

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. ДИЭЛЕКТРИКИ

MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY. DIELECTRICS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2016. Т. 19, № 1. С. 28–33.
ISSN 1609-3577. DOI: 10.17073/1609-3577-2016-1-28-33

УДК 621.315.592

О СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ПЛАСТИЧНОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

© 2016 г. А. Р. Велиханов

ФГБУН Институт физики им. Х. И. Амирханова Дагестанского научного центра РАН,
ул. М. Ярагского, д. 94, Махачкала, Республика Дагестан, 367003, Россия

В монокристаллах кремния p -типа проводимости (p -Si) исследованы особенности поведения деформационных характеристик в условиях совместного действия электрического тока и температуры, а также отдельно электрического тока. Изучена зависимость изменения удельной электрической проводимости p -Si от температуры при его нагреве и остывании как в условиях сжатия, так и без него. Наблюдается небольшой рост удельного сопротивления p -Si с ростом приложенного давления. В условиях совместного действия на монокристалл температуры и электрического тока обнаружено увеличение сопротивления деформированию. В случае действия только электрического тока при сжатии монокристалла обнаружено увеличение пластических свойств. Изучены поверхностные микроструктуры полученных деформированных образцов. Предложены возможные физические объяснения наблюдаемым явлениям.

Ключевые слова: пластическая деформация, кремний, высокая температура, электрическое поле, дислокационные структуры.

Введение

Создание регулярных дислокационных структур позволит создавать массивы квантовых точек на различных полупроводниковых материалах [1]. Умение управлять параметрами самособирающихся массивов квантовых точек важно как для усовершенствования уже существующих оптоэлектронных приборов (например, полупроводниковых лазеров), так и для создания новых (в частности, однофотонных источников для квантовой информатики).

В работе [1] две сращенные пластины GaAs сжимали и отжигали в течение 1 ч при температуре 600 °С под нагрузкой. Между ними образовались ковалентные связи, и сформировались сетки дислокаций. В результате упругие напряжения, создаваемые такими сетками, привели к неоднородному осаждению материала. Период получившейся поверхностной наноструктуры задавали периодом дислокационной сетки. Правда, авторам не удалось получить мас-

сив квантовых точек на этом материале, так как они не смогли подобрать параметры формируемой дислокационной сетки и условий осаждения.

Важно понимать, как такие вводимые дислокации и другие дефекты влияют на пластические и прочностные свойства полупроводника. Обнаружение новых физических свойств у кристаллов позволяет создавать новые приборы, используя развитую технологию кремниевой микроэлектроники [2].

При деформировании обычными методами начало пластичности в кремнии проявляется при температуре выше $0,6T_{пл}$ (где $T_{пл}$ — температура плавления), т. е. это случай горячей пластической деформации (ГПД) [3]. Подобные экспериментальные исследования проводили и на кристаллах $CaFe_2$ [4]. В этих кристаллах изучали распределение деформации после их испытания на сжатие вдоль кристаллографических направлений [110] и [112] с постоянной скоростью деформации в интерва-

ле температур $T = 100\text{--}980\text{ }^\circ\text{C}$. В работе [5] проведено изучение прочностных характеристик, особенностей дефектной и дислокационной структур образцов $\text{LiF} - \text{LiF} : \text{Mg}$, которые прошли деформацию в жидком гелии и при комнатных температурах. Пластические свойства кремния при высоком уровне гидростатического сжатия (до 5 ГПа) в интервале температур от 20 до 425 $^\circ\text{C}$ изучали в работе [6]. Установлено, что зависимость предела текучести от температуры в кремнии имеет различный вид в разных температурных интервалах. К новым способам деформирования относятся комбинированная пластическая (КПД) и электропластическая (ЭПД) деформации. В первом случае учитывают влияние температуры наряду с прохождением постоянного электрического тока высокой плотности ($j > 80\text{ А/см}^2$) через образец. Во втором случае отсутствует внешний нагрев в печи в процессе деформационного сжатия, т. е. через образец течет только постоянный ток, и появляется возможность проводить испытания при $0,5T_{\text{пл}}$. Применение эффекта электропластичности в кристаллах, который уже находит практическое применение [7, 8], позволит управлять пластическими свойствами кремния как особо хрупкого материала. Электропластический эффект (ЭПЭ) — это метод, основанный на взаимодействии движущихся дислокаций и электронов. В работе [9] исследовали особенности проявления ЭПЭ при растяжении в зависимости от структурно-фазового состояния, размера зерна и режимов импульсного тока в титановых сплавах различной природы. В работе [10] предпринята попытка исследования влияния электрического потенциала на пластические свойства проводников. Известно, что во многих устройствах полупроводниковые приборы подвергаются действию различных вибраций и напряжений [11]. Обработка кремния в условиях воздействия нагрузки и тока высокой плотности ($j > 80\text{ А/см}^2$) позволит создавать полупроводниковые приборы, устойчивые к действию различных механических и электрических нагрузок, возникающих в приборе во время его работы. В более ранней работе [12] изучали различие в пластических свойствах монокристаллов кремния p - и n -типов. Эти монокристаллы подвергали КПД.

Цель исследования — сравнение влияния КПД и ЭПД на прочностные, пластические, электрические свойства p -Si и изучение особенностей формирования дислокационных структур на поверхности полупроводника.

Образцы и методы исследования

Объектами исследования являлись образцы монокристаллов кремния, легированных бором, p -типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho = 16\text{ Ом} \cdot \text{см}$. Образцы были вырезаны в форме параллелепипеда размером $10 \times 7 \times 4\text{ мм}^3$, ребра которых совпадали с кристаллографическими на-

правлениями [112], [001], [110] соответственно. Деформирование образцов в динамическом режиме (режим в переменной во времени нагрузке) осуществляли в камере, в которой создавали вакуум ($p = 1,1\text{ Па}$). До нагружения образец предварительно прогревали в печи сопротивления до температуры 425 $^\circ\text{C}$ (рис. 1). Затем осуществляли плавную подачу постоянного напряжения до 30 В с источника к исследуемому образцу через молибденовые электроды. Достижение такого максимального напряжения позволяет резко повысить температуру до 1000 $^\circ\text{C}$, когда через образец начинает проходить постоянный электрический ток высокой плотности. Для проводимых деформационных испытаний в условиях КПД и ЭПД задавали температуру 760 $^\circ\text{C}$. В случае КПД плотность тока через образец составляла 80 А/см^2 , падение напряжения на образце — 4 В. В случае ЭПД плотность тока — 120 А/см^2 , падение напряжения — 3 В. Температуру испытаний, равную 760 $^\circ\text{C}$, фиксировали. После чего осуществляли механическую нагрузку сжатием. Сжатие Si проводили в течение 25 мин. Образец сжимали вдоль направления [110]. Механическое напряжение σ меняли от 0 до 100 МПа со скоростью нагружения 6 г/с. Датчиком для записи значений механического напряжения служил динамометр давления. Значение фактической пластической деформации ϵ определяли с помощью механического микрометра, который фиксировал деформацию с точностью $\pm 1\text{ мкм}$.

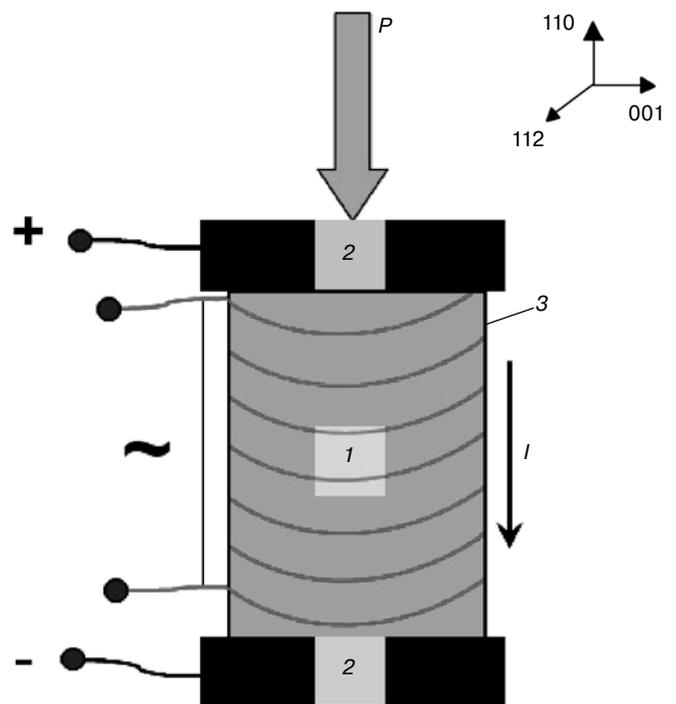


Рис. 1. Схема эксперимента:
1 — образец; 2 — молибденовые электроды; 3 — печь;
I — постоянный электрический ток; P — нагрузка

Fig. 1. The scheme of the experiment:
(1) sample; (2) molybdenum electrodes; (3) furnace;
(I) constant electric current; (P) load

После КПД и ЭПД образцы разрезали на бруски размером $8 \times 3 \times 1 \text{ мм}^3$. Для измерения удельного электросопротивления на торцы этих образцов наносили омические контакты из олова. Удельное сопротивление этих образцов измеряли при комнатной температуре.

Для выявления и изучения поверхностной дислокационной структуры образцы деформированных монокристаллов Si подвергали химическому травлению в течение 1–2 мин. Травитель SD–1 представлял собой смесь уксусной, азотной и плавиковой кислот, взятых в объемном отношении 1 : 3 : 6. После травления широкую поверхность образца исследовали с помощью металлографического агрегатного микроскопа серии ЕС МЕТАМ РВ–23.

Результаты и их обсуждение

Ранее было показано [3], что образцы, у которых направление оси сжатия параллельно (110), являются более пластичными, чем образцы с ориентацией оси параллельной (001) и (112). В данной работе результаты измерений были получены при сжатии монокристалла вдоль оси, параллельной (110). На рис. 2 представлены зависимости удельной электрической проводимости ρ от приложенного механического напряжения σ . Выявлена общая тенденция: в условиях как КПД, так и ЭПД с ростом σ электропроводность образцов падает. Однако, если в случае ЭПД (кривая 2) зависимость имеет почти плавный ход уменьшения проводимости, то в случае КПД (кривая 1) наблюдается резкий скачок падения удельной электропроводности в интервале приложенных механических напряжений от 48 до 67 МПа (см. рис. 2).

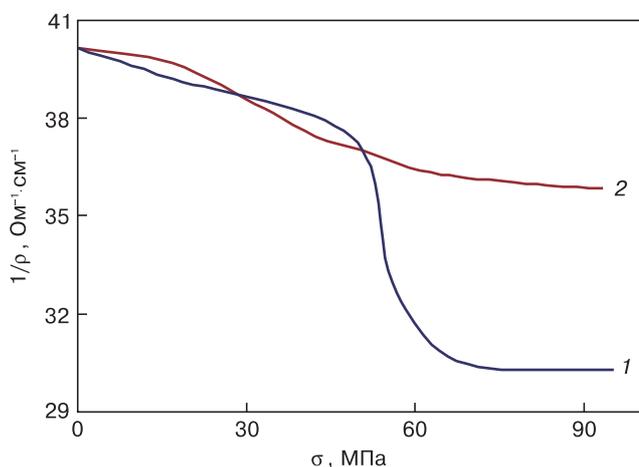


Рис. 2. Зависимости удельной электрической проводимости ρ от приложенного механического напряжения σ (вдоль длинной стороны образца [110]) для монокристаллов Si при $T = 760 \text{ }^\circ\text{C}$, подвергнутых в течение 25 мин КПД (1) и ЭПД (2)

Fig. 2. Dependence of the specific electric conductivity ρ on the applied mechanical stress σ (along the long side of the sample [110]) for single crystals of Si at $T = 760 \text{ }^\circ\text{C}$, subjected to a 25 min (1) period of efficiency and (2) EPD

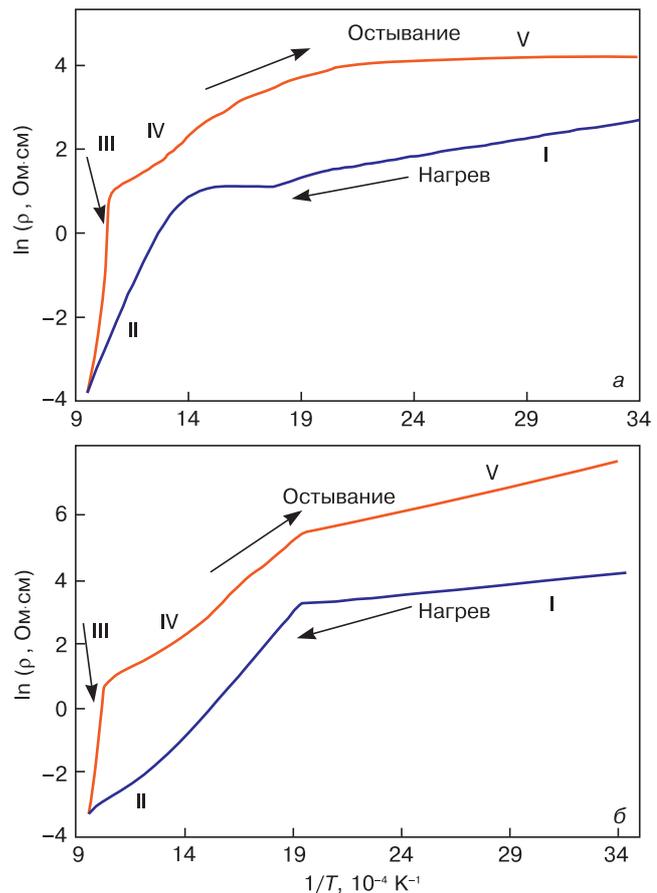


Рис. 3. Зависимости удельной электрической проводимости ρ от температуры T для монокристаллов Si, подвергнутых ЭПД (а) и КПД (б)

Fig. 3. Dependences of the specific electric conductivity on the temperature T for single crystals of Si subjected to EPD (a) and efficiency (b)

На рис. 3 приведены зависимости удельного сопротивления ρ от обратной температуры для p -Si при нагреве в печи (участок I), одновременном нагреве в печи и током (участок II), остывании (участки IV, V) как без деформационного сжатия, так и в условиях ЭПД (а) и КПД (б) (участок III). В обоих случаях (см. рис. 3) на I участке наблюдается плавное уменьшение удельного электросопротивления, а на II участке идет резкое падение удельного сопротивления p -Si (см. рис. 3) вследствие дополнительного его нагрева постоянным током до 1033 К. Возможно, что на этом участке образец переходит к собственной проводимости. Участок III характеризует небольшое увеличение удельного сопротивления в условиях сжатия. На IV участке, после завершения пластической деформации во время остывания образца, заметно некоторое увеличение ρ (см. рис. 3), связанное, по-видимому, с уменьшением подвижности свободных носителей заряда. При сравнении конечного значения ρ на V участке в обоих случаях (см. рис. 3) можно заметить, что в условиях влияния электрического тока в чистом виде без дополнительного нагрева печью при сжатии (ЭПД) оно оказывается значительно меньше значения ρ у p -Si в условиях КПД.

Изменение физико–механических параметров p -Si
[The change in physico–mechanical parameters of p -Si]

Состояние образца	Способ деформации	ϵ , %	ρ , Ом · см	D , см ⁻²
Недеформированный	—	—	16	$2 \cdot 10^4$
Деформированный	КПД	2,3	2046	$4 \cdot 10^4$
Деформированный	ЭПД	3,8	68	$3,4 \cdot 10^5$

Примечание. $T = 760$ °С за $t = 25$ мин. Погрешность измерений составила ± 5 %. D — плотность дислокаций.

В таблице приведены физико–механические параметры p -Si, подвергнутого ЭПД и КПД. Из таблицы видно, что значение ЭПД в 1,6 раза превышает величину КПД. Включение постоянного электрического тока плотностью 80—120 А/см², ориентированного вдоль направления сжатия [110], вызывает снижение механического напряжения в образце и способствует облегченному пластическому течению по всему объему монокристалла. Действие постоянного тока на полупроводник в условиях одноосного сжатия приводит в итоге к увеличению его удельного сопротивления по сравнению с исходным образцом, но в условиях КПД эта величина меняется наиболее значительно. Как видно из таблицы, значения КПД и ЭПД различаются в 18 раз.

Рис. 4 дает информацию о формировании поверхностного рельефа исследуемых образцов. Поверхность недеформированного кремния характеризуется наличием беспорядочно расположенных дислокаций (см. рис. 4, а). На поверхности образца монокристалла Si в условиях воздействия КПД наблюдается наличие продольно–поперечных следов скольжения, вдоль которых и расположены дислокации (см. рис. 4, б). Направление их первичного скольжения ориентировано под углом 75° к оси сжатия, а ориентация вторичного скольжения продолжается под углом 55° по отношению к направлению первичного скольжения. Эволюция полосчатой субструк-

туры с продолжающейся деформацией зависит от подвижности дислокационных границ между полосами [13, 14]. Морфология и характер распределения дефектной структуры образца монокристалла Si в условиях воздействия ЭПД несколько иные. Здесь наблюдается более упорядоченное расположение дислокаций, которые образуют своего рода одномерно ориентированную поверхностную структуру образца (см. рис. 4, в). Изменение средней плотности дислокаций D у деформированных образцов по сравнению с исходным (недеформированным) образцом приведено в таблице.

Наибольшую достигнутую деформацию, которая приходится на образец монокристалла Si p -типа проводимости в условиях ЭПД, в отличие от КПД, можно объяснить, вероятно, следующим предположением. Большая плотность дырочного тока, двигаясь по направлению электрического поля, увлекает за собой дислокации, обладающие отрицательным зарядом. Это обстоятельство и приводит к более интенсивной пластической деформации. С ростом плотности тока увеличивается поток и скорость увлекаемых дислокаций. А медленно движущиеся дислокации в кремнии аккумулируют дефекты ядра и примеси. Закрепление примесными центрами ограничивает движение и размножение дислокаций [14].

Следовательно, КПД и ЭПД позволяют добиться заметной пластической деформации p -Si. В анало-

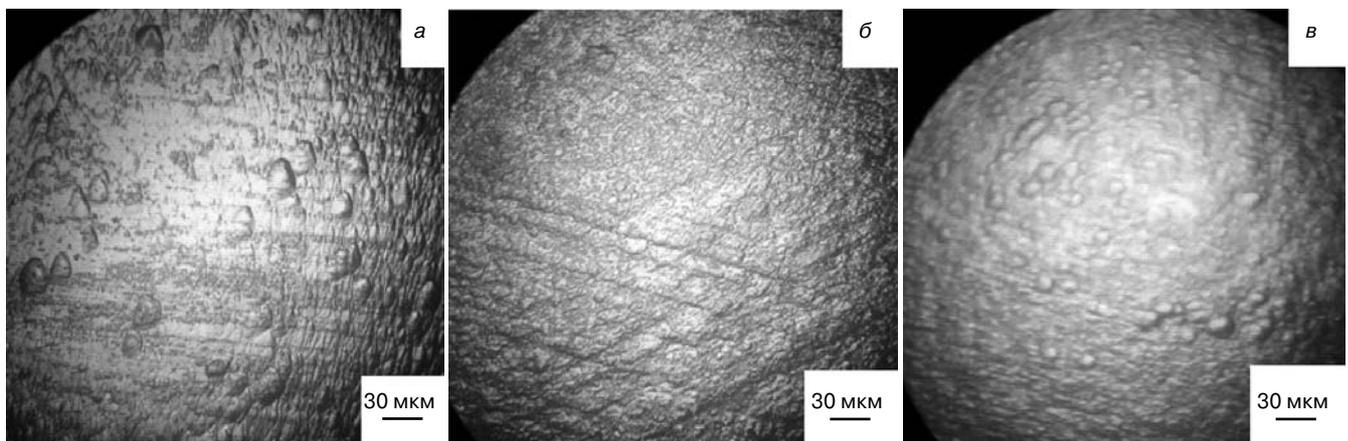


Рис. 4. Микрофотографии поверхностей плоскостей {110} монокристаллов Si: а — недеформированный образец; б — образец, подвергнутый КПД при $T = 760$ °С в течение $t = 25$ мин; в — образец, подвергнутый ЭПД при $T = 760$ °С в течение $t = 25$ мин

Fig. 4. Microphotographs of surfaces of {110} planes of Si single crystals: (a) undeformed sample; (b) sample subjected to an efficiency at $T = 760$ °C for $t = 25$ min; (c) sample subjected to an EPD at $T = 760$ °C for $t = 25$ min

гичных условиях (по нагрузке и температуре) методом ГПД этого добиться невозможно. Из полученных данных выявлены заметные различия в пластичности образцов p -Si, подвергнутых воздействию КПД и ЭПД. При одинаковой температуре, нагрузке, времени деформирования гораздо эффективнее идет деформация у монокристаллов кремния в условиях ЭПД. В случае с КПД в аналогичных условиях происходит значительное сопротивление пластическому деформированию образцов p -Si. Важным преимуществом ЭПД перед ГПД и КПД также является возможность уменьшения температуры испытаний. Это позволяет устранить влияние дополнительных термических напряжений, например при технологической обработке полупроводникового материала. Воздействие КПД и ЭПД на электрические свойства полупроводника p -Si приводит в конечном итоге к увеличению его удельного сопротивления по сравнению с недеформированным образцом. В случае с КПД (см. таблицу) удельное сопротивление меняется значительно сильнее (в 127 раз), чем при ЭПД (в 4 раза). Результаты, приведенные в работе [15], были получены в условиях только ГПД монокристалла кремния n -типа. Деформация монокристалла с исходным $\rho = 6 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ составила 2,5 % при температуре 725 °С. В работе [15] наблюдалась аналогичная картина — рост удельного сопротивления кремния. После ГПД значение ρ возрастало до 150 Ом · см по сравнению с недеформированным образцом. Таким образом, разница составляла 25 раз, но в работе [15] не приводили сравнения с другими возможными методами деформаций полупроводника.

Библиографический список

1. Coelho, J. Long-range ordering of III–V semiconductor nanostructures by shallowly buried dislocation networks / J. Coelho, G. Patriarche, F. Glas, G. Saint-Girons, I. Sagnes // *J. Phys.: Condens.*

Matter. – 2004. – V. 16, N 45. – P. 7941–7942. DOI: 10.1088/0953-8984/16/45/016

2. Шкляев, А. А. Предельно плотные массивы наноструктур германия и кремния / А. А. Шкляев, М. Ичикава // *УФН*. – 2008. – Т. 178, № 2. – С. 139–169. DOI: 10.3367/UFNr.0178.200802b.0139

3. Говорков, В. Г. Влияние температуры на форму кривых сжатия монокристаллов Si / В. Г. Говорков // *Кристаллография*. – 1961. – Т. 5, вып. 6. – С. 789–791.

4. Скворцова, Н. П. Локализация пластической деформации в кристаллах фтористого кальция при повышенных температурах / Н. П. Скворцова, Е. А. Кривандина, Д. Н. Каримов // *ФТТ*. – 2008. – Т. 50, вып. 4. – С. 639–643.

5. Клявин, О. В. Пластические свойства и дефектная структура слоистых монокристаллов LiF–LiF: Mg при $T = 4,2 \text{ K}$ / О. В. Клявин, А. В. Никифоров, В. И. Николаев, В. В. Шпейзман // *ФТТ*. – 2007. – Т. 49, вып. 2. – С. 258–261.

6. Rabier, J. Plastic deformation of silicon between 20 °C and 425 °C / J. Rabier, P. O. Renault, D. Eyidi, J. L. Demenet, J. Chen, H. Convy, L. Wang // *Phys. Status Solidi (c)*. – 2007. – V. 4, iss. 8. – P. 3110–3114. DOI: 10.1002/pssc.200675480

7. Спицын, В. И. Электропластическая деформация металлов / В. И. Спицын, О. А. Троицкий. – М.: Наука, 1985. – 160 с.

8. Троицкий, О. А. Физические основы и технологии обработки современных материалов. Теория, технология, структура и свойства. В 2 т. / О. А. Троицкий, Ю. В. Баранов, Ю. С. Авраамов, А. Д. Шляпин. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 592 с.

9. Столяров, В. В. Структурные превращения при растяжении с током в титановых сплавах / В. В. Столяров // *Письма о материалах*. – 2013. – Т. 3. – С. 137–140.

10. Хон, Ю. А. О влиянии электрического потенциала на пластическую деформацию проводников / Ю. А. Хон, П. П. Каминский, Л. Б. Зуев // *ФТТ*. – 2013. – Т. 55, № 6. – С. 1047–1051.

11. Полякова, А. Л. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов / А. Л. Полякова. – М.: Энергия, 1979. – 168 с.

12. Велиханов, А. Р. // Электропластичность монокристаллов кремния n - и p -типа / А. Р. Велиханов // *Известия вузов. Материалы электронной техники*. – 2008. – № 2. – С. 25–28.

13. Mahesh, S. Deformation banding and shear banding in single crystals / S. Mahesh // *Acta Materialia*. – 2006. – V. 54, iss. 17. – P. 4565–4574. DOI: 10.1016/j.actamat.2006.05.043

14. Kveder, V. V. Influence of the dislocation travel distance on the DLTS spectra of dislocations in Cz–Si / V. V. Kveder, V. I. Orlov, M. Khorosheva, M. Seibt // *Solid State Phenomena*. – 2008. – V. 131–133. – P. 175–182. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.131-133.175

15. Ellis, W. C. Production of acceptor centers in germanium and silicon by plastic deformation / W. C. Ellis, E. S. Greiner // *Phys. Rev.* – 1953. – V. 92, N 4. – P. 1061–1062. DOI: 10.1103/PhysRev.92.1061.2

ISSN 1609–3577 Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronic Technics. 2016, vol. 19, no. 1, pp. 28–33.

About joint action of the temperature and electric current on plastic single-crystalline silicon

A. R. Velikhanov

Amirkhanov Institute of Physics of Dagestan Scientific Center of Russian Academy of Science,
94 M. Yaragskogo Str., Makhachkala, 367003, Russia

Abstract. In low-resistance p -type single-crystalline silicon to explored particularities of the behavior deformations features in condition, as joint action electric and temperature, so and apart electric current. Exists the small growing of resistivity p -Si with growing of the attached pressure. The dependence of the change of the electrical conductivity of p -Si on temperature during heating and cooling, both in terms of compression and without it. In condition of the joint action of the temperature and electric current on single-crystalline is discovered increase the resistance on deformations, but in the event of action only electric current at compression single-crystalline is revealed growing of the increase plastic. Studied surface microstructure got deformed sample. They are offered possible physical explanations to observed phenomenas.

Keywords: plastic deformation, silicon, high temperature, electric field, dislocations structures

References

1. Coelho J., Patriarche G., Glas F., Saint-Girons G., Sagnes I. Long-range ordering of III–V semiconductor nanostructures by shallowly buried dislocation networks. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2004, vol. 16, no. 45, pp. 7941–7942. DOI: 10.1088/0953-8984/16/45/016

2. Shklyaev A. A., Ichikawa M. Extremely dense arrays of germanium and silicon nanostructures. *Phys. Usp.*, 2008, vol. 51, no. 2, pp. 133–161. DOI: 10.1070/PU2008v051n02ABEH006344

3. Govorkov V. G. Effect of temperature on the shape of the compression curves of single crystals of Si. *Kristallografiya = Crystallography Reports*, 1961, vol. 5, no. 6, pp. 789–791. (In Russ.)

4. Skvortsova N. P., Krivandina E. A., Karimov D. N. Localization of plastic deformation in calcium fluoride crystals at elevated temperatures. *Phys. Solid State*, 2008, vol. 50, no. 4, pp. 665–669. DOI: 10.1134/S1063783408040112

Information about author:

Artur R. Velikhanov — Engineer–Researcher (art677@mail.ru).

5. Klyavin O. V., Nikiforov A. V., Nikolaev V. I., Shpeizman V. V. Plastic properties and defect structure of LiF–LiF : Mg layered single crystals at T = 4.2 K. *Phys. Solid State*, 2007, vol. 49, no. 2, pp. 267–271. DOI: 10.1134/S106378340702014X
6. Rabier J., Renault P. O., Eyidi D., Demenet J. L., Chen J., Convy H., Wang L. Plastic deformation of silicon between 20 °C and 425 °C. *Phys. Status Solidi (c)*, 2007, vol. 4, no. 8, pp. 3110–3114. DOI: 10.1002/pssc.200675480
7. Spitsyn V. I., Troitskii O. A. *Elektroplasticheskaya deformatsiya metallov* [Electroplastic deformation of metals]. Moscow: Nauka, 1985. 160 p.
8. Troitskii O. A., Baranov Yu. V., Avraamov Yu. S., Shlyapin A. D. *Fizicheskie osnovy i tekhnologii obrabotki sovremennykh materialov. Teoriya, tekhnologiya, struktura i svoystva* [Physical basis and technology of processing of modern materials. Theory, technology, structure and properties]. Moscow; Izhevsk: Institute of computer science, 2004. 592 p.
9. Stolyarov V. V. Structure transformations during tension with current in titanium–based alloys. *Pisma o materialash*, 2013, vol. 3, pp. 137–140.
10. Khon Y. A., Kaminskii P. P., Zuev L. B. Influence of the electric potential on the plastic deformation of conductors. *Phys. Solid State*, 2013, vol. 55, no. 6, pp. 1131–1135. DOI: 10.1134/S1063783413060164
11. Polyakova A. L. *Deformatsiya poluprovodnikov i poluprovodnikovyykh priborov* [Deformation of semiconductors and semiconductor devices]. Moscow: Energiya, 1979. 168 p.
12. Velikhanov A. R. Electroplastic deformation of single-crystalline silicon p- and n-types. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, 2008, no. 2, pp. 25–28.
13. Mahesh S. Deformation banding and shear banding in single crystals. *Acta Materialia*, 2006, vol. 54, no. 17, pp. 4565–4574. DOI: 10.1016/j.actamat.2006.05.043
14. Kveder V. V., Orlov V. I., Khorosheva M., Seibt M. Influence of the dislocation travel distance on the DLTS spectra of dislocations in Cz–Si. *Solid State Phenomena*, 2008, vols 131–133, pp. 175–182. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.131-133.175
15. Ellis W. C., Greiner E. S. Production of acceptor centers in germanium and silicon by plastic deformation. *Phys. Rev.*, 1953, vol. 92, no. 4, pp. 1061–1062. DOI: 10.1103/PhysRev.92.1061.2

* * *