

ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ КАПЕЛЬ
В МОНОКРИСТАЛЛАХ $ZnTe$ *Р. Балтрамеюнас, Э. Куокшис*

Исследованы спектры люминесценции монокристаллов $ZnTe$ при сильном оптическом возбуждении ($T = 4,2$ К). Обнаружено, что спектр люминесценции состоит из одной линии излучения, полуширина и максимум которой слабо зависят от интенсивности возбуждения. Полученные результаты объяснены на основе модели излучения электронно-дырочных капель (ЭДК). При сопоставлении экспериментальных данных и теоретического расчета формы линии излучения оценена энергия связи капли ($\zeta_0 = 2 - 3$ мэВ) и средняя концентрация носителей в капле ($n_0 = 2,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$).

Конденсация экситонов в электронно-дырочные капли (ЭДК) в прямозонных полупроводниковых соединениях $A^{II} B^{VI}$ отличается от каплеобразования в непрямозонных полупроводниках Ge и Si , которые в этом отношении достаточно хорошо исследованы [1]. Из теоретических оценок следует, что условия для возникновения ЭДК в типичных прямозонных полупроводниках $A^{II} B^{VI}$ менее благоприятны, чем для Ge и Si . Во-первых, время жизни носителей в зонах для прямозонных полупроводников на несколько порядков меньше, чем для непрямозонных, и это вносит свои особенности в процесс конденсации. Во-вторых, наличие сильной анизотропии и вырождения зон в Ge и Si способствуют понижению основного энергетического состояния ЭДК, что значительно стабилизирует каплю по отношению к газу свободных экситонов [2]. Однако в полярных полупроводниках $A^{II} B^{VI}$ понижение основного энергетического состояния ЭДК происходит за счет сильного взаимодействия между носителями заряда и оптическими фононами. Теоретически этот вопрос для некоторых полупроводниковых соединений рассмотрен в [3 – 5]. Следует отметить, что имеющихся экспериментальных данных [6 – 11] далеко недостаточно, чтобы выяснить многие особенности конденсации экситонов в ЭДК в прямозонных полупроводниках.

В настоящей работе впервые рассмотрен вопрос о каплеобразовании в монокристаллах $ZnTe$. Люминесценции $ZnTe$ при больших уровнях возбуждения посвящено несколько работ, в которых особенности в спектрах излучения обсуждались на основе моделей экситон-экситонного, либо экситон-электронного взаимодействий [12 – 14], бозе-эйнштейновской конденсации поляритонов верхней ветви [15].

Люминесценция монокристаллов $ZnTe$ возбуждалась третьей гармоникой излучения АИГ: Nd^{3+} лазера ($E = 3,56$ эВ, $\tau = 10$ нсек, $f_{повт} = 12$ гц). Измерения люминесценции проводились на свежесколотых поверхностях кристаллов, погруженных в жидкий гелий ($T = 4,2$ К). Регистрация спектров фотозлектрическая с использованием синхродетектирования; линейная дисперсия спектрального прибора – $6 \text{ \AA}/\text{мм}$.

На рис. 1 представлены спектры люминесценции $ZnTe$ для разных интенсивностей возбуждения. При малых уровнях возбуждения в спектре имеется лишь одна линия излучения с максимумом $E_1 = 2,2376$ эВ. Эта линия, согласно [16, 17], обусловлена излучением экситона, локализованного на нейтральной вакансии цинка. Больше линий экситон-примесных комплексов, в отличие от других работ, мы не обнаружили, и это является одним из признаков качества исследуемых кристаллов. С увеличением уровня возбуждения на длинноволновом крыле спектра формируется новая линия, а дальнейшее увеличение возбуждения приводит к выявлению этой линии с максимумом около $E_k = 2,371 - 2,372$ эВ. Максимум новой линии излучения не смещается, а полуширина ($\Delta \approx 12$ мэВ) увеличивается лишь незначительно (около $1 - 2$ мэВ) с увеличением плотности возбуждения на порядок. Люксинтенсивная характеристика сначала линейна с дальнейшей тенденцией уменьшения показателя степени при крайних интенсивностях возбуждения.

$I_{\text{люм.}} \text{ отн. ед.}$

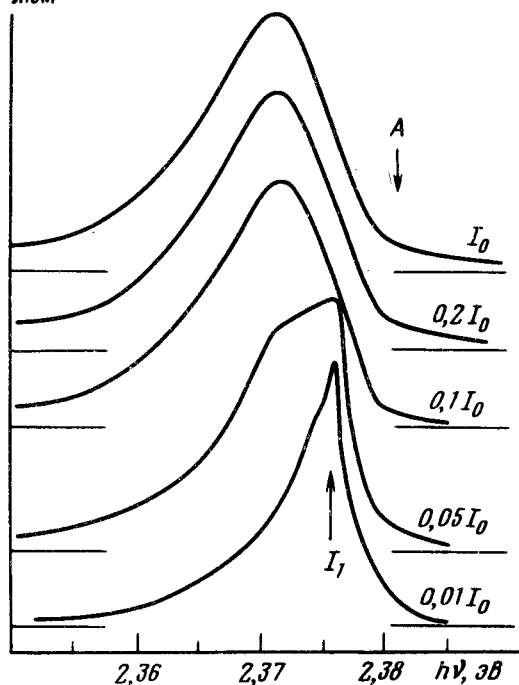


Рис. 1. Спектры люминесценции монокристаллов $ZnTe$ в зависимости от уровня возбуждения при $T = 4,2$ К. $I_0 = 3 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-2}$. Стрелками A и I_1 обозначено энергетическое положение свободного и локализованного на нейтральной вакансии цинка экситона соответственно

Нам кажется, что такое поведение обнаруженной линии люминесценции можно объяснить моделью излучения сильно вырожденной электронно-дырочной плазмы, конденсировавшейся в ЭДК. Расчет средней энергии, приходящейся на электронно-дырочную пару, показывает, что минимум этой энергии близок к энергии основного состояния экситона (рис. 2). Однако, как указывалось, учет взаимодействия электронов и дырок с LO -фононами ведет к понижению минимума средней энергии, тем самым к стабилизации ЭДК. Концентрация носителей в капле соответствует минимуму энергии, поэтому это значение концентрации можно использовать при расчете формы линии излучения ЭДК. Оценки, согласно работе [2]

показывают, что минимум средней энергии на e - h -пару достигается при концентрации $n_{\text{мин}} = 2,7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Зная концентрацию, соответствующую минимуму энергии, рассчитаем для нескольких концентраций, близких к $n_{\text{мин}}$ форму линии излучения. Для прямых разрешенных межзонных переходов в случае квазиравновесного распределения электронов и дырок в зонах форма линии излучения описывается следующим образом:

$$I(h\nu) \sim \sqrt{h\nu - E_g} \left\{ 1 + \exp \left[\left(-F_e + \frac{m_h}{m_e + m_h} (h\nu - E_g) \right) \frac{1}{kT} \right] \right\}^{-1} \times \\ \times \left\{ 1 + \exp \left[\left(-F_h + \frac{m_e}{m_e + m_h} (h\nu - E_g) \right) \frac{1}{kT} \right] \right\}^{-1},$$

где F_e и F_h — квазиуровни Ферми. "Красная" граница спектра определяется условием $h\nu_{\text{кр}} = h\nu_{\text{ф}} - (F_e + F_h)$. "Фиолетовая" граница $h\nu_{\text{ф}}$ в случае капли соответствует минимуму энергии e - h -пары, и по ней можно определить энергию связи ЭДК. На рис. 2 приведены теоретические расчеты формы линии излучения вырожденной электронно-дырочной плазмы для трех близких к $n_{\text{мин}}$ концентраций носителей заряда. На том же графике приведены экспериментальные результаты. Как видно, наилучшее совпадение эксперимента с теорией имеет место для $n_0 = 2,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

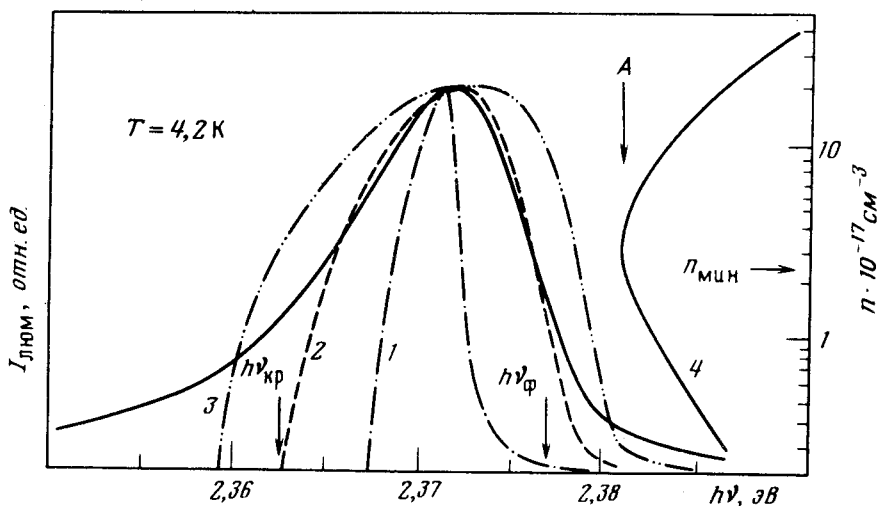


Рис. 2. Экспериментальный (сплошная линия) и теоретические (кривые 1 – 3) спектры излучения ЭДК. Кривая 1 соответствует концентрации $n = 10^{17} \text{ см}^{-3}$; 2 – $2,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; 3 – $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Кривая 4 – зависимость основного состояния вырожденной e - h плазмы от концентрации носителей заряда (шкала справа)

Обращает на себя внимание сильно затянутый длинноволновой край излучения, который может быть обусловлен как взаимодействием с фононами, так и многочастичным взаимодействием в системе квазичастиц [5, 18, 19]. За коротковолновый край линии излучения может быть ответственно либо отступление распределений носителей в зонах от квазиравновесного, либо сплошной "фон", обусловленный излучением при переходах зона — зона [20].

Сравнивая "фиолетовую" границу с экситонным термом в состоянии $n = 1$, определим энергию связи в ЭДК. Как следует из рис. 2, энергия связи ЭДК примерно равна $\zeta_0 = 2 - 3$ мэВ. Следует указать, что она весьма близка к теоретически рассчитанной в [4] энергии основного состояния ЭДК для близкого полупроводникового соединения — теллурида кадмия.

Вильнюсский
государственный университет
им. В.Капсукаса

Поступила в редакцию
19 сентября 1978 г.

Литература

- [1] Optical Properties of Solids. New Developments, ed. by B.O.Seraphin, 1976, N.Y.
- [2] W.F.Brinkman, T.M.Rice. Phys. Rev., **M7**, 1508, 1973.
- [3] Л.В.Келдыш, А.П.Силин. ЖЭТФ, **69**, 1053, 1975.
- [4] G.Beni, T.M.Rice. Phys. Rev. Lett., **37**, 874, 1976.
- [5] M.Rösler, R.Zimmermann. Phys. Stat. Sol., b, **83**, 85, 1977.
- [6] В.Г.Лысенко, В.И.Ревенко, Т.Г.Тратас, В.Б.Тимофеев. ЖЭТФ, **68**, 335, 1975.
- [7] G.O.Muller, H.H.Weber, V.G.Lysenko, V.I.Revenko, V.B.Timofeev. Solid State Comm., **21**, 217, 1977.
- [8] R.F.Leheny, J.Shah. Phys. Rev. Lett., **37**, 871, 1976.
- [9] R.F.Leheny, J.Shah. Phys. Rev. Lett., **38**, 511, 1977.
- [10] T.Sketttrup. Solid State Comm., **23**, 741, 1977.
- [11] Р.Балтрамеюнас, Э.Куокштис. Письма в ЖЭТФ, **28**, 72, 1978.
- [12] В.П.Грибковский, В.А.Иванов, А.А.Патрин, Г.П.Яблонский. ЖПС, **21**, 926, 1974.
- [13] В.П.Грибковский, В.А.Дроздов, А.А.Патрин, В.Д.Ткачев, Г.П.Яблонский. ЖПС, **21**, 1009, 1974.
- [14] A.Opanowicz, K.Marinova, H.Liebing, W.Ruppel. Phys. Stat. Sol., b, **75**, 471, 1976.
- [15] M.S.Brodin, M.G.Matsko. Solid State Comm., **25**, 789, 1978.
- [16] В.Вардзински. Литовский физический сборник, **14**, 327, 1974.
- [17] K.Kwietniak, W.Wardzynski. Phys. Stat. Sol., a, **31**, K47, 1975.

- [18] P.Motisuke, C.A.Arguello, R.C.C.Leite. Solid State Comm., 16, 763, 1975.
- [19] E.A.Meneses, N.Jannuzi, J.G.P.Ramos, R.Luzzi, R.C.C.Leite. Phys. Rev., B11, 2213, 1975.
- [20] J.Shah. Solid State Electronics, 21, 43, 1978.
-