

Стимулированное излучение из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ на длине волны 3400 нм при 77 К

Ю. Н. Ноздрин, А. В. Окомельков¹⁾, А. П. Котков⁺¹⁾, А. Н. Моисеев⁺, Н. Д. Гришнова⁺

Институт физики микроструктур РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия

⁺Институт химии высокочистых веществ РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию 30 апреля 2004 г.

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

PACS: 78.55.–m, 78.66–w, 79.90.+b

В настоящее время во всем мире существует большой интерес к созданию лазеров и фотоприемников, работающих в среднем и дальнем ИК диапазоне длин волн (длины волн приблизительно от 3 до 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 этих устройств, и те и другие являются существенно неоднородными структурами. 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 у квантовых каскадных лазеров. И, более того, в настоящее время чаще всего синтезируются образцы КРТ такого стехиометрического состава, что характерные частоты излучательных межзонных переходов (определяемые шириной запрещенной зоны) “попадают” как раз в диапазон среднего ИК излучения.

С этой точки зрения лазеры на КРТ, если бы они были созданы для достаточно широкого диапазона стехиометрических составов, могли бы, возможно,

составить конкуренцию каскадным лазерам. Одиночная пленка КРТ в значительной степени проще, чем полупроводниковая квантовая сверхрешетка каскадного лазера. Причем, 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 квантоворазмерные 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. Авторами данной статьи измерения проводились на структурах, выращенных в ИХВВ РАН, где разрабатывается MOCVD-метод для изготовления эпитаксиальных слоев КРТ с различными стехиометрическими составами [1, 2].

Исследования по созданию лазеров на КРТ проводились ранее, хотя они были немногочисленны, и в результате многие фундаментальные вопросы остались невыясненными. Спонтанное и когерентное излучение кристаллов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) при оптическом возбуждении полупроводниковым лазером на основе GaAs наблюдали в работе [3] (см. также [4, 5]). Индуцированное излучение наблюдалось в диапазоне длин волн 3.8–4.1 мкм при температуре около 12 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. Не-

¹⁾e-mail: okom@ipm.sci.nnov.ru, kotkov@ihps.nnov.ru

прерывная 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 около 10 кВт/см² при температуре жидкого азота.

Стимулированное излучение из пленок КРТ с $x = 0.46$, выращенных на подложке из полупроводникового теллурида кадмия, наблюдалось в работе [8]. Наблюдалась генерация на длине волны 2.42 мкм при накачке лазером Nd:YAG с мощностью свыше 2.8 кВт/см² 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 порядка 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” образцов можно было бы надеяться на получение лазерного эффекта в диапазоне и более длинных волн. Полученные нами экспериментальные результаты показывают, что в исследуемых нами пленках КРТ возможно наблюдение электромагнитного излучения на меньших частотах и при существенно более высоких температурах, чем раньше.

Экспериментальные данные и их обсуждение. В настоящей статье демонстрируются полученные экспериментальные данные об электромагнитном излучении из эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ при температуре жидкого азота при импульсной оптической накачке образцов с помощью Nd:YAG-лазера (на длине волны 1.064 мкм). Нами использовались образцы $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ толщиной от нескольких до десятка микрон, выращенные в ИХВВ РАН на подложках полупроводникового 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 слоя проецировалось на входную щель стандартного монохроматора, позволяющего разворачивать сигнал в соответствии с его частотным спектром с помощью дифракционных решеток. На выходе из прибора монохроматический сигнал регистрировался охлаждаемым до температуры жидкого азота фотоприемником. В качестве фотоприемника использовался также образец $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с подхо-

дящим стехиометрическим составом, выращенный в ИХВВ РАН. При необходимости перед фотоприемником помещались фильтры из Ge, позволяющие подавить рассеянное излучение волны накачки. Сигнал с фотоприемника подавался на осциллограф, который синхронно запускался импульсом накачки Nd:YAG-лазера.

На рис.1 изображен один из типичных, наблюдаемых нами спектров электромагнитного излучения из образца $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (образец МСТ 638/1) с

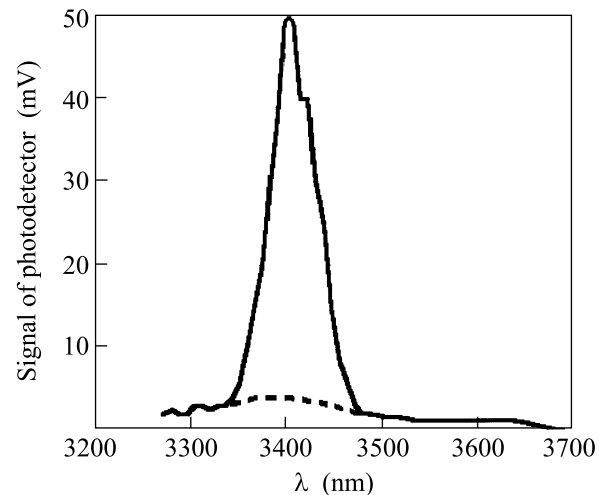


Рис.1. Спектральный состав излучения из образца $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ при $T \approx 77$ К (образец МСТ 638/1, $x \approx 0.376$). Фотоприемник — образец МСТ 641/1, $x \approx 0.272$. Пунктирной линией показан спектр при интенсивности фотовозбуждения меньше пороговой величины ($P < 4$ кВт/см²). При интенсивностях фотонакачки $P \geq 4$ кВт/см² на фоне этого пьедестала проявляется узкая линия, изображенная на рисунке сплошной линией

$x \approx 0.376$, толщина образца $h \approx 8.9$ мкм, температура $T = 77$ К; образец обладал проводимостью p -типа, выращен на подложке GaAs с кристаллографической ориентацией (111). Образец имел форму правильного треугольника со стороной около 5 мм. При интенсивностях оптической накачки $P < 4$ кВт/см² спектр имеет вид довольно широкого пьедестала не слишком большой амплитуды, что показано пунктирной линией на рис.1. При интенсивностях накачки $P \geq 4$ кВт/см² на фоне этого пьедестала проявляется узкая линия. Очевидно, что 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 $P \approx 4$ кВт/см².

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

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 в системе, свидетельствует о наличии достаточно большого коэффициента усиления в системе.

На рис.2 показаны спектры излучения различных образцов, изготовленных из одной и той же пленки $Cd_xHg_{1-x}Te$ с $x \approx 0.376$, а также спектральные линии, получающиеся при засветке различных участков одного и того же образца. Из рис.2 вид-

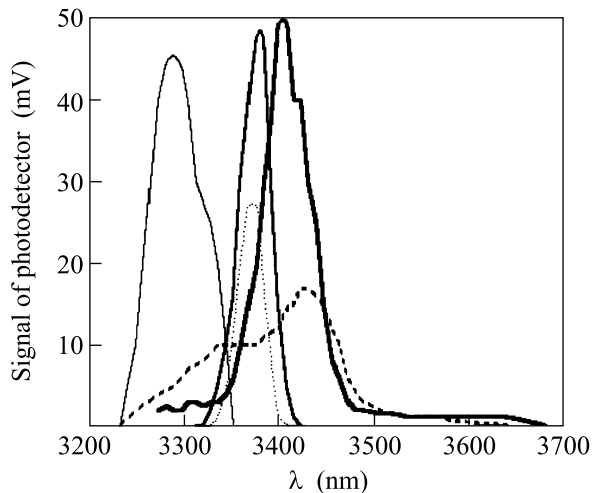


Рис.2. Спектральный состав излучения из образцов $Cd_xHg_{1-x}Te$: зависимость интенсивности излучения от длины волны. Различные кривые получены для различных излучателей, изготовленных из одного и того же образца – пленки $Cd_xHg_{1-x}Te$ (образец МСТ 638/1, $x \approx 0.376$)

но, что эти спектральные линии несколько отличаются между собой положением максимума λ_{max} , шириной и формой. Разброс значений λ_{max} , относящих-

ся к различным областям пленки, составляет приблизительно 3.6%, что, по-видимому, свидетельствует о соответствующей неоднородности данной пленки $Cd_xHg_{1-x}Te$. То есть флуктуации состава (нестехиометричность) исследованных образцов составили приблизительно 3–4%. О наличии пространственной неоднородности свидетельствует также наблюдаемая в большинстве образцов “неправильная” форма линии (в частности, пунктирная линия на рис.2). Существующий некоторый разброс в условиях фотовозбуждения (засветка соседних участков) приводит к неоднородно уширенной линии суперлюминесценции.

Ширина линий спектра суперлюминесценции на рис.2 почти совпадает с шириной спектра в работе [8], однако в отличие от наших, экспериментальные данные [8] получены при $T = 12$ К на длине волны $\lambda_{max} \approx 2420$ нм. В работе [3] наблюдались линии стимулированного излучения в диапазоне $\lambda \sim 4100$ нм, но также при $T = 12$ К. Так что в данной работе сообщается о наблюдении стимулированного излучения из структур $Cd_xHg_{1-x}Te$ при температуре жидкого азота в интервале длин волн $\lambda \sim 3250$ –3450 нм. Наблюдение стимулированного излучения при азотных температурах позволяет говорить о реальных перспективах в его различных применениях. Особо отметим, что наблюдавшиеся нами изменения частоты суперлюминесценции из 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 $Cd_xHg_{1-x}Te$.

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

1. А. Н. Моисеев, А. П. Котков, В. В. Дорофеев, Н. Д. Гришнова, Неорганические материалы **40**, 1 (2004).
2. К. О. Болтарь, Н. И. Яковлева, В. П. Головин и др., Прикладная физика № 5, 95 (2003).
3. I. Melngailis and A. J. Strauss, Appl. Phys. Lett. **8**, 179 (1966).
4. R. Dornhaus and G. Nimtz, Springer Tracts in Modern Physics, Solid State Physics **78**, 1 (1976).
5. Н. С. Барышев, Свойства и применение узкозонных полупроводников, Казань: УНИПРЕСС, 2000.
6. Т. С. Hartman, J. Electron. Mater. **8**, 191 (1979).
7. В. И. Иванов-Омский, К. Е. Миронов, Р. Б. Рустамов, В. А. Смирнов, Письма в ЖТФ **10**, 1021 (1984).
8. К. К. Mahavadi, J. Bleuse, X. Chu, and J. P. Faurie, Appl. Phys. Lett. **55**, 1285 (1989).
9. Gunter Nimtz, Phys. Reports **63**, 265 (1980).