

СПЕКТРЫ ПРИМЕСНОЙ ФОТОПРОВОДИМОСТИ: ДОНОР ФОСФОР В ТВЕРДОМ РАСТВОРЕ Ge_xSi_{1-x}

Васильев В. А., Дышловенко П. Е., Копылов А. А.,
Лютювич К. Л., Шакмаев А. А.

Несмотря на прогресс в изучении свойств твердых растворов, примесные состояния в них изучены довольно слабо. В настоящей работе исследовалась примесная фотопроводимость (ФП) в твердом растворе Ge_xSi_{1-x} . Слои n -типа проводимости были выращены методом газофазной эпитаксии на подложках p -Si с ориентацией (111) и легировались фосфором в процессе роста. Состав твердого раствора варьировался в пределах $x=0-0.39$. Толщина слоев составляла около 5 мкм, концентрация электронов $(0.5-8) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (табл. 1). Опти-

Т а б л и ц а 1
Основные характеристики исследованных образцов

№ образца	x	ρ , Ом · см	n , 10^{11} см^{-3}	μ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
G207/5	0	6.5		
G209/5	0.024	7.5		
G211/5	0.057	6.3	7.9	1250
G213/5	0.15	11	4.7	1200
G215/5	0.27	26.5	2.8	850
G217/5	0.38			300
G219/5	0.39	~50	~0.5	250

ческие измерения проводились в диапазоне $100-650 \text{ см}^{-1}$ с использованием фурье-спектрометра ЛФС-1000 и вакуумного гелиевого криостата. Излучение концентрировалось на образце с помощью латунного конуса. Оптические контакты создавались сплавлением Sb с использованием лазерной технологии [1].

Т а б л и ц а 2
Интерпретация фононной структуры спектра примесной ФП

№ минимума	Положение, см^{-1}	$\hbar\omega$, мэВ	Интерпретация
1	376.2	46.6	$LA(\sim X)$
2	399.5	49.5	$LO(\sim X)$
3	480.4	59.6	$1S(E) + LA(\sim X)$
4	500.0	62.0	$1S(E) + LO(\sim X)$
5	518.7	64.3	$LO(\Gamma)$
6	576.6	71.5	

При температуре жидкого азота ($T \approx 80 \text{ К}$) примесная ФП не наблюдалась. При $T \approx 10 \text{ К}$ фотоответ надежно регистрировался для всех исследованных составов твердого раствора (рис. 1). По всем признакам наблюдаемая полоса обусловлена фотоионизацией мелких донорных уровней. Присутствие фосфора подтверждается наличием линии 40.3 мэВ вблизи края примесной полосы в слоях чистого кремния (рис. 2). Данная линия обусловлена фототермической проводимостью с участием перехода $1S(A_1) \rightarrow 2P_{\pm}$ [2]. Более четко структура фотовозбуждения проявляется в спектре отношения фотоответов, полученных при различной напряженности электрического поля, что показано на вставке к рис. 2.

Тонкая структура коротковолнового спада полосы примесной ФП формируется процессами электрон-фононного взаимодействия [3, 4]. Рассеяние но-

сителей заряда в связанные состояния примесного центра за счет уменьшения времени жизни приводит к появлению характерных минимумов, расположенных при энергиях

$$\hbar\omega = E_j - E_0 + n\hbar\Omega,$$

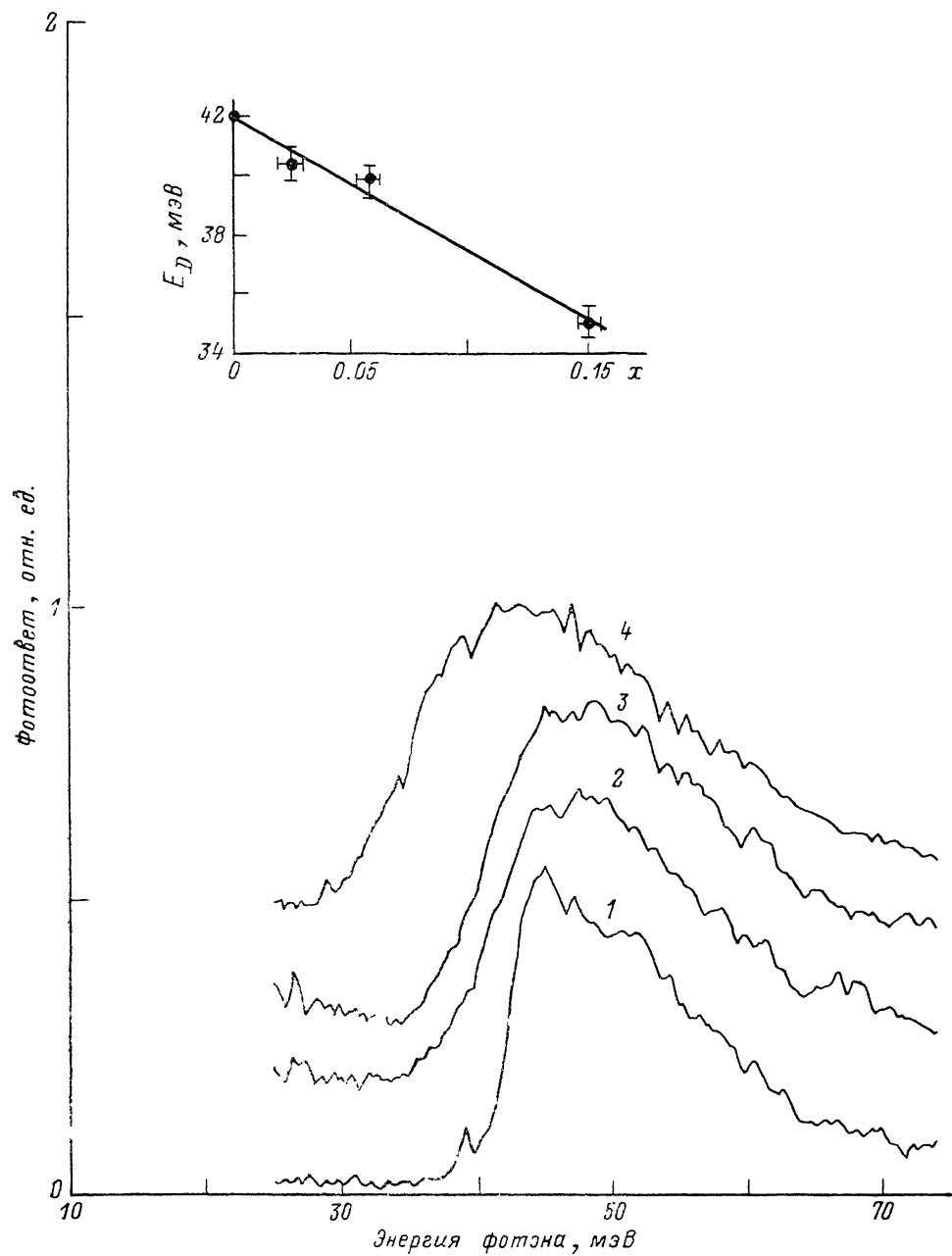


Рис. 1. Спектры фотопроводимости эпитаксиальных слоев $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}:\text{P}$ ($T \approx 10$ К). Состав x : 1 — 0, 2 — 0.024, 3 — 0.057, 4 — 0.15; для удобства кривые смещены друг относительно друга по вертикали. На вставке показана зависимость энергии ионизации донорного уровня от состава.

где E_0 и E_j — энергии основного и возбужденных состояний донорного центра, $\hbar\Omega$ — энергия фононов, участвующих в процессе рассеяния. Спектральное положение и возможная интерпретация минимумов, наблюдающихся на рис. 2, даны в табл. 2. Учитывая двухмодовый характер фононного спектра $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ [5], можно предположить, что в электрон-фононном взаимодействии

активны Si-подобные фононы: $LO(\Gamma) \approx 64$, $LO(\sim X) \approx 49$ и $LA(\sim X) \approx 47$ мэВ, где точка $\sim X$ соответствует волновой вектор $(1, 0.15, 0.15) 2\pi/a$.

Как видно из рис. 1, с ростом концентрации Ge в диапазоне составов $x = 0-0.15$ длинноволновый порог примесной полосы уширяется и смещается

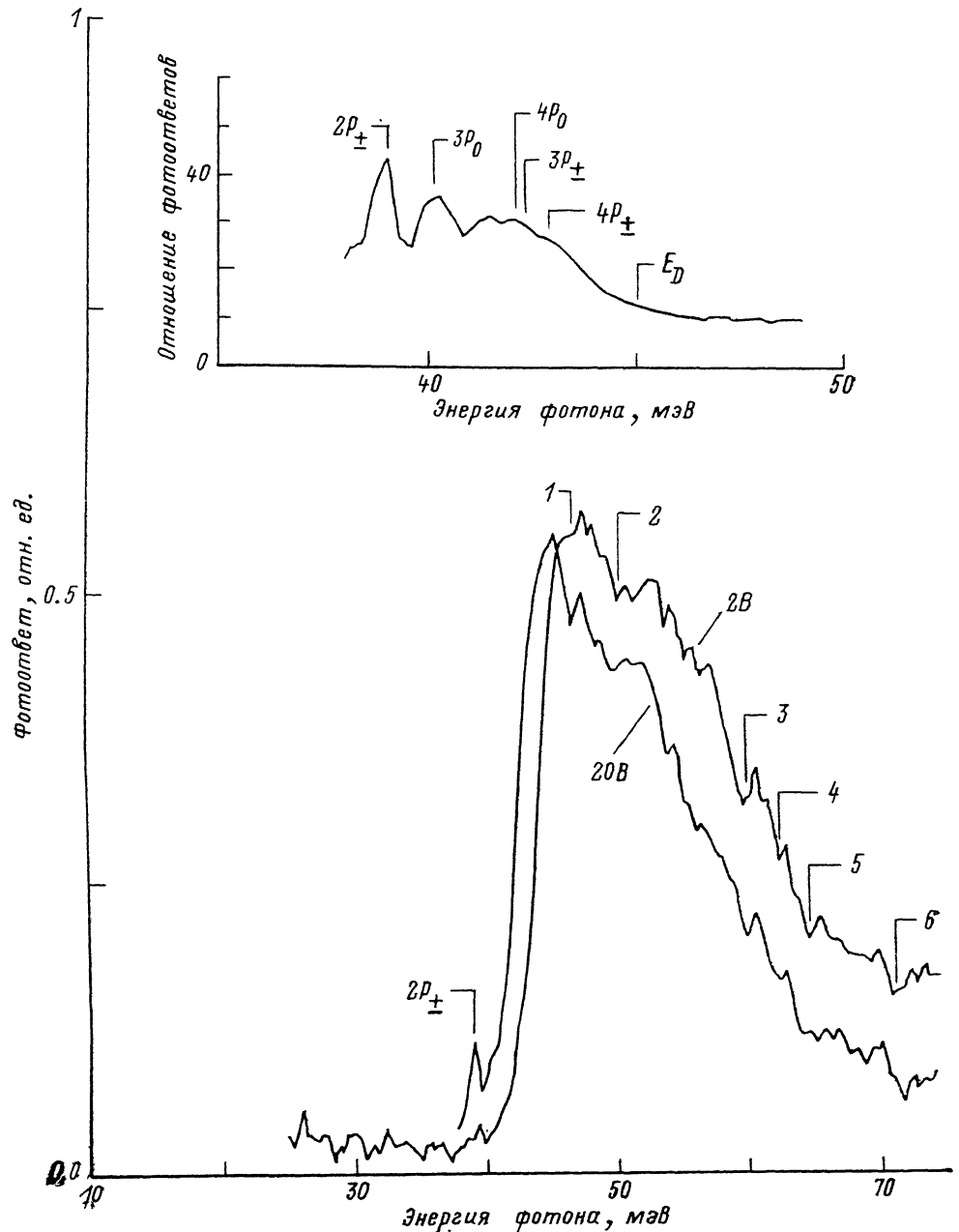


Рис. 2. Спектры фотопроводимости эпитаксиального слоя Si ($T \approx 10$ К).

Величина напряжения на образце указана рядом с кривыми. Вертикальными линиями показаны положения фононных особенностей. На вставке приведено отношение фотоответов для кривых 20 и 2 В и указаны ожидаемые положения линий фотовозбуждения для донора фосфора в Si [2].

в сторону меньших энергий по сравнению с чистым кремнием ($x=0$). Уширение связано с ростом степени неупорядоченности кристаллической решетки. Изменение энергии ионизации, оцененное по полуспаду длинноволнового порога полосы ФП, показано на вставке к рис. 1 и соответствует $\partial E_D / \partial x \approx -40$ мэВ. Оценка в приближении эффективной массы дает $\partial E_D / \partial x \approx -15$ мэВ. Необходи-

ные для расчета параметров определялись линейной интерполяцией между Si и Ge. Теоретический расчет [6] дает $\partial E_D / \partial x \approx -200$ мэВ, что существенно превышает экспериментальное значение.

Для образцов с составами $x=0.26-0.39$ форма полосы примесной ФП существенно изменялась: длинноволновый порог становился более резким и сдвигался примерно на 10 мэВ вверх по энергиям. Кроме того, в этих образцах отчетливо проявлялись тонкая структура вблизи края полосы и сильный минимум 64 мэВ, связанный, по-видимому, с Si-подобным $LO(1)$ -фононом. В твердых растворах $A^{III}B^V$ подобной трансформации полосы примесного поглощения не наблюдалось [7-9]. Качественно такое поведение может объясняться присутствием уровня протекания в зоне проводимости, но для подтверждения этого предположения требуются дополнительные исследования. Возможно, однако, что для данных составов из-за низкого совершенства гетерограницы существенно сказывалось влияние подложки, легированной бором ($E_A = 45$ мэВ).

Спектры ФП исследовались также при различных значениях напряженности электрического поля в образцах. Форма примесной полосы в области фотоионизации практически не зависела от напряженности электрического поля. Влияние поля сказывалось лишь в области длинноволнового края примесной полосы, что согласуется с результатами [10].

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Пихтин А. Н., Попов В. А., Яськов Д. А. // ФТП. 1969. Т. 3. В. 11. С. 1646—1648.
- [2] Landolt-Börnstein. Numerical Data and Functional Relationship in Science and Technology. V. 17. Physics of Group IV Elements and III—V Compounds / Ed. by O. Madelung, Berlin—Heidelberg—N. Y., 1982. С. 1648.
- [3] Onton A. // Phys. Rev. Lett. 1969. V. 22. N 7. P. 288—289.
- [4] Scott W. // J. Appl. Phys. 1979. V. 50. N 1. P. 472—482.
- [5] Barker A. S., Sievers A. J. // Rev. Mod. Phys. 1975. V. 47 (Suppl.). P. S1—S179.
- [6] Ren S.-F., Newman K. E., Dow J. D., Sankey O. F. // Appl. Phys. A. 1984. V. 33. N 4. P. 269—272.
- [7] Берндт В., Копылов А. А., Пихтин А. Н. // ФТП. 1977. Т. 11. В. 11. С. 2206—2209.
- [8] Берндт В., Копылов А. А., Пихтин А. Н. // ФТП. 1978. Т. 12. В. 8. С. 1628—1630.
- [9] Копылов А. А., Пихтин А. Н. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 11. С. 2164—2170.
- [10] Carter A. C., Carver G. P., Nicholas R. J., Portal J. C., Stradling R. J. // Sol. St. Commun. 1977. V. 24. N 1. P. 55—60.

С.-Петербургский
электротехнический институт
им. В. И. Ульянова (Ленина)

Получено 30.05.1991
Принято к печати 17.06.1991

ФТП, том 25, вып. 10, 1991

ОБНАРУЖЕНИЕ МАГНИТОУПОРЯДОЧЕННЫХ КЛАСТЕРОВ В ПОЛУМАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Слынько В. В., Слынько Е. И., Хандожко А. Г.,
Выграненко Ю. К., Данилюк Г. В.

В работах [1-3] исследованы механизмы вхождения примеси железа в CdTe в зависимости от концентрации, температуры и условий термической обработки. Неоднородное распределение примесных ионов, проявляющееся в образовании магнитоупорядоченных кластеров в CdTe : Fe, отражает общий механизм неустойчивости систем с однородным распределением дефектов высокой плотности [4].

В настоящей работе для обнаружения магнитоупорядоченных кластеров примесных ионов в полумагнитных полупроводниках предлагается использовать спектрометр ядерного магнитного резонанса (ЯМР), настроенный на регистрацию дисперсии.