

Двухчастотное стимулированное излучение из двухслойной структуры $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ на длинах волн 2 и 3 мкм

Ю. Н. Ноздрин, А. В. Окомельков¹⁾, В. С. Варавин^{+ 1)}, М. В. Якушев⁺, С. А. Дворецкий

Институт физики микроструктур РАН, 603950 Н.Новгород, Россия

⁺ Институт физики полупроводников СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 21 января 2013 г.

После переработки 14 февраля 2013 г.

Приводятся результаты наблюдения двухчастотного стимулированного излучения из двухслойной гетероструктуры на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ при оптической накачке с помощью импульсного Nd:YAG лазера при температурах $T = (77-150)$ К. Спектральные линии излучения наблюдались на длинах волн $\lambda_1 \sim 2$ мкм и $\lambda_2 \sim 3$ мкм. Приводятся экспериментально измеренные при различной температуре спектры излучения.

DOI: 10.7868/S0370274X13060131

Введение. Материал кадмий–ртуть–теллур (КРТ, $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$) уже давно успешно применяется для создания приемников инфракрасного диапазона. Этот полупроводник интересен и в плане получения стимулированного излучения инфракрасного диапазона (см. обзоры [1, 2], а также работы [3–5]). С точки зрения получения стимулированного излучения КРТ интересен из-за наличия разрешенных прямых оптических переходов между состояниями в зоне проводимости и в валентной зоне (см. [1]). Кроме того, в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ плотность состояний в зоне проводимости довольно мала (эффективная электронная масса для разных составов материала может быть в десятки–сотни раз меньше массы тяжелых дырок; см. [1]). Это обстоятельство позволяет уже при умеренных интенсивностях оптической накачки создавать вырожденное (квазифермиевское) распределение неравновесных носителей в зоне проводимости при их достаточно большом времени жизни. Последнее и означает относительную легкость получения инверсии населенностей в таких соединениях. В [3–6] нам удалось при разных значениях состава x наблюдать интенсивное стимулированное излучение из КРТ в диапазоне длин волн 1.4–4.5 мкм при температуре жидкого азота. При комнатной температуре мы наблюдали стимулированное излучение в диапазоне длин волн 1.4–2.6 мкм [4–6]. К настоящему времени длина волны $\lambda = 2.6$ мкм является рекордной (в длинноволновой области)

в плане наблюдения стимулированного излучения из классических размерных структур КРТ при комнатной температуре. Отметим, что продвижение в длинноволновый диапазон и получение лазерной генерации на длинах волн больше 3 мкм могут быть весьма важными в связи с наличием атмосферного “окна прозрачности”: электромагнитные волны соответствующей длины практически не поглощаются в земной атмосфере.

Интерес к лазерным источникам, работающим одновременно на нескольких длинах волн, связан со следующими причинами (см. также [7]). Получение двухчастотного стимулированного излучения может дать важную информацию о структуре и свойствах самих образцов. Кроме того, многочастотная лазерная генерация может найти применение для целей мониторинга, спектроскопии, связи. Например, использование многочастотной генерации может увеличить надежность информационного канала, а создание многочастотного источника в одном образце – способствовать удешевлению конкретных устройств. Такие источники могли бы служить источниками постановки помех с определенным частотным спектром. Возможны и другие их применения. К одному из таких интересных применений многочастотного излучения относится получение в результате нелинейного преобразования разностных частот с целью создания терагерцовых источников излучения (см., например, [8]).

Для получения двухчастотной генерации могли бы применяться подходы, использующие связанные резонаторы или дополнительные внешние резона-

¹⁾ e-mail: okom@ipm.sci-nnov.ru; varavin@isp.nsc.ru

торы. Однако при таком подходе расстройка двух линий генерации получается не слишком большой (в теоретической работе [7] показано, что величина этой расстройки может принимать типичные значения 0.08–50 нм). Идея использования связанных резонаторов для получения лазерной генерации изначально несколько противоречива. Действительно, расстройка резонаторов по частоте не должна превышать полосу усиления в активной среде. Кроме того, для связанных резонаторов эффект конкуренции мод может не позволить получить двухчастотную генерацию даже при малой величине расстройки частот. Поэтому возникает естественное желание получить лазерную генерацию на различных частотах, расстройка между которыми была бы большой и никак не связанной с ограничениями, навязанными лазерным резонатором. В настоящей работе приводятся экспериментальные данные по наблюдению двухчастотной генерации со спектральными линиями излучения, отличающимися по длине волны приблизительно на 1 мкм.

Экспериментальные данные. Для поиска двухчастотной генерации мы при различных температурах провели измерения на структурах, имеющих несколько слоев КРТ с разным составом (распределение состава по толщине в слоях КРТ гетероструктуры M070212 представлено на рис. 1а). Образцы имели размер 2×4 или 3×4 мм². Данные полупроводниковые структуры были выращены в Институте физики полупроводников СО РАН с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии. После выращивания структура отжигалась в атмосфере инертного газа (гелия) при температуре 260 °С и низком давлении паров ртути (меньше $3 \cdot 10^{-5}$ атм). В этих условиях в КРТ образуются вакансии ртути, которые являются акцепторами, и образец приобретает проводимость *p*-типа с концентрацией дырок в диапазоне $10^{15} - 10^{16}$ см⁻³. Экспериментально установлено (см., например, [5]), что интенсивность излучения из таких образцов обычно оказывается выше, чем из образцов непосредственно после выращивания, имеющих проводимость *n*-типа.

Оптическая накачка образцов осуществлялась со стороны эпитаксиального слоя КРТ по нормали к его поверхности. Для накачки нами использовался Nd:YAG лазер ($\lambda = 1.064$ мкм) с длительностью импульсов около 200 нс. При этом интенсивность засветки образца импульсами накачки могла меняться и составляла 3–30 кВт/см². В наших экспериментах образцы $Cd_xHg_{1-x}Te$ закреплялись внутри криостата со стабилизированной температурой (диапазон из-

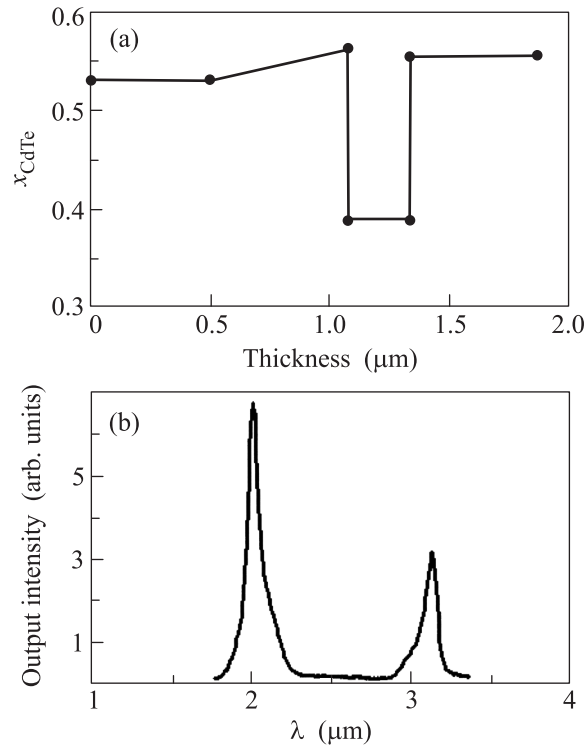


Рис. 1. (а) – Распределение состава по толщине в слоях КРТ гетероструктуры M070212. Толщина отсчитывается от границы буферного слоя CdTe (точка 0 мкм), выращенного на GaAs подложке. Толщина 1.88 мкм соответствует свободной поверхности образца. Образец КРТ оптически накачивался со стороны свободной поверхности Nd:YAG лазером. Излучение принималось из торца структуры. (б) – Спектр стимулированного излучения из образца, измеренный при $T = 78$ К

менения температуры составлял от 77 до 300 К) и оптическим входом. Использование импульсного источника оптического возбуждения позволяло избежать существенного разогрева структур под действием лазерного излучения накачки. С помощью металлического сферического зеркала излучение из образца фокусировалось на входной щели монохроматора. Излучение на выходе монохроматора регистрировалось с помощью фотоприемника. Для подавления излучения накачки использовался Ge фильтр, помещаемый перед фотоприемником. Сигнал с фотоприемника отображался на экране осциллографа, синхронизированного с импульсами Nd:YAG лазера накачки. (Подробное описание экспериментальной установки содержится в [3–6]).

Доказательством возникновения стимулированного излучения, как известно (см., например, [9, 10]), являются обужение спектральной линии и резкое возрастание интенсивности излучаемого сигнала при

интенсивностях оптической накачки выше некоторого порогового значения. Это отмечалось ранее в наших работах по наблюдению стимулированного излучения из КРТ (см., например, [5]). Эффект обужения линии и резкое возрастание интенсивности излучаемого сигнала наблюдались нами и в данном случае.

На рис. 1б показан спектр излучения образца при температуре $T = 78$ К. Спектральные линии в областях длин волн 2 и 3 мкм здесь соответствуют излучению из разных пространственных областей образца (по толщине). Линия на длине волны 3 мкм отвечает излучению из узкой ямы (толщиной около 0.25 мкм), в которой $x \approx 0.39$. Линия на длине волны 2 мкм соответствует излучению из приповерхностного слоя, где $x \approx 0.55$. Относительная ширина этих спектральных линий по уровню интенсивности сигнала 0.5 от максимального значения составляет 3–4 процента, что связано, как обычно, с неоднородным уширением спектральной линии в образцах КРТ.

Проведенные нами температурные измерения (рис. 2) позволили наблюдать сдвиг частоты генера-

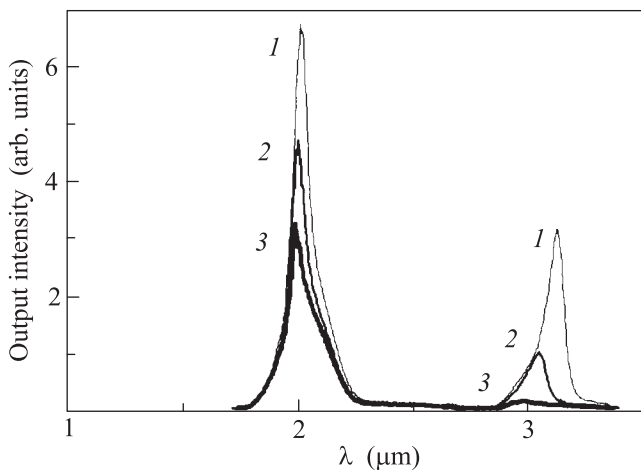


Рис. 2. Спектры стимулированного излучения из образца КРТ M070212, измеренные при разных температурах T [К]: 1 – 78, 2 – 100, 3 – 120. Наблюдаются две спектральные линии стимулированного излучения. С увеличением температуры интенсивность излучения уменьшается и линии несколько сдвигаются в коротковолновый диапазон

ции при увеличении температуры, обусловленный температурной зависимостью ширины запрещенной зоны КРТ (см., например, [4]). Эти измерения показали также, что при увеличении температуры спектральные линии стимулированного излучения сначала несильно, а затем очень существенно расширяются, до тех пор пока они не превратятся в широкие линии спонтанного излучения. Функция

распределения неравновесных носителей по энергии становится при увеличении температуры более размытой. Это приводит к уменьшению усиления в системе и, как результат, к уменьшению величины сигнала стимулированного излучения (см. рис. 2).

В области длин волн около 2 мкм стимулированное излучение наблюдалось до температуры примерно 150 К. Спектральная зависимость для этой области длин волн при $T = 150$ К без усреднения по импульсам накачки изображена на рис. 3. При данной

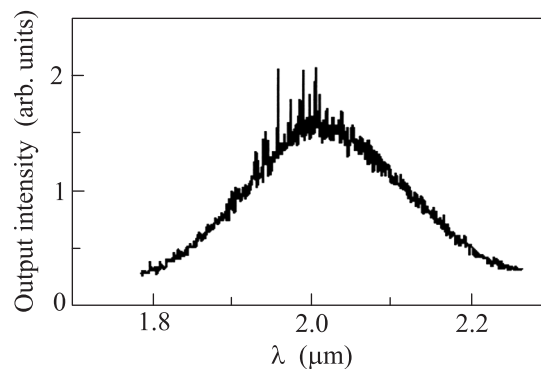


Рис. 3. Спектр стимулированного излучения из образца КРТ M070212, измеренный при $T = 150$ К. Масштабы по осям абсцисс и ординат растянуты по сравнению с рис. 1 и 2

температуре спектральная линия стала широкой, что приблизительно соответствует спонтанному излучению. Однако вблизи максимума спектральной линии наблюдаются довольно сильные флуктуации сигнала, свидетельствующие о наличии усиления в системе. Их возникновение может быть объяснено следующим образом. В эксперименте существует разброс в интенсивностях накачки от импульса к импульсу. При интенсивностях накачки вблизи порогового значения для возникновения стимулированного излучения (случай, изображенный на рис. 3, соответствует именно этой ситуации) усиление таких флуктуаций в активной среде становится особенно заметным. При указанной температуре стимулированного излучения на длинах волн около 3 мкм уже не наблюдалось. В данном случае оно перестает наблюдаться при температурах примерно 110–120 К. Это происходит по двум причинам. Во-первых, существует конкуренция электромагнитных мод в образце. Механизм конкуренции мод состоит в следующем. При оптической накачке образца с поверхности неравновесные носители попадают как в приповерхностную пространственную область, из которой наблюдается стимулированное излучение на длине волны около 2 мкм, так и в узкую яму (см. рис. 1а), межзонные

переходы из которой обеспечивают возникновение стимулированного излучения на длине волны около 3 мкм.

Часть носителей заряда рекомбинирует с испусканием фотонов в приповерхностном слое, обеспечивая существование двух микронного стимулированного излучения. В результате в узкую яму попадает меньше носителей заряда. Таким образом, наличие конкурирующего стимулированного излучения приводит к дополнительному механизму диссипации в системе. Во-вторых, отсутствие трех микронного стимулированного излучения при температуре $T > (110-120) K$ обусловлено еще и возросшей ролью оже-рекомбинации при этих температурах. Увеличение частоты оже-рекомбинации приводит к тому, что носители рекомбинируют без излучения фотонов (см., например, [1, 11]). Из-за наличия двух совместно действующих механизмов, конкуренции мод и оже-рекомбинации, стимулированное излучение на длине волны 3 мкм пропадает при меньших температурах, чем в однородных по составу образцах, излучающих стимулированное излучение на длине волны около 3 мкм. При росте температуры дольше существует коротковолновое стимулированное излучение, так как большая ширина запрещенной зоны обеспечивает большее время жизни неравновесных носителей и, следовательно, более благоприятные условия для существования инверсии населенностей.

Следует отметить, что многочастотное стимулированное излучение из образцов рассмотренного типа наблюдается не всегда. Как показывают экспериментальные данные, возможность существования двухчастотного стимулированного излучения связана с составом КРТ, а также с абсолютной толщиной и соотношением толщин слоев, обеспечивающих излучение отдельных частот. Так, например, нами были проведены измерения на образцах с профилем состава, похожим на профиль, изображенный на рис. 1а, но с тем отличием, что ширина запрещенной зоны в “яме” соответствовала длине волны излучения 3.5–3.6 мкм. Для этого случая при любой температуре (от температуры жидкого азота до комнатной) наблюдалась спектральная линия только излучения из “обкладок” (на длине волны около 2 мкм). Очевидно, что отсутствие двухчастотной генерации в этом случае связано с указанными выше ограничениями, накладываемыми оже-рекомбинацией в узкозонной части образца, а также с конкуренцией мод.

Наблюдение многочастотной генерации из различных областей образца показывает, что если мы хотим получить одночастотное стимулированное из-

лучение из образца, то наличие в нем слоев с другим составом может играть отрицательную роль. Стимулированное излучение из приповерхностных (“обкладочных”) слоев приводит к конкуренции электромагнитных мод в образце, что ухудшает условия для генерации из “основной” ямы. Это обстоятельство важно иметь в виду при создании полупроводниковых лазеров, причем на основе не только КРТ, но и других материалов.

Заключение. Итак, нами экспериментально наблюдалось двухчастотное стимулированное излучение в областях длин волн 2 и 3 мкм из неоднородных по составу образцов КРТ произвольной формы при их оптической накачке. Возможность наблюдения достаточно мощного (десятки милливатт) двухчастотного стимулированного излучения из неоднородных по составу образцов КРТ может быть связана с большими значениями коэффициента усиления, достигаемыми при их оптической накачке [5]. Благодаря большой величине коэффициента усиления стимулированное излучение из образцов наблюдалось даже в отсутствие резонатора. Действительно, при наличии большого усиления в системе роль оптического резонатора для излучаемых волн существенно уменьшается, так как существенное усиление электромагнитной волны стимулированного излучения практически осуществляется при однократном пробеге активной среды образца. При таких условиях электромагнитные волны с разной частотой могут распространяться в одних и тех же пространственных областях.

Экспериментальное наблюдение двухчастотного стимулированного излучения может в принципе послужить первым шагом к наблюдению стимулированного излучения с более сложным спектральным составом (трех-, четырехчастотным спектром излучения и другими многочастотными спектрами). Такие источники инфракрасного излучения могли бы представлять большой интерес для целей спектроскопии и мониторинга окружающей среды. Источник излучения может быть заранее создан так, чтобы его спектральные линии совпадали со вполне определенными спектральными линиями колебательного или вращательного движения тех или иных молекул. Это могло бы способствовать диагностике посредством совпадения нескольких спектральных линий наличия или каких-то определенных молекул, или молекул разного сорта.

Очевидно, что дальнейшее исследование свойств гетероструктур на основе КРТ представляет интерес в плане изучения возможности получения с их помощью излучения ИК-диапазона (в том числе и много-

частотного). Уже сейчас видно, что в таких структурах возникновение стимулированного излучения может определяться не только отдельными квазиоднородными по составу слоями, но и конкуренцией мод в разных слоях образцов. Таким образом, поведение их спектров излучения оказывается более сложным, чем в случае однородных образцов. Это может нести в себе новые физические эффекты и новые возможности для прикладных целей.

Авторы выражают признательность А.А. Андронову за интерес к работе и полезные обсуждения.

1. R. Dornhaus and G. Nimtz, *Solid-State Physics* **78**, 1 (1976).
2. J. Bleuse, J. Bonnet-Gamard, G. Mula et al., *Journal of Crystal Growth* **197**, 529 (1999).
3. Ю. Н. Ноздрин, А. В. Окомельков, А. П. Котков и др., *Письма в ЖЭТФ* **80**, 29 (2004).
4. A. A. Andronov, Yu. N. Nozdryn, A. V. Okomel'kov et al., *Proceedings SPIE* **6636**, 66360U (2007).
5. A. A. Andronov, Yu. N. Nozdryn, A. V. Okomel'kov et al., *Journal of Luminescence* **132**, 612 (2012).
6. А. А. Андронов, Ю. Н. Ноздрин, А. В. Окомельков и др., *Прикладная физика* **5**, 98 (2008).
7. А. С. Логинов, А. Г. Ржанов, Д. В. Скоров, *Квантовая электроника* **36**, 520 (2006).
8. M. A. Belkin, F. Capasso, F. Xie et al., *Appl. Phys. Lett.* **92**, 201101 (2008).
9. I. Melngailis and A. J. Strauss, *Appl. Phys. Lett.* **8**, 179 (1966).
10. T. C. Hartman, *J. Electron. Materials.* **8**, 191 (1979).
11. G. Nimtz, *Phys. Rep.* **63**, 265 (1980).