08

Исследование спектров электролюминесценции в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе твердых растворов HgCdTe при латеральной токовой накачке

© *В.В. Уточкин*[1], *В.В. Румянцев*[1], *М.А. Фадеев*[1], *А.А. Разова*[1,2], *К.А. Мажукина*[1], *А.А. Янцер*[1], *В.И. Гавриленко*[1,2], *С.А. Краев*[1], *Е.А. Архипова*[1], *А.В. Окомельков*[1], *Н.Н. Михайлов*[3], *С.А. Дворецкий*[3], *С.В. Морозов*[1]

[1] Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия
[2] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия
[3] Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: xenonum@bk.ru

Поступило в Редакцию 29 сентября 2025 г.
В окончательной редакции 21 октября 2025 г.
Принято к публикации 2 ноября 2025 г.

Исследуются спектры электролюминесценции гетероструктуры с квантовыми ямами на основе HgCdTe — возможного источника для бездисперсионной инфракрасной спектроскопии (NDIR-спектроскопии). Показано, что при латеральной токовой накачке вследствие инжекции горячих носителей из контактов наблюдается межзонная спонтанная эмиссия при температурах вплоть до комнатной. Исследованы вольт-амперные характеристики структуры. Определен доминирующий механизм генерации неравновесных носителей в условиях латеральной токовой накачки.

Ключевые слова: HgCdTe, NDIR, квантовая яма, инфракрасный диапазон.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.05.62329.20508

В настоящее время исследования твердых растворов $Hg_{1-x}Cd_xTe$ широко известны по крайней мере в двух прикладных аспектах. Первый заключается в разработке приборов ночного видения, тепловизоров и других аналогичных им приемников электромагнитного излучения инфракрасного (ИК) диапазона [1]. Второй состоит в использовании тонких пленок и квантовых ям (КЯ) на основе HgCdTe с дираковским энергетическим спектром для создания излучателей электромагнитных волн от терагерцевых частот [2] до коротковолновой части среднего ИК-диапазона [3]. Однако для разработки компактного прибора предпочтительна токовая накачка. Следует подчеркнуть, что в литературе до сих пор не сообщалось о демонстрации межзонной спонтанной электролюминесценции в HgCdTe в условиях ударной ионизации или инжекции горячих носителей из контактов при латеральной токовой накачке. Настоящая работа посвящена исследованию спонтанной эмиссии при межзонной рекомбинации неравновесных носителей заряда в HgCdTe-структурах в условиях латеральной токовой накачки.

Подобные источники излучения ИК-диапазона с латеральной токовой накачкой (аналогичные светодиодам по формфактору, но без диодной характеристики) могут найти прикладное применение в первую очередь в бездисперсионной ИК-спектроскопии (NDIR-спектроскопии) в окнах прозрачности атмосферы $3-5$ и $8-13\,\mu$m. NDIR-спектроскопия широко применяется в промышленных газоанализаторах [4,5], в том числе для анализа многокомпонентных газовых смесей [6,7]. С учетом лидирующего положения HgCdTe как материала для приемников в данных областях длин волн представляется возможным создание интегрированной планарной оптопары для анализа газовых смесей. Фактически речь может идти об источнике излучения и фотоэлектрическом приемнике (фотосопротивлении), изготовленных на одном чипе в рамках единого технологического процесса. Примечательно, что в такой конструкции оптопары реализуется механизм резонансного детектирования: спектр эмиссии излучателя лежит вблизи энергии межзонного перехода в приемнике, в области его максимальной чувствительности, при этом, поскольку детектирование происходит вблизи краев зон, пороговая оже-рекомбинация не активируется и не снижает концентрацию носителей, участвующих в формировании сигнала фототока.

В гетероструктурах с тонкими квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe за счет дираковского энергетического спектра подавлена безызлучательная оже-рекомбинация [8]. Подавление безызлучательного канала рекомбинации позволяет рассчитывать на слабое снижение интегральной интенсивности излучения HgCdTe-гетероструктур с ростом температуры и обеспечивает лучшую чувствительность приемников на основе таких структур в области высоких температур. Кроме того, плотность состояний для двумерного газа носителей в КЯ описывается лестничной функцией Хевисайда с резким краем по энергии. Указанные свойства HgCdTe-гетероструктур позволяют использовать их одновременно в качестве излучателя и приемника в

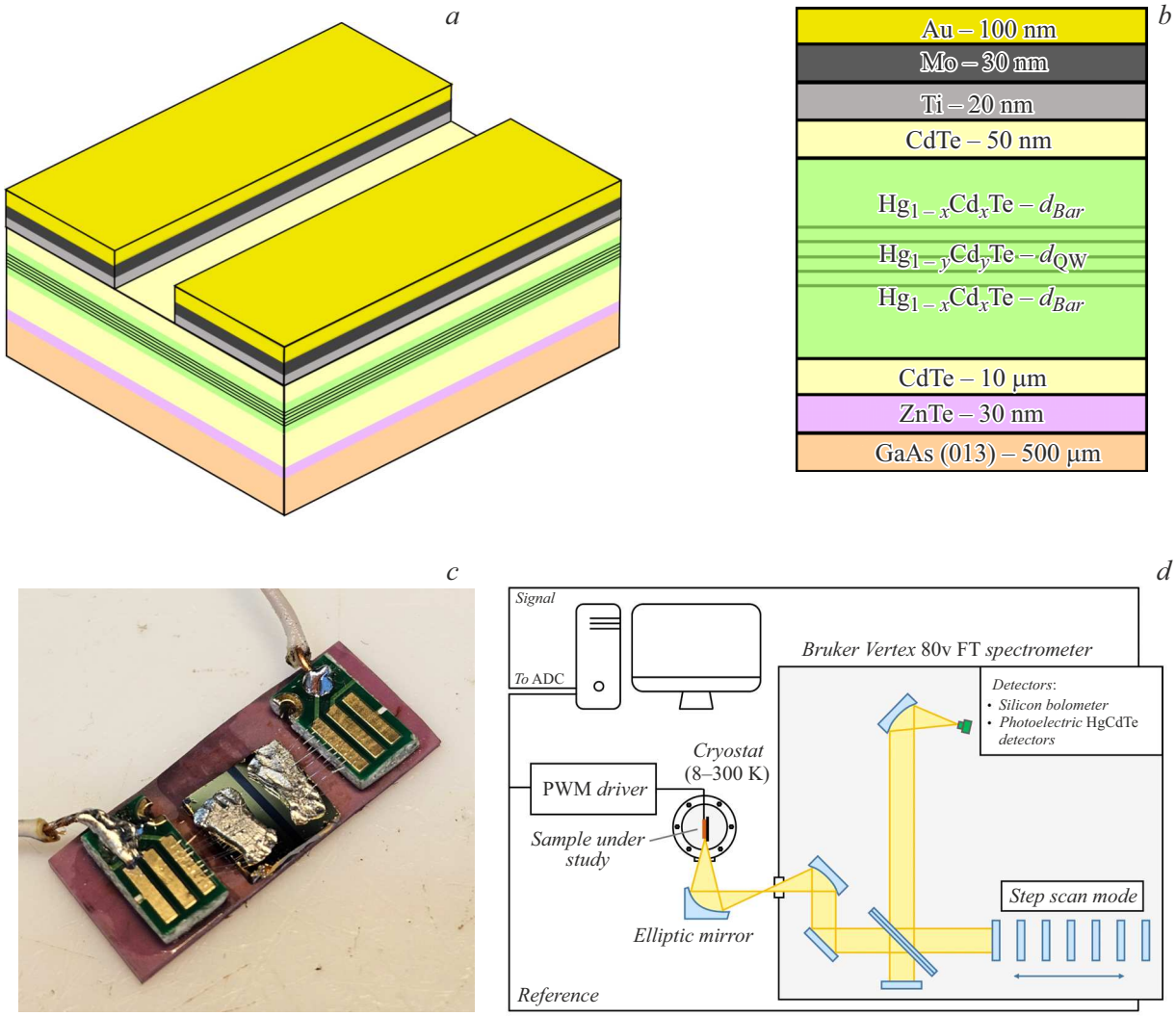


Рис. 1. *a* — общий вид исследованных образцов; *b* — соответствующая ему схема слоев структуры (не в масштабе); *c* — фотография структуры с распаянными контактами; *d* — схема экспериментальной установки для записи спектров ЭЛ (PWM *driver* — импульсный блок питания). Спектры ФЛ записывались в аналогичной геометрии с заменой источника токового возбуждения на тулиевый лазер.

предлагаемой конструкции оптопары. С одной стороны, излучательная часть оптопары должна обеспечивать эффективную эмиссию при комнатной температуре, что подразумевает подавление безызлучательных каналов рекомбинации. С другой стороны, от детектирующей части оптопары требуется резкая граница спектра поглощения (плотности состояний), поскольку максимум спектра излучательной части будет лежать вблизи энергии запрещенной зоны в полупроводнике. В настоящей работе проведены экспериментальные исследования спектров фото- и электролюминесценции (ФЛ и ЭЛ соответственно) HgCdTe-структур с КЯ при различных температурах.

Все исследованные в работе гетероструктуры с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на полуизолирующей подложке GaAs (013) с *in situ* эллипсометрией. Исследованная структура содержала пять КЯ $Hg_{0.98}Cd_{0.02}Te/Cd_{0.6}Hg_{0.4}Te$ толщиной 3.2 nm каждая, заглубленных на 750 nm от поверхности структуры. Перед напылением многослойных металлических контактов поверхность образца подвергалась непродолжительному ионному травлению. Далее наносились многослойные металлические контакты: слои Ti (20 nm), Mo (30 nm) и Au (100 nm), к которым через слой индия крепились золотые электроды (рис. 1, *a*–*c*). Расстояние между контактами (ширина межконтактной области) составляло 200 μm. Образцы с нанесенными контактами устанавливались на холодный палец гелиевого криостата замкнутого цикла с температурным диапазоном 8–300 K (рис. 1, *d*). Спектры ФЛ и ЭЛ исследовались в одинаковой геометрии, в которой излучение собиралось с торца образца, при этом фокус оптической системы сбора излучения выставлялся на межконтактный промежуток.

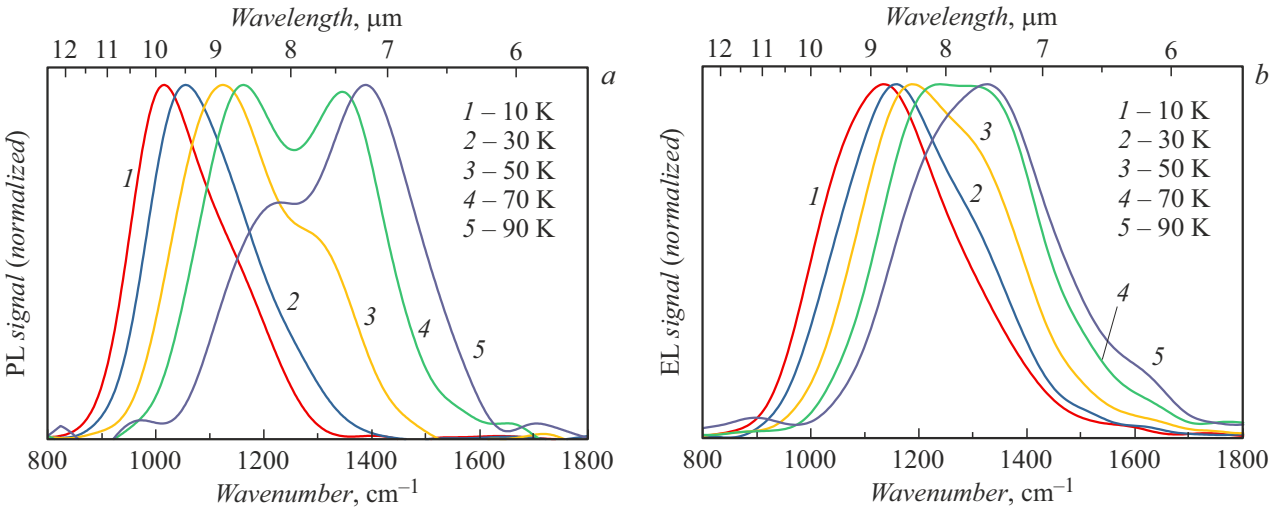


Рис. 2. Спектры ФЛ (a) и ЭЛ (b) исследуемой структуры при оптическом возбуждении тулиевым лазером (a) и при возбуждении импульсами тока с межконтактной разностью потенциалов ~ 45 V (b) при температурах 10–90 K.

В качестве источника возбуждения при спектроскопии ФЛ использовался непрерывный тулиевый лазер (1.91 μm, 200 mW), возбуждение осуществлялось со стороны выращенной HgCdTe-структуры в межконтактную область. В экспериментах по исследованию ЭЛ к образцам в латеральной геометрии прикладывалось напряжение от 0 до 200 V импульсами длительностью 800 ns с частотой повторения 111 Hz. В цепь с исследуемым образцом последовательно включался токоограничивающий резистор номиналом 7.5 Ω. Спектры как ЭЛ, так и ФЛ измерялись с помощью фурье-спектрометра Bruker Vertex 80v, работавшего в режиме пошагового сканирования.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследовались двухконтактным методом: ток, протекающий в цепи образец–резистор, измерялся при помощи токового трансформатора. Общее падение напряжения в цепи образец–резистор контролировалось источником напряжения Keithley 2400, для нахождения падения напряжения на образце из общего напряжения вычиталось падение напряжения на токоограничивающем резисторе. Для идентификации межзонного характера ЭЛ предварительно записывались спектры межзонной ФЛ при различных температурах, которые далее сравнивались со спектрами ЭЛ при тех же значениях температуры. На рис. 2, a приведены спектры ФЛ исследованной структуры в диапазоне температур 10–90 K, из которых видно, что линия межзонной ФЛ при 10 K лежит в окрестности 10 μm и с ростом температуры сдвигается в коротковолновую область, что согласуется с температурным изменением запрещенной зоны в HgCdTe. При 90 K спектр ФЛ лежит в окрестности длины волны 7 μm, при этом полная ширина спектра на половине высоты (FWHM) при 10 K составляет $\sim 210\,\mathrm{cm}^{-1}$, плавно уширяясь до ~ 360–$370\,\mathrm{cm}^{-1}$ с ростом температуры до 90 K (см. таблицу). Отметим, что спектры ФЛ всех структур с контактами и их гашение с ростом температуры соответствовали таковым для структур без контактов. Отсюда следует вывод, что изготовление контактов не влияло на оптические свойства активной области структур — массива квантовых ям.

На рис. 2, b приведены спектры ЭЛ исследованной структуры в том же температурном диапазоне. Видно, что положение линий ЭЛ и их сдвиг с температурой в целом качественно повторяют поведение линий ФЛ. При этом при температуре 10 K максимум спектра приходится на длину волны 9 μm, сдвигаясь до 7.5 μm при высоких температурах. При низких температурах FWHM спектра составляет $\sim 290\,\mathrm{cm}^{-1}$, а при более высоких температурах $\sim 320\,\mathrm{cm}^{-1}$. Видно, что FWHM спектров ЭЛ проявляет менее выраженную температурную зависимость при одновременно меньшем температурном сдвиге спектров. Наблюдаемый результат свидетельствует в пользу того, что при ЭЛ в области низких температур эффективная температура носителей слабо зависит от температуры решетки, а их функция распределения определяется в большей степени условиями токового возбуждения.

Что касается исследования ЭЛ в широком температурном диапазоне, то спонтанная эмиссия наблюдалась при всех температурах вплоть до комнатной (рис. 3). Интегральное гашение ЭЛ при переходе от температуры 10 K к комнатной не превышало одного порядка, при

Полная ширина на половине высоты (в cm^{-1}) спектров ФЛ и ЭЛ при различных температурах

Тип люминесценции	T, K				
	10	30	50	70	90
ФЛ	209	219	306	368	360
ЭЛ	292	304	323	330	324

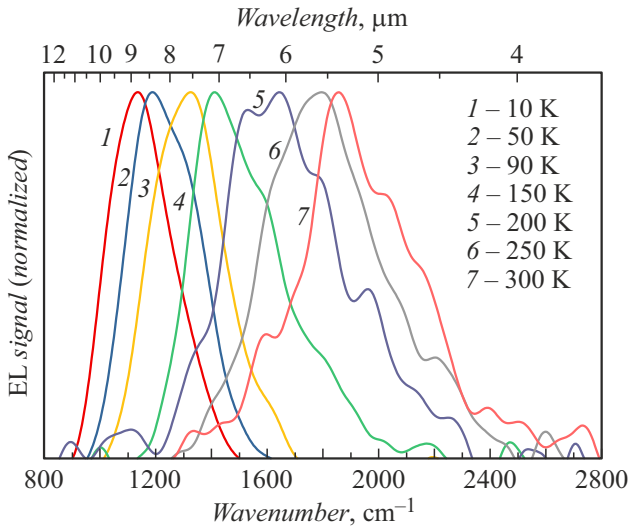


Рис. 3. Спектры электролюминесценции исследуемой структуры при возбуждении импульсами тока длительностью 800 ns с напряжением $\sim 40-45$ V при температурах от 10 до 300 K.

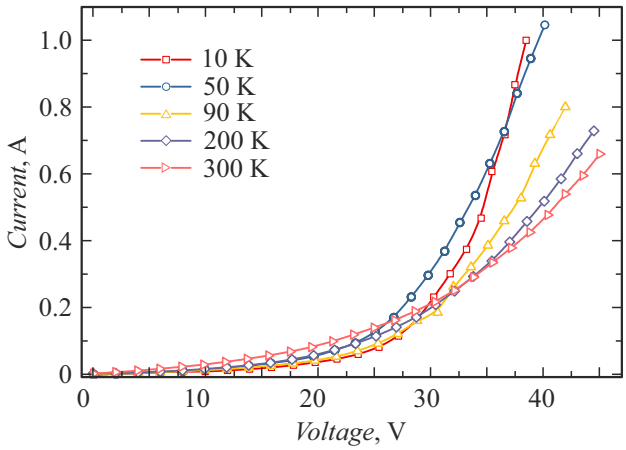


Рис. 4. ВАХ исследуемой структуры при температурах 10–300 K.

этом основное гашение приходилось на диапазон температур 10–100 K, а интегральная интенсивность излучения при температуре 90 K отличалась от интенсивности при комнатной температуре всего в 1.5 раза. Сравнительно небольшое снижение интенсивности излучения свидетельствует в пользу подавления безызлучательных механизмов рекомбинации носителей заряда в структурах, в особенности оже-рекомбинации, скорость которой зависит от температуры экспоненциально. В то же время FWHM спектров ЭЛ при приближении к комнатной температуре плавно растет и сравнивается с FWHM спектров ФЛ, значение которой для данной структуры составляет $\sim 450\,\mathrm{cm}^{-1}$.

Основными механизмами генерации неравновесных носителей в подобной системе с латеральными контактами могут быть ударная ионизация в электрическом поле и ассоциированная с контактом металл–полупроводник инжекция неосновных носителей. Поскольку теоретическая оценка вклада каждого из них в общий темп генерации носителей представляется затруднительной, важной задачей являлась идентификация доминирующего механизма генерации носителей в эксперименте. Для этого в образцах исследовалась ВАХ.

Ударная ионизация является межзонным процессом, и при увеличении ширины запрещенной зоны КЯ с ростом температуры энергия активации ударной ионизации также становится выше. Поэтому при более высоких температурах характерная точка изгиба ВАХ — момент активации ударной ионизации — должна сдвигаться вправо, в область более высоких полей. В то же время инжекция неосновных носителей в первую очередь определяется свойствами границы полупроводник/металл и должна слабо зависеть от температуры, поэтому точка изгиба ВАХ не должна существенно смещаться при изменении температуры образца.

На рис. 4, *a* приведены ВАХ структуры при различных температурах в диапазоне 10–300 K. Из измеренных ВАХ видно, что ожидаемого для ударной ионизации смещения кривых ВАХ вправо, пропорционального изменению E_g, не наблюдается. Таким образом, в исследованной структуре основным механизмом генерации носителей является инжекция неосновных носителей заряда в приконтактной области.

В HgCdTe-структурах возможна эмиссия излучения среднего ИК-диапазона в импульсном режиме при комнатной температуре и токовой накачке, причем интегральное снижение интенсивности излучения при переходе от 10 к 300 K не превышало одного порядка. Показано, что в исследуемой структуре генерация неравновесных носителей происходит по механизму инжекции горячих носителей из контактов. Такие излучатели, объединенные в рамках единого чипа с фотоприемником на основе той же HgCdTe-структуры, могут найти применение в газоанализаторах, работающих на принципах NDIR-спектроскопии, не только в окне прозрачности атмосферы $3-5\,\mu$m, но и в окне прозрачности $8-13\,\mu$m, в котором создание межзонных излучателей на основе традиционных полупроводников ИК-диапазона с большей шириной запрещенной зоны невозможно.

Финансирование работы

Исследование спектров электролюминесценции и вольт-амперных характеристик выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-72-00160 (https://rscf.ru/project/25-72-00160/). Спектроскопия фотолюминесценции проведена за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00310-П (https://rscf.ru/project/22-12-00310/).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] A. Rogalski, *HgCdTe photodetectors in mid-infrared optoelectronics* (Elsevier, 2020). p. 235–335. DOI: 10.1016/B978-0-08-102709-7.00007-3
[2] T. Apretna, N. Nilforoushan, J. Tignon, S. Dhillon, F. Carosella, R. Ferreira, E. Lhuillier, J. Mangeney, Appl. Phys. Lett., **121** (25), 251101 (2022). DOI: 10.1063/5.0134396
[3] K.E. Kudryavtsev, V.V. Rumyantsev, V.V. Utochkin, M.A. Fadeev, V.Y. Aleshkin, A.A. Dubinov, M.S. Zholudev, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretskii, V.G. Remesnik, F. Teppe, J. Appl. Phys., **130** (21), 214302 (2021). DOI: 10.1063/5.0071908
[4] L. Fu, S. You, G. Li, Z. Fan, Rev. Anal. Chem., **42** (1), 20230062 (2023). DOI: 10.1515/revac-2023-0062
[5] L. Zhou, Y. He, Q. Zhang, L. Zhang, Micromachines, **12** (7), 845 (2021). DOI: 10.3390/mi12070845
[6] M. Xu, B. Peng, X. Zhu, Y. Guo, Sensors, **22** (3), 836 (2022). DOI: 10.3390/s22030836
[7] J.-G. Liang, Y. Jiang, J.-K. Wu, C. Wang, S. von Gratowski, X. Gu, L. Pan, Sensors Actuators A, **356**, 114318 (2023). DOI: 10.1016/j.sna.2023.114318
[8] G. Alymov, V. Rumyantsev, S. Morozov, V. Gavrilenko, V. Aleshkin, D. Svintsov, ACS Photon., **7** (1), 98 (2019). DOI: 10.1021/acsphotonics.9b01099