

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ УРОВНЯХ ИОНИЗАЦИИ

Д.И.Вайсбурд, Б.Н.Семян

Обнаружен новый вид собственной люминесценции ионных кристаллов, которая сильно отличается от всех экситонных свечений и преобладает при коротких импульсах возбуждения, высоких температурах и уровнях ионизации. Предполагается, что впервые наблюдалась внутризонная люминесценция.

Для возбуждения люминесценции использовался наносекундный ускоритель электронов с регулируемыми параметрами пучка: $1 - 25$ нсек; $1 - 2000$ А/см²; $0,3 - 0,5$ МэВ [$1 - 3$]. Мы обнаружили свечение, свойства которого слабо зависят от примесей. По многим данным это излучение вторичных электронов и дырок (ЭД-плазмы). Поэтому предварительно мы назвали его "плазменная люминесценция (ПЛ)". Ниже приводятся ее свойства.

1. *Спектры свечения* KI показаны на рис.1, а. При низких температурах преобладает люминесценция самозахваченных экситонов — синглетная (СЭЛ) и триплетная (ТЭЛ). При 77 К максимум полосы СЭЛ приходится на 4,13 эВ, а время затухания равно 1,4 нсек. Для ТЭЛ соответственно 3,31 эВ и 6 мксек. С температурой интенсивность экситонной люминесценции быстро уменьшается и остается ПЛ (рис. 1, б). Она имеет очень широкий спектр, который простирается от ИК до УФ области, где обрезается собственным поглощением кристалла (рис. 1, а). Сравнение спектров свечения и поглощения кристаллов KI, KBr, RbCl, KCl, NaCl во время импульса облучения показывает, что наблюдаемая структура спектра есть результат наложения на ПЛ полос экситонной

люминесценции (включая горячую) и абсорбции света центрами окраски, которые образуются при облучении. Удобными для наблюдения спектров ПЛ оказались кристаллы NaCl и RbCl. Центры окраски образуются в них неэффективно. СЭЛ у кристалла RbCl не наблюдается вообще [5, 6], а у NaCl имеет низкую температуру тушения (42 К) в отличие от KI (82 К) [5]. При 600 К СЭЛ погашена у KI в 10^2 раз, а у NaCl больше, чем в 10^3 раз. Поэтому на NaCl и RbCl спектр ПЛ наблюдается почти в чистом виде (рис. 2). Он практически не имеет структуры. В области 1,5 – 6,5 эВ наблюдается слабое нарастание числа излученных фотонов на единичный интервал энергии ($N_{\hbar\omega}$). Две небольшие впадины – результат поглощения ПЛ соответственно дырочными и F-центрами.

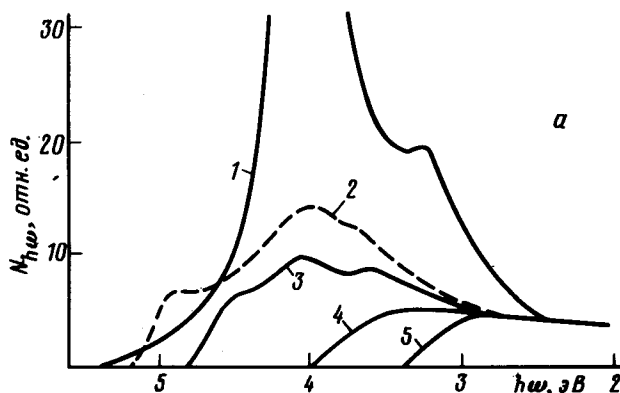
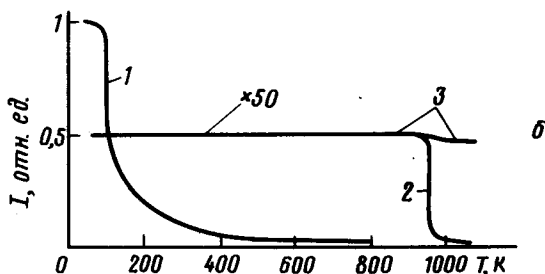


Рис. 1. а – Спектры люминесценции KI при импульсном облучении плотными пучками электронов: монокристалл при 77 К – 1; 200 К – 2; 600 К – 3, 900 К – 4; расплав при 970 К – 5; б – температурные зависимости интенсивности люминесценции самозахваченных экситонов (1) и плазменной люминесценции в области 3,5 эВ (2) и 2,5 эВ (3); ниже 959 К – монокристалл, выше 959 К – расплав KI



2. Температурная независимость ПЛ резко отличает ее от всех видов излучения локализованных электронов в оптическом диапазоне. Например, интенсивность СЭЛ в KI уменьшается в $\sim 10^2$ раз в интервале 77 – 500 К, а ПЛ не зависит от температуры вплоть до плавления кристалла (рис. 1, б). При этом смещение коротковолнового края спектра ПЛ прямо отражает известное [4] поведение края собственного поглощения. До точки плавления он плавно смещается с температурой в длинноволновую сторону, а при плавлении – скачком сразу на 0,5 – 0,7 эВ (рис. 1, а). Поэтому при плавлении интенсивность ПЛ уменьшается почти в 10^2 раз в коротковолновой части спектра и практически не изменяется в длинноволновой (рис. 1, б).

3. Время релаксации люминесценции измерялось с временным разрешением 0,5 нсек с помощью фотоэлектронного умножителя 31 ЭЛУ-Ф. Измеренное время релаксации СЭЛ в KI при 77 К равно 1,4 нсек и хоро-

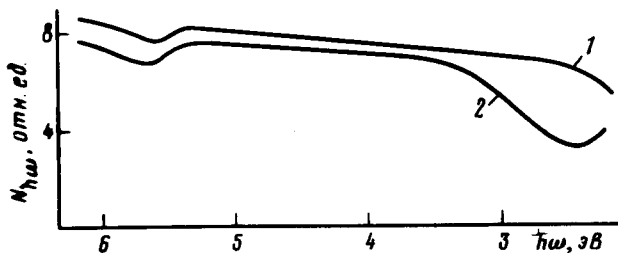


Рис.2. Спектр плазменной люминесценции RbCl (1), NaCl (2) под действием наносекундных импульсов электронного облучения при 600 К

шо согласуется с известными данными [5]. Однако время релаксации ПЛ оказалось меньше временного разрешения, т.е. $\tau_{пл} < 0,5$ нсек.

4. Выход ПЛ измерялся двумя способами. В одном эталоне была СЭЛ кристалла KI при 77 К с известным выходом [5]. В другом эталоне служила ленточная лампа накаливания ТРШ-2850-3000 с известной температурой равновесного излучения. Оба дали приблизительно одинаковые результаты: абсолютный энергетический выход ПЛ равен $(0,5 - 0,7) \cdot 10^{-3}$ от поглощенной энергии пучка.

5. Модель. По спектру и некоторым другим свойствам ПЛ подобна излучению Вавилова - Черенкова (ИВЧ). Однако выход последнего намного меньше. В нашем случае он равен $(1 - 3) \cdot 10^{-5}$. Прямой эксперимент показал, что вклад ИВЧ несущественен. При этом ПЛ возбуждалась электронами с энергией 0,11 МэВ, которые не дают ИВЧ, так как их скорость меньше фазовой скорости света в кристалле. По всем данным ПЛ - это излучение не локализованных электронов и дырок (квазисвободных и зонных). Можно оценить скорость релаксации их энергии $(-dE/dt)$, зная выход и спектр ПЛ. Средняя энергия фотона ПЛ равна 4 - 5 эВ. Таковую энергию электрон излучает за $10^{-9} - 10^{-8}$ сек (характерное время оптических дипольных переходов). Выход ПЛ $\sim 10^{-3}$. Следовательно, эту энергию электрон теряет в основном безызлучательно за $10^{-12} - 10^{-11}$ сек. Отсюда $-dE/dt = 10^{12} - 10^{13}$ эВ/сек. При высоких уровнях ионизации¹⁾ существует только один участок энергетического спектра свободных электронов и дырок, на котором скорость релаксации их энергии такого порядка. Это "электронно-дырочная пассивная зона (ЭД-зона)" [2, 3]. Она состоит из двух участков. Первый, электронный, - в зоне проводимости; второй, дырочный, - в валентной зоне. Ширина каждого не больше щели между этими зонами (E_g). За пределами ЭД-зоны высокоэнергетические электроны и дырки эффективно создают ЭД-пары, экситоны, плазмоны и т.д. При этом $-dE/dt = 10^{15} - 10^{16}$ эВ/сек. Как только они попадают в ЭД-зону, то теряют способность эффективно создавать электронные возбуждения и отдают энергию решетке, рождая фононы. При этом $-dE/dt = 10^{12} - 10^{13}$ эВ/сек, т.е. в 10^3 раз меньше, чем за пределами ЭД-зоны. Во столько же раз заселенность ее больше, чем других участков спектра свободных электронов. Полученные данные позволяют предполагать, что ПЛ есть внутризонная лю-

¹⁾ Уровень ионизации (E_I) равен максимальной энергии ЭД-пары в среде. Он считается высоким, если $E_I > 2E_g$. В нашем случае E_I почти совпадает с энергией электронов пучка.

минесценция (ВЗЛ) ЭД-зоны, т.е. это свечение возникает при прямых и не прямых излучательных переходах между подзонами внутри зоны проводимости или внутри валентной зоны. В УФ она переходит в междузонную люминесценцию. Модель ПЛ как ВЗЛ ЭД-зоны просто объясняет экспериментальные данные. Действительно, согласно этой модели ширина спектра приблизительно равна E_g ; время релаксации 10^{-11} – 10^{-12} сек, энергетический выход $\sim 10^{-3}$; интенсивность свечения очень слабо зависит от температуры вплоть до плавления, так как $-dE/dt$ электронов в ЭД-зоне определяется спонтанным испусканием фононов, не зависящим от температуры. В интервале плотностей пучка 1 – 2000 А/см² мы не обнаружили какого-либо порога для возникновения ПЛ, что также согласуется с моделью.

Мы благодарны Л.В.Келдышу за интерес к работе и обсуждение результатов.

Томский политехнический институт
им. С.М.Кирова

Институт сильноточной электроники
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
8 апреля 1980 г.

После переработки
18 июня 1980 г.

Литература

- [1] D.I.Vaisburd et al. Intern. Conf. Lumines. Abstracts. Leningrad, 1972.
- [2] Д.И.Вайсбурд, Б.Н.Семин, Э.Г.Таванов и др. Изв. АН СССР, сер. физ., 38, 1281, 1974; 40, 2404, 1976.
- [3] D.I.Vaisburd. Intern. Conf. Rad. Phys. Semicond. Relat. Materials. Abstracts. Tbilisi, 1979.
- [4] Ю.Р.Закис, А.В.Москальонов. Ученые записки Латв. гос. университета. Рига, 1975, т.231, вып.3, стр.61.
- [5] D.Pooley, W.A.Runciman. J.Phys. C., 3, 1815, 1970; I.M.Blair, D.Pooley, D.Smith. J. Phys. C., 5, 1537, 1972.
- [6] M.I.Kezawa, T.Kojima. J. Phys. Soc. Japan, 27, 1551, 1969.