

СПЕКТРЫ ФОТОВОЗБУЖДЕНИЯ СВОБОДНЫХ ЭКСИТОНОВ СУБМИЛЛИМЕТРОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В "УЛЬТРАЧИСТОМ" ГЕРМАНИИ

*В. С. Вавилов, Н. В. Гузеев, В. А. Заяц, В. Л. Кононенко,
Т. С. Мандельштам, В. Н. Мурзин*

Впервые в широком субмиллиметровом диапазоне (1,7 ÷ 3,7 мэв) зарегистрирована серия линий поглощения, соответствующих переходам из основного в возбужденные состояния свободного экситона в германии. Измерения проведены при 1,5 ÷ 4,2°К на образце с концентрацией остаточных примесей $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Из температурных измерений определена величина расщепления основного состояния непрямого экситона $\Delta \approx 0,7 \text{ мэв}$.

До последнего времени экспериментальные исследования экситонов в полупроводниках проводились исключительно в области междузонных переходов, т. е. в оптическом диапазоне спектра. Между тем, очевидно, что, как и в случае мелких примесей, более полная информация о строении экситонов и их энергетическом спектре может быть получена из измерений в области, соответствующей энергии связи экситонов, т. е. для большинства полупроводников в длинноволновом ИК диапазоне спектра. Впервые такие эксперименты были проведены на германии [1], где удалось зарегистрировать поглощение в области 2 — 5 мэв, обусловленное фотовозбуждением и фотоионизацией экситонов. В дальнейшем в такого рода исследованиях была применена более чувствительная методика высокого разрешения с использованием ламп обратной волны (ЛОВ) в качестве монохроматического источника субмиллиметрового излучения, что позволило зарегистрировать в спектре поглощения свободными экситонами в германии триплет с максимумом при 3,42 мэв [2, 3].

В той же области спектра была обнаружена фотопроводимость связанная с фототермоионизацией свободных экситонов в германии [3, 4]. Во всех этих экспериментах использовались образцы германия с концентрацией остаточных примесей $10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$, соизмеримой с типичными для этих опытов значениями концентраций экситонов порядка $10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$, что не исключало полностью возможные примесные эффекты.

В данной работе приведены результаты исследования спектров фотовозбуждения экситонов в достаточно широком субмиллиметровом диапазоне в кристаллах "ультрачистого" германия, содержание остаточных примесей в котором не превышало $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ [5]. Измерения проводились на ЛОВ [6] в интервалах длин волн 340 – 455 и 510 – 730 мкм, а также с помощью дифракционного спектрометра в далекой ИК области 60 – 700 мкм. При измерениях на дифракционном спектрометре модулировалось длинноволновое ИК излучение [1]. В экспериментах с ЛОВ использовалась дифференциальная методика с модулированием излучения лампы накаливания, создающей неравновесные носители тока в образце. Уровень оптической генерации электронно-дырочных пар составлял $10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$. Эксперименты проводились в интервале температур 1,5 – 4,2°K.

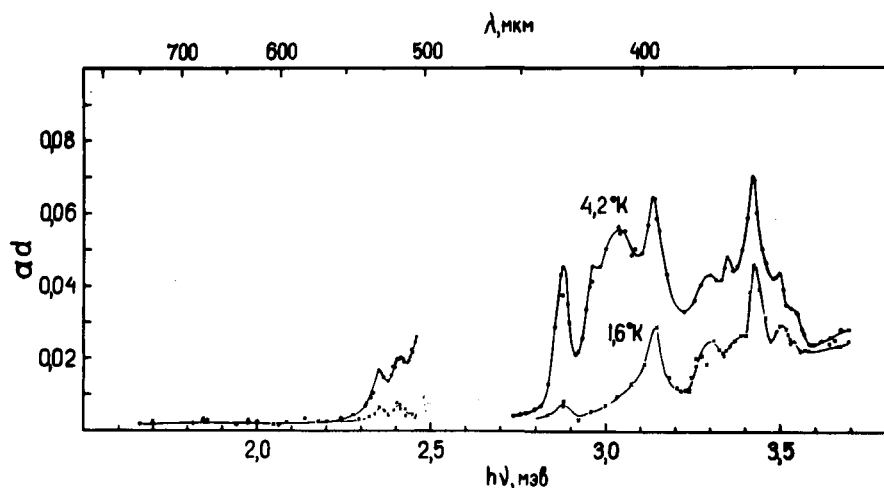


Рис. 1. Спектр экситонного поглощения в "ультрачистом" германии

В измерениях при 1,5°K, проведенных с помощью дифракционного спектрометра, наблюдался спектр резонансного поглощения электронно-дырочными каплями в "ультрачистом" германии, мало отличающийся от наблюдавшихся ранее на образцах германия с содержанием примесей $10^{12} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$ [2]. На краю спектра при энергии фотонов 2 – 4 мэв были заметны некоторые особенности, которые проявлялись более отчетливо при повышении температуры до 2°K и, как было показано, соответствовали фотовозбуждению свободных экситонов [1, 2]. Результаты детального исследования длинноволнового участка спектра, проведенного с более высоким разрешением и чувствительностью методом ЛОВ при 4,2 и 1,6°K, представлены на рис. 1. Как видно, спектр пог-

лошения свободными экситонами в германии приходится на область энергий $2,3 \div 3,6$ мэв и состоит из ряда линий поглощения шириной порядка $0,05$ мэв (см., например, линию при $2,875$ мэв), которые перекрываются на некоторых спектральных участках. Положения отдельных линий и максимумов поглощения в спектре при $4,2^\circ\text{K}$, измеренные с точностью $\pm 0,005$ мэв, соответствуют энергиям: $2,355$ мэв; $2,410$ мэв; $2,875$ мэв; $2,965$ мэв; $3,040$ мэв; $3,135$ мэв; $3,295$ мэв; $3,350$ мэв; $3,420$ мэв; $3,495$ мэв; $3,540$ мэв. Примерно такие же спектры наблюдаются на других образцах относительно чистого германия n - и p -типа с концентрацией остаточных примесей $10^{12} \div 10^{13}$ см $^{-3}$.

Поскольку измеренный спектр состоит из узких линий, можно заключить, что он обусловлен главным образом переходами из основного в возбужденные состояния экситона. Из рис. 1 при этом с очевидностью следует, что энергия связи экситона в основном состоянии для германия превышает $3,7$ мэв.

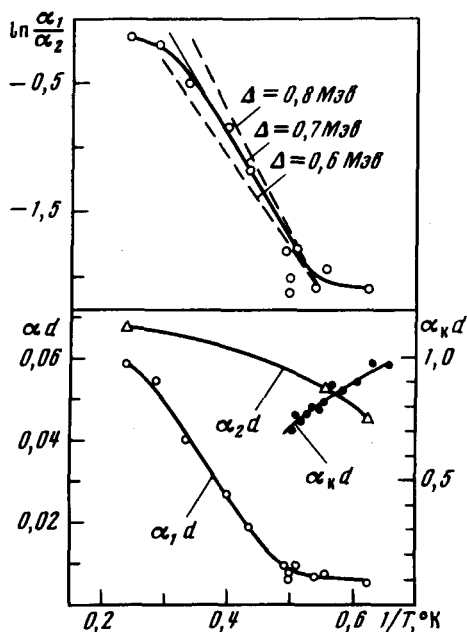


Рис. 2. Зависимость величины индуцированного поглощения αd в различных частях спектра: $\alpha_1 d - 3,00$ мэв $\alpha_2 d - 3,42$ мэв и $\alpha_n d - 9$ мэв и логарифма отношения α_1/α_2 от обратной температуры

При понижении температуры до $1,6^\circ\text{K}$, как видно из рис. 1, интенсивность полос поглощения в области $3,135 - 3,540$ мэв несколько уменьшается, в то время, как в более длинноволновой части экситонного спектра поглощение падает практически до нуля. Такие изменения в спектре можно объяснить, предположив, что эти две группы линий обусловлены, соответственно, переходами с нижнего и верхнего уровней основного состояния экситона в германии. На рис. 2 приведены температурные зависимости интенсивностей поглощения $\alpha_1 d$ и $\alpha_2 d$ (α — коэффициент поглощения; $d \sim 1$ мм — толщина образца), измеренные в двух характерных точках спектра, а также температурный ход отношения этих интенсивностей. Поскольку последнее определяется населенностью двух уровней N_1 и N_2 : $\alpha_1 d / \alpha_2 d = N_1 / N_2 \sim e^{-\Delta / kT}$, то по наклону прямой на рис. 2 можно оценить величину Δ энергетического расстояния между

двумя уровнями основного состояния экситона в германии $\Delta = 0,7$ мэв. Полученное значение Δ удовлетворительно согласуется с теоретическими оценками и данными измерений в области междузонных переходов [7, 8]. Уменьшение интенсивности поглощения $\alpha_1 d$ при понижении температуры до 1,6°К, по-видимому, связано с переходом части носителей в конденсированную фазу, о чем свидетельствует рост величины резонансного поглощения $\alpha_k d$, измеренного при $h\nu = 9$ мэв.

Поскольку измеренные линии экситонного спектра оказались весьма узкими ($\sim 0,05$ мэв), следует заключить, что наличие у экситонов кинетической энергии ($kT \sim 0,4$ мэв при 4,2°К) не вносит существенного вклада в уширение линий экситонного поглощения, как это предполагалось ранее [1]. По-видимому, как и в случае мелких примесей, полуширина линий экситонного поглощения при низких температурах определяется взаимодействием экситонов с нулевыми колебаниями кристаллической решетки. Оценки, выполненные на основе теории [9] дают $\Delta h\nu \sim \sim 0,01 \pm 0,02$ мэв. Вместе с тем в наших экспериментах усредненная по объему кристалла концентрация достигала значений $\sim 10^{13}$ см⁻³ ¹⁾. При этом заметный вклад в уширение линий могут вносить процессы взаимодействия экситонов между собой [2].

Авторы выражают благодарность Н.А.Ирисовой и А.М.Прохорову за интерес к работе и полезные обсуждения.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
22 марта 1973 г.

Литература

- [1] В.С.Вавилов, В.А.Заяц, В.Н.Мурзин. Краткие сообщения по физике (ФИАН) №4, 9, 1971.
- [2] В.Н.Мурзин, В.А.Заяц, В.Л.Кононенко. Труды XI Международной конференции по физике полупроводников, 678, 1972.
- [3] Е.М.Гершензон, Г.Н.Гольцман, Н.Г.Птицына. Письма в ЖЭТФ, 16, 228, 1972.
- [4] В.И.Сидоров, Я.Е.Покровский. ФТП, 6, 2405, 1972.
- [5] R. N. Hall, T. J. Solys. IEEE Trans. NS-18, 160, 1971.
- [6] М.Б.Голант, З.Т.Алексеев, З.С.Короткова, Л.А.Лункина, А.А.Негирев, О.П.Петрова, Т.Б.Реброва, В.С.Савельев. ПТЭ, №3, 232, 1969.
- [7] T. P. McLean, R. Loudon. J. Phys. Chem. Sol., 13, 1, 1960.
- [8] Е.Ф.Гросс, В.И.Сафаров, А.Н.Титков, Н.С.Шлимак. Письма в ЖЭТФ, 13, 332, 1971.
- [9] M. Lax. E. Burstein. Phys. Rev., 100, 592, 1955.

¹⁾ Объемное время жизни экситонов в исследованных образцах "ультрачистого" германия при тех же концентрациях экситонов при 4,2°К составляет 5 – 10 пикосек по данным Б.В.Зубова и В.П.Калинушкина (частное сообщение).