

# Стимулированное излучение гетероструктур на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ при комнатной температуре в условиях оптической накачки

© А.А. Андронов, Ю.Н. Ноздрин, А.В. Окомельков<sup>¶</sup>, А.А. Бабенко<sup>+</sup>,  
В.С. Варавин<sup>¶¶</sup>, Д.Г. Икусов<sup>+</sup>, Р.Н. Смирнов<sup>+</sup>

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

<sup>+</sup> Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 14 мая 2007 г. Принята к печати 24 мая 2007 г.)

Сообщается об экспериментальном наблюдении стимулированного излучения в диапазоне длин волн 1.4–4.5 мкм гетероструктур на основе  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  при оптической накачке. В экспериментах использовались варизонные образцы  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , выращенные на подложках GaAs и Si с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии. Суперлюминесценция таких структур наблюдалась при температурах 77–300 К при импульсной накачке образцов Nd:YAG-лазером (длина волны 1.064 мкм). При комнатной температуре стимулированное излучение наблюдалось на длинах волн 1.4–1.7 мкм. Полученные экспериментальные данные являются первыми результатами по наблюдению стимулированного излучения на этих длинах волн при комнатной температуре из объемных варизонных структур  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  на подложках Si и GaAs.

PACS: 78.45.+h, 78.55.Et, 78.66.Hf

## 1. Введение

Интерес к созданию полупроводниковых лазеров диапазона 1.5–12 мкм, перекрывающих основные коротковолновые „окна“ атмосферной прозрачности (3–5, 8–12 мкм), чрезвычайно велик. В настоящее время основные надежды связывают с внутризонными каскадными лазерами и с межзонными лазерами на гетеропереходах II типа (см., например, [1,2]), где оже-рекомбинация значительно подавлена благодаря тому, что области существования неравновесных дырок и электронов оказываются в них пространственно разнесенными. Это позволяет надеяться на получение с помощью таких структур лазерного излучения при комнатной температуре. Однако пространственное разделение носителей заряда приводит к тому, что вероятность излучения в таких системах существенно уменьшается. В то же время возможности использования гетероструктур на основе  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  (КРТ) с разрешенными излучательными переходами для получения лазерного излучения в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне еще не полностью исследованы. Во-первых, за последние годы наблюдается значительный прогресс в технологии создания слоев КРТ, который обусловлен развитием приемных систем среднего ИК диапазона на основе КРТ. Во-вторых, уже достаточно давно были выполнены теоретические расчеты (см., например, [3]), показавшие возможность существенного (в 100 раз) подавления оже-рекомбинации при переходе к использованию квантово-размерных слоев КРТ; существенное подавление темпа безызлучательной рекомбинации могло бы способствовать существенному увеличению рабочей температуры длинноволновых лазеров, создаваемых на основе таких структур.

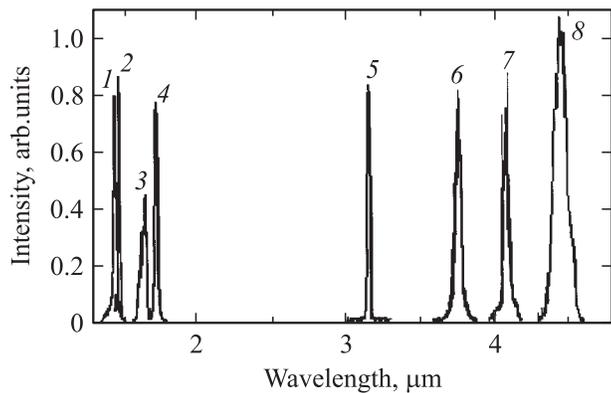
Исследуемые нами варизонные структуры на основе КРТ имеют как на свободной поверхности, так и на границе с подложкой слои с более широкой запрещенной зоной (см., например, [4]). Эти слои (с двух сторон активной области) обладают меньшей диэлектрической проницаемостью (см., например, [5]), а потому сами структуры являются естественными волноводами для лазерного излучения. В настоящей работе, являющейся развитием недавних сообщений [6–8], приводятся результаты исследования условий возникновения стимулированного излучения при оптической накачке в гетерослоях КРТ различного состава и толщины, выращенных на подложках GaAs и Si с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Такие исследования мы рассматриваем в качестве первого шага к созданию лазеров среднего ИК диапазона на основе квантовых  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ -гетероструктур, работающих при комнатной температуре.

## 2. Экспериментальные результаты

В наших экспериментах образцы  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  закреплялись на медном хладопроводе, помещенном в жидкий азот. На них проецировалось излучение накачки — излучение импульсного Nd:YAG-лазера с рабочей длиной волны 1.064 мкм и длительностью импульсов  $\sim 80$  нс. Все экспериментальные результаты, приведенные в настоящей работе, относятся к случаю засветки образцов со стороны слоев КРТ. Использование импульсного источника оптического возбуждения позволяет избежать существенного разогрева структур под действием лазерного излучения. С помощью металлического сферического зеркала излучение из образца фокусировалось на входной щели спектрометра. Излучение на выходе

<sup>¶</sup> E-mail: okom@ipm.sci-nnov.ru

<sup>¶¶</sup> E-mail: varavin@isp.nsc.ru



**Рис. 1.** Спектры стимулированного излучения образцов  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  с различным составом (1–8) при температуре  $T = 77$  К. Стимулированное излучение наблюдалось в диапазоне 1.4–4.5 мкм. Интенсивность измеряется в относительных единицах, своих для каждого образца.

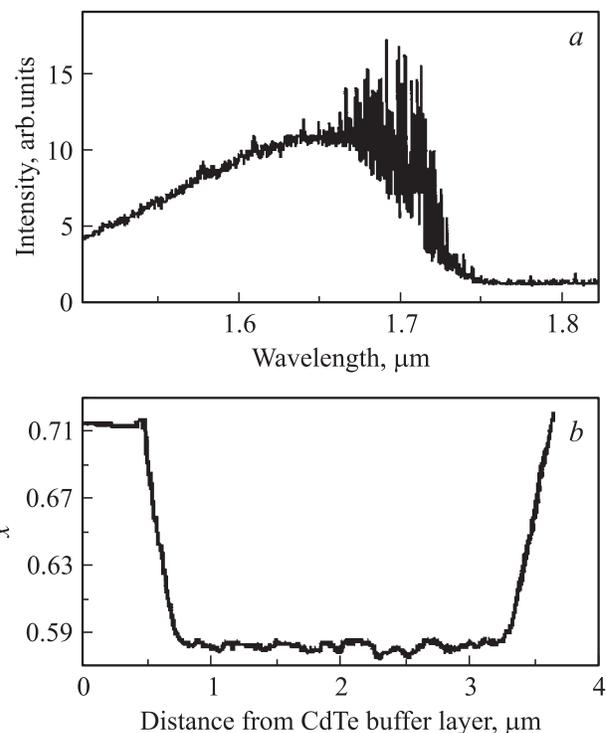
спектрометра регистрировалось с помощью фотоприемника. При необходимости для подавления излучения накачки использовался Ge-фильтр, помещаемый перед фотоприемником. Сигнал с фотоприемника отображался на экране осциллографа, синхронизированного импульсами Nd:YAG-лазера накачки. Никакого структурирования гетерослоев (изготовления лазерных резонаторов) не проводилось. Таким образом, нами наблюдалась суперлюминесценция из образца или (при неполной засветке образца) из „пятна“ на образце, в которое было сфокусировано излучение накачки.

При сравнительно малых интенсивностях оптической накачки на всех образцах КРТ наблюдается спонтанное излучение, которое характеризуется не слишком большой интенсивностью и довольно широкополосным спектром излучения, ширина которого по частоте  $\omega$  существенно больше  $k_B T / \hbar$  ( $k_B$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура,  $\hbar$  — постоянная Планка), что обусловлено наличием флуктуаций состава образца (см., например, [9]). Возникновение стимулированного излучения идентифицировалось нами по нескольким признакам. С ростом интенсивности накачки стимулированное излучение возникает пороговым образом: интенсивность излучения при пороговой интенсивности засветки резко возрастает — сигнал увеличивается на 2–3 порядка; при этом вблизи порога из-за нестабильности импульсов излучения накачки в пределах 10% наблюдаются существенные (на порядок или больше) скачки интенсивности наблюдаемого излучения (см., например, рис. 2, *a*). Кроме того, наблюдается резкое сужение спектра излучения. Ширина спектра стимулированного излучения вблизи порога много меньше  $k_B T / \hbar$ . Значение относительной ширины спектра  $\Delta\omega / \omega$  стимулированного излучения в исследованных нами образцах было  $\sim 10^{-2}$  и определялось неоднородным уширением, обусловленным неоднородностью фазового состава пленок.

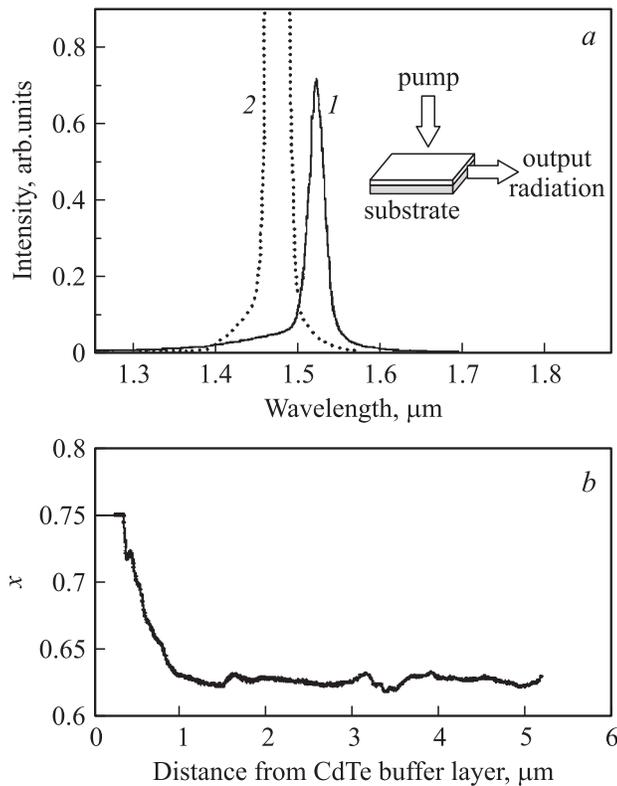
На рис. 1 приведены спектры стимулированного излучения различных исследованных нами структур КРТ. В диапазоне длин волн 1.4–4.5 мкм стимулированное излучение наблюдается для образцов разной толщины, выращенных на подложках как GaAs, так и Si, при температуре  $T = 77$  К.

На рис. 2, *a* показан спектр стимулированного излучения образца КРТ 030318 на подложке *p*-Si при комнатной температуре ( $T = 300$  К). Спектр измерен для случая, когда интенсивность накачки несколько превышала пороговое значение возникновения стимулированного излучения. Из рисунка видно, что стимулированное излучение возникает на длине волны  $\sim 1.7$  мкм на фоне широкополосного спонтанного излучения и сопровождается „гребенкой“ всплесков стимулированного излучения.

Изменение состава для этого образца по толщине изображено на рис. 2, *b*. Толщина в направлении поперек КРТ-структуры отсчитывается от буферного слоя CdTe, нанесенного на подложку. Профиль изменения состава (содержания CdTe  $x$ ) по толщине, изображенный на рис. 2, *b*, показывает, что использованные нами структуры имеют два более широкозонных, чем в центральной части, „обкладочных“ слоя; один — вблизи поверхности (его наличие уменьшает темп поверхностной безызлучательной рекомбинации — см. [4]), а другой — на границе с буферным слоем со стороны подложки (его наличие улучшает, в частности, согласование кристаллических решеток КРТ материала и буферного слоя CdTe).



**Рис. 2.** Спектр стимулированного излучения образца КРТ 030318 на подложке *p*-Si при температуре  $T = 300$  К (*a*) и профиль распределения CdTe по толщине (*b*).



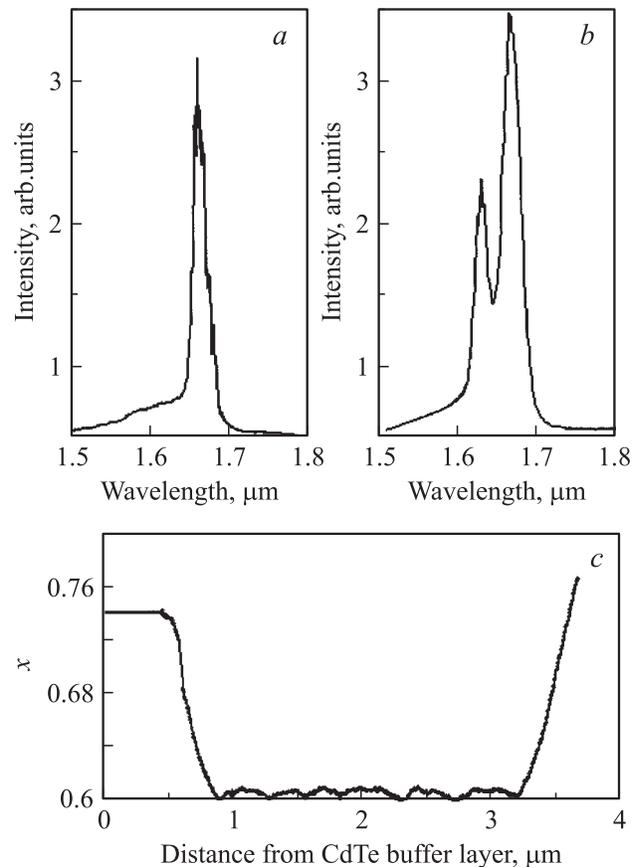
**Рис. 3.** *a* — спектры стимулированного излучения образца КРТ 051108 на подложке *p*-GaAs ( $x = 0.62$ , толщина слоя КРТ 5.2 мкм) при температурах  $T = 300$  (1) и 77 К (2); на вставке схематично показана геометрия эксперимента. *b* — профиль распределения CdTe по толщине.

Центральная область по толщине структуры намного больше как длины волны де Бройля носителей, так и их длины свободного пробега и демонстрирует, таким образом, свойства объемного материала КРТ. К особенностям используемых образцов следует также отнести наличие пространственных флуктуаций состава (параметра  $x$ ) твердого раствора  $Cd_xHg_{1-x}Te$ , что хорошо видно в центральной (по толщине) части образца (на рис. 2, *b* в области приблизительно от 1 до 3 мкм). При этом, как очевидно и как будет показано далее, определенные флуктуации параметра  $x$  (а потому и ширины запрещенной зоны узкощелевого полупроводника) существуют и в плоскости пленки. Эти неоднородности состава могут проявляться в наблюдаемых свойствах излучения КРТ-структур. В частности, в нашем случае они проявляются в уширении спектральных линий стимулированного излучения и даже могут приводить к более сложному спектральному составу по сравнению с пространственно однородной ситуацией.

На рис. 3, *a* приведены спектры стимулированного излучения образца КРТ 051108 на подложке *p*-GaAs. Изменение состава образца по толщине для этого случая изображено на рис. 3, *b*. Данный образец достаточно широкозонный и не имеет приповерхностного обкладоч-

ного слоя. На рис. 3, *a* схематично изображена также геометрия эксперимента: излучение из торца образца проецировалось на входную щель монохроматора. Как при температуре жидкого азота, так и при комнатной температуре спектр излучения представляет собой узкую линию, ширина которой меньше температуры в энергетических единицах. Сдвиг длины волны линии стимулированного излучения в коротковолновую область при переходе к азотной температуре связан с увеличением ширины запрещенной зоны образца КРТ.

На рис. 4, *a, b* изображены спектры стимулированного излучения двух различных образцов, полученных из структуры КРТ 030404 на подложке *p*-Si, при комнатной температуре. Изменение состава образца по толщине для этого случая изображено на рис. 4, *c*. Наличие двух узких линий стимулированного излучения (на рис. 4, *b*) связано с тем, что стимулированное излучение в данном случае возникает в двух различных пространственных областях образца и обусловлено наличием в нем неоднородностей. Стимулированные излучения, соответствующие этим линиям, возникают на близких частотах.



**Рис. 4.** Спектры стимулированного излучения двух различных образцов (*a, b*), полученных из структуры КРТ 030404 на подложке *p*-Si ( $x = 0.6$ , толщина слоя КРТ 3.68 мкм), при  $T = 300$  К и профиль распределения CdTe по толщине структуры (*c*).

### 3. Заключение

В данной работе экспериментально показано, что стимулированное излучение при оптической накачке Nd:YAG-лазером существует в широком диапазоне составов и толщин слоев  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , выращенных на подложках как GaAs, так и Si. В образцах, где ширина запрещенной зоны была достаточно велика (соответствующий диапазон длин волн 1.4–1.7 мкм), мы наблюдали стимулированное излучение при комнатной температуре. Таким образом, в широкозонных объемных образцах (в отличие от квантовых гетероструктур) в условиях достаточно сильной оптической накачки оказывается возможным преодолеть влияние оже-рекомбинации и получить стимулированное излучение при температурах вплоть до комнатной.

Наши экспериментальные результаты являются, насколько нам известно, первыми данными по наблюдению стимулированного излучения при комнатной температуре из объемного материала  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , выращенного с помощью метода МПЭ на подложках Si и GaAs. Полученные нами результаты близки (по длине волны и диапазону рабочих температур) к данным, полученным на квантовых гетероструктурах (см., например, [1]). Мы надеемся, что предполагаемый в дальнейшем переход к квантово-размерным структурам, полученным с помощью используемой нами технологии МПЭ, позволит значительно увеличить длину волны стимулированного излучения при комнатной температуре.

В качестве возможных приложений наших исследований отметим, что наблюдение стимулированного излучения из гетероструктур на основе  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  на длине волны  $\sim 1.5$  мкм при комнатной температуре может представлять практический интерес, например, для целей спектроскопии, мониторинга окружающей среды и для волоконно-оптических линий связи. Кроме того, использование кремниевых подложек для создания лазерных структур могло бы позволить интегрировать данные источники на одной кремниевой подложке с другими элементами твердотельной электроники.

Работа поддержана грантами РФФИ № 06-02-16685-а, 07-02-00935-а, программой РАН „Проблемы радиофизики“, Федеральным агентством по науке и инновациям (Государственный контракт № 02.515.11.508), грантом РФФИ № 07-02-13616-офи\_ц.

### Список литературы

- [1] J. Bleuse, J. Bonnet-Gamard, G. Mula, N. Magnea, J.-L. Pautrat. *J. Cryst. Growth*, **197**, 529 (1999).
- [2] A.P. Ongstad, R. Kaspi, C.E. Moeller, M.L. Tilton, J.R. Chavez, G.C. Dente. *J. Appl. Phys.*, **95** (4), 1619 (2004).
- [3] Y. Jiang, M.C. Teich, W.I. Wang. *J. Appl. Phys.*, **69** (10), 6869 (1991).
- [4] Ю.Г. Сидоров, С.А. Дворецкий, В.С. Варавин, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, И.В. Сабинаина. *ФТП*, **35** (9), 1092 (2001).

- [5] R. Dornhaus, G. Nimtz. *Springer Tracts in Mod. Phys.*, **78**, 1 (1978).
- [6] Ю.Н. Ноздрин, А.В. Окомельков, А.П. Котков, А.Н. Моисеев, Н.Д. Гришнова. *Письма ЖЭТФ*, **80** (1), 29 (2004).
- [7] Ю.Н. Ноздрин, А.В. Окомельков, А.П. Котков, А.Н. Моисеев, Н.Д. Гришнова. *ФТП*, **38** (12), 1419 (2004).
- [8] А.А. Андронов, Ю.Н. Ноздрин, А.В. Окомельков, В.С. Варавин, Р.Н. Смирнов, Д.Г. Икусов. *ФТП*, **40** (11), 1300 (2006).
- [9] П. Ю. М. Кардона. *Основы физики полупроводников* (М., Физматлит, 2002).

Редактор Л.В. Шаронова

### Stimulated emission from optically pumped $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ heterostructures at room temperature

A.A. Andronov, Yu.N. Nozdrin, A.V. Okomel'kov, A.A. Babenko<sup>+</sup>, V.S. Varavin<sup>+</sup>, D.G. Ikusov<sup>+</sup>, R.N. Smirnov<sup>+</sup>

Institute for Physics of Microstructures,  
Russian Academy of Sciences,  
603950 Nizhniy Novgorod, Russia  
<sup>+</sup> Institute of Semiconductor Physics,  
Russian Academy of Sciences, Siberian Branch,  
630090 Novosibirsk, Russia

**Abstract** Experimental observations of stimulated emission in the range 1.4–4.5  $\mu\text{m}$  from epitaxial structures  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  are reported. In our experiments, we have used  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  samples grown on GaAs and Si substrates by the molecular-beam epitaxy. In the present work, we have observed super luminescence from these structures at temperatures 77–300 K under the pulsed optical pumping by Nd:YAG laser. Our experiments are the first observations of stimulated emission at room temperature from the bulk (non quantum size) structures  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  have been grown by molecular-beam epitaxy method on Si and GaAs substrates. Details of the samples, experiments, spectra of the stimulated emission and the possible applications are discussed.