

Индucedированное и спонтанное излучение структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в диапазоне 3.2—3.7 мкм при 77 К

© Ю.Н. Ноздрин, А.В. Окомельков[¶], А.П. Котков^{¶¶}, А.Н. Моисеев*, Н.Д. Гришнова*

Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

* Институт химии высокочистых веществ Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 5 мая 2004 г. Принята к печати 17 мая 2004 г.)

Приводятся результаты наблюдения индуцированного излучения образцов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ при оптической накачке с помощью импульсного Nd:YAG-лазера при температуре $T \approx 77$ К. В диапазоне длин волн $\lambda \approx 3300\text{--}3600$ нм наблюдалось как стимулированное, так и спонтанное излучение. Приводятся экспериментальные спектры излучения. Обсуждаются свойства спектров изучаемых образцов, а также возможные применения.

1. Введение

В настоящее время во всем мире существует большой интерес к созданию активных устройств (лазеров) и фотоприемников, работающих в среднем и дальнем инфракрасных (ИК) диапазонах длин волн ($\lambda \approx 3\text{--}20$ мкм). Освоение этого диапазона представляет интерес, в частности:

— для целей связи, так как в этом диапазоне существуют „окна прозрачности“ земной атмосферы (3.5—4 мкм, 4.5—5 мкм, 8—14 мкм и 16—23 мкм);

— для спектроскопии и мониторинга окружающей среды, так как в этом диапазоне находятся частоты колебательно-вращательных переходов многих молекул.

К немногим реально работающим в этом диапазоне активным устройствам относятся полупроводниковые лазерные диоды, а также квантовые каскадные лазеры. В силу принципа работы устройств и те, и другие являются существенно неоднородными структурами. В лазерных диодах необходимо создание $p\text{--}n$ -переходов, а в квантовых каскадных лазерах — квантовых полупроводниковых сверхрешеток с довольно большим количеством (обычно от одного до нескольких десятков) квантово-размерных слоев. Это обстоятельство делает создание таких структур весьма сложным и приводит к их большой стоимости. Как известно, характерные частоты излучательных межзонных переходов в пленках узкощелевых полупроводников, например $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ), могут находиться в том же диапазоне, что и в квантовых каскадных лазерах. Более того, в настоящее время чаще всего синтезируются образцы КРТ такого стехиометрического состава, что характерные частоты излучательных межзонных переходов (определяемые шириной запрещенной зоны E_g) „падают“ как раз в диапазон среднего ИК излучения. Материал КРТ можно рассматривать как довольно перспективный для получения стимулированного излучения, так как он является прямозонным (прямые излучательные межзон-

ные переходы носителей оказываются разрешенными). Носители в нем могут обладать довольно большим временем жизни (при достаточно большой величине ширины запрещенной зоны).

С этой точки зрения лазеры на КРТ, если бы они были созданы для достаточно широкого диапазона стехиометрических составов, могли бы составить конкуренцию каскадным лазерам. Одиночная пленка КРТ в значительной степени проще, чем полупроводниковая квантовая сверхрешетка каскадного лазера. При этом сама пленка КРТ является волноводом в силу большой величины диэлектрической проницаемости материала КРТ (15—20), что при создании лазера может способствовать формированию резонаторных мод за счет полного внутреннего отражения на границах пленки. Кроме того, здесь, в отличие от структур квантовых каскадных лазеров, нет необходимости с помощью прецизионной технологии выращивать квантово-размерные слои — типичная толщина пленок КРТ обычно составляет от нескольких до десятков микрон. Технология изготовления высококачественных эпитаксиальных пленок КРТ в настоящее время уже достаточно хорошо отработана в связи с изготовлением ИК фотоприемников. Основными методами выращивания эпитаксиальных слоев КРТ в настоящее время являются жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ), молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и химическое осаждение из паров металлоорганических соединений (MOCVD). Авторами данной статьи измерения проводились на структурах, выращенных в Институте химии высокочистых веществ Российской академии наук, где разрабатывается MOCVD-метод изготовления эпитаксиальных слоев КРТ различных стехиометрических составов [1,2].

Исследования по созданию лазеров на КРТ проводились ранее, однако они были немногочисленными, и в результате многие фундаментальные вопросы остались невыясненными (например, вопросы о том, насколько возможно продвижение в длинноволновую область и в область высоких температур). Спонтанное и когерентное излучение кристаллов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ при оптическом

[¶] E-mail: okom@ipm.sci-nnov.ru

^{¶¶} E-mail: kotkov@ihps.nnov.ru

возбуждении полупроводниковым лазером на основе GaAs впервые наблюдали в работе [3] (см. также [4,5]). Индуцированное излучение наблюдалось в диапазоне длин волн $\lambda = 3.8\text{--}4.1\text{ мкм}$ при температуре $T \approx 12\text{ К}$, а спонтанное излучение регистрировалось до длины волны 15 мкм .

В [6] сообщалось о создании лазеров с оптической накачкой, которые излучали в области длин волн от 1.25 до 2.97 мкм при температуре жидкого азота. Непрерывная генерация на длине волны 2.79 мкм была получена при температуре 12 К . Стимулированное излучение пленок КРТ для $x = 0.5$ на длине волны 2.13 мкм наблюдалось в работе [7]. При этом пороговая мощность возбуждения была $\sim 10\text{ кВт/см}^2$ при температуре жидкого азота.

Стимулированное излучение пленок КРТ с $x = 0.46$, выращенных на подложке из полуизолирующего теллурида кадмия, наблюдалось в работе [8]: генерация на длине волны 2.42 мкм при накачке лазером Nd:YAG с мощностью излучения выше 2.8 кВт/см^2 при температуре 10 К .

Как видно из приведенных здесь данных, при температуре жидкого азота максимальная длина волны наблюдаемого стимулированного излучения составляла 2.97 мкм . Обычно это связывают с тем, что при более узких запрещенных зонах (для относительно маленькой величины x , $x \approx 0.2$ и меньше) относительная роль безызлучательных переходов, связанных с оже-рекомбинацией, возрастает (см. [9]), хотя, по-видимому, может существовать ограничение на частоту генерации, связанное с безызлучательной рекомбинацией с участием примесей. В этом случае, очевидно, для более совершенных и чистых от примесей образцов можно было бы надеяться на получение лазерного эффекта в диапазоне и более длинных волн. При этом важным неисследованным вопросом является также проблема оптимизации толщины образцов. Полученные нами экспериментальные результаты показывают, что в исследуемых пленках КРТ возможно наблюдение электромагнитного излучения на меньших частотах и при существенно более высоких температурах, чем раньше.

2. Экспериментальные данные и их обсуждение

В настоящей статье приводятся экспериментальные данные об электромагнитном излучении, получаемом на эпитаксиальных слоях $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ при температуре жидкого азота и импульсной оптической накачке с помощью Nd:YAG-лазера ($\lambda = 1.064\text{ мкм}$). Нами использовались образцы $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ толщиной от нескольких единиц до десятка микрометров на подложках из полуизолирующего GaAs с буферным слоем высокоомного CdTe. Фотовозбуждение образцов, расположенных на медном хладопроводе, осуществлялось со стороны эпитаксиального слоя. С помощью металлического сферического зеркала излучение со стороны торца эпитаксиального

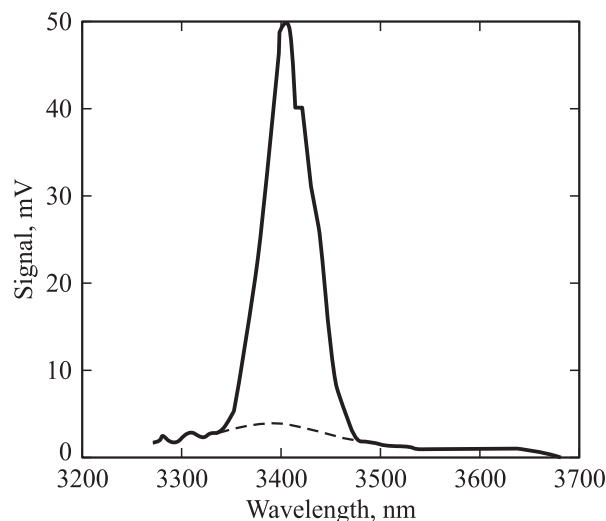


Рис. 1. Спектральный состав излучения образца $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ при $T \approx 77\text{ К}$ (образец МСТ 638/1, $x = 0.376$). Фотоприемник — образец МСТ 641/1, $x \approx 0.272$. Штриховая линия — спектр при интенсивности фотовозбуждения меньше пороговой величины ($P < 4\text{ кВт/см}^2$). При интенсивностях фотонакачки $P \geq 4\text{ кВт/см}^2$ на фоне этого пьедестала проявляется узкая линия, изображенная на рисунке сплошной линией.

слоя проецировалось на входную щель стандартного монохроматора. На выходе монохроматора сигнал регистрировался охлаждаемым до температуры жидкого азота фотоприемником. В качестве фотоприемника использовался также образец $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с подходящим стехиометрическим составом. При необходимости перед фотоприемником помещались фильтры из Ge, позволяющие подавить рассеянное излучение накачки. Сигнал с фотоприемника подавался на осциллограф, который синхронно запускался импульсом накачки Nd:YAG-лазера.

На рис. 1 изображен один из наблюдавшихся нами спектров излучения (в виде сигнала на фотоприемнике в зависимости от длины волны) образца $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (образец МСТ 638/1) с $x \approx 0.376$: толщина образца $h \approx 8.9\text{ мкм}$, температура $T = 77\text{ К}$; образец имел проводимость p -типа, выращен на подложке GaAs с кристаллографической ориентацией (111). Образец имел форму равностороннего треугольника со стороной $\sim 5\text{ мм}$. При интенсивностях оптической накачки $P < 4\text{ кВт/см}^2$ спектр имеет вид довольно широкого пьедестала не слишком большой амплитуды, что показано штриховой линией на рис. 1. При интенсивностях накачки $P \geq 4\text{ кВт/см}^2$ на фоне пьедестала проявляется узкая линия. Пьедестал естественно ассоциировать со спонтанным излучением, а узкую линию — со стимулированным излучением (суперлюминесценцией). Таким образом, мы наблюдали эффект сужения спектра излучения при интенсивностях фотовозбуждения выше порогового значения, которое составляло в нашем случае $P \approx 4\text{ кВт/см}^2$.

Наиболее близким к этому является результат, представленный в работе [8]. Спектральная линия стимулированного излучения в [8] соответствует длине волны $\lambda \approx 2420$ нм, а ширина почти совпадает с шириной линии, изображенной на рис. 1. Важно отметить, что измерения в работе [8] проводились при температуре $T = 12$ К, тогда как наши измерения проводились при температуре $T \geq 77$ К. Тот факт, что в нашем эксперименте температура была в 6–7 раз больше, а ширина спектральных линий практически совпадает (ширина $\Delta\lambda \approx 50$ –60 нм), подтверждает нашу интерпретацию спектральной линии как линии стимулированного излучения.

В наших экспериментах поверхность образцов засвечивалась не полностью (различные участки поверхности). Поэтому мы фактически измеряли спектры суперлюминесценции из разных засвеченных областей. Довольно большая простота наблюдения стимулированного излучения (даже при отсутствии резонатора) свидетельствует о наличии достаточно большого коэффициента усиления в системе. Это согласуется с теоретической оценкой: по оценкам [10] коэффициент усиления может достигать значений $\alpha \sim 10^3 \text{ см}^{-1}$.

На рис. 2 показаны спектры излучения различных образцов, изготовленных из одной и той же пленки $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x \approx 0.376$, а также спектральные линии, получающиеся при засветке различных участков одного и того же образца. Из рис. 2 видно, что эти спектральные линии несколько различаются между собой положением максимума λ_{max} , шириной и формой. Разброс значений λ_{max} , относящихся к различным областям пленки, составляет $\sim 3.6\%$, что, по-видимому, свидетельствует о неоднородности данной пленки $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, т. е. флуктуации состава (нестехиометричность) исследованных образцов составили ~ 3 –4%. О наличии пространственной

неоднородности свидетельствует также наблюдаемая в большинстве образцов „неправильная“ форма линии (в частности, спектр, показанный штриховой кривой на рис. 2). Существующий некоторый разброс в условиях фотовозбуждения (засветка соседних неоднородных участков) приводит к неоднородно уширенной линии суперлюминесценции.

Рассмотрим простую оценку зависимости ширины линии спектра спонтанного излучения от температуры для пространственно-однородного образца и случая, когда имеет место резкий край поглощения. Известно (см., например, [11]), что для спектральной зависимости интенсивности фотолюминесценции (спонтанного излучения) в этом случае справедлива формула

$$I_{\text{PL}}(\hbar\omega) \propto \begin{cases} (\hbar\omega - E_g)^{1/2} \exp\left(-\frac{\hbar\omega - E_g}{k_B T}\right) & \text{при } \hbar\omega > E_g, \\ 0 & \text{при } \hbar\omega < E_g. \end{cases}$$

Отсюда следует, что ширина линии спонтанного излучения составляет

$$\Delta(\hbar\omega) \approx (2-3)k_B T. \quad (1)$$

Для азотной температуры нашего эксперимента это составляет в температурных единицах приблизительно 160–240 К.

Очевидно, что (1) является оценкой снизу на ширину линии спонтанного излучения, так как при этом не учитывается возможный разогрев образца. В наших экспериментах типичные интенсивности (как и в [8]) были довольно большими. Так, порог по интенсивности накачки для возникновения стимулированного излучения соответствовал приблизительно $P \approx 4 \text{ кВт/см}^2$. Кроме того, возможно дополнительное уширение линии спонтанного излучения, связанное с пространственной неоднородностью твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (а потому с пространственной неоднородностью ширины запрещенной зоны).

В температурных единицах ширина спектральной линии (на уровне половины максимальной интенсивности, $0.5 I_{\text{max}}$) и пьедестала в спектре, изображенном на рис. 1, составляют ~ 86 и ~ 400 К соответственно. Эти оценки показывают, что ширина узкой линии в 2–3 раза меньше оценки для „идеальной“ линии фотолюминесценции и потому не может быть спектром спонтанного излучения. В то же время ширина пьедестала по частоте больше „идеальной“ оценки, так что этот пьедестал может быть спектром спонтанного излучения. Отметим еще раз, что во всех известных работах (например, [3, 6–8]) спектр имеет как раз такой вид: на фоне широкого пьедестала, определяемого спонтанным излучением, проявляется узкая линия стимулированного излучения.

На рис. 3 приведены зависимости интенсивности излучения образца $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (в полосе приемника с шириной запрещенной зоны, соответствующей длине волны ~ 6 мкм) МСТ 638/1 с $x \approx 0.376$ при $T = 77$ К от

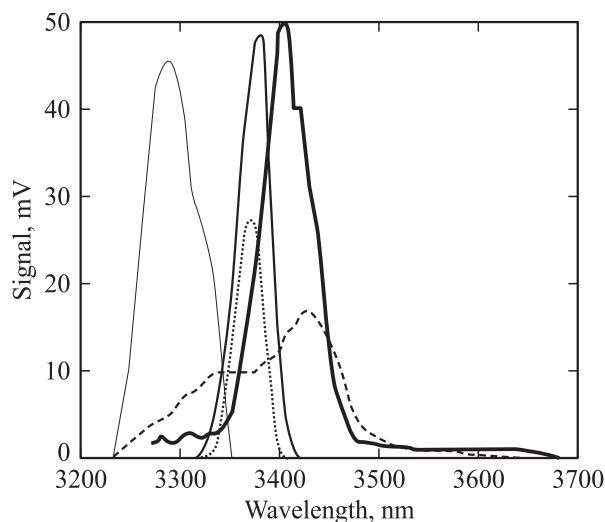


Рис. 2. Спектральный состав излучения образцов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$: зависимость интенсивности излучения от длины волны. Различные кривые — различные излучатели из одной пленки $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (образец МСТ 638/1, $x \approx 0.376$).

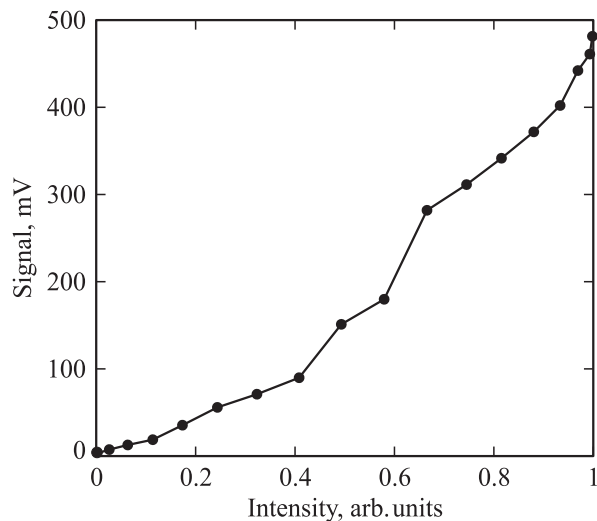


Рис. 3. Интенсивность излучения $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (образец МСТ 638/1, $x \approx 0.376$) при $T = 77\text{ K}$ в зависимости от интенсивности оптической накачки.

интенсивности оптической накачки. Видно, что зависимость является нелинейной, но имеет довольно плавный вид. Так что наличие пороговой интенсивности для возникновения стимулированного излучения может хорошо наблюдаться лишь при анализе соответствующих спектральных зависимостей.

3. Заключение

Ширина линий спектра суперлюминесценции на рис. 2 почти совпадает с шириной спектра в работе [8]. Однако, в отличие от наших результатов, в работе [8] излучение получено при более низкой температуре, $T = 12\text{ K}$, и соответствует меньшей длине волны, $\lambda_{\text{max}} \approx 2420\text{ nm}$. В работе [3] наблюдались линии стимулированного излучения в диапазоне $\lambda \approx 4100\text{ nm}$, но также при $T = 12\text{ K}$. Таким образом, в данной работе, по-видимому, впервые сообщается о наблюдении стимулированного излучения структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ при температуре жидкого азота в интервале длин волн $\lambda \approx 3250\text{--}3450\text{ nm}$. Наблюдение стимулированного излучения при азотных температурах позволяет говорить о реальных перспективах с точки зрения его различных применений. Особо отметим, что наблюдавшиеся нами изменения частоты суперлюминесценции для разных областей одного и того же образца могут дать возможность использовать этот эффект для диагностики неоднородностей стехиометрического состава. Последнее может быть весьма важно для совершенствования процесса изготовления структур на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. Совершенствование качества изготавливаемых структур может в свою очередь привести к более узким спектральным линиям стимулированного излучения.

В заключение авторы выражают признательность А.А. Андронову за интерес к работе и полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] А.Н. Моисеев, А.П. Котков, В.В. Дорофеев, Н.Д. Гришнова. Неорг. матер., **40** (1), 1 (2004).
- [2] К.О. Болгарь, Н.И. Яковлева, В.П. Головин, В.П. Пономаренко, В.И. Стафеев, И.Д. Бурлаков, А.Н. Моисеев, А.П. Котков, В.В. Дорофеев. Прикл. физика, № 5, 95 (2003).
- [3] I. Melngailis, A.J. Strauss. Appl. Phys. Lett., **8** (7) 179 (1966).
- [4] R. Dornhaus, G. Nimtz. In: *Springer Tracts in Modern Physics* (1978) v. 78, p. 1.
- [5] Н.С. Барышев. *Свойства и применение узкозонных полупроводников* (Казань, УНИПРЕСС, 2000).
- [6] Т.С. Hartman. J. Electron. Mater., **8** (2), 191 (1979).
- [7] В.И. Иванов-Омский, К.Е. Миронов, Р.Б. Рустамов, В.А. Смирнов. Письма ЖТФ, **10** (16), 1021 (1984).
- [8] K.K. Mahavadi, J. Bleuse, X. Chu, J.P. Faurie. Appl. Phys. Lett., **55** (13), 1285 (1989).
- [9] G. Nimtz. Phys. Rep., **63** (5), 265 (1980).
- [10] Г.М. Генкин, А.В. Окомельков, И.Д. Токман. ФТП, **22** (12), 2151 (1988).
- [11] П. Ю, М. Кардона. *Основы физики полупроводников* (М., Физматлит, 2002) с. 312.

Редактор Л.В. Шаронова

Stimulated and spontaneous emitting by $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ structures within the interval of $3.2\text{--}3.7\text{ }\mu\text{m}$ at $T = 77\text{ K}$

Yu.N. Nozdrin, A.V. Okomel'kov, A.P. Kotkov*, A.N. Moisejev*, N.D. Grishnova*

Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

* Institute for Chemistry of High Pure Matter,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Results on the observation of both stimulated and spontaneous emitting by $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ samples under optical excitation with a pulsed Nd:YAG laser at the temperature $T \approx 77\text{ K}$ are presented. We had stimulated alongside with spontaneous emissions within the wave length interval $\lambda \approx 3300\text{--}3600\text{ nm}$. Spectrums of the emission are given. Properties of the spectrums, the investigated samples and possible applications are being discussed.