

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СИММЕТРИИ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ МЕТОДОМ ПЬЕЗО-ХОЛЛ-ЭФФЕКТА

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

Анализируется положение уровня Ферми в полупроводниках, подвергнутых одноосному сжатию, с учетом расщепления глубоких уровней дефектов вследствие снятия ориентационного либо электронного вырождения. Исследования кремния, содержащего дефекты с энергетическим уровнем $E_c - 0.17$ эВ, методом пьезо-холл-эффекта указывают на расщепление данного уровня при приложении одноосных нагрузок вдоль основных кристаллографических направлений, которое характерно для центров с симметрией C_{2v} .

Исследования пьезо-холл-эффекта в кремнии [1, 2] показали, что зависимость постоянной Холла R_H от величины одноосной нагрузки P не соответствует линейному изменению энергии ионизации глубокого энергетического уровня. Такое поведение $R_H(P)$ может быть результатом расщепления энергетических уровней при деформации кристаллов [3] в результате снятия ориентационного [4] или электронного [5] вырождения уровней.

Рассмотрим полупроводник с концентрацией мелких доноров N_D и дефектами, имеющими глубокий акцепторный уровень E_A в верхней половине запрещенной зоны с концентрацией N_A , причем $N_A > N_D$. Для температур, при которых мелкий уровень ионизован полностью, а глубокий частично [6],

$$E_F(0) \simeq E_A + kT \ln \frac{1/2 N_D}{N_A - N_D}, \quad (1)$$

где $E_F(0)$ — положение уровня Ферми в недеформированном кристалле. В случае наличия ориентационного вырождения дефектов и расщепления глубокого уровня при приложении одноосной нагрузки на две компоненты E_{A1} и E_{A2} с концентрацией N_{A1} и N_{A2} соответственно уравнение электронейтральности примет вид

$$\frac{N_{A1}}{1 + g \exp\left(\frac{E_{A1} - E_F}{kT}\right)} + \frac{N_{A2}}{1 + g \exp\left(\frac{E_{A2} - E_F}{kT}\right)} = N_D. \quad (2)$$

Если расщепление происходит вследствие снятия электронного вырождения, то вероятность заполнения компонент подчиняется статистике Больцмана

$$f'(E_{A1})/f'(E_{A2}) = \exp(-\Delta E/kT), \quad (3)$$

где $\Delta E = |E_{A1} - E_{A2}|$ — расстояние между расщепившимися компонентами. С другой стороны, $f'(E_{A1}) + f'(E_{A2}) = 1$, или

$$f'(E_{A1}) = \frac{\exp(-\Delta E/kT)}{1 + \exp(-\Delta E/kT)}, \quad f'(E_{A2}) = \frac{1}{1 + \exp(-\Delta E/kT)}. \quad (4)$$

С учетом (4) уравнение электронейтральности запишется

$$\frac{N_A}{1 + \exp(-\Delta E/kT)} \left[\frac{\exp(-\Delta E/kT)}{1 + g \exp\left(\frac{E_{A1} - E_F}{kT}\right)} + \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{E_{A2} - E_F}{kT}\right)} \right] = N_D. \quad (5)$$

Решения уравнений (2), (5) рассчитывались с учетом смещений под действием нагрузки края s -зоны $\Delta E_c(P)$ [7] и линейного сдвига двух (для снятия ориентационного вырождения) компонент расщепления уровня E_{A1} и E_{A2} с $N_{A1}=N_{A2}$. Как показали расчеты (рис. 1), наличие расщепления уровня приводит к нелинейности зависимостей $\Delta E_F(P) = E_F^+(P) - E_F(0)$, тем более сильной, чем больше величина расщепления, причем при одинаковых величинах расщепле-

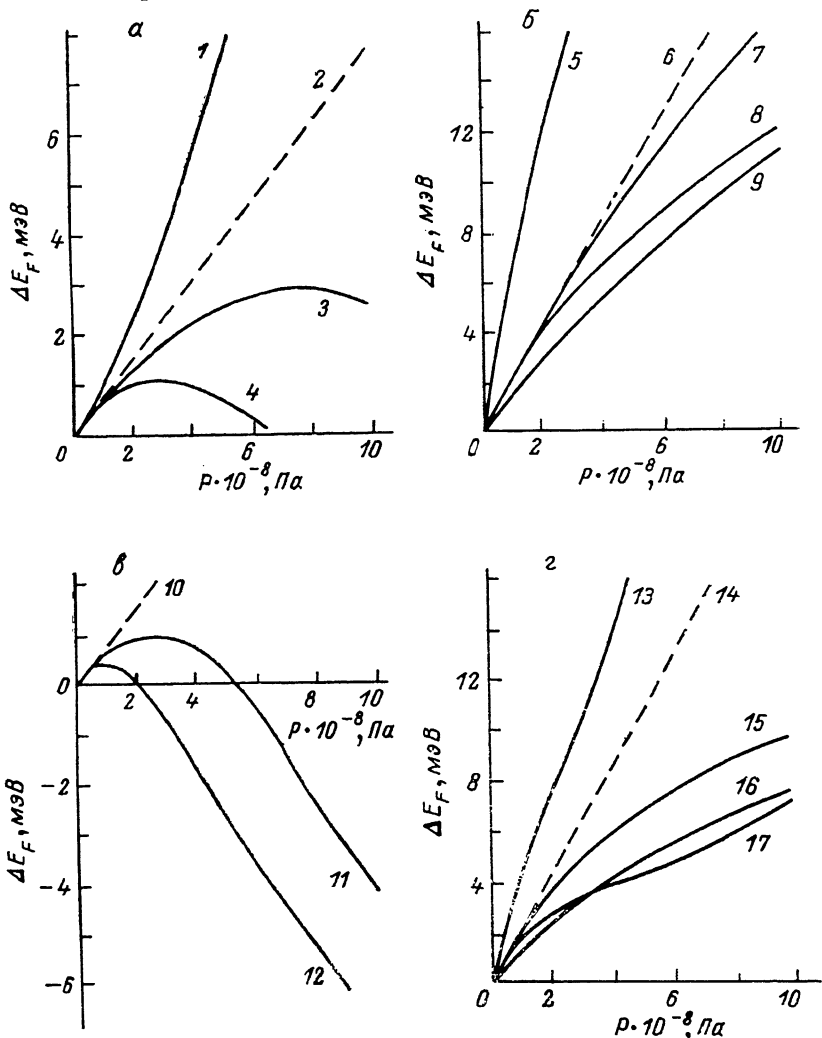


Рис. 1. Изменение положения уровня Ферми при приложении одноосной нагрузки для случаев снятия ориентационного (а, б) и электронного (в, г) вырождений.

а, в — $P \parallel \langle 111 \rangle$; б, г — $P \parallel \langle 110 \rangle$; 5, 13 — $P \parallel \langle 100 \rangle$; 2, 6, 10, 14 — смещение края s -зоны [7]. $\Delta E_{A1} \cdot 10^{11}$, эВ/Па: 1, 3, 4, 7, 8, 11, 12, 15, 17 — 1.5; 5, 13 — 3; 9, 16 — 0, $\Delta E_{A2} \cdot 10^{11}$, эВ/Па: 1, 3, 4, 7, 8, 11, 12, 15, 17 — -1.5; 5, 13 — -3; 9, 16 — -1.5. К: 1 — 1.01; остальные кривые — ≥ 20 . Т, К: 3, 7, 11, 15 — 200; остальные кривые — 80.

ния ход $\Delta E_F(P)$ различен для разных случаев снятия вырождения, степени компенсации $K = N_A/N_D$ и температуры.

На рис. 2 приведены зависимости $\Delta E_F(P)$, полученные из измерений пьезохолл-эффекта в кремнии n -типа, облученном быстрыми электронами, в температурной области ионизации уровня $E_c - 0.17$ эВ, которые определялись из зависимостей $\Delta n(P)$ путем учета изменений эффективной плотности состояний в зоне проводимости и холл-фактора под действием одноосной нагрузки. Используя полученные зависимости $\Delta E_F(P)$ и полагая, что при приложении одноосной нагрузки энергетический уровень расщепляется в результате снятия ориентационного вырождения на две компоненты, методом наименьших квадра-

тов определялись скорости смещения расщепившихся компонент E_{A1} и E_{A2} в выражении (2). Учитывалась также конфигурационная перестройка дефектов при одноосном сжатии кристаллов [8], которая проявляется при температурах выше 150 К, что видно из полученных зависимостей $n(T)$ (рис. 3), когда нагрузка прикладывалась при 80 и 300 К (кривые 2 и 3 соответственно). Конфигурационная перестройка приводит к переориентации дефектов относительно оси деформации кристалла и, следовательно, к изменению отношения N_{A1}/N_{A2} [9]:

$$\frac{N_{A1}}{N_{A2}} = \frac{N'_{A1}}{N'_{A2}} \exp\left(-\frac{\Delta\mathcal{E}}{kT}\right), \quad (6)$$

где N'_{A1}/N'_{A2} — отношение концентраций расщепившихся компонент вследствие сня-

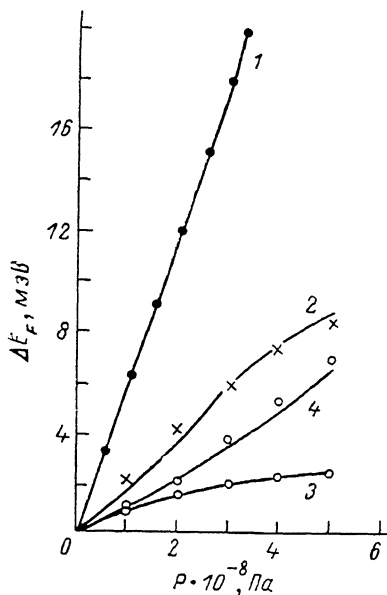


Рис. 2. Зависимость $\Delta E_F(P)$ в кремнии, содержащем радиационные дефекты с уровнем $E_c - 0.17$ эВ.

1 — $P \parallel \langle 100 \rangle$; 2 — $P \parallel \langle 110 \rangle$; 3, 4 — $P \parallel \langle 111 \rangle$. К: 1—3 — 10; 4 — 1.1. $T = 125$ К.

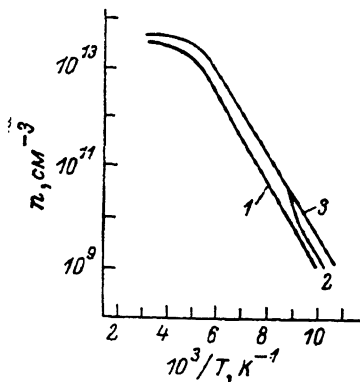


Рис. 3. Температурная зависимость концентрации электронов в кремнии с уровнем $E_c - 0.17$ эВ.

$P \cdot 10^{-3}$, Па: 1 — 0; 2, 3 — 3.4. Т, К: 2 — 80; 3 — 300.

тия ориентационного вырождения, $\Delta\mathcal{E}(P)$ — энергия активации конфигурационной перестройки дефекта при приложении нагрузки (предполагалось, что $\Delta\mathcal{E}(P)$ линейно зависит от величины прикладываемой нагрузки [9]). Полученные значения ΔE_{A1} , ΔE_{A2} и $\Delta\mathcal{E}$ представлены в таблице. Значение ΔE_A для $P \parallel \langle 100 \rangle$ не удается определить из-за того, что в интервале температур,

Направление P	$\Delta E_{A1} \cdot 10^{11}$, эВ/Па (эксперимент)	$\Delta E_{A2} \cdot 10^{11}$, эВ/Па (эксперимент)	$ \Delta E_{A1} - \Delta E_{A2} \cdot 10^{11}$, эВ/Па		$\Delta\mathcal{E} \cdot 10^{11}$, эВ/Па	
			эксперимент	[8]	эксперимент	[8]
$\langle 100 \rangle$	-1.4	—	—	4.2	-10	-16.4
$\langle 111 \rangle$	1.7	-1.3	3.0	3.3	0.4	0.4
$\langle 110 \rangle$	2.8	-1.5	4.3	4.5	—	—

Примечание. ΔE_{A1} и ΔE_{A2} — скорости смещения расщепившихся компонент уровня дефекта относительно его положения в недеформированном кристалле без учета $\Delta E'_c$.

где производились измерения пьезо-холл-эффекта, происходит практически полная перестройка этой компоненты в другую конфигурацию, и нелинейность в зависимости $\Delta E_F(P)$ не наблюдается. При $P \parallel \langle 110 \rangle$ уровень А-центра расщепляется на три компоненты [4], две из которых близко расположены по шкале энергий ($\Delta E_2 \approx \Delta E_3$), а третья существенно отличается (ΔE_1). Отношение N_{A1}/N_{A2} в этом случае [8]

$$\frac{N_{A1}}{N_{A2}} = \frac{1}{4 \exp(-7.6/kT) + \exp(0.8/kT)} \quad (7)$$

Полученные в работе результаты, включая наблюдавшиеся эффекты по переориентации дефектов, не противоречат утверждению об ответственности за энергетический уровень $E_c - 0.17$ эВ в облученном кремнии А-центров (комплексов кислород—вакансия) с симметрией C_{2v} [$8-10$].

С учетом того, что каждому из возможных типов симметрии дефектов в кубической решетке соответствует конкретное число компонент расщепления, анализ зависимостей $\Delta E_F(P)$, таким образом, позволяет определить наличие или отсутствие расщепления энергетических уровней при деформации вдоль различных кристаллографических направлений, величину расщепления и оценить другие микроскопические параметры, т. е. получить прямую информацию о свойствах симметрии электрически активных дефектов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Тарасик М. И., Янченко А. М. Изменение энергии ионизации А-центра в кремнии при одноосной деформации. — ФТП, 1977, т. 11, в. 11, с. 2252—2254.
- [2] Семенюк А. К., Назарчук П. Ф. Влияние одноосной деформации на энергию ионизации А-центра в *n*-Si. — ФТП, 1985, т. 19, в. 7, с. 1331—1333.
- [3] Янченко А. М., Тарасик М. И., Шварков Д. С. Влияние одноосных нагрузок на энергетическое положение дефектов структуры в кремнии. — В кн.: Матер. X Всес. конф. по физике полупроводников. Минск, 1985, ч. 3, с. 191—192.
- [4] Каплянский А. А. Некубические центры в кубических кристаллах и их пьезоспектроскопическое исследование. — Опт. и спектр., 1964, т. 16, в. 4, с. 602—614.
- [5] Hughes A. E., Runciman W. A. — Proc. Phys. Soc., 1967, v. 90, N 30, p. 827—838.
- [6] Болтакс Б. И., Бахадырханов М. К., Городецкий С. М., Куликов Г. С. Компенсированный кремний. Л., 1972. 124 с.
- [7] Balslev J. — Phys. Rev., 1966, v. 143, N 2, p. 636—647.
- [8] Watkins G. D., Corbett J. W. — Phys. Rev., 1961, v. 121, N 4, p. 1001—1014.
- [9] Qin Guo Gang, Yao Xiu Chen., Mou Jian Xun. — Sol. St. Commun., 1983, v. 55, N 2, p. 201—205.
- [10] Meese J. M., Farmer J. W., Lamp C. D. — Phys. Rev. Lett., 1983, v. 51, N 14, p. 1286—1289.

Белорусский государственный университет
им. В. И. Ленина
Минск

Получена 28.04.1987
Принята к печати 12.06.1987