

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

А.Р. Велиханов

ПЛАСТИЧНОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛОВ Si *n*- И *p*-ТИПОВ В ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра учреждения РАН
ул. М. Ярагского, 94, г. Махачкала, 367003, Россия

Статья поступила в редакцию 11 сентября 2012 года

*В монокристаллах кремния *n*- и *p*-типов исследованы особенности поведения деформационных характеристик в условиях как совместного действия электрического тока и теплового поля, так и отдельно электрического тока. Наблюдается небольшое повышение удельного сопротивления Si с ростом приложенного давления. Для образцов *p*-Si при сжатии в условиях совместного действия теплового поля и электрического тока обнаружено увеличение сопротивления деформированию, а при действии только электрического тока выявлен рост пластичности. У образцов *n*-Si обратный эффект: в условиях совместного действия теплового поля и электрического тока при сжатии растет пластичность, а при действии только электрического тока повышаются прочностные свойства. Изучены поверхностные микроструктуры полученных деформированных образцов. Предложены возможные физические объяснения наблюдаемым явлениям.*

Ключевые слова: кремний, пластичность, дислокации, тепловое поле, электрическое поле

*У монокристаллах кремнію *n*- і *p*-типу досліджено особливості поведінки деформаційних характеристик в умовах як сумісної дії електричного струму й теплового поля, так і окремо електричного струму. Спостерігається невелике підвищення питомого опору Si зі зростанням прикладеного тиску. Для зразків *p*-Si при стисненні в умовах сумісної дії теплового поля й електричного струму виявлено збільшення опору деформуванню, а при дії тільки електричного струму виявлено зростання пластичності. У зразків *n*-Si зворотний ефект: в умовах сумісної дії теплового поля й електричного струму при стисненні зростає пластичність, а при дії тільки електричного струму підвищуються міцнісні властивості. Вивчено поверхневі микроструктури отриманих деформованих зразків. Запропоновано можливі фізичні пояснення спостережуваних явищ.*

Ключові слова: кремній, пластичність, дислокації, теплове поле, електричне поле

Введение

Создание внутри объемного кристалла наноструктуры преимущественно ориентированных дислокаций – новое направление в первую очередь в об-

ласти разработки экспериментальных методов управления связью структура–состав–свойства [1]. Важным фактором является понимание роли таких вводимых дислокаций и других дефектов на пластические и прочностные свойства полупроводника. Пластичность, близкая к металлической [2], наступала в кремнии при температуре выше $0.6T_{\text{melt}}$ (горячая пластическая деформация – ГПД), где T_{melt} – температура плавления. При новых способах деформирования воздействием теплового поля наряду с прохождением постоянного электрического тока высокой плотности через образец (комбинированная пластическая деформация – КПД) и в отсутствие теплового поля в процессе деформационного сжатия, т.е. когда через образец течет только постоянный ток (электропластическая деформация – ЭПД), появляется возможность проводить испытания при $0.5T_{\text{melt}}$. Использование эффекта электропластичности в кристаллах, который уже находит практическое применение [3], позволит управлять пластическими свойствами кремния как особо хрупкого материала. Известно, что во многих устройствах полупроводниковые приборы подвергаются действию больших нагрузок [4]. В этом случае для некоторых приборов пригодны монокристаллы с заданной плотностью и равномерным распределением дислокаций [5]. На основе поверхностных дислокаций, полученных в условиях воздействия давления и тока высокой плотности, можно создавать полупроводниковые приборы, устойчивые к действию нагрузок и кратковременных токов, протекающих в приборе во время действия нагрузки. Целью исследования являлось выяснение в сравнительном плане влияния КПД и ЭПД на прочностные, пластические и электрические свойства кремния *n*- и *p*-типов.

Методика исследования

В качестве объекта исследования использовали образцы монокристаллов *n*- и *p*-типов, легированных бором, с удельным сопротивлением $\rho = 30 \text{ } \Omega \cdot \text{см}$. Образцы изготавливали в виде параллелепипедов размером $10 \times 7 \times 4 \text{ мм}$, ребра которых совпадали с кристаллографическими направлениями [112], [001], [110] соответственно. Использовали камеру, размещенную на установке прессового типа, в которой создавали вакуум и деформировали образец в динамическом режиме. До нагружения образец предварительно прогревали в печи сопротивления до температуры 425°C . После подачи постоянного напряжения (30 В) с источника на молибденовые электроды, между которыми размещали исследуемый образец, включали постоянный электрический ток. Такое напряжение «зажигания» позволяет резко повысить температуру испытания за счет быстрого снижения удельного сопротивления образца, когда через него начинает проходить постоянный ток высокой плотности.

Для КПД и ЭПД устанавливали температуру деформирования 760°C за счет уменьшения плотности тока после подачи напряжения 30 В. При КПД эту температуру набирали за счет совместного нагрева образца в печи сопротивления и электрическим током. В случае с ЭПД сначала предваритель-

но отключали печь, которая, как известно, набирала температуру 425°C, и лишь потом с помощью постоянного электрического тока устанавливали температуру 760°C. Температуру испытания 760°C фиксировали, после чего осуществляли механическую нагрузку сжатием.

Сжатие образца проводили в течение 25 min вдоль направления [110]. Механическое напряжение σ изменялось от 0 до 100 МПа со скоростью нагружения 6 g/s. Для КПД плотность тока составляла 80 А/см², падение напряжения на образце – 4 V, а для ЭПД – соответственно 120 А/см² и 3 V. Датчиком для записи величины механического напряжения служил динамометр давления. Значение фактической величины пластической деформации ϵ определяли с помощью механического микрометра, который фиксировал деформацию с точностью $\pm 1 \mu\text{m}$. Изменение удельного сопротивления вдоль образца регистрировали по цифровому прибору Ц300, который входил в приборное обеспечение установки.

Для выявления и изучения поверхностной дислокационной структуры образцы деформированных монокристаллов Si подвергали химическому травлению в течение 1–2 min. 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

На основании полученных кривых 1–2 (рис. 1) зависимости удельной электрической проводимости $1/\rho$ от приложенного механического напряжения σ выявлена общая тенденция: в условиях как КПД, так и ЭПД с ростом приложенного механического напряжения σ проводимость $1/\rho$ образцов *p*-Si падает (растет удельное сопротивление ρ). Но если кривая 2, полученная в условиях ЭПД, имеет почти плавный ход уменьшения проводимости полупроводника (рис. 1), то в случае же с КПД (кривая 1) наблюдается резкий скачок падения удельной электропроводности в интервале приложенных механических напряжений от 48 до 67 МПа.

Кривые 3 и 4, приведенные на том же рис. 1, для *n*-Si имеют несколько иной ход. Кривая 4 указывает на аналогичную тенденцию повышения удельного сопротивления *n*-Si с ростом приложенного давления так же, как

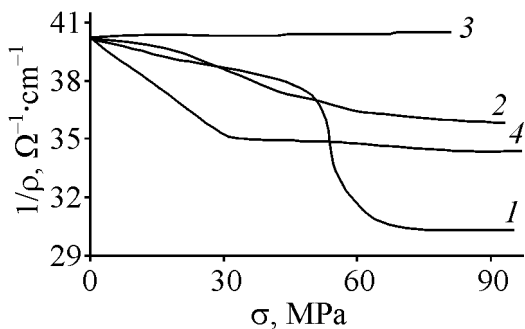
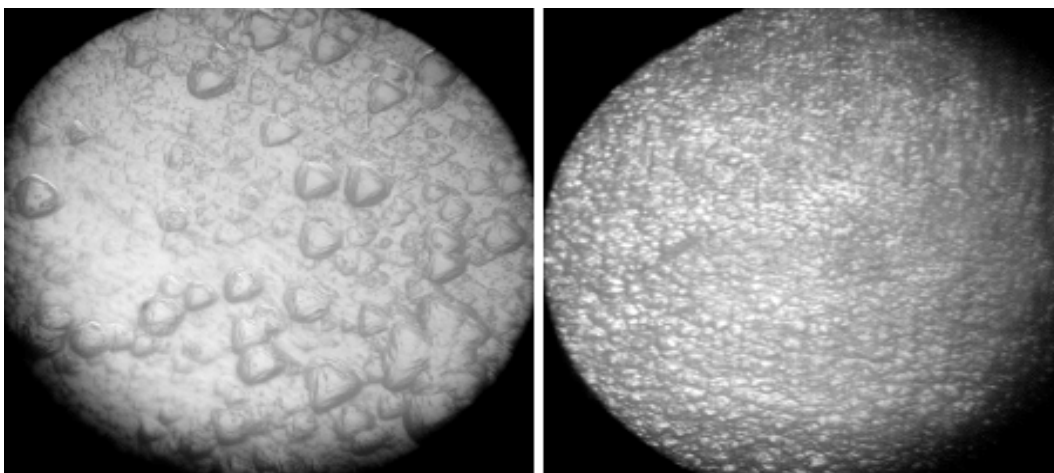


Рис. 1. Зависимость величины удельной электрической проводимости $1/\rho$ от величины приложенного механического напряжения σ для *p*-Si (1), *n*-Si (4) в условиях КПД и *p*-Si (2), *n*-Si (3) в условиях ЭПД при $T = 760^\circ\text{C}$ в течение 25 min

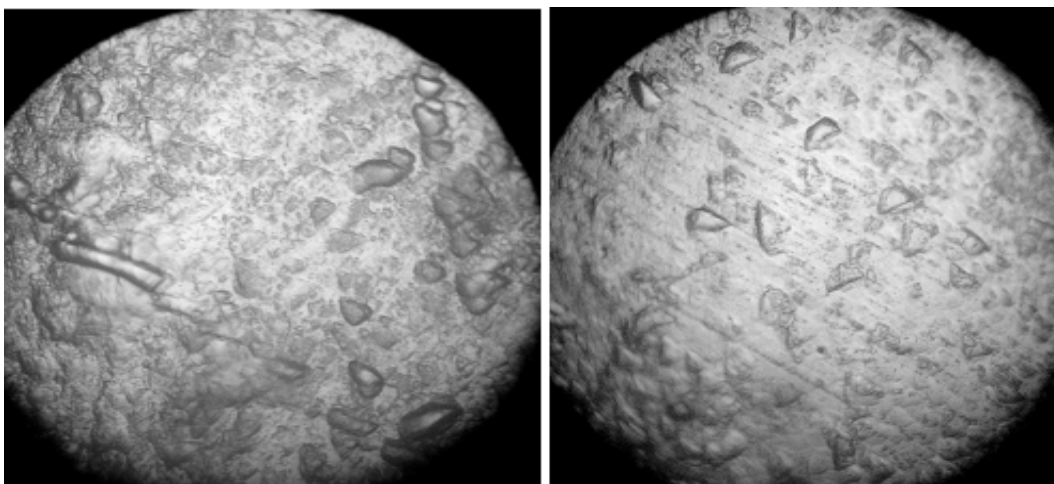
у p -Si в условиях КПД. А вот кривая 3 свидетельствует об отсутствии изменения удельного сопротивления с ростом приложенного давления в условиях ЭПД. В случае снятия механической нагрузки с образца проводимость вновь начинает расти, как и до сжатия монокристалла. Таким образом, из полученных кривых (рис. 1) следует, что приложенная нагрузка наиболее эффективно влияет на изменение удельного сопротивления p -Si как при КПД, так и при ЭПД.

Рис. 2 дает информацию о формировании поверхностного рельефа исследуемых образцов. Протяженность дислокаций на рис. 2, I имеет различные размеры. На поверхности образца p -Si в условиях воздействия КПД наблюдается наличие системы неупорядоченных ямок травления (рис. 2, I, a), указывающих на заметную протяженность поверхностных дислокаций.

I



II



a

б

Рис. 2. Фотографии поверхностей монокристаллов Si p -типа (I) и n -типа (II), подвергнутых при $T = 760^\circ\text{C}$ и $t = 25 \text{ min}$: *a* – КПД (плотность дислокаций $\sim 1.7 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-2}$), *б* – ЭПД (плотность дислокаций $\sim 1.0 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2}$); ($\times 500$)

Морфология и характер распределения дефектной структуры образца p -Si в условиях воздействия ЭПД несколько иные. Здесь наблюдаются упорядоченно расположенные дислокации, имеющие малую протяженность и образующие своего рода однородно-ориентированную дислокационную структуру образца (рис. 2, I, б). Для n -Si в условиях ЭПД (рис. 2, II, а) характерно более равномерное распределение дислокаций на поверхности в отличие от n -Si, полученного в условиях КПД (рис. 2, II, б). Кроме того, на поверхности n -Si, полученной в условиях ЭПД, заметны отдельные линии скольжения дислокаций. С дислокационно-кинетической точки зрения все полученные структуры являются результатом процесса самоорганизации дислокаций, протекающего на тех или иных структурных уровнях [6]. Отличия в величинах достигнутых деформаций n - и p -Si при ЭПД и КПД можно объяснить, по всей вероятности, следующими факторами:

- отжиг печью сопротивления n -Si в процессе КПД уменьшает плотность дислокаций. При этом большая концентрация электронов, передавая часть своего импульса дислокациям, увлекает их за собой. Несмотря на движение системы электрон–дислокация против направления приложения постоянного электрического поля, это приводит к эффектам снижения сопротивляемости монокристалла n -Si в отличие от p -Si;

- в случае с ЭПД в n -Si значительная плотность положительно заряженных дислокаций, играющих роль акцепторов, двигаясь по направлению электрического поля, взаимодействует со встречным потоком электронов, что приводит к замедлению пластического течения в монокристалле. Возникает обратный эффект – уменьшение пластических и рост прочностных свойств n -Si.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что при равных с КПД и ЭПД условиях по нагрузке и температуре добиться заметной величины пластичности в процессе ГПД невозможно. Кроме этого, оба предложенных способа позволяют значительно снизить предел пластического течения как по температуре, так и по приложенному механическому напряжению. Из полученных данных выявлены заметные различия в пластификации образцов n - и p -Si, подвергнутых воздействию КПД и ЭПД (таблица). При одинаковой температуре, нагрузке, времени деформирования значительно эффективнее идет деформация у монокристаллов кремния p -типа в условиях ЭПД, а в случае с КПД наблюдается значительное сопротивление пластическому деформированию образцов. У кремния n -типа наблюдаются обратные эффекты пластичности в тех же условиях. Установлено также, что важным преимуществом ЭПД перед ГПД и КПД является возможность уменьшения загрязнения образца примесями, выделяемыми элементами конструкций и материалом печи, что важно для технологии получения чистых полупроводниковых материалов. Воздействие КПД и ЭПД на электрические свойства полупроводника n - и p -Si приводит в конечном итоге к уменьшению его удельного сопротивления по сравнению с исходным

Таблица

Изменение физико-механических параметров *n*- и *p*-Si с исходным $\rho = 30 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ при $T = 760^\circ\text{C}$ за $t = 25 \text{ min}$

Способ деформации	Величина деформации ε , %		Удельное сопротивление после деформации ρ , $\Omega\cdot\text{cm}$	
	<i>p</i> -тип	<i>n</i> -тип	<i>p</i> -тип	<i>n</i> -тип
КПД	2.3	2.9	1	20
ЭПД	3.8	2.1	18	29

(недеформированным) образцом, но в случае с КПД удельное сопротивление меняется сильнее, чем при ЭПД. По сравнению с результатами, полученными в работе [7] в условиях ГПД (без нагрева током), наблюдается обратная картина – рост удельного сопротивления Si.

1. *J. Coelho, G. Patriarche, F. Glas, G. Saint-Girons, I. Sagnes*, J. Phys.: Condens. Matter **16**, 7941 (2004).
2. *В.Г. Говорков*, Кристаллография **5**, 789 (1961).
3. *Ю.В. Баранов, О.А. Троицкий, Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин*, Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы, МГИУ–ИМАШ РАН, Москва (2001).
4. *А.Л. Полякова*, Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов, Энергия, Москва (1979).
5. *Ю.Т. Левицкий*, Макроскопические дефекты кристаллической структуры и свойства материалов, Наука, Москва (1988).
6. *Г.А. Малыгин*, ФТТ **51**, 1709 (2009).
7. *W.C. Ellis, E.S. Greiner*, Phys. Rev. **92**, 1061 (1953).

A.R. Velikhanov

PLASTICITY OF THE SI SINGLE CRYSTALS OF *n*- AND *p*-TYPES IN THERMAL AND ELECTRICAL FIELDS

In single crystals of silicon of *n*- and *p*-type, the peculiarities of deformation characteristics under conditions of both joint action of electrical and thermal fields and electric current only are tested. There is a small increase in specific resistance of Si with increasing pressure applied. For the *p*-Si samples under combined action of thermal field and electric current at compression (combined plastic deformation – CPD), an increase in resistance to deformation was found, while under the influence of electric current only (electroplastic deformation – EPD), an increase of plasticity was detected. Samples of *n*-Si demonstrated an opposite effect: under combined action of the thermal field and electric current, compression enhances plasticity, while under the influence of the electric current only, an increase of the strength properties occurs. The resistance to deformation dramatically increases in the conditions of hot plastic deformation (HPD); in this case the sample is compressed under the influence of the thermal field only. When compared with efficiency and EPD load and temperature, it is impossible to achieve substantial magni-

tude of plasticity in the process of the HPD. Surface microstructure of the deformed samples were studied. They noticeably differ in morphology and distribution of dislocations on the surface. Impact efficiency and EPD effect on the electrical properties of the *n*- and *p*-Si semiconductors, results in a change in resistivity compared to the original model: *n*-Si demonstrates the growth of the resistivity, and *p*-Si resistivity drops. With an efficiency, the resistivity varies stronger than at EPD. Possible physical explanation of the observed phenomena is suggested.

Keywords: silicon, plasticity, dislocations, thermal field, electrical field

Fig. 1. Applied mechanical stress σ dependence of the conductivity $1/\rho$ for *p*-Si (1), *n*-Si (4) in terms of efficiency and *p*-Si (2), *n*-Si (3) under EPD at $T = 760^\circ\text{C}$ for 25 min

Fig. 2. Photos of the surface of the Si single-crystals of *p*-type (I) and *n*-типа (II) subjected to: *a* – CPD (the density of dislocations $\sim 1.7 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-2}$), *b* – EPD (the density of dislocations $\sim 1.0 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2}$) at $T = 760^\circ\text{C}$ and $t = 25 \text{ min}$; ($\times 500$)