация, монокристаллы кремния, ток высокой плотности, полупроводники

Низкая пластичность кремния обусловлена направленным типом химических связей [1]. Известны различные способы, приводящие к повышению пластичности кремния. Методом дифракции синхротронного излучения американскими учеными в национальной лаборатории Брукхевена (США) изучена пластическая деформация монокристаллов кремния при всестороннем гидростатическом сжатии до 5 GPa и низких относительно  $T_{\text{melt}}$  температурах от комнатной до 425°C [2]. В условиях горячей пластической деформации (ПД) при одноосном сжатии до 0.3 GPa пластичность кремния, близкая к металлической, наблюдаемая в работе [3], наступала при температуре  $0.5T_{\text{melt}}$ .

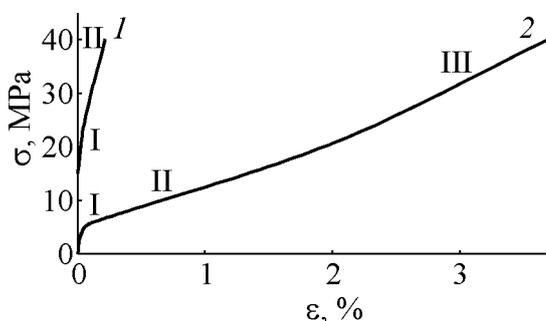
Поскольку за пластичность ответственны именно дефекты, то естественно предположить, что воздействие электрического тока может эффективно изменять характер пластического течения кристаллов. Этим объясняется большой интерес, проявленный исследователями к проблеме электропластического эффекта. Ранее установлено наличие явления резкого снижения сопротивления металла деформированию и повышению его пластичности при воздействии током высокой плотности  $\sim 10^5$  А/см<sup>2</sup>. В работах О.А. Троицкого с сотрудниками [4] показано, что воздействие токовых импульсов длительностью  $\sim 100$  мкс облегчает процессы макроскопической пластической деформации (релаксация напряжений, ползучесть, деформация).

В предложенном способе воздействия на полупроводник комбинированной ПД начало пластичности кремния проявлялось при более низких на-

грузках, чем в [2,3], и температурах  $0.4T_{\text{melt}}$ . Суть этого способа состоит в том, что при пластическом деформировании в условиях внешнего нагрева через образец проходит постоянный электрический ток высокой плотности. В настоящей работе рассматриваются эффекты электропластичности, обнаруженные на монокристаллах кремния.

Объектом исследования были выбраны образцы монокристаллов кремния, легированных бором,  $p$ -типа с удельным сопротивлением  $\rho = 10 \text{ }\Omega \cdot \text{cm}$  в виде параллелепипедов размером  $10 \times 8 \times 5 \text{ mm}$ , ребра которых совпадали с кристаллографическими направлениями  $[\bar{1}10]$ ,  $[110]$ ,  $[001]$ . Деформацию одноосным сжатием проводили вдоль направления  $[110]$  при температурах испытания  $T = 700^\circ\text{C}$  в условиях одновременного воздействия комбинированной и горячей ПД (внешний нагрев). Механическое напряжение сжатия  $\sigma$  изменялось от 0 до 40 МПа. Датчиком для записи величины механического напряжения служил динамометр давления, для линейной деформации  $\varepsilon$  – механический микрометр (точность измерений  $\pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ ).

Для электронно-микроскопического исследования образцы вначале подвергали химическому травлению в течение 1–2 min, а затем полученные поверхностные микроструктуры на широкой грани образца изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа SEM LEO 1450. Основная задача данной работы – выяснение закономерностей изменения пластичности кремния в зависимости от влияния внешнего нагрева и нагрева электрическим током, а также выявление в связи с этим особенностей формирования поверхностных микроструктур образца.



**Рис. 1** Зависимость величины механического напряжения  $\sigma$  от величины деформации  $\varepsilon$  при  $T = 700^\circ\text{C}$  для различных способов деформирования: 1 – горячая ПД, 2 – комбинированная; римскими цифрами обозначены участки кривых

На рис. 1 приведены кривые сжатия монокристаллов кремния, полученные в условиях горячей и комбинированной ПД. Видно, что способ деформирования заметным образом влияет на ход и параметры кривых сжатия. Так, для горячей ПД (кривая 1) характерно наличие значительно большей упругой области, которая наблюдается и при более высоких температурах деформации. Кроме того, различие в кривых горячей и комбинированной ПД проявляется не только в заметных изменениях упругой области, но и в общей величине пластичности. Как видно из таблицы, общая величина деформации образцов, подвергнутых комбинированной ПД, в 20 раз превышает значение деформации образца, обработанного в условиях горячей ПД. Особенностью кривых сжатия 1 и 2 является наличие нескольких ступенчатых

участков ПД с различными коэффициентами упрочнения  $\gamma$  (см. таблицу). Для образцов, подвергнутых горячей ПД, постоянный коэффициент упрочнения на начальном участке ступенчато уменьшается на втором (рис. 1, кривая 1). Для образцов, которые деформированы комбинированно, наблюдается несколько иная картина – возрастающий  $\gamma$  на первом участке сменяется падающим  $\gamma$  на втором, а затем снова возрастающим  $\gamma$  на третьем участке.

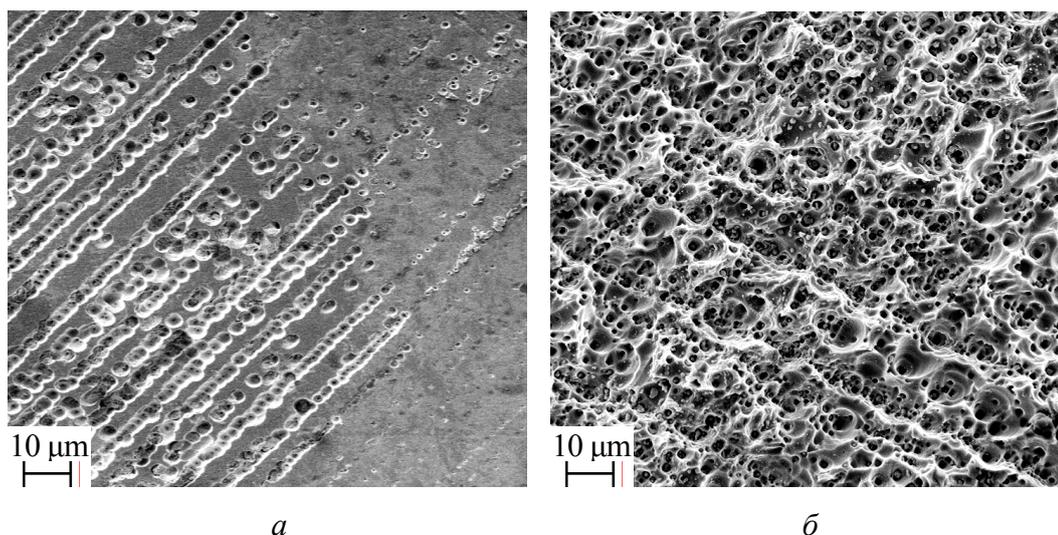
Таблица

Количественные параметры деформационного процесса

№ образца	Вид пластической деформации	Плотность тока $j$ , А/см <sup>2</sup>	Мощность $P$ , W	Механическое напряжение $\sigma$ , МПа	Коэффициент упрочнения по участкам $\gamma = d\sigma/d\varepsilon$ , МПа/%		Величина деформации $\varepsilon$ , %
					I	II	
1	Горячая	–	–	40	I	178	1.5
					II	94	
2	Комбинированная	80	100	40	I	31	2.1
					II	8	
					III	11	
3		220	210	Атмосферное давление	–		0.3

Как показывают электронно-микроскопические исследования, при переходе от одной ступени деформации к другой, выразившейся в изменении коэффициента упрочнения, происходят качественные изменения структуры ядра дислокаций. Снятие внешнего нагрева в процессе комбинированной ПД (т.е. когда через образец течет только постоянный ток при достижении нужной температуры деформации) приводит к возрастанию пластичности образца, торможению в нем диффузных процессов. Это облегчает перемещение дислокаций, в результате чего деформация заметно растет. Возникает вопрос, к чему приведет дальнейший рост тока в отсутствие механической нагрузки на образец? Эксперимент дал ответ на этот вопрос. При критическом значении плотности тока и мощности, выделяемой на образце (см. таблицу), когда температура достигает 1100°C, деформация кремния происходит при атмосферном давлении, достигая небольшого значения.

Особенности структурного рельефа, сформированного на поверхности образца деформационными дефектами, отображающие закономерности формирования волновых пластических фронтов, приведены на рис. 2. Использование направленного потока электронов в качестве управляющего параметра воздействия на дислокационную систему кристалла позволяет влиять на морфологию и характер распределения деформационной структуры. Однородно-ориентированная дислокационная структура образца, полученная в условиях комбинированной ПД, характеризуется наличием геликоидальных дислокаций (рис. 2,а) [5]. Для поверхности же образца кремния, полученной в условиях горячей ПД, характерно неравномерное распределение плотности дислокаций (рис. 2,б).



**Рис. 2.** Дислокационная структура кремния при температуре испытания 700°C: *а* – горячая ПД, *б* – комбинированная

Как показывают эксперименты, электрический ток оказывает избирательное действие на дислокации в кристалле, вызывая их смещение за счет эффекта разогрева. Это действие зависит от направления тока по отношению к дислокационным стенкам. Отличительной особенностью горячей ПД по сравнению с комбинированной является отсутствие заметной величины деформации при меньших параметрах воздействия на кристалл. Новый комбинированный способ позволяет существенно снизить величину механического напряжения, уменьшить предел упругой области, понизить температуру деформирования, что важно для уменьшения диффузионного вклада в формирование дислокационной структуры кристалла. Сохранение внешнего нагрева при достигнутой температуре 700°C приводит к понижению пластичности образца. В случае отсутствия внешнего нагрева, когда образец нагревается только постоянным током, пластичность растет.

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

1. С.С. Горелик, М.Я. Дашевский, *Материаловедение полупроводников и диэлектриков*, Металлургия, Москва (1988).
2. J. Rabier, P.O. Renault, D. Eyidi, J.L. Demenet, J. Chen, H. Couvy, L. Wang, *Phys. Status Solidi C4*, 3110 (2007).
3. В.Г. Говорков, *Кристаллография* **5**, 789 (1961).
4. В.И. Спицын, О.А. Троицкий, *Электропластическая деформация металлов*, Наука, Москва (1985).
5. С. Амелинкс, *Методы прямого наблюдения дислокаций*, Мир, Москва (1968).

*A.P. Velikhanov*

### ПРО ВПЛИВ СТРУМУ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МОНОКРИСТАЛІЧНОГО КРЕМНІЮ

Показано, що протікання електричного струму густиною  $j \sim 10^4\text{--}10^5$  А/см<sup>2</sup> через напівпровідник із значною концентрацією дефектів призводить до суттєвого збільшення пластичної деформації в результаті локального перегріву зразка в області дефектів.

**Ключові слова:** пластична деформація, монокристали кремнію, струм високої густини, напівпровідники

*A.P. Velikhanov*

### THE IMPACT OF THE CURRENT ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SINGLE CRYSTAL SILICON

It has been shown that the current of the density  $j \sim 10^4\text{--}10^5$  A/cm<sup>2</sup> through a semiconductor with significant defect concentration results in essential increase of plastic deformation due to local overheating of the sample within the defect area.

**Keywords:** plastic deformation, single crystals of silicon, high-density current, semiconductors

**Fig. 1.** The stress-strain plots  $\sigma(\epsilon)$  at  $T = 700^\circ\text{C}$  and different methods of deformation: 1 – heat PD, 2 – multifunction PD; curve areas are labelled with Roman numerals

**Fig. 2.** Dislocation structure of silicon at  $T = 700^\circ\text{C}$ : a – heat PD, b – multifunction PD