

ИНТЕНСИВНОСТЬ ПРИМЕСНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ В КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ ФОСФОРОМ

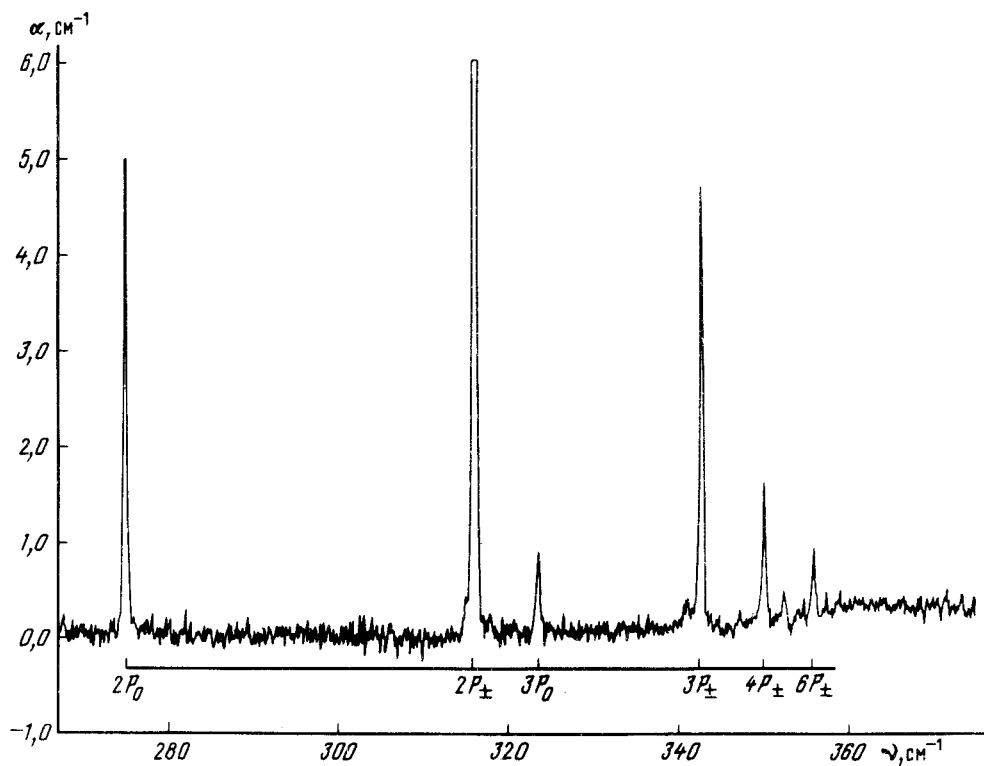
*Б.А.Андреев, В.Б.Иконников, Е.Б.Козлов,
Т.М.Лифшиц, В.Б.Шмагин*

Определены силы осцилляторов $f_{n P_M}$ примесных оптических переходов в кремнии, легированном фосфором с концентрацией фосфора $N_P = 1,7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Найдено, что величины $f_{n P_M}$ примерно в два раза меньше, чем предсказываемые теорией⁷.

Спектры оптического поглощения мелких примесей в многодолинных полупроводниках до настоящего времени использовались, в основном, для исследования структуры энергии

ческих уровней примесей, энергий переходов, формы и ширины линий (см., например, обзор ¹). Очень мало данных опубликовано о сечениях фотоионизации ^{2, 3} и, тем более, о силах осцилляторов (СО) внутрипримесных оптических переходов для мелких примесей в кремнии и германии. СО для двух наиболее ярких переходов в донорах V группы и в акцепторах III группы в германии определены в недавно вышедшей работе ⁴. В ⁵ приведены полученные из неопубликованных данных площади линий в спектрах галлия и индия в кремнии, из которых можно найти соответствующие СО (которые, однако, в работе не приведены). В настоящей статье излагаются результаты измерения СО переходов в Si : P.

Приводимые ниже данные относятся к образцу, вырезанному из кристалла кремния, легированного фосфором, выращенного методом бестигельной зонной плавки. Концентрация фосфора, найденная из измерений коэффициента Холла при комнатной температуре $N_p = 1,7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Степень компенсации основной примеси, определенная из спектров люминесценции связанных экситонов, составляла 0,03. Все измерения проводились на фурье-спектрометре "Брукер-113v". В некоторых экспериментах для исключения слабой межзонной подсветки, помимо штатных фильтров, использовался фильтр из черного полиэтилена. Было найдено, что для наших образцов такой фильтр не вносит сколько-нибудь заметных изменений в результаты измерений. Спектры пропускания, измеренные при $T = 4,4 \text{ К}$ нормировались на уровень сигнала в промежутках между линиями в длинноволновой части этого же спектра (вдали от континуума).



Спектр примесного поглощения в Si:P. Указана идентификация наиболее интенсивных линий. В центре линии $1s(A_1) \rightarrow 2P_{\pm}$ наблюдалось сильное поглощение. Линия на рисунке ограничена

На рисунке приведен спектр примесного поглощения, полученный при разрешении спектрометра $0,1 \text{ см}^{-1}$. Анализ линий, представленных в сильно увеличенном по оси частот масштабе показал, что их форма имеет вид, промежуточный между лоренцевой и гауссовой, полная ширина на полувысоте составляет для разных линий от $0,34$ до $0,45 \text{ см}^{-1}$. При расчете поглощения учитывалось многократное отражение излучения внутри образца, площадь

каждой линии определялась интегрированием по ее контуру. Используя правило сумм ^{6, 7}, для СО оптического перехода из основного состояния $1s(A_1)$ (при низкой температуре и в отсутствие сильного фонового излучения заполнено только это состояние) в состояние nP_M (обозначения даны по ⁷), имеем

$$f_{nP_M} = \frac{n\bar{m}c^2}{\pi e^2} \left(\frac{E_0}{E_{eff}} \right)^2 \frac{S_L}{N_P} = 0,987 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-1} \frac{S_L}{N_P}, \quad S_L = \int_L \alpha d\nu.$$

Здесь $n = 3,387$ — показатель преломления кристалла ⁸, $\bar{m} = 3/(1/m_l + 2/m_t) = 0,258 m_0$ — средняя эффективная масса носителей заряда, α и ν — коэффициент поглощения и частота излучения в см^{-1} , E_0/E_{eff} — отношение среднего поля к эффективному полю, индуцирующему переход. Для мелких примесей в кремнии и германии $E_0/E_{eff} = 1$ ⁹. В таблице приведены положение линий (ν_0), измеренные площади линий, отнесенные к концентрации примеси, вычисленные по ним силы осцилляторов и их теоретические значения для примеси фосфора в кремнии ⁷. Из таблицы видно, что найденные описанным способом величины СО примерно в два, а для мелких конечных состояний почти в три раза меньше, чем предсказываемые теорией. Интересно, что и для примесей в германии (Sb, P, As) в ⁴ величины СО для интенсивных переходов были найдены также примерно вдвое меньшими, чем их теоретические значения.

Для доноров в кремнии работ по определению СО, по-видимому, нет, поэтому, для сопоставления наших результатов с данными, которые могут быть получены из опубликованных спектров примесного поглощения, мы воспользовались работой ¹⁰, в которой в приемлемом масштабе приведены линии фосфора в трансмутационно легированном кремнии $2P_0$, $2P_{\pm}$ и $3P_{\pm}$, а также концентрации примеси. Рассчитанные значения СО для этих линий равны: $f_{2P_0} = 14,1 \cdot 10^{-3}$, $f_{2P_{\pm}} = 84 \cdot 10^{-3}$, $f_{3P_{\pm}} = 16 \cdot 10^{-3}$.

Переход	ν_0 , см ⁻¹	$(S_L/N_P) \cdot 10^{14}$ см	$(f_{n,P_M}) \cdot 10^3$		f_{nP_M} (эксп.) f_{nP_M} (теор.)
			эксперимент	теория	
$1s(A_1) \rightarrow 2P_0$	275,13	1,64	16,24	31,3	0,52
$2P_{\pm}$	316,02	$\approx 7,08$	≈ 70	133	$\approx 0,52$
$3P_0$	323,46			6,44	
$3P_{\pm}$	342,45	1,6	15,8	30,4	0,52
$4P_{\pm}$	349,95	0,58	5,7	10,8	0,53
$5P_{\pm}$	352,31	0,13	1,3	3,7	0,35
$7P_0$	354,32	0,03	0,29	0,74	0,4
$6P_{\pm}$	355,81	0,36	3,56	9,09	0,39
$8P_{\pm}$	358,83	0,15	1,5	4,3	0,35

Таким образом, обработка спектров, приведенных в литературе, дает значения СО, близкие к найденным нами, подтверждая обнаруженное нами в кремнии и в ⁴ в германии примерно двукратное расхождение с теорией ⁷. С другой стороны, в ⁷ приведены убедительные подтверждения правильности расчета СО, в частности, совпадение полученных в них величин поляризуемости с экспериментом (для P в Si см. ¹¹). В настоящее время мы можем объяснить только большее, чем для других переходов уменьшение СО для мелких конечных состояний по сравнению с теорией. Оно связано с уходом части поглощения в континуум ("пьедестал" линий), плавно нарастающий к энергии ионизации и наблюдающийся как в

наших, так и в других спектрах (см., например, ¹²). Этот континуум возникает вследствие перекрытия высоколежащих конечных состояний переходов в близко расположенных примесных центрах. Различие между экспериментальными и теоретическими значениями CO можно было бы объяснить тем, что величина эффективного поля на примеси несколько (в 1,5 раза) меньше среднего поля в кристалле. Однако, в настоящее время мы не имеем оснований для такого предположения.

Авторы выражают благодарность А.С.Каминскому и А.Н.Сафонову за предоставление кристалла и измерение степени компенсации примеси в нем, Ю.А.Нечунееву за определение концентрации фосфора в образце, а также Ш.М.Когану и И.Л.Бейнихесу за обсуждение результатов работы.

Литература

1. *Ramdas A.K., Rodriguez S.* Rep. Progr. Phys., 1981, **44**, 1297.
2. *Picus G., Burstein E., Hennis B.* J. Phys. Chem. Sol., 1956, **1**, 75.
3. *Baron R., Young M.H., Neeland J.K. et al.* Appl. Phys. Lett., 1977, **30**, 594.
4. *Rotsaert E., Clauws P., Vennik J., van Goethem L.* Physica, B, 1987, **146**, 45.
5. *Bambakidis G., Brown G.L.* Phys. Rev. B, 1986, **33**, 8180.
6. *Kogan Sh.M., Polupanov A.F.* Sol. St. Comm., 1978, **27**, 1281.
7. *Бейнихес И.Л., Коган Ш.М.* ЖЭТФ, 1987, **93**, 285.
8. *Loewinstein E.V., Smith D.R., Morgan R.L.* Appl. Opt. 1973, **12**, 398.
9. *Dexter D.L.* Sol. St. Phys., 1958, No 6, 353.
10. *Jagannath C., Grabowski Z.W., Ramdas A.K.* Phys. Rev. B, 1981, **23**, 2082.
11. *Capizzi M., Thomas G.A., de Rosa F. et al.* Phys. Rev. Lett., 1980, **44**, 1019.
12. *Fischer D.W., Rome J.J.* Phys. Rev. B, 1983, **27**, 4826.

Институт химии
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
28 ноября 1988 г.