

ПЬЕЗО-ХОЛЛ-ЭФФЕКТ В *p*-КРЕМНИИ

Тарасик М. И., Шварков Д. С., Янченко А. М.

Приведены результаты исследований пьезо-холл-эффекта в *p*-кремнии, легированном бором (Si), индием (Si <In>) и облученном электронами (Si <e>). Зависимости постоянной Холла от величины одноосной нагрузки в Si объясняются с учетом перераспределения легких и тяжелых дырок и изменения их эффективных масс.

Получены изменения положения уровня Ферми при одноосной деформации кристаллов Si <In> и Si <e>, поведение которых интерпретируется для Si <In> расщеплением уровня индия при снятии электронного вырождения, а в Si <e> — расщеплением уровня дефекта $E_v + 30$ эВ вследствие снятия ориентационного вырождения и конфигурационной перестройки дефекта. Определены скорости смещения компонент расщепления энергетических уровней дефектов.

Применение одноосных нагрузок позволяет получить сведения о свойствах симметрии электрически активных дефектов структуры в многодолинных полупроводниках с энергетическими уровнями, расположенными в верхней половине запрещенной зоны [1-3]. Представляет интерес получение подобной информации для дефектов с уровнями у валентной зоны.

В работе приведены результаты исследований поведения постоянной Холла R_H в условиях одноосной нагрузки P в кремнии, легированном бором ($1 \cdot 10^{15} \div 1 \cdot 10^{16}$ см⁻³), индием (до $1 \cdot 10^{17}$ см⁻³), а также облученном электронами (до $\Phi_e = 1 \cdot 10^{16}$ эл/см²). Температурные зависимости концентрации носителей заряда в Si <In> определялись дефектами с энергетическим уровнем $E_v + 0.16$ эВ, а в Si <e> — с $E_v + (0.30 \pm 0.02)$ эВ (рис. 1, а). Зависимости $R_H(P)$ в этих кристаллах снимались в области ионизации уровней, далекой от истощения.

Ход изменений $R_H(P)$ в Si при 80 К и $P \parallel \langle 100 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ (рис. 1, б, кривые 1, 2) качественно объясняется с учетом перераспределения легких и тяжелых дырок между соответствующими подзонами и перестройки их изоэнергетических поверхностей при деформации кристалла [4]. Количественного согласования можно ожидать при учете изменения механизмов рассеяния дырок в вырожденных зонах при одноосных нагрузках. При более высоких температурах (200 К) (рис. 1, б, кривые 3, 4) значительную роль играют переходы в область больших значений $E(k)$, где законы дисперсии более сложны и отличны от законов вблизи $k=0$ [4, 5].

Кривые 5, 6 и 7, 8 (рис. 1, б) характеризуют изменения $R_H(P)$ в Si <In> и Si <e> соответственно с учетом изменения холл-фактора $r_H(P)$ в исходном материале.

С использованием выражения для концентрации дырок в валентной зоне

$$p = N_v \exp(E_F/kT), \quad (1)$$

где N_v — эффективная плотность состояний, E_F — положение уровня Ферми, из соотношения $p(P)/p(0)$ определены зависимости изменения положения уровня Ферми ΔE_F от величины одноосной нагрузки, которые приведены на рис. 2, б. Учет $N_v(P)$ при этом проводился аналогично изменению $N_v(P)$ [2] с дополнительным вкладом изменения эффективных масс тяжелых дырок при больших деформациях [4] и уменьшения влияния подзоны легких дырок.

Аналогично [1] для Si, легированного индием, решено уравнение электронейтральности для случая расщепления уровня на две компоненты E_{A1} и E_{A2} с величиной $\Delta E_A = 1.9 \cdot 10^{-11}$ эВ/Па [6] для основных кристаллографиче-

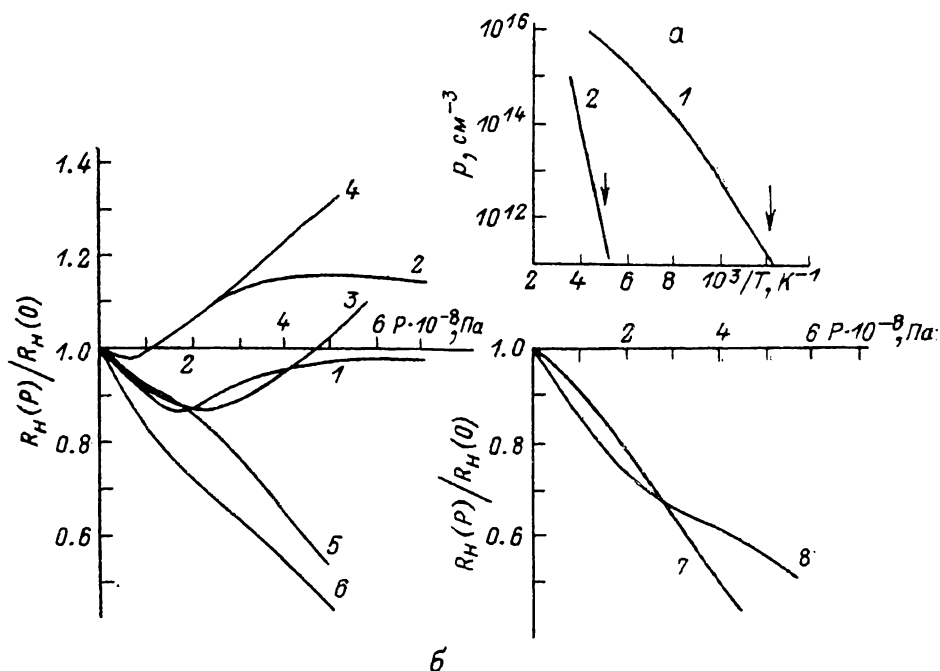


Рис. 1. Температурная зависимость концентрации дырок (а) и зависимости $R_H(P)$ (б). а) 1 — Si(In); 2 — Si(e); б) 1—4 — Si(B); 5, 6 — Si(In); 7, 8 — Si(e); T, K : 1, 2, 5, 6 — 80; 3, 4, 7, 8 — 200; 1, 3, 5, 7 — $P \parallel \langle 100 \rangle$; 2, 4, 6, 8 — $P \parallel \langle 111 \rangle$; 5—8 — с учетом изменения $R_H(P)$ в соответствующем исходном материале.

ских направлений с учетом снятия электронного вырождения. Сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей $\Delta E_F(P)$ (рис. 2, б, кривые 1—3) позволило однозначно определить скорости смещения компонент расщепления $\Delta E_{A1}(P)$ и $\Delta E_{A2}(P)$ (рис. 2, а) уровня индия по отношению к положению в недеформированном кристалле, которые приведены в таблице.

В облуженном электронами р-кремнии зависимость $\Delta E_F(P)$ в температурной области низа температуры уровня дефекта (200 К) при $P \parallel \langle 110 \rangle$ линейна, а для других направлений сжатия при $P \parallel \langle 100 \rangle$ и $P \parallel \langle 111 \rangle$ имеет нелинейный участок (рис. 2, б, кривые 4—6). Такое поведение $\Delta E_F(P)$ свидетельствует о сложной структуре дефекта и возможном наличии у него ориентационного вырождения. В этом случае при указанных значениях величин нагрузки происходит атомная переориентация дефекта в одну конфигурацию, в результате чего при дальнейшем увеличении нагрузки наблюдается одна компонента уровня дефекта, скорости смещения которой для основных кристаллографических направлений приведены в таблице. Тот факт, что $\Delta E_F(P)$ для $P \parallel \langle 110 \rangle$ не имеет нелинейного участка, может быть обусловлен тем, что это кристаллографическое направление является комбинацией направлений $\langle 111 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$, имеющих противоположные виды кри-

Тип дефекта	Направление P	$\Delta E_{A1} \cdot 10^{11}$, эВ/Па	$\Delta E_{A2} \cdot 10^{11}$, эВ/Па
In	$\langle 100 \rangle$	-0.20	1.70
	$\langle 111 \rangle$	-0.80	1.10
	$\langle 110 \rangle$	-0.11	1.89
PД	$\langle 100 \rangle$	-0.55	—
	$\langle 111 \rangle$	-0.70	—
	$\langle 110 \rangle$	-0.63	—

Примечание. ΔE_{A1} и ΔE_{A2} — скорости смещения расщепившихся компонент уровня дефекта относительно его положения в недеформированном кристалле без учета E_{se} .

визны на участке малых нагрузок, либо скорости смещения компонент так малы, что до переориентации дефекта сложно зафиксировать нелинейный участок изменения $\Delta E_F(P)$. Поскольку в литературе описано несколько моделей дефектов с энергетическими уровнями в интервале $E_v + (0.27 \div 0.33)$ эВ [7, 8], наличие ориентационного вырождения у радиационных дефектов с энергетическим уровнем $E_v + 0.30$ эВ с относительной легкостью переориентации в одну конфигурацию предполагает содержание вакансионных комплексов в их составе, отдающее, в свою очередь, предпочтение K -центрам (комплексам вакансия—кислород—углерод [7] или дивакансия—кислород—углерод [8]).

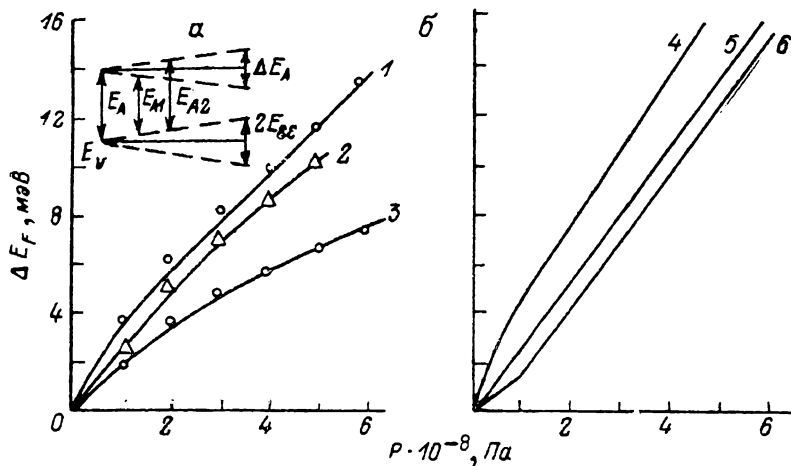


Рис. 2. Энергетическая диаграмма расщепления акцепторного уровня и валентной зоны (а) и зависимости $\Delta E_F(P)$ (б).

1—3 — Si(In) (80 K);

линии — расчет; 4—6 — Si(Se) (200 K); 1, 4 — $P \parallel \langle 100 \rangle$; 2, 5 — $P \parallel \langle 110 \rangle$; 3, 6 — $P \parallel \langle 111 \rangle$.

Таким образом, исследования пьезо-холл-эффекта в p -кремнии показали, что поведение уровня индия в кремнии в условиях одноосной нагрузки достаточно хорошо описывается с учетом снятия электронного вырождения, свидетельствующего о высокой симметрии дефекта. Для дефектов радиационного происхождения с энергетическим уровнем $E_v + 0.30$ эВ наиболее вероятны наличие ориентационного вырождения и их переориентация в одну конфигурацию при сравнительно малых величинах нагрузок, а также примесно-вакансионная их природа.

Список литературы

- [1] Тарасик М. И., Шварков Д. С., Янченко А. М. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 97—100.
- [2] Ахмед Шах Бахтери, Тарасик М. И., Шварков Д. С., Янченко А. М. // Вестн. БГУ. Сер. 1. Физ., мат., мех. 1987. № 3. С. 15—19.
- [3] Семенюк А. К., Назарчук П. Ф. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 7. С. 1331—1333.
- [4] Вир Г. Л., Пикус Г. Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М., 1969. 590 с.
- [5] Киреев П. С. Физика полупроводников. М., 1969. 590 с.
- [6] Chandrasekhar H. R., Fisher P., Ramdas A. K., Rodriguez S. // Phys. Rev. B. 1973. V. 8. N 8. P. 3836—3850.
- [7] Вопросы радиационной технологии полупроводников / Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, 1980. 296 с.
- [8] Lee Y. H., Corbett J. W., Brower K. L. // Phys. St. Sol. (a). 1977. V. 41. N 2. P. 636—647.

Белорусский
государственный университет
им. В. И. Ленина
Минск

Получена 1.12.1988
Принята к печати 20.02.1989