

ЭЛЕКТРОН-ФОНОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА "МЕЛКИХ" ДОНОРАХ
В ФОСФИДЕ ГАЛЛИЯ

А. А. Копылов, А. Н. Пухтин

Впервые для мелких примесных состояний в полупроводниках наблюдалось проявление электрон-фононного взаимодействия с участием фононных состояний всей зоны Бриллюэна.

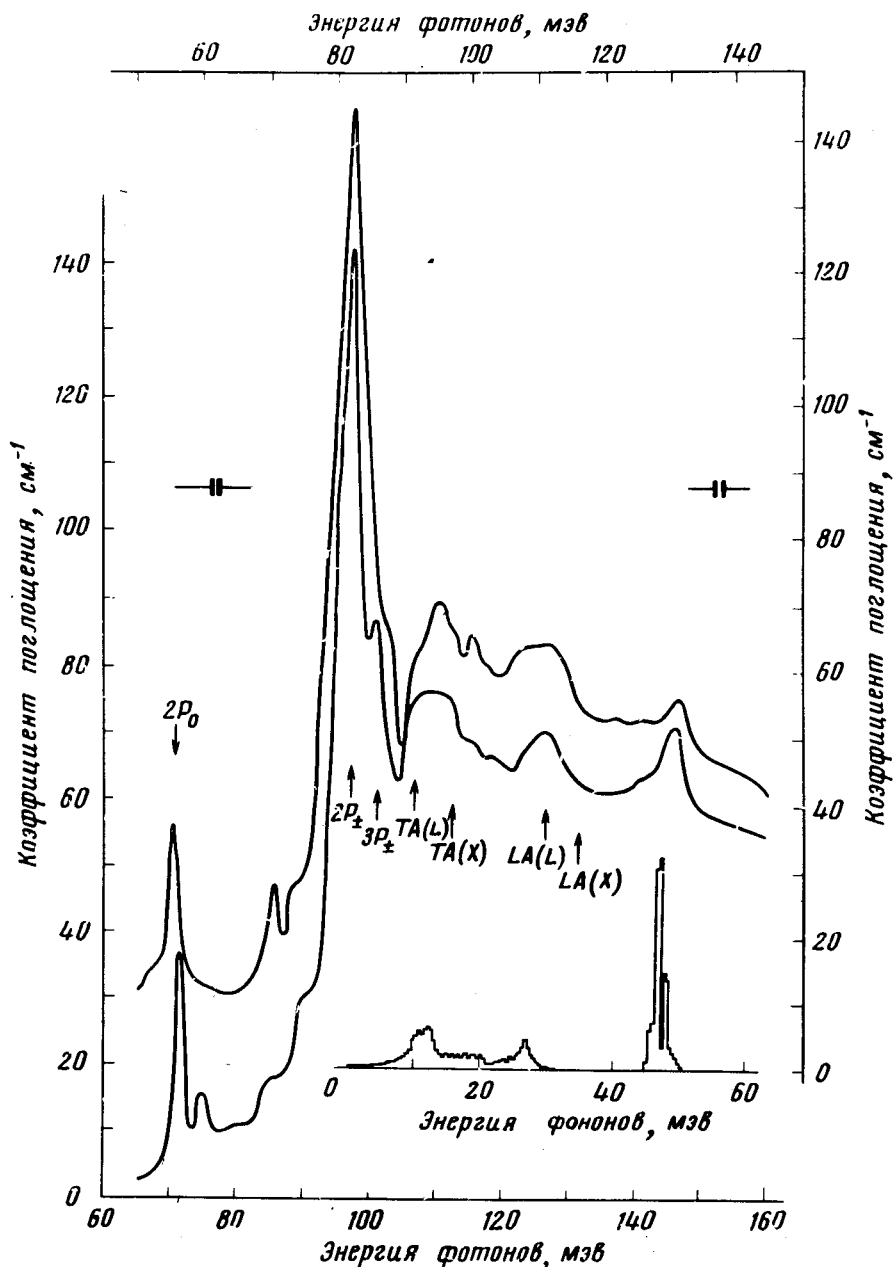
Мелкие примесные состояния в полупроводниках сформированы блоховскими функциями незначительной области k -пространства вблизи экстремума соответствующей зоны. Вследствие этого, связанный с мелким центром электрон в принципе должен преимущественно взаимодействовать с длинноволновыми колебаниями решетки, в то время как взаимодействие с коротковолновыми колебаниями значительно ослабляется.

В спектрах фотовозбуждения мелких донорных центров S и Te в GaP нами обнаружена структура, в которой отчетливо проявляется взаимодействие связанного электрона с фононными состояниями всей зоны Бриллюэна. Аналогичное взаимодействие ранее наблюдалось только для примесных центров малого радиуса.

Эксперименты проводились на спектрометре ИКС-21 с измененной оптической схемой и системой регистрации, что позволило уверенно измерять оптическое пропускание на уровне 1%. Количество рассеянного в приборе света строго контролировалось. Измерения проводились при температурах 20 и 80 К.

Типичный вид полученных спектров показан на рисунке. Наиболее сильная линия с положением максимума 97,0 мэВ для серы и 82,5 мэВ для теллура соответствует переходам электронов из основного состояния доноров $1S$ в возбужденное $-2P_{\pm}$ [1]. Структура из трех линий сложной формы, наблюдающаяся в более коротковолновой области спектра, расположена выше соответствующих порогов фотоионизации и не может быть непосредственно связана с процессами фотовозбуждения.

Обратим внимание на подобие спектров в случае серы и теллура. При температуре 80К вид спектров в основном сохраняется, однако детали имеют менее отчетливый характер.



Спектры примесного поглощения фосфида галлия: $T = 20\text{K}$. Нижняя кривая — GaP : S (масштабы внизу и слева), верхняя кривая — GaP : Te (масштабы вверх и справа). Поглощение, обусловленное колебаниями решетки, вычтено. Стрелками обозначены линии фотовозбуждения и особенности в однофононном крыле, соответствующие акустическим фононам в точках X и L зоны Бриллюэна. На вставке приведена функция плотности фснных состояний GaP [2]

Спектральное положение линий позволяет интерпретировать наблюдаемую структуру как однофононное крыло наиболее сильной бесфононной линии, соответствующей $1S \rightarrow 2P_{\pm}$ переходу. Это предположение подтверждается сравнением спектра с функцией плотности фононных состояний GaP, рассчитанной из экспериментов по неупругому рассеянию нейтронов и приведенной на рисунке. Таким образом, оказывается, что $1S$ и $2P_{\pm}$ состояния мелких доноров в фосфиде галлия, в принципе сформированные блоховскими состояниями незначительной области k -пространства в окрестности абсолютного минимума зоны проводимости, взаимодействуют с фононными состояниями по всей зоне Бриллюэна.

Наблюдаемое усиление электрон-фононного взаимодействия можно связать с сильной анизотропией эффективной массы свободных электронов. По результатам измерений циклотронного резонанса величины поперечной и продольной эффективных масс электронов в GaP составляют $m_t = 0,25 m_0$ и $m_l \approx 5m_0$ [3]. Известно, что энергия ионизации основного состояния доноров определяется величиной поперечной эффективной массы [4]. Оценим соответствующий характерный радиус основного состояния:

$$a_z \sim \frac{\hbar}{(2m_t E)^{1/2}} \approx 13 \text{ \AA}.$$

Здесь E — энергия связи основного состояния составляет 104 мэВ для S и 90 мэВ для Te [1]. Для сравнения укажем, что для доноров в кремнии $a_t \approx 20 \text{ \AA}$. Аналогичным образом можно оценить характерный радиус основного состояния электрона, связанного с донором, и для направления продольной оси эллипсоида эффективной массы, который в случае фосфида галлия оказывается равным $a_l \approx 3 \text{ \AA}$ (для доноров в кремнии $a_l \approx 10 \text{ \AA}$). Таким образом, вследствие аномально большой величины продольной эффективной массы электронов в GaP соответствующий характерный радиус основного состояния электрона, связанного с донором, оказывается сравнимым по величине с аналогичными параметрами центров малого радиуса в ионных кристаллах, что возможно и является причиной наблюдавшегося эффекта.

Ленинградский
электротехнический институт
им. В.И.Ульянова (Ленина)

Поступила в редакцию
22 июля 1976 г.

Литература

- [1] A.Onton. Phys. Rev., 186, 786, 1969; A.Onton, R.C.Taylor. Phys. Rev. B, 1, 258, 1970.
- [2] R.Banerjee, Y.P.Varshni. J. Phys. Soc. Japan, 30, 1015, 1971.
- [3] J.Leotin, J.C.Ousset, R.Barbaste, S.Askenazy, M.S.Skolnick, R.A.Stradling, G.Poiblaud. Sol. St. Comm., 16, 363, 1975.
- [4] W.Kohn, J.M.Luttinger. Phys. Rev. 98, 915, 1955.