

12,09,03

Излучение света одиночной широкой квантовой ямой CdTe в условиях сильного оптического возбуждения

© В.Ф. Агекян¹, G. Karczewski², А.Ю. Серов¹, Н.Г. Философов¹✉, С.Ю. Вербин¹, И.В. Штром¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Institute of Physics PAN, Warsaw, PL-02-668 Poland

✉ E-mail: n.filosofov@spbu.ru

Поступила в Редакцию 27 июня 2023 г.

В окончательной редакции 18 июля 2023 г.

Принята к публикации 18 сентября 2023 г.

CdTe/Cd_{0.7}Mg_{0.3}Te с одиночной квантовой ямой в широких интервалах уровня оптического возбуждения и температуры. Прослежено изменение спектров люминесценции, соответствующее трансформации экситонного газа в электронно-дырочную плазму. При возбуждении поверхности образца световой полосой в спектре люминесценции наблюдалось стимулированное излучение электронно-дырочной плазмы с низким порогом его возбуждения, поляризованное перпендикулярно ориентации полосы.

Ключевые слова: полупроводниковые структуры II–VI, люминесценция, стимулированное излучение, экситон, электронно-дырочная плазма.

DOI: 10.61011/FTT.2023.11.56560.128

1. Введение

Трансформация спектров люминесценции объемных полупроводниковых кристаллов и полупроводниковых наноструктур при повышении уровня оптического возбуждения изучается в течение многих лет. В зависимости от свойств объекта и экспериментальных условий экранирование кулоновского взаимодействия в экситонах при усилении возбуждения приводит к образованию либо электронно-дырочной плазмы (electron–hole plasma, ЕНР) [1–4], либо электронно-дырочной жидкости (electron–hole liquid, ЕНЛ). ЕНЛ образуется при низких температурах, ее свойства изучались в основном в непрямозонных системах [5–7]. В работе [8] был продемонстрирован переход от ЕНЛ к ЕНР при повышении температуры в системе связанных нанонитей GaAs/GaAlAs. Целью настоящей работы является исследование зависимости спектров излучения гетероструктур CdTe/CdMgTe с широкой квантовой ямой (КЯ) от температуры и уровня оптического возбуждения, а также от способа и уровня легирования гетероструктуры.

2. Образцы и экспериментальная техника

Исследованные гетероструктуры CdTe/Cd_{1-x}Mg_xTe содержат одиночную КЯ CdTe шириной 100 nm. Энергия экситона барьерного слоя Cd_{1-x}Mg_xTe равна 2.1 eV, что соответствует $x = 0.3$. Легирование донорами производилось с помощью источника ZnI₂. В двух образцах теллур замещался йодом в слоях толщиной 1 монослой (monolayer, ML) и 5 ML соответственно. Эти слои фор-

мировались в барьере на расстоянии 15 nm от интерфейса КЯ. В двух других образцах равномерно легировалась КЯ CdTe при температурах источника ZnI₂ 130 и 140°C, для объемных образцов CdTe это соответствует концентрациям доноров $4 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Был также выращен нелегированный образец. Для возбуждения люминесценции использовались непрерывный лазер Millet Griot 85-DSL-301 с длиной волны излучения 532 nm и лазер LCS-DTL-374QT с длительностью импульсов 10 ns, частотой 2 kHz и длиной волны излучения 532 nm. Лазерное излучение фокусировалось на поверхность образца в виде полосы размером $0.04 \times 0.40 \text{ cm}^2$, плотность мощности при импульсном возбуждении составляла от 0.2 до 20 kW/cm^2 . Люминесценция регистрировалась в направлении, перпендикулярном поверхности образца, на щель спектрометра проецировалась центральная область полосы возбуждения.

3. Результаты и их обсуждение

Эксперимент показал, что в нашем случае легирование гетероструктур не влияет качественно на трансформацию спектра излучения широкой КЯ CdTe при изменении уровня оптического возбуждения и температуры. В настоящей статье приводятся данные, полученные для образца, в котором один ML теллура в барьере замещен йодом. В этом образце порог появления стимулированного излучения оказался самым низким; возможно, это связано с компенсацией донорами неконтролируемых акцепторных состояний в КЯ.

Спектры отражения и люминесценции приведены на рис. 1. Для экситона в КЯ CdTe шириной 100 nm

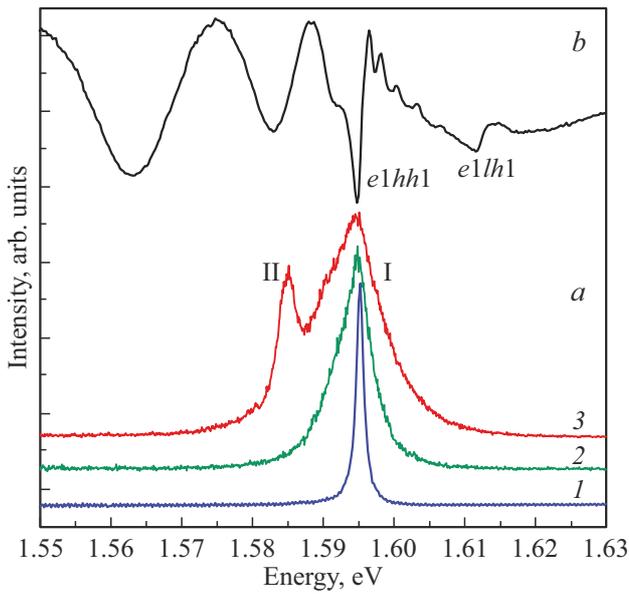


Рис. 1. *a* — полосы спонтанного (I) и стимулированного (II) излучения в спектре люминесценции КЯ CdTe при плотностях мощности возбуждения 10^{-5} (кривая 1), 0.5 (кривая 2) и 1.5 (кривая 3) kW/cm^2 ; *b* — спектр отражения с резонансами тяжелого и легкого экситонов $e1hh1$ и $e1lh1$, структура со стороны высоких энергий от резонанса $e1hh1$ соответствует размерному квантованию волнового вектора экситона. $T = 5$ К.

реализуется режим слабого размерного квантования, в этом случае ограничение в направлении роста гетероструктуры влияет на движение экситона как целого. Это проявляется в виде структуры со стороны высоких энергий от экситонного резонанса.

При увеличении уровня возбуждения уширяется полоса I спонтанного излучения, и на ее длинноволновом крыле возникает полоса II стимулированного излучения (рис. 1). Известно, что стимулированное излучение распространяется вдоль полосы возбуждения. Проявление стимулированного излучения в использованной нами геометрии эксперимента свидетельствует о том, что определенная доля этого излучения рассеивается и отражается от границы с подложкой GaAs. В этом случае естественно ожидать, что излучение будет частично поляризовано перпендикулярно полосе возбуждения. Спектры, приведенные на рис. 2, показывают, что полоса II полностью поляризована перпендикулярно полосе возбуждающего света на поверхности образца, то есть деполаризации стимулированного излучения при отражении от подложки не происходит. Использованная геометрия эксперимента не позволяет измерять интенсивность стимулированного излучения, но делает возможным установить порог его появления и динамику развития.

На рис. 3–5 приведены спектры излучения КЯ CdTe при различных плотностях мощности возбуждения P , а также зависимости интегральной интенсивности J

и полуширины (FWHM) полос I и II от P при $T = 5$ К. Видно, что в интервале P от 10^{-5} до 1 kW/cm^2 полоса I резко усиливается и уширяется; такая трансформация спектра соответствует переходу от излучения экситонов к излучению ЕНР. При дальнейшем росте P увеличение интенсивности и уширение полосы I становятся более медленными. Зависимость J полосы II от P с момента ее возникновения близка к линейной, FWHM полосы II резко растет до $P = 1 \text{ kW/cm}^2$, при дальнейшем усилении возбуждения уширение полосы II замедляется. Рост P от 0 до 20 kW/cm^2 мало влияет на энергетическое

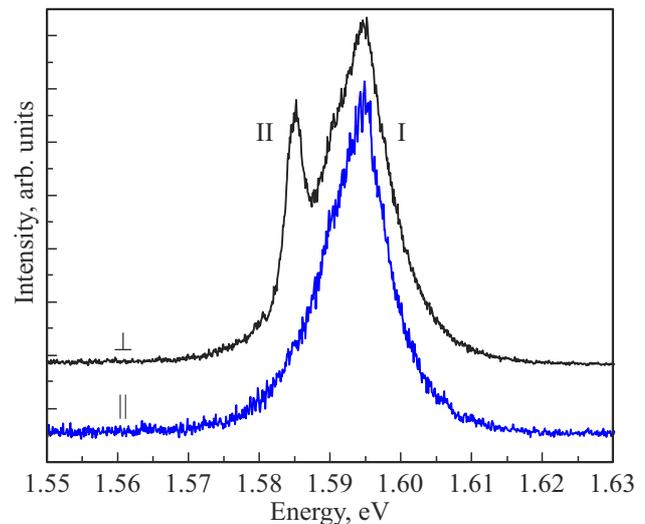


Рис. 2. Спонтанная (полоса I) и стимулированная (полоса II) люминесценция КЯ CdTe в поляризациях параллельно полюсу возбуждающего люминесценции света (||) и перпендикулярно (\perp) к ней. Плотность мощности возбуждения $P = 1.5 \text{ kW/cm}^2$, $T = 5$ К.

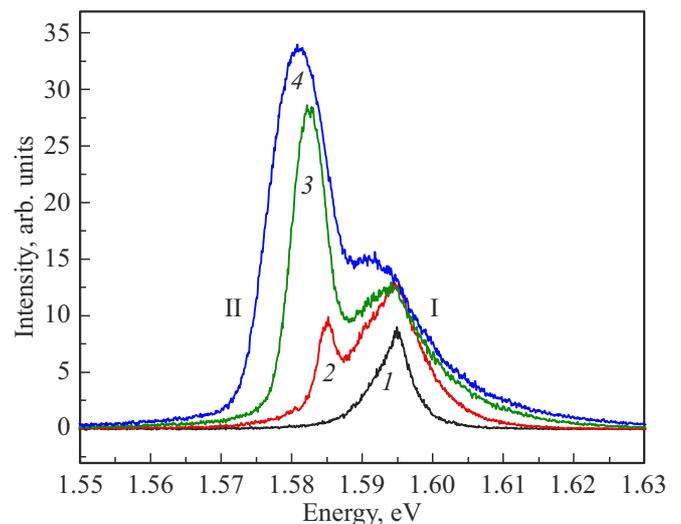


Рис. 3. Спонтанная (полоса I) и стимулированная (полоса II) люминесценция КЯ CdTe при плотностях мощности возбуждения 0.2 (кривая 1), 1.5 (кривая 2), 10 (кривая 3) и 15 (кривая 4) kW/cm^2 . $T = 5$ К.

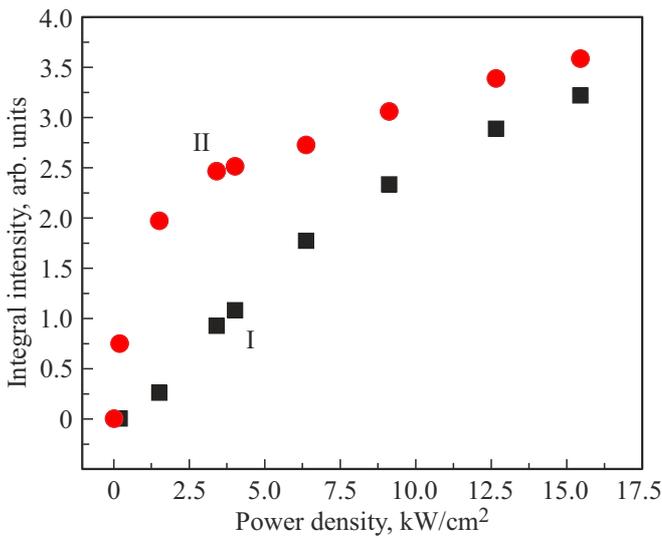


Рис. 4. Зависимость интегральных интенсивностей полос I и II в спектре люминесценции КЯ CdTe от плотности мощности возбуждения, $T = 5$ К.

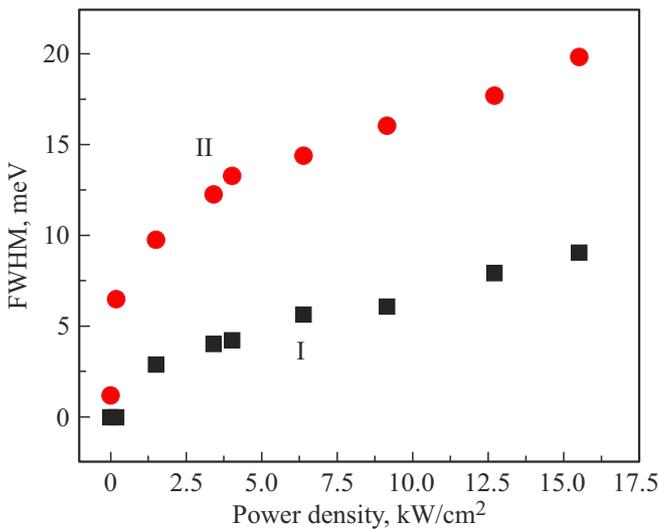


Рис. 5. Зависимость FWHM полос I и II в спектре люминесценции КЯ CdTe от плотности мощности возбуждения, $T = 5$ К.

положение максимума полосы I, что свидетельствует об отсутствии заметной перенормировки ширины запрещенной зоны. С ростом P полоса II сдвигается в сторону низких энергий по контуру полосы I.

Область спектра, в которой возникает стимулированное излучение, зависит от свойств объекта. Оно наблюдалось в области локализованных экситонов в твердом растворе $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$ [9], в области мелких связанных экситонов в объемном кристалле CdS [10], в области переходов типа примесь–зона и донорно-акцепторных переходов в пленке GaAs p -типа [11]. Результаты, полученные на нашей серии образцов, показывают, что

в широкой КЯ CdTe процессы, связанные с примесями, несущественны. Областью наибольшего усиления является низкоэнергетическое крыло полосы излучения электронно-дырочной плазмы, в которую трансформируется люминесценция свободных экситонов при повышении уровня оптического возбуждения.

Следует отметить, что пороговая плотность мощности P возбуждения стимулированной люминесценции в широкой КЯ CdTe оказалась ниже на порядок и более по сравнению с объемными полупроводниками, исследованными в вышеуказанных работах. Высокий порог возбуждения стимулированного излучения наблюдался и в гетероструктурах $n\text{As}|\text{InAsSb}|\text{InAsSbP}$ [12] и $\text{InGaAs}|\text{GaAs}|\text{AlGaAs}$ [13], а также в гетероструктурах $\text{GaN}|\text{AlN}$ с ультратонкими КЯ [14], где, по-видимому, важным фактором являются флуктуации ширины КЯ. Численные расчеты пороговой плотности мощности для объемных кристаллов также дают высокие пороговые мощности [15]. Низкий порог возбуждения стимулированного излучения наблюдался в узкозонной гетероструктуре $\text{HgTe}|\text{CdHgTe}$ [16].

При $P = 3 \text{ kW/cm}^2$ стимулированное излучение в широкой КЯ CdTe наблюдается до $T = 200 \text{ K}$, интенсивность полосы II при росте температуры изменяется немонотонно, она имеет максимум при $T = 40 \text{ K}$ (рис. 6). Рост температуры от 5 до 150 К не влияет существенно на величину FWHM полосы стимулированного излучения, при этом FWHM полосы спонтанного излучения в том же температурном интервале увеличивается в 5 раз (рис. 7).

Для КЯ в условиях сильного возбуждения характерно появление новых полос люминесценции, соответствующих высоким возбужденным состояниям (см., в частности, [4]). В нашем случае такие полосы не наблюдались;

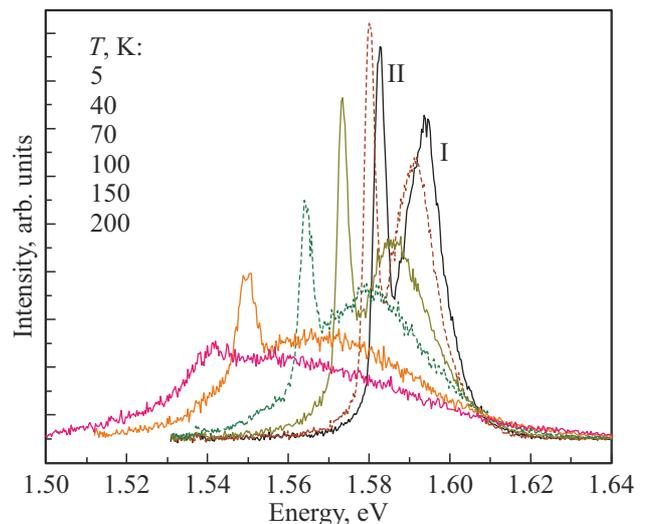


Рис. 6. Спектры спонтанной (полоса I) и стимулированной (полоса II) люминесценции КЯ CdTe в интервале температур 5–200 К при плотности мощности возбуждения $P = 3 \text{ kW/cm}^2$.

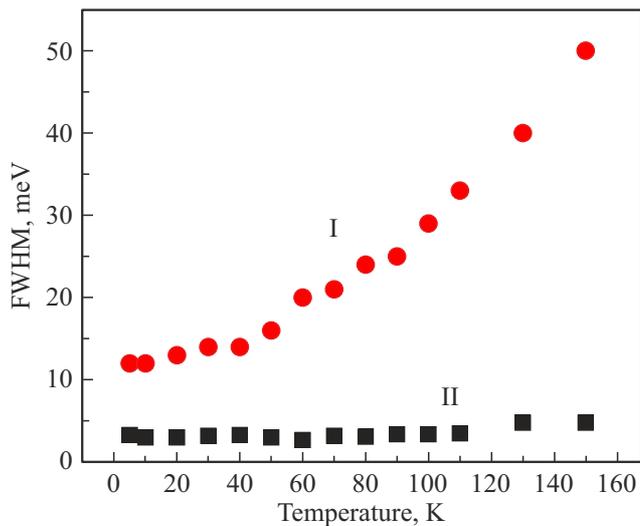


Рис. 7. Температурная зависимость FWHM полос I и II в спектре люминесценции КЯ CdTe при плотности мощности возбуждения $P = 3 \text{ kW/cm}^2$.

по-видимому, в широкой КЯ CdTe переход от экситонов к ЕНР происходит раньше, чем насыщаются уровни $e1$ и $hh1$.

Таким образом, трансформация экситонного газа в ЕНР в широкой КЯ CdTe при $T = 5 \text{ K}$ происходит при значениях $P > 1 \text{ kW/cm}^2$. При возбуждении люминесценции световой полосой размером $0.04 \times 0.40 \text{ cm}^2$ при плотности мощности P около 1.5 kW/cm^2 на низкоэнергетическом крыле полосы ЕНР возникает узкая полоса стимулированного излучения. В использованной нами геометрии эксперимента эта полоса наблюдается вследствие рассеяния и отражения излучения от подложки. Поляризация полосы стимулированного излучения близка к 100% и ориентирована перпендикулярно полосе возбуждения. Способы и уровни легирования, примененные к исследованным образцам, качественно, не влияют на характеристики люминесценции КЯ CdTe.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГУ № 93020138 (В.Ф. Агекян, А.Ю. Серов, Н.Г. Философов, И.В. Штром) и гранта УМО-2021/41/В/ST3/03651 (G. Karczewski).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

[1] J. Rubio, L. Pfeiffer, M.H. Szymanska, A. Pinczuk, S. He, H.U. Baranger, P.B. Littlewood, R.W. West, B.S. Dennis. *Solid State Commun.* **120**, 11, 423 (2001).

- [2] F.B. Sousa, R. Perea-Causin, S. Hartmann, L. Lafetá, B. Rosa, S. Brem, C. Palekar, S. Reitzenstein, A. Hartschuh, E. Malic, L.M. Malard. *Nanoscale* **15**, 15, 7154 (2023).
- [3] K. Henneberger, T. Schmielau. *Progress in Nonequilibrium Green's Function II* (2003). P. 248.
- [4] V.D. Kulakovskii, E. Lach, A. Forchel, D. Grützmacher. *Phys. Rev. B* **40**, 11, 8087(R) (1989).
- [5] С.Г. Тиходеев. *УФН* **145**, 1, 3 (1985). [S.G. Tikhodeev. *Sov. Phys. Usp.* **28**, 1, 1 (1985).]
- [6] Н.Н. Сибельдин. *УФН* **187**, 11, 1236 (2017). [N.N. Sibeldin. *Phys. Usp.* **60**, 11, 1147 (2017).]
- [7] S. Nihonyanagi, Y. Kanemitsu. *Appl. Phys. Lett.* **85**, 23, 5721 (2004).
- [8] H. Kalt, R. Nötzel, K. Ploog, H. Gießen. *Solid State Commun.* **83**, 4, 285 (1992).
- [9] F.A. Majumder, S. Shevel, V.G. Lyssenko, H.E. Swoboda, C. Klingshirm. *Z. Phys. B Condens. Matter* **66**, 4, 409 (1987).
- [10] В.Г. Лысенко, И.И. Ревенко, Т.Г. Тратас, В.Б. Тимофеев. *ЖЭТФ* **68**, 1, 335 (1975). [V.G. Lysenko, V.I. Revenko, T.G. Tratas, V.B. Timofeev. *JETP* **31**, 1, 163 (1975).]
- [11] Р.И. Джиоев, К.В. Кавокин, Ю.Г. Кусраев, И.А. Меркулов. *ФТП* **23**, 1, 104 (1989).
- [12] А.А. Семакова, М.С. Ружевич, В.В. Романов, Н.Л. Баженов, К.Д. Мынбаев, К.Д. Моисеев. *ФТП* **56**, 9, 876 (2022). [A.A. Semakova, M.S. Ruzhevich, V.V. Romanov, N.L. Bazhenov, K.D. Mynbaev, K.D. Moiseev. *Semiconductors* **56**, 9, 659 (2022)].
- [13] В.Я. Алешкин, Н.В. Дикарева, А.А. Дубинов, С.А. Денисов, З.Ф. Красильник, К.Е. Кудрявцев, С.А. Матвеев, С.М. Некоркин, В.Г. Шенгуров. *Письма в ЖЭТФ* **100**, 12, 900 (2014). [V.Ya. Aleshkin, N.V. Dikareva, A.A. Dubinov, S.A. Denisov, Z.F. Krasil'nik, K.E. Kudryavtsev, S.A. Matveev, S.M. Nekorkin, V.G. Shengurov. *JETP Lett.* **100**, 12, 795 (2014).]
- [14] Е.В. Луценко, А.В. Нагорный, Н.В. Ржеуцкий, Д.В. Нечев, В.Н. Жмерик. В сб.: *Квантовая электроника. Материалы XIII Междунар. науч.-тех. конф. Минск* (2021). С. 245–248.
- [15] C. Klingshirm, H. Haug. *Phys. Rep.* **70**, 315 (1981).
- [16] Л.А. Кушков, В.В. Уточкин, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов, К.Е. Кудрявцев, В.И. Гавриленко, Н.С. Куликов, М.А. Фадеев, В.В. Румянцев, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, А.А. Разова, С.В. Морозов. *ФТП* **54**, 10, 1163 (2020). [L.A. Kushkov, V.V. Utochkin, V.Ya. Aleshkin, A.A. Dubinov, K.E. Kudryavtsev, V.I. Gavrilenko, N.S. Kulikov, M.A. Fadeev, V.V. Rumyantsev, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoret'skii, A.A. Razova, S.V. Morozov. *Semiconductors* **54**, 10, 1365 (2020)].

Редактор Е.В. Толстякова