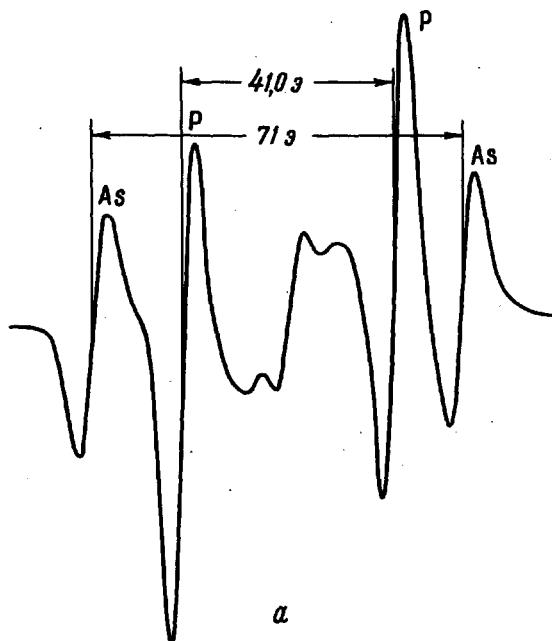


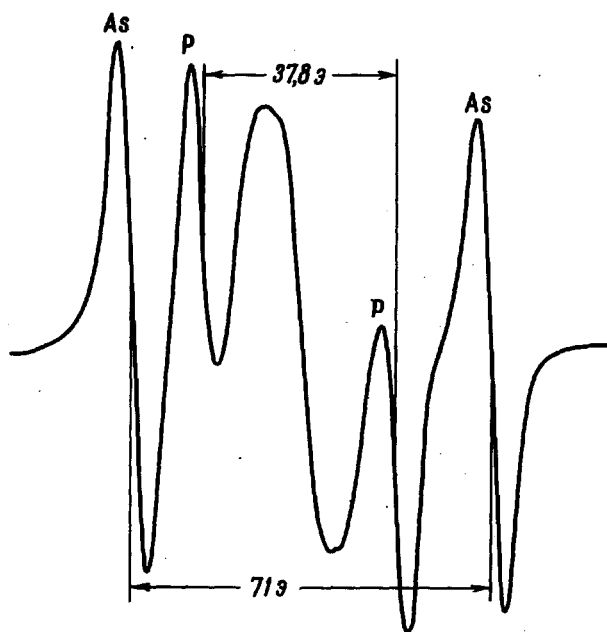
ВЛИЯНИЕ КОМПЕНСАЦИИ НА СВЕРХТОНКОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ СПЕКТРА ЭПР ФОСФОРА В СИЛЬНОЛЕГИРОВАННОМ КРЕМНИИ *n*-ТИПА

Б.Г.Журкин, Н.А.Пенин

При исследовании ЭПР фосфора в образцах кремния *n*-типа с концентрацией донорной примеси $N_D \geq 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и со степенью компенсации $K = N_A/N_D > 0,5$ (компенсация осуществлялась введением акцепторной примеси бора в расплав при выращивании слитков) нами было обнаружено уменьшение величины сверхтонкого расщепления A . Для изолированных примесных атомов фосфора в кремнии $A = 42 \text{ э}$ [1]. Эксперименты проводились на частоте $9,4 \text{ Гц}$ при температуре $4,2^\circ\text{К}$. В качестве эталонного образца для получения меток магнитного поля использовался образец *n*-Si, легированный $6 \cdot 10^{16} \text{ ат. As/см}^3$ с расстоянием между линиями сверхтонкого расщепления, равным 71 э . Параметры исследованных образцов и полученные экспериментальные значения A представлены в таблице. На рисунке показаны записи спектров ЭПР в виде $d\chi''/dH = f(H)$ для сильнокомпенсированных образцов с $N_D = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $N_D = 7,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (образцы 3 и 7 таблицы соответственно). Спектры ЭПР слабокомпенсированных образцов не приводятся, так как они даны в работе [2]. Из таблицы следует, что величина A у всех слабокомпенсированных образцов ($K < 0,01$) не меняется вплоть до концентрации $N_D = 7,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, при которой практически исчезают линии сверхтонкой структуры (СТС) на частотах $\nu = \nu_0 \pm 1/2 A$, где частота ν_0 определяется из соотношения $h\nu_0 = g\beta H$. Уменьшение величины A при сильной компенсации особенно заметно при $N_D \geq 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, где существует сильное обменное взаимодействие, о чем свидетельствует интенсивная линия на частоте ν_0 [2]. Появ-



a



b

Спектры ЭПР $d\chi''/dH = f(H)$ двух сильнокомпенсированных образцов кремния n -типа: а — $N_D = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $K = 0,9$ и б — $N_D = 7,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $K = 0,99$. Две крайние линии на спектрах — линии сверхтонкого расщепления эталонного образца n -Si с $6 \cdot 10^{16} \text{ ат. As/см}^3$

ление линий СТС в образце с $N_D = 7,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $K = 0,99$ (образец 7 таблицы) однозначно указывает на возникновение локализованных состояний в результате компенсации. Этот эффект впервые наблюдался в работе [3] и теоретически объяснен в работе [4].

Т а б л и ц а

Параметры исследованных образцов и значения сверхтонкого расщепления А

№ образца	$N_D, \text{ см}^{-3}$	$K = N_A / N_D$	Удельное сопр. при $T_{\text{комн}}$, $\text{ом} \cdot \text{см}$	А, э
1	$2 \cdot 10^{17}$	$< 0,01$	0,054	42
2	$2 \cdot 10^{17}$	0,6	0,17	42
3	$2 \cdot 10^{17}$	0,9	0,48	41
4	$6 \cdot 10^{17}$	$< 0,01$	0,033	42
5	$6 \cdot 10^{17}$	0,9	0,14	38,3
6	$7,2 \cdot 10^{17}$	$< 0,01$	0,029	—
7	$7,2 \cdot 10^{17}$	0,99	4,2	37,8

Уменьшение величины сверхтонкого расщепления в сильнолегированных образцах при сильной компенсации можно качественно объяснить на основе теории Такеяма с сотрудниками [5], рассмотревшими электронные состояния ионизированных пар примесей. Полагая, что в сильнолегированных кристаллах парное взаимодействие самое сильное и что при компенсации происходит образование ионизированных пар, была оценена величина энергии обменного взаимодействия при $N_D \geq 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Для этого использовалась экстраполяция данных работы [5] к более высоким концентрациям. Полученная величина, равная $\geq 4 \cdot 10^{-3} \text{ эв}$, сравнима по порядку величины с долин-орбитальным расщеплением фосфора в кремнии n -типа $E_{12} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ эв}$ [6]. В этом случае, согласно [5], к основным состояниям ионизированной пары подмешиваются вышележащие состояния, не дающие вклада в сверхтонкое расщепление, что и приводит к уменьшению величины А.

Физический институт
им. П. Н. Лебедева
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
19 июля 1967 г.

Литература

- [1] R.C.Fletcher, W.A.Yager, G.L.Rarson, A.N.Holden, W.F.Read, F.R.Merritt. Phys. Rev., 94, 1392.
- [2] Б.Г.Журкин, Н.А.Пенин. ФТТ, 6, 1141, 1964.
- [3] Б.Г.Журкин, Н.А.Пенин. ФТТ, 7, 3204, 1965.
- [4] Л.В.Келдыш, Т.Г.Тратас. ФТТ, 8, 83, 1966.
- [5] K.Takeyama, M.Kawahito, M.Okazaki, M.Kikuchi. J.Phys. Soc. Japan, 22, 118, 1967.
- [6] D.K.Wilson, G.Feher. Phys. Rev., 124, 1068, 1961.

ЛИНЕЙНЫЙ ЭФФЕКТ ШТАРКА НА БЕСФОНОННЫХ ЛИНИЯХ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ В КРИСТАЛЛАХ ФТОРИСТОГО ЛИТИЯ

А.А.Каплинский, В.Н.Медведев

Если точечная группа симметрии примеси или дефекта в кристалле не содержит инверсии, в их оптическом спектре во внешнем электрическом поле возможен линейный эффект Штарка [1-3]. Первые попытки наблюдать этот эффект в спектрах сложных центров окраски в щелочно-галогенидных кристаллах были предприняты Оверхаузером и Рюхардтом [1] на широких полосах M - и R - центров в KCl и $NaCl$. Обнаружение в спектрах центров окраски электронно-колебательной структуры полос, включающей узкие бесфононные линии [4], открывает новые возможности для наблюдения линейного Штарк-эффекта в спектрах безынерсионных центров окраски.

В настоящей работе в электрическом поле обнаружено линейное по полю расщепление ряда бесфононных линий в спектрах поглощения сложных электронных центров окраски LiF . Постоянное поле напряженностью до $\epsilon_0 = 300$ кВ/см прикладывалось при $4,2^\circ K$ к монокристаллам окрашенного γ -лучами LiF вдоль оси $\langle 100 \rangle$. Спектры поглощения фотографировались в поперечном к $\vec{\epsilon}_0$ направлении на дифракционном спектрографе с дисперсией от 1,7 до 8,0 А/мм.

Бесфононная линия ионизованных F_3^+ -центров 4874 \AA [5] расщепляется в симметричный триплет, крайние компоненты которого поляризованы с $E \perp \vec{\epsilon}_0$; ширина триплета $\delta \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}/\text{В/см}$ (рисунок а