

Письма в ЖЭТФ, том 9, стр. 415-419

5 апреля 1969 г.

КОНДЕНСАЦИЯ ЭКСИТОННОГО ГАЗА В ГЕРМАНИИ

24

В.М.Аснин, А.А.Розачев

В работах [1-3] сообщалось о наблюдении металлизации экситонного газа в германии, проявляющейся в резком возрастании электропроводности при достижении некоторого критического значения плот-

ности экситонов. Эти опыты, однако, не позволили выяснить вопрос о механизме такого перехода. В принципе возможно, что переход происходит в результате более или менее постепенного захлопывания энергетической щели между уровнями экситонов и состояниями сплошного спектра. С другой стороны может оказаться, что металлизация экситонов является фазовым переходом первого рода [4,5]. В последнем случае следует ожидать образования в образце областей, в которых экситоны находятся либо в диэлектрическом, либо в металлизированном состоянии. Важной отличительной особенностью этого случая могло бы явиться постоянство концентрации в металлизированных областях.

Настоящая работа посвящена предварительным результатам экспериментального исследования этого вопроса.

В работах [3,6,7] было обнаружено, что форма края поглощения прямых переходов германия существенно зависит от концентрации свободных носителей тока и показано, что изменение формы края поглощения происходит вследствие экранирования кулоновского взаимодействия создаваемых светом электронов и дырок. Этот эффект проявляется в модуляции проходящего через образец света с длиной волны вблизи края при появлении в образце свободных носителей тока. Форма спектров модуляции определяется концентрацией создаваемых в полупроводнике носителей тока. В этой работе аналогичные измерения были использованы для получения ответа на вопрос, является ли металлизация экситонов фазовым переходом первого рода. Действительно, в случае, если образец разбивается на области, в которых концентрация свободных носителей постоянна и области, где свободные носители практически отсутствуют, то следует ожидать постоянства формы спектров модуляции¹⁾. Наоборот постепенное нарастание концентрации свободных электронов и дырок приведет к существенному изменению формы этих спектров [7].

Опыты проводились на образцах германия p -типа ($\rho = 25 \text{ ом}\cdot\text{см}$) толщиной 6 мм, помещенных в жидкий гелий. Для уменьшения скорости поверхностной рекомбинации образцы травились в полирующем травителе. Электронно-дырочные пары создавались светом импульсной лам-

¹⁾ При этом предполагается, что образец достаточно тонок, а изменения коэффициента поглощения достаточно малы.

пы ИСШ-100 с длительностью импульса $1,5 \text{ мксек}$. Одновременно образец просвечивался монохроматическим светом в области длин волн, соответствующих краю прямых переходов. Сигнал модуляции интенсивности этого света, возникающий при импульсном освещении, принимался германиевым фотодиодом с постоянной времени $\approx 1 \text{ мксек}$ и регистрировался при помощи импульсного синхронного детектора, который позволял измерять сигнал модуляции с регулируемой задержкой относительно возбуждающего импульса.

Так как время жизни электронно-дырочных пар в интервале температур от 77 до $1,7^\circ\text{K}$ было значительно больше длительности импульса возбуждающего света, то среднюю по образцу концентрацию электронов и дырок ¹⁾ можно было определять по формам спектров модуляции при температуре жидкого азота. При этом зависимость величины коэффициента поглощения вблизи прямого экситона от концентрации свободных носителей градуировалась по образцам, легированным сурьмой и галлием и имевшим известную концентрацию носителей тока.

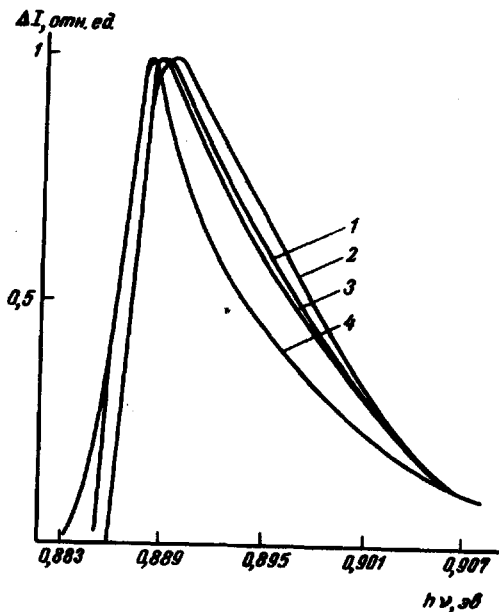


Рис.1. Спектры просветления германия в области прямых переходов при различных уровнях возбуждения образца при $T = 4,2^\circ\text{K}$: 1 - $n = 3,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, 2 - $n = 5,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, 3 - $n = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, 4 - $n = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$

На рис.1 показаны спектры просветления образца, полученные при различных уровнях возбуждения, а на рис.2 - зависимость величины интегрального просветления от средней по образцу концентрации элек-

¹⁾ Имеется в виду полная концентрация как свободных, так и связанных в экситоны электронно-дырочных пар.

тронно-дырочных пар. Модуляция света в образце появляется, когда концентрация электронно-дырочных пар превышает 10^{15} см^{-3} . Существенно, что с момента появления модуляции на всем участке резкого роста ее величины форма спектров модуляции остается практически неизменной (кривые 1–3, рис.1).

Из этого факта следует, что в образце существуют отдельные области, в которых экситоны находятся в металлизированном состоянии с постоянной плотностью, не зависящей от уровня возбуждения. Возрастающие локальной концентрации становятся возможным лишь после того, как эти области полностью заполняют образец. Заполнение образца металлизированными экситонами, по-видимому, происходит вблизи точки окончания резкого роста модуляции на рис.2, так как при больших концентрациях наблюдается существенное изменение формы спектра модуляции (кривая 4, рис.1). Следует отметить, что именно в этой области концентраций наблюдалось уширение спектров люминесценции в области непрямых переходов, что, очевидно, отражает рост энергии Ферми. В то же время на предшествующем участке резкого роста модуляции форма спектров люминесценции оставалась практически неизменной.

Изложенные факты позволяют заключить, что наблюдаемые металлизированные области представляют собой "капли" сконденсировавшихся экситонов.

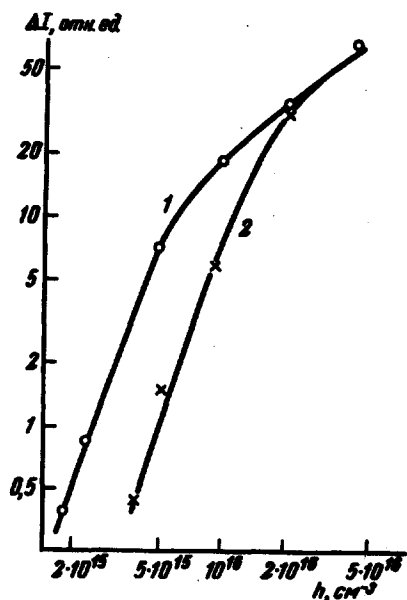


Рис.2. Зависимость величины интегрального просветления от средней по образцу концентрации электронно-дырочных пар: 1 — $T = 4,2^\circ\text{K}$, 2 — $T = 1,7^\circ\text{K}$

В другой серии опытов для изменения концентраций электронно-дырочных пар использовалось изменение времени задержки, через которое производилось измерение спектров и величины модуляции. Уменьшение

концентрации со временем может быть приблизительно описано зависимостью $n = n_0(1 - e^{-t/\tau})$, где τ — время жизни ¹⁾, поэтому каждой величине задержки t соответствовала определенная величина концентрации электронно-дырочных пар. При такой постановке опыта участок резкого роста модуляции отсутствовал, однако постоянство формы спектров модуляции в соответствующей области концентрации оставалось. Результаты этих опытов, вероятно, характеризуют кинетику образования "капель" экситонного конденсата. При малой средней концентрации за время жизни экситонов лишь небольшая часть их успевает сконденсироваться в "капли". Эта часть однако быстро растет при приближении концентрации к критической величине, равной концентрации в "капле". При постепенном вымирании носителей постепенно уменьшается объем "капель", что и приводит к более плавной зависимости величины модуляции от концентрации. Как следует из приведенных здесь экспериментальных данных плотность электронно-дырочных пар в металлической фазе примерно равна 10^{16} см^{-3} и несколько увеличивается с понижением температуры.

Авторы благодарят С.М.Рывкина за поддержку и интерес, проявленный к работе и Л.В.Келдыша за плодотворное обсуждение вопросов, относящихся к коллективным свойствам экситонов большого радиуса.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
24 февраля 1969 г.

Литература

- [1] В.М.Аснин, А.А.Рогачев, С.М.Рывкин. ФТП, 1, 1742, 1967.
- [2] В.М.Аснин, А.А.Рогачев. Письма в ЖЭТФ, 7, 464, 1968.
- [3] А.А.Рогачев. Proc. IX International Conf. on the Phys. Semicond. Moscow, 1968, p.407, Leningrad, 1968.
- [4] N.F.Mott. Phil. Mag., 6, 287, 1961.
- [5] Л.В.Келдыш, А.А.Рогачев. Доклад на сессии отделения Общей физики и астрономии АН СССР, сентябрь 1968.
- [6] В.М.Аснин, А.А.Рогачев. Phys. Sol. Stat., 20, 755, 1967.
- [7] В.М.Аснин, А.А.Рогачев, Г.П.Эристави. Phys. Sol. Stat., 29, 443, 1968.

¹⁾ О зависимости концентрации от времени можно было судить по характеру релаксации фотолюминесценции образцов при тех же уровнях возбуждения.