

ФІЗИКА. МЕТОДИКА ВИКЛАДАННЯ ФІЗИКИ І АСТРОНОМІЇ В ЗОШ ТА ВНЗ

УДК 537.311.33

Надточий В.А., Хаперец Д.С., Шарап Р.А.

¹ доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики, ГВУЗ «ДГПУ»

²⁻³ студенты 4 курса физико-математического факультета, ГВУЗ «ДГПУ»

e-mail: fiziksgpu@ya.ua

ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЕВЫХ p-n-ПЕРЕХОДОВ

Исследованы электрические свойства кремневых *p-n*-переходов, деформируемых сжатием в условиях ступенчатого нагружения при 300 и 77 К.

Установлены две характерные области: ниже критического давления обратный ток *p-n*-перехода изменяется обратимо, выше — необратимо. Проведены исследования структуры деформированных *p-n*-переходов и температурных зависимостей обратного тока.

Ключевые слова: деформация, дислокация, обратный ток, энергетические уровни, дефекты структур

Введение

В работах [1-3, 9, 10] были исследованы структурно-кинетические закономерности микропластической деформации монокристаллического Si и Ge. Установлено, что в приповерхностных слоях этих полупроводников глубиной около 10 мкм в интервале механических напряжений (20-100) МПа при 20 °С происходит зарождение дислокаций. Представляло интерес изучить влияние низкотемпературной деформации на свойства *p-n*-переходов в тех случаях, когда их глубина залегания находится в пределах пластически деформированного слоя.

© Надточий В.А., Хаперец Д.С., Шарап Р.А., 2016

Основная часть

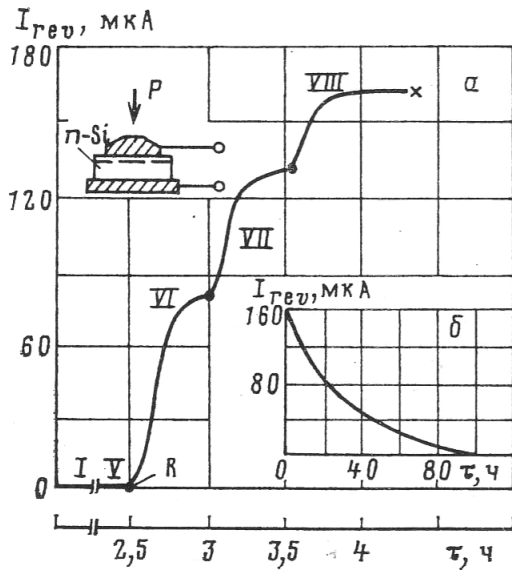


Рис. 1

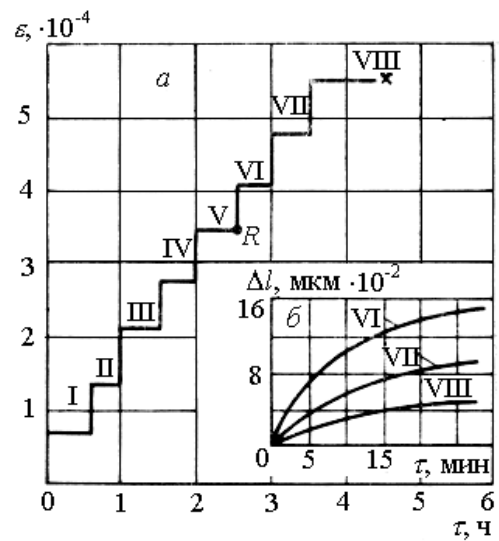


Рис. 2

Рис. 1: Зависимость обратного тока I_{rev} кремниевого $p-n$ -перехода от времени при 300 К: a — изменение обратного тока в процессе ступенчатого нагружения и схема деформации; b — изменение обратного тока нагруженного $p-n$ -перехода при длительной выдержке при 300 К

Рис. 2: Кривая ступенчатой ползучести при сжатии вдоль [111] при 300 К: a — ступенчатая деформация, величина ступени нагружения $\Delta P = 10$ МПа; b — переходная ползучесть, кривые сведены к общему началу отсчёта без скачков деформации при нагружениях, цифры у кривых обозначают номера ступеней нагружения

Материалы и методика. В настоящей работе исследовались диффузионные кремниевые $p-n$ -переходы с глубиной залегания ~ 5 мкм на базе шайб диаметром 5 и толщиной 0,2 мм. $P-n$ -переходы изготавливались диффузией бора ($N_B \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) в плоскость (111) монокристаллов $n\text{-Si}$ ($\langle p \rangle$, $N_p \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) с плотностью дислокаций в исходных монокристаллах $N \leq 2 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2}$. Для устранения влияния на электрические характеристики $p-n$ -переходов поверхностных утечек и для стабилизации поверхности $p-n$ -переходы окружались диффузионными охранными кольцами (кольцами бора) и защищались пиролитическим окислом SiO_2 . Омические контакты создавались пайкой к вольфрамовым компенсаторам, что исключало появление механических напряжений в полупроводниковом материале при изменениях температуры вследствие разности теплового коэффициента расширения кремния и кристаллодержателя.

Переходы деформировались сжатием по схеме, указанной на рис. 1. В процессе сжатия снимались зависимости обратного темнового тока $p-n$ -перехода от времени при различных нагрузках.

Кроме того, для установления взаимосвязи между изменениями электрических и деформационных характеристик испытывались на сжатие вдоль [111] образцы n -Si, имеющие форму прямоугольных призм размерами $3 \times 3 \times 10$ мм³. Боковые поверхности представляли кристаллографические плоскости типа (110), (112) и (111), а наибольшее измерение (10 мм) совпадало с направлением [111]. Режим деформации выбирался один и тот же: сжатие при ступенчатом режиме нагружения. Величина ступени нагружения ΔP выбиралась равной 10 МПа. Время выдержки на каждой ступени составляло 30 мин. Деформирование осуществлялось на специально разработанной установке, позволяющей регистрировать очень малые изменения длины образцов. Чувствительность датчика деформации составляла 0,004 мкм. Имелась возможность деформировать образцы при 300 и 77 К.

Результаты и их обсуждение. Деформация. Зависимость деформации сжатия образца Si во времени при ступенчатом режиме нагружения при 300 К представлена на рис. 2, *а*. Здесь каждой ступени нагружения $\Delta P = 10$ МПа соответствует скачкообразное приращение деформации, причем выдержка образца под напряжением на каждой ступени до V включительно не дает заметной микропластичности. На VI ступени нагружения (выше R) при общей нагрузке $P = 60$ МПа после скачка деформации регистрируется деформация микроползучести (рис. 2), затухающая по логарифмическому закону [1, 3]. График этой закономерности без учета скачка деформации при нагружении показан отдельно (рис. 2, *б*) ввиду малости общей микропластической деформации. На последующих VII и $VIII$ ступенях нагружения общая величина микродеформации ползучести уменьшается (кривые VII , $VIII$). Таким образом на ступенчатой кривой можно выделить две области: до R , где образец Si деформируется чисто упруго, и область выше этой точки, где существует микропластичность, обусловленная появлением дислокаций. На рис. 3, *а* показана дислокационная структура, снятая на глубине 5 мкм от нагруженной поверхности образца Si. Видны ямки травления от отдельных полупетель, выходящих на поверхность.

Электрические свойства. Рассмотрим теперь электрические свойства деформируемого при комнатной температуре p - n -перехода. Различают две группы эффектов изменения обратного тока при деформации кремния [4, 5]: эффекты, обусловленные изменением ширины запрещенной зоны, и за счет возникновения центров генерации-рекомбинации. Учитывая различие концентрации примесей n - и p - типа ($\approx 10^2$), образующих p - n -переход, можно с достаточным основанием считать, что расширение области объемного заряда при наложении обратного смещения будет происходить в основном

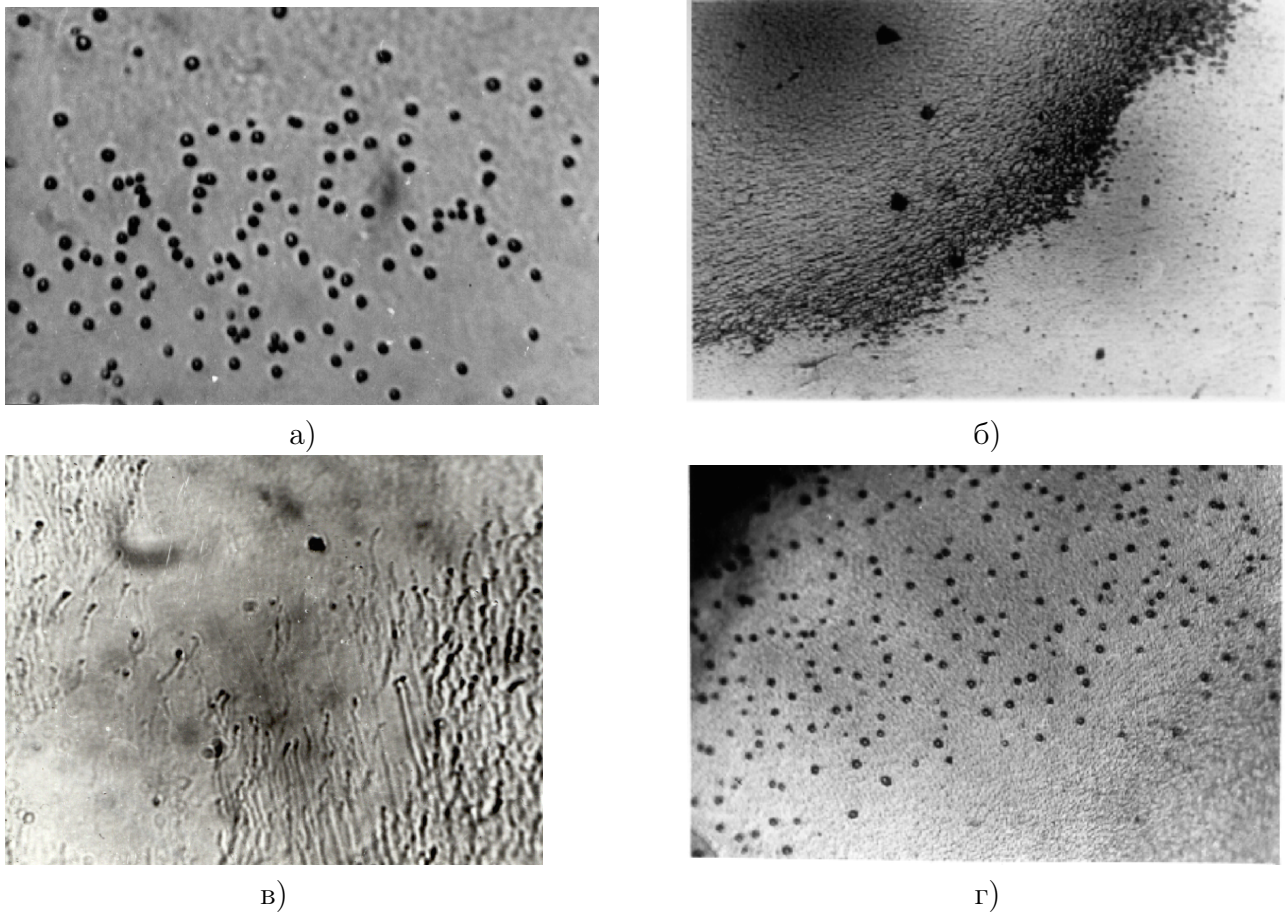


Рис. 3: Дислокационная структура Si: *a* — после деформации на глубине 5 мкм от нагруженной поверхности; $\times 2000$; *б-г* — *p-n*-переход, деформированный при 70 К; *б* — вблизи выхода на поверхность диффузии; $\times 800$; *в* — граница раздела пластически деформированной области; $\times 4000$; *г* — область выхода на поверхность диффузии; $\times 2000$

в *n*-область, и, следовательно, уровень обратного тока (дрейфовый ток) *p-n*-перехода будет определяться положительно заряженными носителями — неосновными носителями для *n*-области. При чисто упругой деформации *n*-Si вдоль [111] концентрация носителей заряда должна изменяться незначительно [3, 6]. Действительно, обратный ток при ступенчатом нагружении *p-n*-перехода остается приблизительно постоянным ($I_{rev} = 0,1$ мкА) до нагружения $P = 50$ МПа, т.е. до точки *R* на кривой $I_{rev}(\tau)$ (рис. 1, *a*). Зависимость снималась при постоянном обратном напряжении 30 В. На VI ступени нагружения обратный ток начинает резко возрастать с постепенным выходом на насыщение. Подобное нарастание тока наблюдается также на VII и VIII ступенях. Для получения полной информации и проверки воспроизводимости результатов испытания проводились также на *p-n*-переходах, полученных по технологии изготовления Д-215, Д-242, Д-243, Д-245, Д-246. Закономерности изменения обратного тока оказались приблизительно таки-

ми же, с той лишь разницей, что величина тока в конце испытаний несколько отличалась от образца к образцу по абсолютному значению.

Сравнение результатов деформирования *p-n*-переходов и призматических образцов, а также структурные данные позволяют сделать вывод, что резкое возрастание обратного тока при нагрузке 60 МПа обусловлено появлением дислокаций в области *p-n*-перехода. Обратный ток при этом определяется в основном генерационной составляющей, т.е. обусловлен тепловой генерацией в области перехода электронно-дырочных пар на центрах, уровни энергии которых находятся вблизи середины запрещенной зоны [7].

Характерным для изменения I_{rev} сразу после ступенчатого нагружения (рис. 1, а) является наличие инкубационного периода, где темп роста тока замедлен. Это можно объяснить тем, что для достижения основной массой дислокаций, генерируемых в основном с поверхности, области *p-n*-перехода требуется некоторое время. После затухания ползучести плотность дислокаций, пересекающих *p-n*-переход, остается постоянной и ток в первом приближении не меняется. Подобные закономерности изменения I_{rev} наблюдаются и на последующих ступенях нагружения, но поскольку с увеличением нагрузки величина приращения микропластической деформации и приращения плотности дислокаций уменьшается, рост тока также ограничивается. При указанных испытаниях он достигает значения ~ 160 мкА и сохраняется сразу после снятия нагрузки. В процессе длительной выдержки образца при комнатной температуре наблюдается постепенное снижение обратного тока (рис. 1, б). Через 5-6 суток он становится приблизительно равным обратному току до деформации (доли миллиампера). Однако при повторном нагружении ток снова постепенно нарастает. Наблюдается электрическая «ползучесть».

Изменение электрической активности дислокаций при длительной выдержке образцов обусловлено, по-видимому, оседанием вдоль дислокаций точечных дефектов. Дислокации остаются относительно чистыми только непосредственно после деформации. С течением времени порождаемые самой движущейся дислокацией вакансии, примесные или собственные дислоцированные атомы, оказавшиеся вблизи дислокации, будут перемещаться к ней, частично снимая упругие напряжения и понижая ее генерационную активность. Повторное нагружение вызывает освобождение дислокаций от этих дефектов. Этими процессами можно объяснить также изменение вида обратных ветвей вольтамперных характеристик *p-n*-перехода (рис. 4), снятых до деформации (1), после испытаний (2) и разных по длительности выдержек (3, 4). Исследования показали, что если к разгруженному *p-n*-переходу сразу

приложить большое обратное напряжение (100 – 150) В, то нарастание тока не ограничивается и переход через некоторое время пробивается за счет образования на дислокациях микроплазм [7, 9, 10].

Испытания отдельных образцов кремния при 77 К и промежуточных температурах до комнатной показали, что критическое напряжение, соответствующее началу зарождения новых дислокаций в кремнии, слабо зависит от температуры. Глубина пластически деформированного слоя при 77 К приблизительно такая же (8 – 10) мкм, как и при 300 К, если условия деформирования сохраняются те же.

Структура. Представляло интерес провести структурные исследования *p-n*-переходов, деформированных при 77 К, изучить влияние введенных при этом дислокаций на величину обратного тока и характер изменения электрической активности дислокаций в температурном интервале 77 – 300 К.

Кремниевый *p-n*-переход деформировали при 77 К в ступенчатом режиме нагружения; полная нагрузка на переход через 4 ч испытаний доводилась до 100 МПа. После разгрузки образец за 20 с отогревался до комнатной температуры. При напряжении 30 В обратный ток при 300 К составлял 160 – 180 мкА, т.е. был приблизительно таким, как сразу после деформирования при 300 К. Уже через 20 мин выдержки при 300 К обратный ток, уменьшаясь по экспоненциальному закону, спадал до 13 % от начального значения. Отсюда следует, что сохранить чистые дислокации при 300 К даже на время измерений невозможно. Обратный ток образца, как оказалось, можно сохранить без существенного изменения на время 1 ч при 77 К. Поэтому температурные зависимости обратного тока, проводимости, э.д.с. Холла, подвижности носителей и др. можно снимать сразу после разгрузки образцов при этой температуре.

Структурные исследования деформированного при 77 К *p-n*-перехода проводились следующим образом. Со стороны базы *p-n*-переход химически травливался в смеси HNO_3 и HF до выхода на диффузионную поверхность так, что в месте выхода создавался клин с очень малым углом. Затем *p-n*-переход кратковременно травился на дислокации по методике, описанной в [3]. На рис. 3 представлены металлографические структуры, снятые в области диффузионного слоя вблизи границы выхода на поверхность кристалла. Видны (рис. 3, б) две области: пластически деформированная и область, практически свободная от дислокаций. При большем увеличении (рис. 3, в) наблюдаются отдельные дислокации, ориентированные почти параллельно поверхности. Эта структура снята на границе двух указанных областей. Глубина фронта пластической деформации находится на расстоянии 10 мкм от

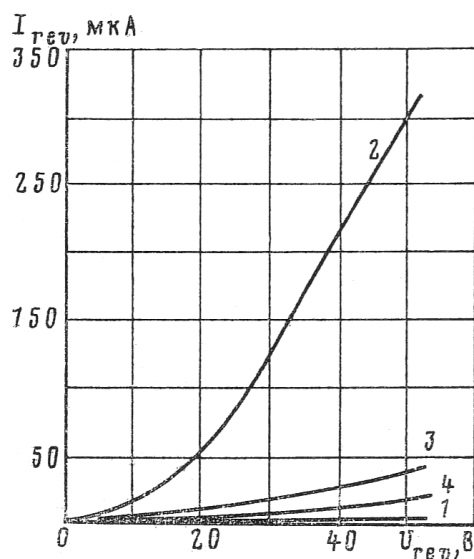


Рис. 4

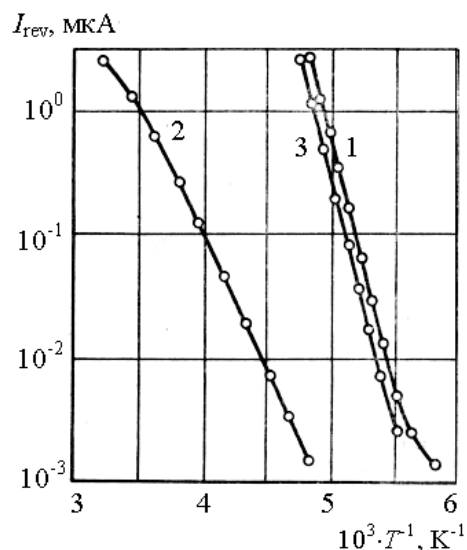


Рис. 5

Рис. 4: Зависимость обратного тока I_{rev} от напряжения U_{rev} кремниевого p - n -перехода: 1 — зависимость, снятая до деформации; 2 — после испытания на ступенчатую ползучесть; 3, 4 — кривые, полученные после выдержки p - n -перехода при 300 К в течение 3 и 6 сут. соответственно

Рис. 5: Температурная зависимость обратного тока I_{rev} : 1 — снятая сразу после испытания на ступенчатую ползучесть при 77 К; 2 — после выдержки при 300 К в течение 3 сут.; 3 — после повторной выдержки под давлением 100 МПа в течение 20 мин при 70 К

поверхности диффузии. Плотность дислокаций $N_d = (10^4 - 10^6) \text{ см}^{-2}$. На тех участках, где дислокации выходят под большим углом к поверхности, вытравливаются парные ямки от каждой полупетли (рис. 3, а, з). Характерно, что на дислокациях, введенных в Si при низких температурах (300 К и ниже), вытравливаются неглубокие ямки, что обусловлено очень слабой насыщенностью их примесной атмосферы [3, 9].

Энергетические уровни. Положение глубоких энергетических уровней, которые определяют величину I_{rev} , может быть найдено путем измерения его температурной зависимости. Такие измерения проводились на деформированном при 77 К p - n -переходе сразу после снятия нагрузки и отогреве до 300 К. Для этого же перехода снимались температурные зависимости I_{rev} после выдержки при 300 К без нагрузки и после повторной кратковременной деформации (рис. 5).

Обработка результатов осуществлялась по формуле, применимой в тех случаях, когда обратный ток определялся генерационными процессами на генерационно-рекомбинационных (gr) центрах

$$I_{rev} = -\frac{eWn_i}{2\sqrt{\tau_n\tau_p}} \text{ch} \left[\frac{E_t - E_i}{kT} + \frac{1}{2} \ln \frac{\tau_n}{\tau_p} \right]$$

где W — ширина p - n -перехода; τ_n , τ_p — времена жизни неосновных носителей в объеме электронной и дырочной областей соответственно; E_t — энергетический уровень gr -центра.

Для 1-й и 3-й зависимости $E_t = 0,68$ эВ, для 2-й — $0,4$ эВ. Первый результат близок к значению $E_t = 0,64$ эВ для дислокационного уровня в кремнии, найденного Веланом (см. [7, с. 383]). Второй результат согласуется с данными [8], полученными при высокотемпературной деформации n -Si ($0,4$ и $0,44$ эВ). Энергия уровня E_t отсчитывается от потолка валентной зоны. Сравнение с результатами [8] дает возможность предположить, что уровень gr -центра $0,4$ эВ связан с комплексами на основе дислокаций. В комплексы входят точечные дефекты, захваченные дислокациями после длительной выдержки образца при 300 К. Дислокации, по-видимому, освобождаются от этих дефектов при повторной деформации (рис. 5, кривая 3) и температурные зависимости обратного тока 1 и 3 почти совпадают.

Заключение

Предложенная методика введения относительно «чистых» дислокаций при низких температурах дает возможность уточнить наши представления об их электрической активности с привлечением других электрофизических измерений.

Литература

1. Надточий В.А., Алехин В.П., Нечволод Н.К., Шоршоров М.Х. О закономерностях пластической деформации кремния при комнатной температуре // Физика и химия обраб. материалов. — 1974. — № 6. — С. 103–107.
2. Шоршоров М.Х., Надточий В.А., Нечволод Н.К. и др. Низкотемпературная деформация в монокристаллах Ge и Si. — В кн. Монокристаллы тугоплавких и редких металлов, сплавов и соединений. М.: Наука, 1977. — 150 с.
3. Надточий В.А. Исследование закономерностей низкотемпературной пластической деформации монокристаллического германия и кремния. Автореф. дис. на соискание уч. ст. канд. физ.-мат. наук. Киев: ИМФ АН УССР, 1975.
4. Полякова А.Л., Шкловская-Корди В.В. Влияние деформаций на свойства кремниевых p - n -переходов. — ФТТ. — 1966. — Т. 8, № 1. — С. 208.
5. Полякова А.Л., Шкловская-Корди В.В. Электрические характеристики кремниевых p - n -переходов, подвергнутых неоднородной деформации. Л.: Наука, 1969. — 141 с.

6. *Киреев П.С.* Физика полупроводников. М.: Высш. шк., 1969. — 348 с.
7. *Матаре Г.* Электроника дефектов в полупроводниках. М.: Мир, 1974. — 126 с.
8. *Еременко В.Г., Никитенко В.И., Якимов Е.В.* Исследование природы диодного эффекта на дислокациях в кремнии. — ЖЭТФ, 1974. — Т. 67, № 3. — С. 1148.
9. *Надточий В.А.* Микропластичность алмазоподобных кристаллов (Si, Ge, GaAs, InAs): Дисс. ... доктора физ.-мат. наук: 01.04.07 / Харьковский национальный университет. — Харьков, 2006. — 467 с.
10. *Nadtochiy V., Golodenko N., Nechvolod N.* Recombination of non-equilibrium charge carriers injected into Ge through intermediate defective layer // Functional Materials. — 2005. — V.12, № 1. — P. 45–50.

Nadtochiy Viktor A., Khaperets Dmytro S., Sharap Roman A.

Donbas State Teachers' Training University, Slovians'k, Ukraine.

Effect of low-temperature deformation of the electrical properties of silicon $p - n$ -junctions

The electrical properties of the silicon p-n-junctions, deformable in compression under the step of loading at 300 and 77K. Established two distinct areas: lower reverse current p-n-junction critical pressure changes reversibly, above – is irreversible. Investigations of the structure of deformed p-n-junction temperature and reverse current dependencies.

Keywords: *strain, dislocation, reverse current, the energy levels of structural defects.*
