

*Письма в ЖЭТФ, том 12, стр. 259 – 262*

*5 сентября 1970 г.*

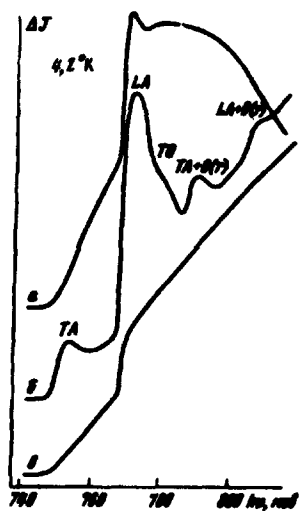
**КИНЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭКСИТОНОВ  
И СПЕКТРЫ ФОТОПРОВОДИМОСТИ ГЕРМАНИЯ**

*Е.Ф.Гросс, А.В.Ильинский, Б.В.Новиков, Н.С.Соколов*

К настоящему времени электронная структура экситона довольно хорошо изучена. Кинетика экситонов, однако, изучена гораздо меньше

[1]. Это связано со значительными трудностями, встречающимися обычно как при теоретическом рассмотрении, так и постановке экспериментов с целью изучения кинетических свойств экситонов. Поскольку экситоны являются нейтральными образованиями, то при их движении не происходит непосредственного переноса заряда. Однако в результате действия различных механизмов фотоактивного распада экситонов [1] в кристалле появляются свободные носители, обуславливающие фотопроводимость (ФП) полупроводника, и в то же время несущие информацию о процессах гибели экситонов [2], в том числе и о их взаимодействии с примесными центрами.

С целью получения такой информации нами изучалось спектральное распределение ФП чистого и легированного германия при низких температурах (2–4°K). Исследования проводились в области непрямых экситонных переходов, где коэффициент поглощения мал (до  $10 \text{ см}^{-1}$ ) и влиянием поверхности можно пренебречь.



Спектральное распределение фотопроводимости германия при различных напряженностях электрического поля. (Масштабы по оси ординат для кривых а, б и в различны: а – 0,05 в/см, б – 1,5 в/см, в – 4,0 в/см)

Учитывая возможность ударной ионизации экситонов [3] и примесных центров [4] уже в электрических полях 3–6 в/см, мы обратили особое внимание на величину напряженности электрического поля, при которой изучалась ФП. Напряженность поля в образцах определялась с помощью зондов.

При больших напряженностях электрического поля вид спектра ФП коррелирует со спектром коэффициента поглощения [5–7]. В спектре ФП отчетливо видны две ступеньки, соответствующие рождению экситонов с возбуждением ТА и LA фононов (рис. а). При уменьшении поля в

области начала ступенек экситонного поглощения появляются резкие максимумы (рис. б). В еще более слабых полях эти максимумы практически также отсутствуют (рис. а).

В связи с тем, что такая зависимость структуры ФП от напряженности поля отсутствует в наиболее чистых кристаллах, мы предположили, что ее появление обусловлено ионизацией примесных центров при захвате ими экситонов. Это явление рассмотрено теоретически в работе Трлифая [8]. Им показано, что наиболее сильное взаимодействие экситонов с примесными центрами происходит при малых скоростях экситонов. Поэтому, при создании экситонов с малой кинетической энергией, а, следовательно, и скоростью (в начале ступеньки) возникает большой фототок. При увеличении энергии создаваемых светом экситонов фототок меняется слабо, так как экситоны термализуются, если время их жизни достаточно велико, и скорости их уменьшаются до значений, эффективных по Трлифая для взаимодействия с примесными центрами. Эти рассуждения качественно объясняют вид спектра ФП при слабых полях (рис. а).

При более сильных полях становится значительной вероятность ударной ионизации экситонов свободными носителями тока. Экситоны не успевают термализоваться за время жизни и при взаимодействии с примесными центрами обладают еще той кинетической энергией, с которой были созданы. В этом случае в спектре ФП проявится зависимость сечения захвата экситонов примесными центрами от скорости экситонов  $\sigma(v)$ . При малых кинетических энергиях фототок максимален и резко спадает при увеличении кинетической энергии, а, следовательно, и скорости экситона. Это приводит к появлению максимумов в начале ступенек экситонного поглощения (рис. б). Анализ формы этих максимумов позволяет определить зависимость  $\sigma(v)$ .

При дальнейшем увеличении напряженности электрического поля время жизни экситонов из-за ударной ионизации свободными носителями сокращается настолько, что длина диффузии экситонов становится меньше среднего расстояния между примесями. Рассмотренный выше механизм ФП становится несущественным, и мы получаем обычное спектральное распределение фоточувствительности германия, определяемое ходом коэффициента поглощения и фотоактивным распадом экситонов из-за ударной ионизации свободными носителями (рис. в).

Помимо основных максимумов (TA и LA), на коротковолновой части рис.б наблюдается два более слабых максимума TA + O(Г) и LA + O(Г).

Эти максимумы сдвинуты относительно основных на энергию оптического фонона в центре зоны Бриллюэна [9]. Появление этих максимумов позволяет предположить, что в этих точках спектра создаются экситоны с малыми скоростями. Это возможно либо в результате двухфононного непрямого поглощения, либо за счет быстрой релаксации кинетической энергии экситонов с возбуждением оптических фононов [10, 11]. Последнее предположение представляется нам более вероятным, поскольку в германии двухфононные переходы не наблюдались в спектрах непрямого экситонного излучения [12]. Разное соотношение между интенсивностями процессов с участием одного и двух фононов для  $TA$  и  $LA$  максимумов может быть объяснено, если учесть, что однофононный процесс в германии с участием  $TA$  фонона является запрещенным, а с участием  $LA$  фонона — разрешенным.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность С.А.Пермогорову за плодотворное обсуждение полученных результатов.

Институт полупроводников  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
7 августа 1970 г.

### Литература

- [1] Р.Нокс. Теория экситонов, Изд. Мир, 1966.
- [2] E.F.Gross, B.V.Novikov. J. Phys. Chem. Sol., 22, 87, 1962.
- [3] В.М.Аснин, А.А.Рогачев, С.М.Рывкин. ФТП, I, 1740, 1967.
- [4] Э.И.Заварицкая. Труды ФИАН, 37, 41, 1966.
- [5] G.G.Macfarlane, T.P.McLean, J.E.Quarrington, V.Roberts. J. Phys. Chem. Sol., 8, 388, 1959.
- [6] Б.В.Новиков, Е.Ф.Гросс, М.А.Дрыгин. Письма в ЖЭТФ, 8, 15, 1968.
- [7] Е.Ф.Гросс, А.В.Ильинский, Б.В.Новиков, Н.С.Соколов. ФТТ, 11, 3007, 1969.
- [8] Trlifaj. M., Czech. J. Phys., 9, 446, 1959.
- [9] B.N.Brockhouse. Phys. Rev. Lett., 2, 256, 1959.
- [10] E.F.Gross, A.V.Ilynskii, K.F.Lieder, B.V.Novikov, N.S.Sokolov. Phys. Stat. Sol., 34, K59, 1969.
- [11] E.F.Gross, S.A.Permogorov, V.V.Travnikov, A.V.Selkin. J. Phys. Chem. Sol. (to be published).
- [12] Benoit a la Guillaume, O.Parodi. Proc. Int. Conf. on Semicond. Phys., p.426, Prague, 1960.