

ЭФФЕКТ ШТАРКА НА МЕЛКИХ ДОНОРАХ В ФОСФИДЕ ГАЛЛИЯ

А.А.Копылов, С.П.Медведев, А.Н.Пухтин

Для водородоподобных примесных центров в полупроводнике впервые наблюдался эффект Штарка. Обнаружены запрещенные в отсутствие электрического поля электронные переходы между компонентами $1S$ -состояния, расщепленными долинно-орбитальным взаимодействием.

В работе представлены результаты исследования эффекта Штарка на донорных центрах в фосфиде галлия. Выбор этого материала в качестве объекта исследования обусловлен следующим важным обстоятельством: при сохранении в GaP водородоподобного характера однозарядных доноров их энергия ионизации составляет $E_d \approx 100$ мэВ. Это значительно больше, чем в германии и кремнии, и позволяет создавать в легированном образце GaP статические электрические поля на уровне $\mathcal{E} \sim 10^6$ В/м уже при температуре ~ 20 К. Для германия и кремния это достигается только при температурах ~ 3 и 10 К, соответственно, что, вероятно, объясняет причину отсутствия в литературе данных по эффекту Штарка на мелких примесных уровнях в этих материалах.

Нами исследованы модуляционные спектры электропоглощения (ЭП) монокристаллов n -GaP. Образцы вырезались из слитков, выращенных по методу Чохральского и легированных серой, теллуrom или кремнием на уровне $5 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Методика создания электрического поля в образце была аналогична [1]. Измерения проводились в области спектра 5 – 25 мкм с использованием вакуумного криостата и монохроматора ИКС-14.

Примеры спектров ЭП, полученные на образцах GaP:S, показаны на рис. 1,а и рис. 2. В спектрах отчетливо проявляются простые по форме особенности при энергиях фотонов $\hbar\omega$ около 54 и 71,5 мэВ и сложная структура в области 80 – 110 мэВ, наиболее характерным элементом которой является отрицательный пик вблизи 97 мэВ. Линии опти-

ческого поглощения с энергетическим положением 71,5 и 97 мэВ были ранее идентифицированы в спектрах фотовозбуждения GaP: S [3, 4] и приписаны соответственно переходам $1S (A_1) \rightarrow 2P_0$ и $1S (A_1) \rightarrow 2P_{\pm}$ (см. схему на рис. 1, б). Относительно слабые отрицательные максимумы при энергиях фотонов 112, 126 и 144 мэВ соответствуют фоновым повторениям $2P_{\pm}$ -линии [6]. Линии при $\hbar\omega = 54$ мэВ в спектрах фотовозбуждения не проявлялось.

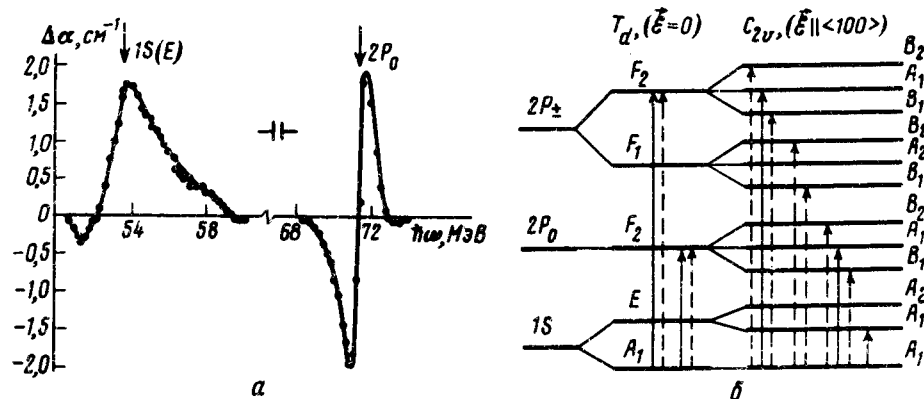


Рис. 1. а — Особенности спектра ЭП GaP: S в области энергий фотонов 50 — 80 мэВ. $T \approx 20\text{K}$, $\mathcal{E} = 0,6 \cdot 10^6$ В/м. Приведена спектральная зависимость изменения коэффициента поглощения $\Delta\alpha$ в электрическом поле. Вектор напряженности электрического поля \mathcal{E} и волновой вектор фотонов $k_{\text{фот}}$ взаимно перпендикулярны и направлены по $\langle 100 \rangle$. Стрелками указаны ожидаемые положения особенностей [2 — 4]. б — Схема расщепления энергетических уровней донорного центра VI группы в GaP в электрическом поле. Обозначения неприводимых представлений соответствуют [5]. Стрелками указаны оптические переходы, разрешенные в дипольном приближении: сплошная линия — вектор поляризации излучения $e \parallel \mathcal{E}$; штриховая линия — $e \perp \mathcal{E}$

Форма особенности 71,5 мэВ в спектре ЭП (рис. 1, а) указывает на сдвиг компонент $2P_0$ -уровня, расщепляющихся в электрическом поле.

В отличие от этого, для особенности 54 мэВ интегральное изменение $\Delta\alpha(\hbar\omega)$ существенно положительно. Такое поведение характерно для переходов, запрещенных при $\mathcal{E} = 0$. В данной области спектра, как видно из рис. 1, б, можно наблюдать только переход $1S (A_1) \rightarrow 1S (E)$ между компонентами $1S$ -состояния, расщепленными долино-орбитальным взаимодействием. Тогда, для величины этого расщепления получим $\Delta = 1S (E) - 1S (A_1) = 54,0 \pm 0,5$ мэВ, что хорошо согласуется со значением $\Delta = 53,4$ мэВ, полученным ранее по спектрам комбинационного рассеяния [2] и не имевшим подтверждения.

Характерная форма спектра в области 80 — 110 мэВ (отрицательный пик, ограниченный положительными крыльями) может наблюдаться в двух случаях: либо при уширении линии оптического поглощения в элек-

трическом поле, либо при расщеплении со сдвигом компонент в противоположных направлениях, имитирующем уширение. Для того, чтобы наблюдаемую форму спектра объяснить уширением $2P_{\pm}$ -линии, необходимо допустить, что уширение имеет аномально большую величину $\Delta\Gamma \approx 0,2$ мэВ и более, чем на порядок превышает теоретическую оценку $\Delta\Gamma \sim 3 \cdot 10^{-3}$ мэВ (при $\mathcal{E} = 2 \cdot 10^5$ В/м). Более того, в этом случае оказывается невозможным объяснить существенную зависимость формы спектра от направления поляризации (рис. 2). В частности, положение отрицательного пика для различных направлений поляризации отличается на величину $\sim 0,5$ мэВ. Расщепление $2P_{\pm}$ -уровня должно носить линейный характер, поскольку группа симметрии донорного центра замещения в GaP (группа T_d) не имеет центра инверсии. Это экспериментально подтверждается линейной зависимостью сигнала ЭП от напряженности электрического поля, что видно на вставке рис. 2.

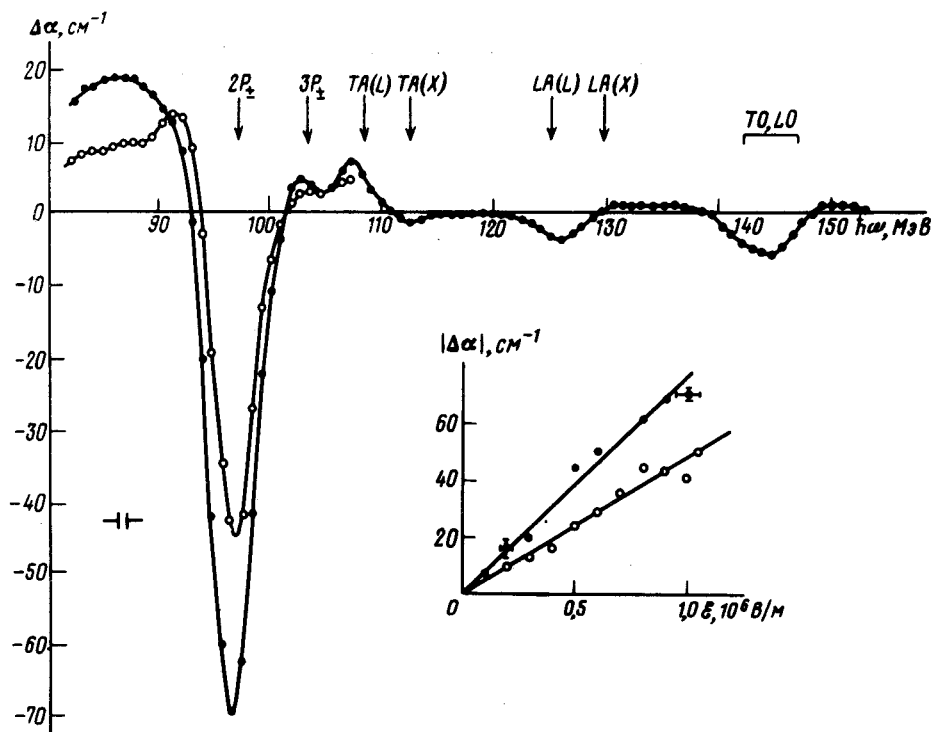


Рис. 2. Спектр ЭП GaP:S в области энергий фотонов 80 — 160 мэВ. $T \approx 20$ К, $\mathcal{E} = 0,9 \cdot 10^6$ В/м. Ориентация \mathcal{E} и $k_{\text{фот}}$ аналогична данным на рис. 1, а. Темные точки — $\parallel \mathcal{E}$, светлые — $\perp \mathcal{E}$ (данные приведены только для области 80 — 110 мэВ). Стрелками указано положение линии и особенностей в спектре фотовозбуждения GaP:S [3, 4, 6]. На вставке приведена зависимость $\Delta\alpha(\mathcal{E})$ для максимума отрицательного пика ($\hbar\omega = 96,5$ мэВ)

Таким образом, структура спектра ЭП в области $2P_{\pm}$ -линии фотовозбуждения определяется линейным Штарковским расщеплением $2P_{\pm}$ -уровня донорного центра. Как видно на рис. 1, б, в электрическом поле, па-

раллельном направлению $\langle 100 \rangle$ этот уровень расщепляется на шесть компонент различной симметрии. Кроме этого, из-за наличия "двугорбой" структуры X_{1C} -минимума зоны проводимости GaP [3] возбужденное $3D_{\pm}$ -состояние донора, как показывает проведенный теоретический расчет, лежит всего на 0,5 – 1,0 мэВ выше $2P_{\pm}$ -состояния¹⁾. При $\xi \neq 0$ состояние $3D_{\pm}$, имеющее симметрию $F_1 + F_2$, должно сильно перемешиваться с состоянием $2P_{\pm}$, поэтому детальная расшифровка структуры спектра ЭП в области $2P_{\pm}$ -линии представляет собой трудоемкую задачу.

Данные, полученные нами при исследовании спектров ЭП с участием доноров Te и Si, полностью согласуются с приведенными для случая GaP:S.

Электротехнический институт
им. В.И.Ульянова (Ленина)

Поступила в редакцию
21 августа 1979 г.

Литература

- [1] Г.Ф.Глинский, А.Н.Лихтин. ФТП, 9, 2139, 1975.
- [2] D.D.Manchon, Jr., P. J. Dean. Proc. Int. Conf. Phys. Semicond., p. 760, Cambridge, 1970.
- [3] А.А.Копылов, А.Н.Пихтин. ФТП, 11, 867, 1977.
- [4] А.А.Копылов, А.Н.Пихтин. Solid State Comm., 26, 735, 1978.
- [5] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Квантовая механика. М., 1963.
- [6] А.А.Копылов, А.Н.Пихтин. Письма в ЖЭТФ, 24, 193, 1976.
- [7] G.F.Glinskii, A.A.Kopylov, A.N.Pikhtin. Solid. State Comm., 30, 631, 1979.

¹⁾Закон дисперсии электрона вблизи X_{1C} -минимума зоны проводимости GaP имеет "двугорбую" структуру, причем два смежных минимума разделены энергетическим "горбом" величиной всего $3,5 \pm 0,3$ мэВ [3, 7]. Очевидно, что возбужденные состояния, доноров с энергией связи порядка этой величины будут группироваться парами (четное и нечетное), что аналогично, так называемому, инверсионному удвоению.