

ФОТОИОНИЗАЦИЯ СВОБОДНЫХ ЭКСИТОНОВ В ГЕРМАНИИ

В. С. Вавилов, В. А. Заяц, В. Н. Мурзин

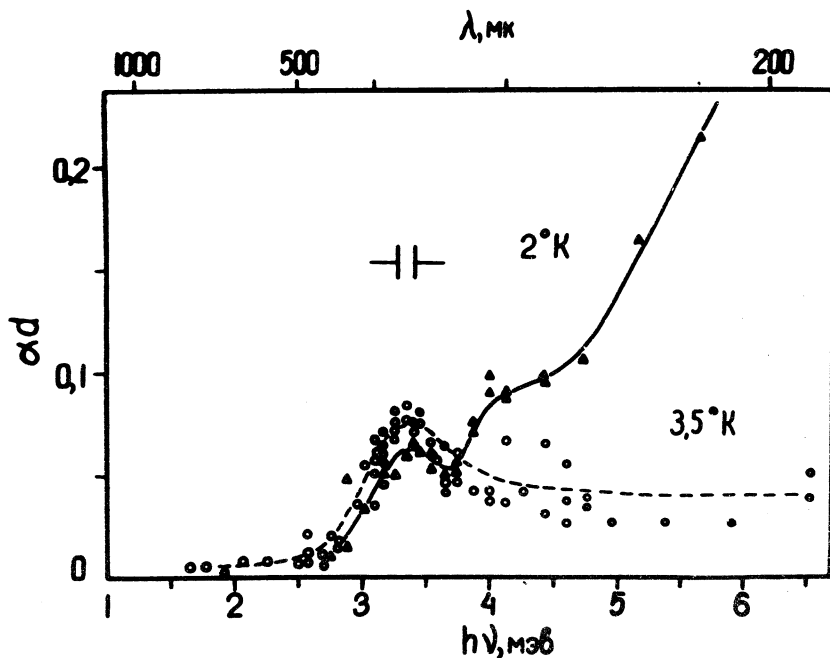
В настоящей работе, по-видимому, впервые удалось экспериментально наблюдать фотоионизацию свободных экситонов субмиллиметровым излучением. Исследования проводились на чистом германии, образцы которого с достаточно большим временем жизни экситонов отбирались по интенсивности линии рекомбинационного излучения в Ge (714,2 мэв).*) Схема возбуждения неравновесных носителей в кристалле и методика спектральных измерений не отличались от описанных ранее /1/. Попрежнему непосредственно измеряемой величиной было отношение пропускания образца при оптическом возбуждении к его темновому пропусканию, которое пересчитывалось к индуцированному оптическому поглощению αd .

Первые попытки наблюдения фотоионизации экситонов в Ge при температуре 1,5°K окончились неудачей. Причины этого сейчас представляются достаточно ясными. В условиях эксперимента большая часть экситонов конденсировалась в новую фазу в виде электронно-дырочных капель /1/. Для того, чтобы перейти в нужную для наблюдения экситонов область фазовой диа-

*) Авторы благодарят Я. Е. Покровского и В. С. Багаева за предоставление образцов германия.

граммы "концентрация - температура", мы попытались повысить температуру кристалла.

Как видно из рис. 1, при повышении температуры образца до $2,0^{\circ}\text{K}$ помимо некоторого уменьшения ве-



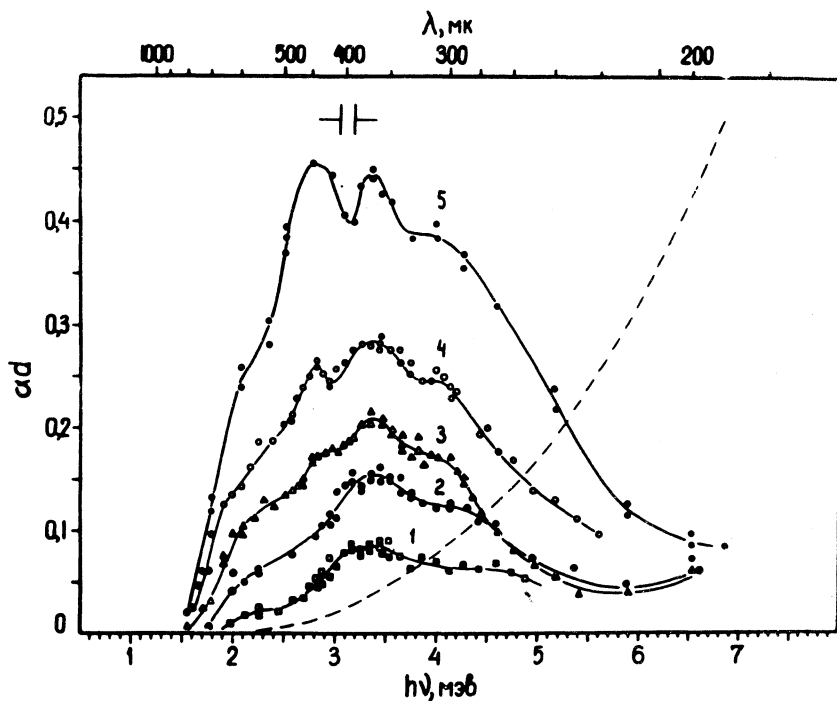
Р и с. 1. Спектральная зависимость α_d , измеренная при различных температурах ($I_{\text{возб}} = 300$ мвт).

личины резонансного поглощения /1/ на его длинноволновом крае обозначились две особенности при $h\nu = 3,5$ и $4,0$ мэв. Многократные измерения при $3,5^{\circ}\text{K}$ показывают, что в области $h\nu \geq 5$ мэв поглощение, связанное с каплями, практически отсутствует, а максимум поглощения при $3,5$ мэв проявляется еще более отчетливо.

Пытаясь сохранить высокую чувствительность измерений и в то же время избежать конденсации экс-

тонов, дальнейшие исследования мы проводили при $T = 1,5^{\circ}\text{K}$, теплоизолируя образцы от жидкого гелия с помощью тонкой полиэтилентерефталатной пленки. В этих условиях образец должен был перегреваться за счет возбуждающего света, причем можно было ожидать, что температура его будет возрастать скачкообразно, а в промежутках между скачками меняться незначительно /2/. Такой характер перегрева образцов, по-видимому, и имел место в эксперименте. Это следует из скачкообразного вида измеренной в этих условиях зависимости поглощения при $h\nu = 3,5$ мэв от интенсивности возбуждающего света. Измерить температуру образца в условиях перегрева пока не удалось, однако, из различных соображений можно думать, что при спектральных измерениях она составляла $5-7^{\circ}\text{K}$. Спектры поглощения такого теплоизолированного образца, измеренные при различных уровнях возбуждения, а следовательно, и при различных температурах, показаны на рис. 2. Прежде всего видно, что в этих условиях отсутствует резонансное поглощение при $h\nu \geq 5$ мэв. Спектр поглощения имеет вид широкой полосы с двумя максимумами при $3,35$ и $2,8$ мэв, причем более длинноволновый максимум появляется и растет при увеличении температуры. На всех кривых проявляется также некоторая особенность при $4,0$ мэв и заметный излом на длинноволновом крае спектра при $2,1$ мэв.

Поскольку приведенные спектры наблюдались только на образцах чистого германия и приходится на область энергии связи свободных непрямых экситонов, естественно предположить, что они обусловлены взаимодействием длинноволнового ИК излучения со свободными непрямыми экситонами в германии. Полный энергетический спектр экситонов в германии не рассчитан, а имеющиеся данные о двух нижних уровнях экситонов в Ge /3,4/ (табл.1) для интерпретации полученных спектров недостаточны. Поэтому основные выводы сделаны в результате сопоставления с другой, более хорошо изученной водородоподобной электронной систе-



Р и с. 2. Спектральная зависимость α_d , измеренная на теплоизолированном образце германия при температуре жидкого гелия $1,5^\circ\text{K}$. Уровень возбуждения растет с номером кривой. Пунктиром показан край резонансного поглощения электронно-дырочными каплями, измеренный на том же образце при $1,5^\circ\text{K}$ без перегрева; интенсивность возбуждения для пунктирной кривой соответствует кривой 4.

мой, а именно системой мелких донорных примесей элементов \bar{V} группы в германии. Близость теоретических моделей экситонов /3,4/ и мелких донорных примесей в Ge /5/ представляет некоторую основу для такого сопоставления. Как известно, в случае мелких

Таблица 1

Энергия уровня	Теория /3/	Экспер. /3/	Теория /4/	Экспер. /4/	По спектрам фотоионизации
E_{31} , мэв	3,3	$3,3 \pm 0,4$	3,47	$2,7 \pm 0,4$	4,0
E_{32} , мэв	2,5	$2,3 \pm 0,4$	2,88	$1,7 \pm 0,4$	3,34
$\Delta = E_{31} - E_{32}$, мэв	0,8	1,0	0,59	1,0	0,66

донорных примесей в германии теория дает весьма хорошее согласие с экспериментом, а для самих спектров примесного поглощения наиболее характерным является наличие двух интенсивных линий (типа В), связанных с переходами из двух химически расщепленных уровней основного состояния на возбужденный уровень ($2p \pm 1$) /5/. Другие линии в спектре менее интенсивны, а переходы в зону проводимости проявляются в виде пологого максимума малой интенсивности. Опираясь на аналогию со спектрами примесного поглощения в Ge, обнаруженную структуру спектра экситонного поглощения, а именно, максимумы поглощения при $h\nu_1 = 3,35$ мэв и $h\nu_2 = 2,8$ мэв, можно связать с переходами типа В из двух нижних состояний экситона в соответствующие возбужденные состояния. То обстоятельство, что эти линии связаны с переходами из различных начальных состояний, подтверждается разной зависимостью их интенсивности от температуры. По положению линий поглощения типа В можно определить энергию ионизации экситона /5/. Такой расчет для двух уровней дает значения $E_{31} = 4,0$ мэв и $E_{32} = 3,34$ мэв (табл. 1). Для перехода типа Е в этом случае получается энергия 2,1 мэв, что согласуется с наблюдавшейся особенностью в длинноволновой части спектра

поглощения. Данные измерений позволяют определить величину сечения поглощения $\sigma_{\text{эксн}}^{\text{эксп}} = 10^{-13} \text{ см}^2$, которая хорошо согласуется с $\sigma_{\text{эксн}}^{\text{теор}} = 0,7 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$, оцененной по водородоподобной модели /6/.

Наконец, следует отметить, что в отличие от примесей экситонные спектры характеризуются большой шириной полос поглощения $\Delta h\nu \approx (1+2)kT$, что может быть связано с наличием у свободных экситонов кинетической энергии.

В заключение авторы выражают признательность Б. М. Вулу и Л. В. Келдышу за интерес к работе, а также В. С. Виноградову за обсуждение результатов и В. В. Буздину за помощь при проведении измерений.

Поступила в редакцию
5 февраля 1971 г.

Л и т е р а т у р а

1. В. С. Вавилов, В. А. Заяц, В. Н. Мурзин. Proc. X International Conference of the Phys. of Semicond., Cambridge, Massachusetts, 1970, p.509.
2. Э. И. Заварицкая. ФТТ, 2, 3009 (1960).
3. В. Lax, S. Zwerdling, K. J. Button, L. Roth. Phys. Rev., 114, 80 (1959).
4. Т. Р. McLean, R. Loudon. J. Phys. Chem. Sol., 13, 1 (1960).
5. J. H. Reuzer, P. Fisher. Phys. Rev., 135, 1125 (1964).
6. Г. А. Бере, Э. Солпитер. Квантовая механика атомов с одним и двумя электронами, стр. 478. М., Физматгиз, 1960 г.