

НАБЛЮДЕНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ СПЛОШНОГО СПЕКТРА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Д.П.Дворников, В.М.Салманов, И.Д.Ярошецкий

Сообщается о наблюдении, на примере моноселенида индия (InSe) и галлия (GaSe), резонансного излучения, обусловленного переходами из состояний, находящихся в глубине зоны проводимости и валентной зоны и расположенных на расстояниях, соизмеримых с шириной запрещенной зоны полупроводника. В качестве возможного объяснения природы обнаруженного излучения привлекаются представления о гиперболическом экситоне.

Люминесценция в полупроводниках обычно наблюдается из состояний вблизи края основного поглощения. В ряде случаев было обнаружено и более коротковолновое рекомбинационное излучение за краем основного поглощения в непосредственной близости от него. Сюда относятся работы по наблюдению излучения вблизи прямого перехода в Ge [1], а также люминесценции в GaAs, связываемой с излучением разогретых светом носителей тока [2]. В настоящей работе сообщается об обнаружении люминесценции в полупроводниках, обусловленной переходами из состояний, находящихся в глубине зоны проводимости и валентной зоны и расположенных на расстояниях, соизмеримых с шириной запрещенной зоны полупроводника E_g . Эксперименты были выполнены на монокристаллах моноселенида индия (InSe) и галлия (GaSe) с E_g соответственно $\sim 1,3$ и $\sim 2,13$ эв. Возбуждение осуществлялось с помощью рубинового ($\hbar\omega = 1,79$ эв) и второй гармоники неодимового ($\hbar\omega = 2,34$ эв) лазеров, работающих в частотном режиме с модуляцией добротности. Регистрация люминесценции производилась с помощью монохроматора МДР-2 с последующим синхронным детектированием и записью спектров на самописце. Измерения были выполнены в интервале температур от 2,5 до 400°K. При возбуждении образцов InSe светом направленным вдоль *C*-оси, были обнаружены отчетливые линии излучения в области 2,5 — 2,6 эв, а в случае GaSe при $T = 4,2^\circ\text{K}$ наблюдалась люминесценция с энергией фотонов 3,361 эв. Соответствующие данные о спектральном распределении наблюдаемого излучения в InSe при различных температурах представлены на рис. 1. В этом случае при низких температурах в интервале от 2,5 до 77°K наблюдаются две линии излучения с энергиями $E_1 = 2,547$ эв и $E_2 \sim 2,613$ эв при $T = 4,2^\circ\text{K}$, и $E_1 = 2,531$ эв и $E_2 \sim 2,588$ эв при $T = 77^\circ\text{K}$. При этом по мере увеличения температуры интенсивность линии E_2 заметно уменьшается по величине и при температурах свыше 100°K она полностью исчезает. Следует отметить, что величина энергии E_2 оказывается несколько различной для различных образцов, а интенсивность этой линии существенно меняется от кристалла к кристаллу. Что же касается линии E_1 , то ее энергетическое положение, а также интенсивность в пределах погрешности эксперимента одинаковы для различных образцов. При температурах свыше 77°K наблюдается некоторое уширение линии E_1 без существенного уменьшения интенсивности вплоть до $T = 380^\circ\text{K}$. Зависимости по-

ложения, интенсивности в максимуме I_1 , полуширины ΔE_1 , а также интегральной интенсивности Q_1 линии E_1 от температуры представлены на рис. 2. Здесь же для сравнения показаны температурные зависимости интенсивности I_2 и положения линии E_2 .

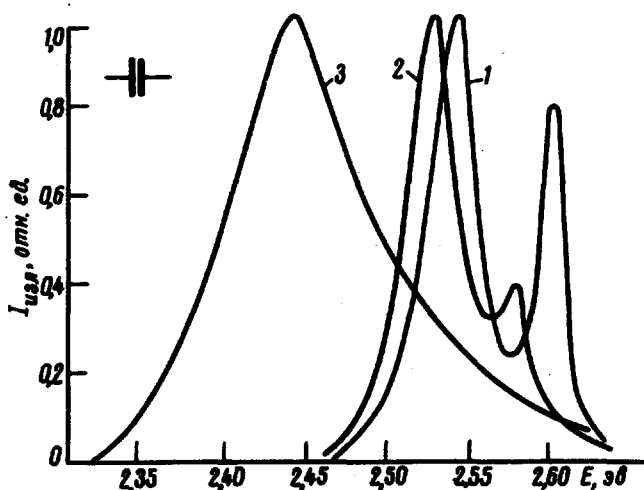


Рис. 1. Спектры излучения InSe при различных температурах. $I \sim (2 - 3) \cdot 10^{24}$ кэ/см² · сек: 1 - $T = 4,2^\circ\text{K}$, 2 - $T = 77^\circ\text{K}$, 3 - $T = 293^\circ\text{K}$

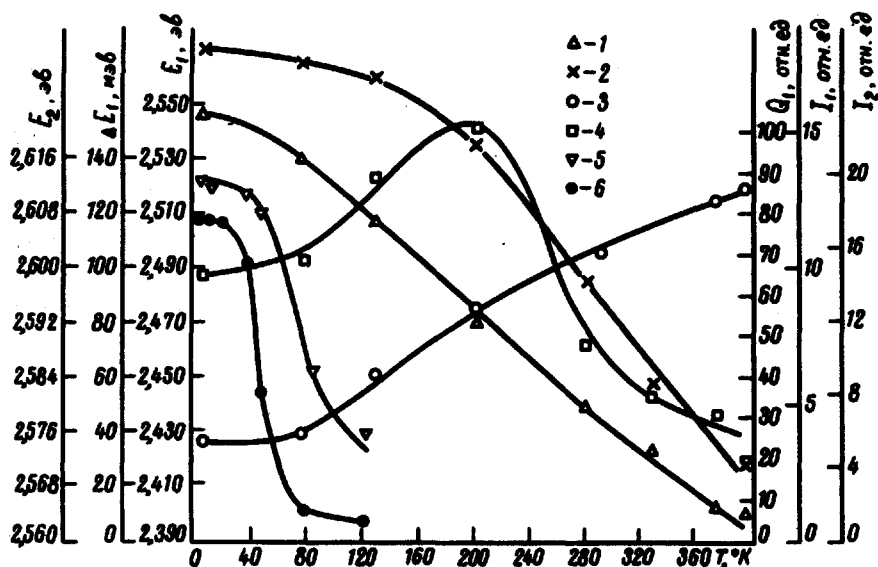


Рис. 2. Температурные зависимости параметров наблюдаемого излучения. $I_0 \sim (5 - 6) \cdot 10^{24}$ кэ/см² · сек: 1 - E_1 ; 2 - I_1 ; 3 - ΔE_1 ; 4 - Q_1 ; 5 - E_2 ; 6 - I_2

Обращает на себя внимание сравнительно большая полуширина линии (~ 40 мэВ) при низких температурах (полуширина линии излучения GaSe примерно такая же), постоянство ее в интервале от 2,5 до 77°K , а также сравнительно слабое уширение при дальнейшем повышении темпе-

ратуры. При этом существенно подчеркнуть факт наличия излучения E_1 вплоть до очень высоких температур (до 400°K), причем интегральная интенсивность при 400°K всего лишь в 2,5 раза ниже, чем при гелиевой температуре. Что же касается зависимости интенсивности обнаруженного излучения I_Λ от интенсивности возбуждения I_0 , то линии E_1 и E_2 хорошо аппроксимируются зависимостями $I_\Lambda \sim I_0^m$, где для линии $E_1, m = 1,5$, а для $E_2, m = 2$. Наблюдаемая в излучении линия E_1 полностью коррелирует с соответствующим пиком в глубине области собственного поглощения, наблюдающимся в работах [3, 4]. Сравнение параметров этой линии, полученных из исследования излучения и поглощения при различных температурах, дано в таблице.

Излучение ¹⁾			Поглощение	
$T, ^\circ\text{K}$	$E_1, \text{эв}$	$E_1, \text{мэв}$	$E_1, \text{эв} [4]$	$E_1, \text{эв} [3]$
4,2	2,547	37	—	—
15	2,546	37	2,546	—
77	2,531	39	—	2,534
90	2,526	42	2,527	—
200	2,470	83	2,470	—
293	2,440	104	2,420	2,440
376	2,402	125	—	—
$\delta E_1 / \delta T \cdot 10^4 \text{ эв/град}$			$\delta E_1 / \delta T \cdot 10^4 \text{ эв/град}$	

2,3(4,2 – 77)⁰K

5,03(100 – 400)⁰K

2,5 ± 0,1(15 – 100)⁰K 4,2(77 – 300)⁰K

5,2 ± 0,2(100 – 200)⁰K

5,5 ± 0,5(200 – 300)⁰K

Перейдем к обсуждению полученных результатов. Тот факт, что положение и интенсивность линии E_2 различны в разных образцах и соответствующий аналог отсутствует в поглощении²⁾, по-видимому, свидетельствует о том, что эта линия связана с дефектами или примесями, обладающими, однако, той спецификой, что их уровни располагаются в области сплошного спектра, превышающей край собственного поглощения на величину порядка E_g .

Резонансный характер линии E_1 с несомненностью свидетельствует об экситонной природе наблюдаемого излучения. Вопрос же о типе критической точки, с которой связан этот экситон, на основании получен-

1) Данные настоящей работы.

2) Правда, измерение поглощения производилось не на тех же образцах, на которых наблюдалось излучение

ных нами, а также имеющихся в литературе данных, однозначно в настоящее время, по-видимому, не может быть решен. Однако, как нам представляется, полученные в настоящей работе результаты и, в частности, значительная полуширина линии, ее слабая температурная зависимость, стабильность линии вплоть до 400°K , слабая зависимость интегральной интенсивности от температуры, асимметрия линии излучения с более резким коротковолновым краем, значительно четче проявляющаяся при меньших интенсивностях возбуждения I_0 , а также результаты исследования поглощения, полученные в работах [3 – 5], могут быть более последовательно интерпретированы с точки зрения представлений о гиперболическом экситоне [6 – 8].

Авторы благодарят С.М.Рывкина, Э.И.Рашба и Е.Л.Ивченко за обсуждение работы.

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

Поступила в редакцию
24 мая 1974 г.

Литература

- [1] J.R.Haynes, N.G.Nilson. Proc. 7-th Conf. Phys. Semicond., Paris, 1964, p. 21.
 - [2] J.Shak, R.Leite. Phys. Rev. Lett., 22, 1304, 1969.
 - [3] А.И.Савчук и др. УФЖ, 17, 1548, 1972.
 - [4] Г.И.Абуталыбов, М.А.Белле. ФТП, 8, 1974.
 - [5] V.K.Subashiev et all. Solid State Comm., 9, 369, 1971.
 - [6] J.C.Phillips. Phys. Rev., 136, 1705, 1964.
 - [7] B.Velicky, J.Sak. Phys. Stat. Sol., 16, 147, 1966.
 - [8] E.O.Kane. Phys. Rev., 180, 852, 1969.
-