

©1994 г.

## ИЗМЕНЕНИЯ АНИЗОТРОПИИ РАССЕЯНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА В *n*-Si, ВОЗНИКАЮЩИЕ В ОБЛАСТИ КОМНАТНЫХ ТЕМПЕРАТУР ПОД ВЛИЯНИЕМ ВЫСОКОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

*П.И.Баранский, Е.Н.Видалко*

Институт физики полупроводников Академии наук Украины,  
252650, Киев, Украина  
(Получена 6 декабря 1993 г. Принята к печати 13 января 1994 г.)

На монокристаллах *n*-Si, исходных и подвергнутых воздействию высокого гидростатического давления (10 кбар, 7 суток), проведены измерения удельного сопротивления при направленном давлении, параллельном току. Установлено, что гидростатическое давление, не внося существенных структурных нарушений в кристалл, влияет на анизотропию рассеяния электронов.

Известно, что прямые электронно-микроскопические и рентгенопографические методы исследования позволяют выявлять упорядочение дислокационной структуры в пластически деформированных металлах, которые подвергаются деформации или отжигу (в области температур 300 ÷ 500 °С) под высоким гидростатическим давлением (ВГД) [1-4].

Упорядочение дислокационной структуры, наблюдаемое при деформировании металлов в условиях ВГД, обуславливается повышением энергии дислокаций (и образуемых ими упругих полей) в гидростатически сжатых кристаллах, а снижение подвижности дислокаций, возникающее при этом, компенсируется возрастанием их плотности под влиянием высокого давления [3].

Естественно, что подобным образом некоторую неравновесность создают также легирующие и остаточные примеси в бездислокационных полупроводниковых кристаллах, поскольку в непосредственной окрестности этих атомов в кристаллической решетке полупроводника возникают механические напряжения (положительные или отрицательные, что определяется величиной их тетраэдрических радиусов по сравнению с тетраэдрическими радиусами атомов кристаллической решетки).

В связи с изложенным, а также в связи с результатами по эффекту «барополигонизации» в металлах [1] возникает вопрос: можно ли с помощью ВГД перевести бездислокационный полупроводник (например,  $n$ -Si) с легирующими [или (и) остаточными] примесями в более равновесное состояние? Следует подчеркнуть, что здесь речь идет об изменениях лишь в локальных полях механических напряжений в окружении примесных центров, следовательно о возможных изменениях в их электрических характеристиках, а совсем не о существенных изменениях в структуре полупроводника под влиянием ВГД. ВГД прикладывается к кристаллу на значительное время (порядка нескольких суток), однако, как правило, при достаточно низких (например, комнатных) температурах. Именно электрофизические методы исследования могут оказаться чувствительными в условиях, при которых еще никаких существенных структурных изменений в кристалле не происходит.

Изменения в бездислокационном кристалле с легирующими [и (или) остаточными] примесями будут возникать не только вследствие локальных механических напряжений, о которых шла речь, но также и в результате уменьшения термодинамически равновесной концентрации межузельных атомов и вакансий ( $C_V$ ) под воздействием ВГД, что неминуемо приводит к пересыщению ими объема кристалла, поскольку в соответствии с [4-6]

$$C_V(P) \sim \exp\left(-\frac{Pv}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $P$  — давление, а  $v$  — активационный объем образования вакансий [4]. Это обстоятельство неминуемо должно найти отражение в межпримесном [и (или) дефектно-примесном] взаимодействии, что в свою очередь может привести к соответствующим изменениям в эффективности рассеяния носителей тока и в анизотропии этого рассеяния.

Для экспериментальной проверки высказанных предположений был использован бездислокационный трансмутационно-легируемый примесью фосфора кристалл  $n$ -Si, выращенный по методу Чохральского (с остаточной примесью кислорода  $N_0 \sim 1.6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ), который прошел (после облучения тепловыми нейтронами) стандартный технологический отжиг (в течение 2 ч при  $800^\circ \text{C}$ ).

На образцах с разной продольной ориентацией, приготовленных из описанного выше кристалла, измерялись изменения удельного сопротивления  $\rho(X)/\rho_0$  при воздействии направленным давлением  $X$  (при токе  $J$ ) в условиях  $X \parallel J \parallel \langle 100 \rangle$ , а также  $X \parallel J \parallel \langle 111 \rangle$  как до, так и после выдержки их в барокамере, в которой обеспечивалась подача на образцы гидростатического давления до  $P=10$  кбар в течение 7 сут. Результаты этих исследований приведены на рис. 1 и 2.

Прежде чем перейти к обсуждению этих результатов, следует заметить, что выдержка всех образцов в барокамере (в течение 7 сут при  $T = 300 \text{ K}$ ) не привела к изменению основных параметров, выходящих за пределы погрешности эксперимента (при  $77 \text{ K}$  концентрация электронов  $n = 6.4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , подвижность  $\mu = 21400 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , удельное сопротивление  $\rho = 4.56 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ).

Вместе с тем такая обработка образцов ВГД (независимо от того, проводились или не проводились перед этим на них измерения  $\rho(X)$ )

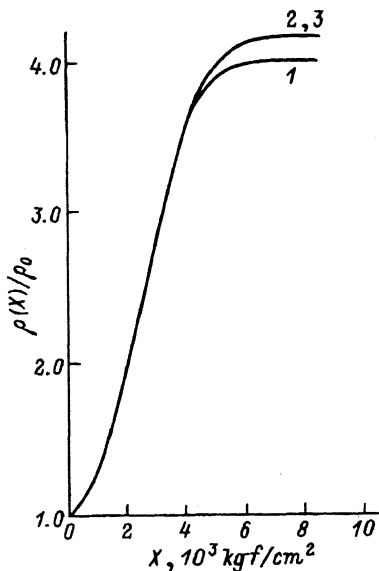


Рис. 1. Зависимости  $\rho(X)/\rho_0 = f(X)$ ; измеренные в условиях  $X \parallel J \parallel \langle 100 \rangle$  на  $n$ -Si при 77.4 К:

1 — исходный образец; 2 — образец после измерения при воздействии направленной упругой деформации (1) и выдержки под ВГД  $P = 10$  кбар при 300 К; 3 — образец только после выдержки под ВГД  $P = 10$  кбар при 300 К.

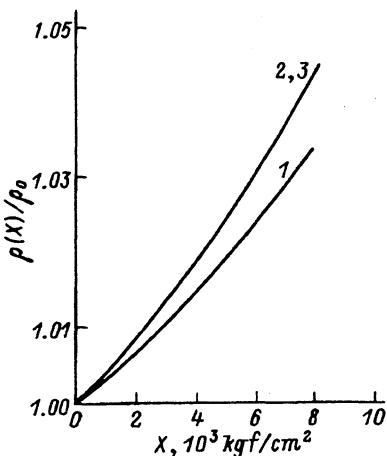


Рис. 2. Зависимости  $\rho(X)/\rho_0 = f(X)$ , измеренные в условиях  $X \parallel J \parallel \langle 111 \rangle$  на  $n$ -Si при 77.4 К:

1 — исходный образец; 2 — образец после измерения при воздействии направленной упругой деформации (1) и выдержки под ВГД  $P = 10$  кбар при 300 К; 3 — образец только после выдержки под ВГД  $P = 10$  кбар при 300 К.

при направленной упругой деформации) неминуемо приводила хотя бы в некоторой области  $X$ , как это видно из рис. 1, к заметному смещению в сторону возрастания зависимости  $\rho(X)$  по сравнению с той, которая была получена на образце, не подвергавшемся воздействию гидростатического давления.

Исходя из того, что кристалл, из которого были приготовлены опытные образцы, был бездислокационным, а направленное (и тем более — гидростатическое) давление до  $8 \cdot 10^3$  кгс/см<sup>2</sup> (до 10 кбар) было явно недостаточным для того, чтобы вызвать структурные нарушения в кристалле, наблюдаемые изменения в  $\rho(X)/\rho_0$  на рис. 1 следует рассматривать как связанные со снижением анизотропии рассеяния носителей тока.

Действительно, поскольку значением

$$\lim_{X \rightarrow \infty} \rho^{(100)}(X) = \rho_{\infty}$$

(т.е. величиной удельного сопротивления в области насыщения зависимостей рис. 1) определяется величина

$$K = \frac{3}{2} \frac{\rho_{\infty}}{\rho_0} - \frac{1}{2} \equiv \frac{K_m}{K_{\tau}}, \quad (2)$$

то при  $K_m = \frac{m_{\parallel}}{m_{\perp}} = \text{const}$  возрастанию  $K$  (под влиянием гидростатического давления) может соответствовать только снижение  $K_{\tau} = \frac{\langle \tau_{\parallel} \rangle}{\langle \tau_{\perp} \rangle}$ .

Это является следствием примесно-дефектного взаимодействия, происходящего в условиях необычного низкотемпературного «отжига» ( $T \cong 300$  К), существенно стимулируемого гидростатическим давлением.

Естественно, эти рассуждения, имеющие прямое отношение к серии опытов с  $X \parallel J \parallel \langle 111 \rangle$ , непосредственно нельзя использовать для объяснения данных рис. 2, где природа пьезосопротивления, как показано в [7], совсем иная.

Авторы благодарны В.А.Климову за содействие в обработке образцов под гидростатическим давлением.

#### Список литературы

- [1] Е.Д. Мартынов, В.И. Трефилов, С.А. Фирстов, Б.И. Берсенев, Ю.Н. Рябинин. ДАН СССР, **176**, 1276 (1967).
- [2] В.И. Зайцев, О.В. Преснякова. В кн.: *Физика высоких давлений* (Киев, Наук. думка, 1979) с. 91.
- [3] В.И. Зайцев, В.А. Стрельцов, А.А. Добриков. В кн.: *Физика высоких давлений* (Киев, Наук. думка, 1979) с. 119.
- [4] Н.Н. Буйнов, Р.А. Караханян, Р.Р. Романова и др. *Физика металлов и металловедение*, **27**, 509 (1969).
- [5] Дж. Хиллард, Дж. Кан. В кн.: *Физика высоких давлений* (М., ИЛЛ, 1963) с. 232.
- [6] В.Л. Инденбом, А.Н. Орлов. *Физика металлов и металловедение*, **43**, 469 (1977).
- [7] P.I. Baranskii, V.Y. Kolomoets, S.S. Korolyuk. *Phys. St. Sol. (b)*, **106**, K109 (1983).

Редактор Л.В. Шаронова

---