

$g(\mu) = f(U)$ возрастает с увеличением напряжения и имеет осцилляции. В зависимости $E_a = f(U)$ два наклона с энергией 0,85 и 0,3 эВ (при больших напряжениях). Уменьшение E_a с ростом U соответствует возрастанию $g(\mu)$.

Дано объяснение большой величине R и ее зависимости от U , что связано с характером изменения $g = f(U)$.

Предложены вероятные причины скачка на зависимости $R = f(T)$.

Литература

1. Амбровевич С. А., Лакалин А. В., Солонин А. П. Вольт-емкостные исследования светодиодов на основе гетероструктуры InGaN/GaN// Ученые записки УлГУ. Сер. Физическая, 2005. Вып. 1(17). С. 54—58.
2. Лакалин А. В., Солонин А. П. Температурные исследования электрических характеристик голубых светодиодов на основе GaN с квантовой ямой// Там же. С. 59—64.
3. Грушко Н. С., Лакалин А. В., Солонин А. П. Электролюминесценция в структурах AlGaIn/GaN с квантовыми ямами// Харьковская нанотехнологическая ассамблея. 2007. Тонкие пленки: Сб. докл. Т. 2. С. 39—43.
4. Грушко Н. С., Солонин А. П. Эффективность излучения голубых светодиодов на основе InGaN/GaN// Опто-наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: Тр. VIII междунар. конф. — Ульяновск, 2006. С. 206.
5. Солонин А. П., Грушко Н. С. Низкотемпературная электролюминесценция светодиодов на основе нитрида гал-

лия// VIII всерос. молодежная конф. по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике: Тезисы докладов. — СПб, 2006. С. 106.

6. Грушко Н. С., Лакалин А. В., Сомов А. Н. Определение механизма токопереноса в p - n -переходах по анализу температурной зависимости прямой вольт-амперной характеристики// Оптика. Оптоэлектроника и технологии: Труды междунар. конференции. — Ульяновск, 2003. С. 78.

7. Кудряшов В. Е. Люминесцентные и электрические свойства светодиодов InGaN/AlGaIn/GaN с множественными квантовыми ямами/В. Е. Кудряшов, А. Н. Туркин, А. Э. Юнович, А. Н. Ковалев, Ф. И. Маняхин// ФТП. 1999. Т. 33. Вып. 4. С. 445—449.

8. Ковалев А. Н. Изменения люминесцентных электрических свойств светодиодов из гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN при длительной работе/А. Н. Ковалев, Ф. И. Маняхин, В. Е. Кудряшов, А. Н. Туркин, А. Э. Юнович// Там же. Вып. 2. С. 224—231.

9. Грушко Н. С., Дуванова Н. В., Логинова Е. А. Структуры InGaN/SiC с модулированным легированием// Ученые записки УлГУ. Сер. Физическая. 2004. Вып. 1(16). С. 30—39.

10. Петров В. А., Никитин А. В. Управление электрическим полем эффектами пространственной повторяемости и мультипликации электронных волн в полупроводниковых двумерных наноструктурах// ФТП. 2006. Т. 40. Вып. 8. С. 977—985.

11. Сардарин Р. М., Самедов О. А., Наджафов А. Н., Садыгов И. Ш., Зейналова Э. А., Мамедов Т. Г. Релаксорные свойства кристаллов $TlInS_2$ // Физика и астрономия АН Азербайджана. 2005. № 2. С. 70—74.

Статья поступила в редакцию 13 марта 2008 г.

Current transfer in light-emitting diodes on the basis of the InGaN/GaN heterostructure

N. S. Grushko, A. V. Lakalin, A. P. Solonin
Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia

Consideration is made to the InGaN/AlGaIn/GaN light-emitting diodes on the standard SiC substrate [HgCdTe-1608 PBC (SMD)] with two quantum wells and with the active $In_xGa_{1-x}N$ layer ($x = 0.2$). A mechanism is determined for a current transfer on direct current-voltage characteristics — tunneling with participation of hopping. Defined are parameters of these mechanisms and their voltage and temperature dependence.

УДК 538.958:535-15:537.862

Стимулированное и спонтанное излучение из пленок $Cd_xHg_{1-x}Te$ на GaAs- и Si-подложках при оптической накачке

А. А. Андронов, Ю. Н. Ноздрин, А. В. Окомельков
Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород, Россия

А. А. Бабенко, В. С. Варавин, Д. Г. Икусов, Р. Н. Смирнов
Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Сообщено о наблюдении спонтанного и стимулированного излучения в диапазоне длин волн 1,4—4,5 мкм из гетероструктур $Cd_xHg_{1-x}Te$, выращенных на GaAs- и Si-подложках с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии. Суперлюминесценция наблюдалась при темпе-

ратурах 77—300 К при оптической накачке импульсным Nd:YAG-лазером. Обсуждены детали образцов, экспериментальной установки, спектры излучения и возможные приложения.

Введение

Интерес к созданию полупроводниковых лазеров диапазона 1,5—12 мкм, перекрывающих основные коротковолновые “окна” атмосферной прозрачности (3—5 и 8—12 мкм), чрезвычайно велик. В настоящее время основные надежды связывают с внутризонными каскадными лазерами и с межзонными лазерами на гетеропереходах II типа [1, 2], где Оже-рекомбинация значительно подавлена благодаря тому, что области существования неравновесных дырок и электронов оказываются в них пространственно разнесены. Это позволяет надеяться на получение с помощью таких структур лазерного излучения при комнатной температуре. Однако пространственное разделение приводит к тому, что вероятность излучения в таких системах существенно уменьшается. В то же время нам представляется, что возможности использования гетероструктур $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) с разрешенными излучательными переходами для получения лазерного излучения в среднем ИК-диапазоне еще неполностью исследованы. Во-первых, за последние годы наблюдается значительный прогресс в технологии создания КРТ-слоев, который обусловлен развитием приемных систем среднего ИК-диапазона на основе КРТ-слоев. Во-вторых, уже достаточно давно были выполнены теоретические расчеты [3], демонстрирующие возможность существенного (примерно в 100 раз) подавления Оже-рекомбинации при переходе к использованию квантовых слоев КРТ. Такое существенное подавление темпа безызлучательной рекомбинации могло бы способствовать существенному увеличению рабочей температуры лазеров, создаваемых на основе таких структур. Отметим, что максимальные рабочие температуры в лазерах на гетероструктурах II типа в настоящее время получены именно с использованием оптической накачки.

Следует также отметить, что в настоящее время распространение получили варизонные КРТ-структуры, имеющие неоднородный по толщине состав, а также слои с более широкой запрещенной зоной как на “свободной” поверхности, так и на границе с подложкой [4]. У таких структур приповерхностные слои (с двух сторон) обладают меньшей диэлектрической проницаемостью [5], а потому сами структуры являются естественными волноводами для лазерного излучения.

В настоящей работе (являющейся развитием недавних сообщений в работах [6, 7]) мы приводим результаты исследования условий возникно-

вания стимулированного излучения при оптической накачке в варизонных слоях КРТ различного состава и толщины, выращенных на подложках GaAs и Si. Такие исследования можно рассматривать в качестве первого шага для создания лазеров среднего ИК-диапазона на основе квантовых гетероструктур на основе КРТ.

Эксперименты

В наших экспериментах образцы $Cd_xHg_{1-x}Te$ закреплялись на медном хладопроводе, помещенном в жидкий азот. На них проецировалось излучение накачки — импульсного Nd:YAG-лазера с рабочей длиной волны 1,064 мкм и длительностью импульсов около 80 нс. Использование импульсного источника оптического возбуждения позволяет избежать существенного разогрева исследуемых пленок под действием лазерного излучения. С помощью металлического сферического зеркала излучение из образца фокусировалось на входной щели спектрометра. Излучение на выходе спектрометра регистрировалось с помощью фотоприемника (фотосопротивления, изготовленного из образца $Cd_xHg_{1-x}Te$), охлаждаемого жидким азотом. При необходимости для подавления излучения накачки использовали Ge-фильтр, помещаемый перед фотоприемником. Сигнал с фотоприемника отображался на экране осциллографа, синхронизованного импульсами Nd:YAG-лазера накачки. Никакого структурирования гетерослоев (изготовления лазерных резонаторов) не проводилось. Таким образом, наблюдалась суперлюминесценция из образца (или, при неполной засветке образца, — из “пятна” накачки, сфокусированного на образец).

При сравнительно малых интенсивностях фотонакачки из всех образцов КРТ наблюдается спонтанное излучение, которое характеризуется не слишком большой интенсивностью и довольно широкополосным спектром излучения, ширина которого по частоте порядка температуры термостата T [8] (или несколько шире, что обусловлено наличием флуктуаций состава образца). Возникновение стимулированного излучения с ростом интенсивности накачки идентифицировалось по нескольким признакам. С ростом интенсивности накачки стимулированное излучение возникает пороговым образом: интенсивность излучения из образца при пороговой интенсивности засветки резко возрастает — сигнал увеличивается на 2—3 порядка. Кроме того, при этом наблюдается резкое сужение спектра излучения. Ширина спектра сти-

мулированного излучения (по частоте) вблизи порога много меньше $k_B T / \hbar$, где k_B — постоянная Больцмана, \hbar — постоянная Планка.

При дальнейшем увеличении интенсивности накачки в стимулированном излучении проявляется нелинейный эффект насыщения, заключающийся в том, что излучение из КРТ-структуры начинает уменьшаться. Значение относительной ширины спектра $\Delta\omega/\omega$ стимулированного излучения в исследованных образцах было порядка 10^{-2} и определялось неоднородным уширением, обусловленным неоднородностью фазового состава пленок. В некоторых случаях наблюдались и более узкие спектральные линии, которые не всегда удавалось разрешить, так как их ширина находилась за пределами разрешения использованного монохроматора.

На рис. 1 приведены спектры стимулированного излучения из различных исследованных структур КРТ. В диапазоне длин волн 1,4—4,5 мкм стимулированное излучение наблюдается для образцов разной толщины, выращенных с помощью МВЕ-метода на GaAs и Si-подложках. Следует отметить, что в образцах, где ширина запрещенной зоны была достаточно велика (см. соответствующий диапазон длин волн 1,4—1,7 мкм — образцы 1—4 на рис. 1), наблюдалось стимулированное излучение и при комнатной температуре. Образцы, используемые в эксперименте, не подвергались какой-либо оптимизации. Стимулированное излучение было получено из структур, традиционно используемых для создания детекторов электромагнитного излучения ИК-диапазона.

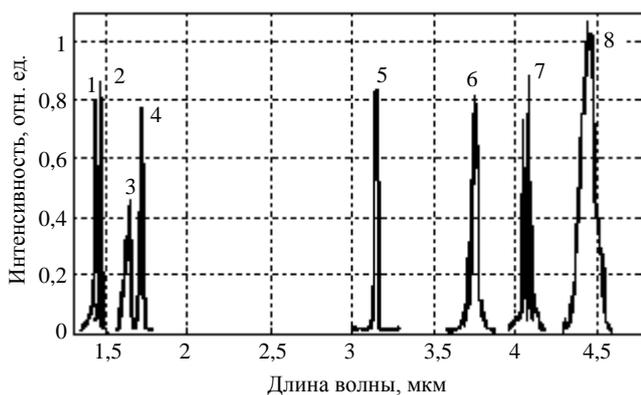


Рис. 1. Типичные спектры стимулированного излучения из образцов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (1—8) с различным составом x при температуре $T = 77$ К и оптической накачке Nd:YAG-лазером (на длине волны 1,064 мкм).

Интенсивность измеряется в отн. ед., разных для каждого образца

Ширина спектральной линии стимулированного излучения в различных образцах и при различной интенсивности оптической накачки может быть различной в зависимости как от возникаю-

щего (нелинейного) режима генерации электромагнитных волн, так и от наличия флуктуаций стехиометрического состава КРТ. В том случае, когда неравновесные носители испытывают сильное электрон-электронное рассеяние, а пространственная неоднородность образца не слишком велика, спектральная линия стимулированного излучения оказывается весьма узкой (в наших экспериментах наблюдались спектральные линии с относительной шириной не более 1—1,5 %). Узость спектральной линии в данном случае связана с тем, что в нелинейном режиме генерации волн существует "конкуренция мод" — генерация развивается не во всем диапазоне энергий, где выполняется условие инверсии населенностей, а в той частотной области, где коэффициент усиления максимален.

Однако, как обнаружено, возможен и другой режим генерации стимулированного излучения, когда "конкуренция мод" не реализуется. Ширина спектральной линии стимулированного излучения начинает определяться при этом всей энергетической областью, где выполняется условие инверсии населенности (с учетом потерь на поглощение и электродинамических потерь), и потому начинает зависеть от интенсивности оптической накачки. Именно этот случай и проиллюстрирован в дальнейшем, а на рис. 2 показаны возникающие при этом спектры стимулированного излучения и поперечные (в направлении поперек пленки) профили состава CdTe в таких структурах.

Для возникновения стимулированного излучения из КРТ необходимо создание сильного вырождения функции распределения электронов в зоне проводимости, при котором числа заполнения по энергии становятся порядка единицы. С ростом интенсивности накачки должна увеличиваться концентрация электронов и повышаться их квазиуровень Ферми, а стимулированное излучение должно наблюдаться при этом из состояний, ограниченных по энергии сверху квазиуровнем Ферми. Это должно приводить к уширению спектральной линии стимулированного излучения и смещению ее в коротковолновую область длин волн при увеличении интенсивности накачки. Такое поведение спектральных линий стимулированного излучения нам удалось наблюдать экспериментально. Соответствующее смещение линий и их уширение изображены на рис. 2, а, в. Об экспериментальном наблюдении такого поведения спектральных линий стимулированного излучения до настоящего момента, насколько нам известно, не сообщалось.

На рис. 2, а приведены спектры стимулированного излучения для различных интенсивностей накачки $P_1 < P_2 < P_3$ при температуре $T = 77$ К для образца КРТ 050428 (после роста) на Si-подложке.

При изменении интенсивности накачки возникают смещение и уширение спектральной линии. Длинноволновая граница этих спектральных линий одинаковая и определяется шириной запрещенной зоны. На рис. 2, б приведен график изменения состава пленки КРТ по толщине для этого случая.

находится “яма” в профилях состава (см. рис. 2, б и г). Характерная ширина этой “ямы” для случая на рис. 2, в, г приблизительно в 5 раз меньше, что приводит к существенно большему (в несколько раз) уширению спектральной линии при тех же интенсивностях фотонакачки по сравнению со

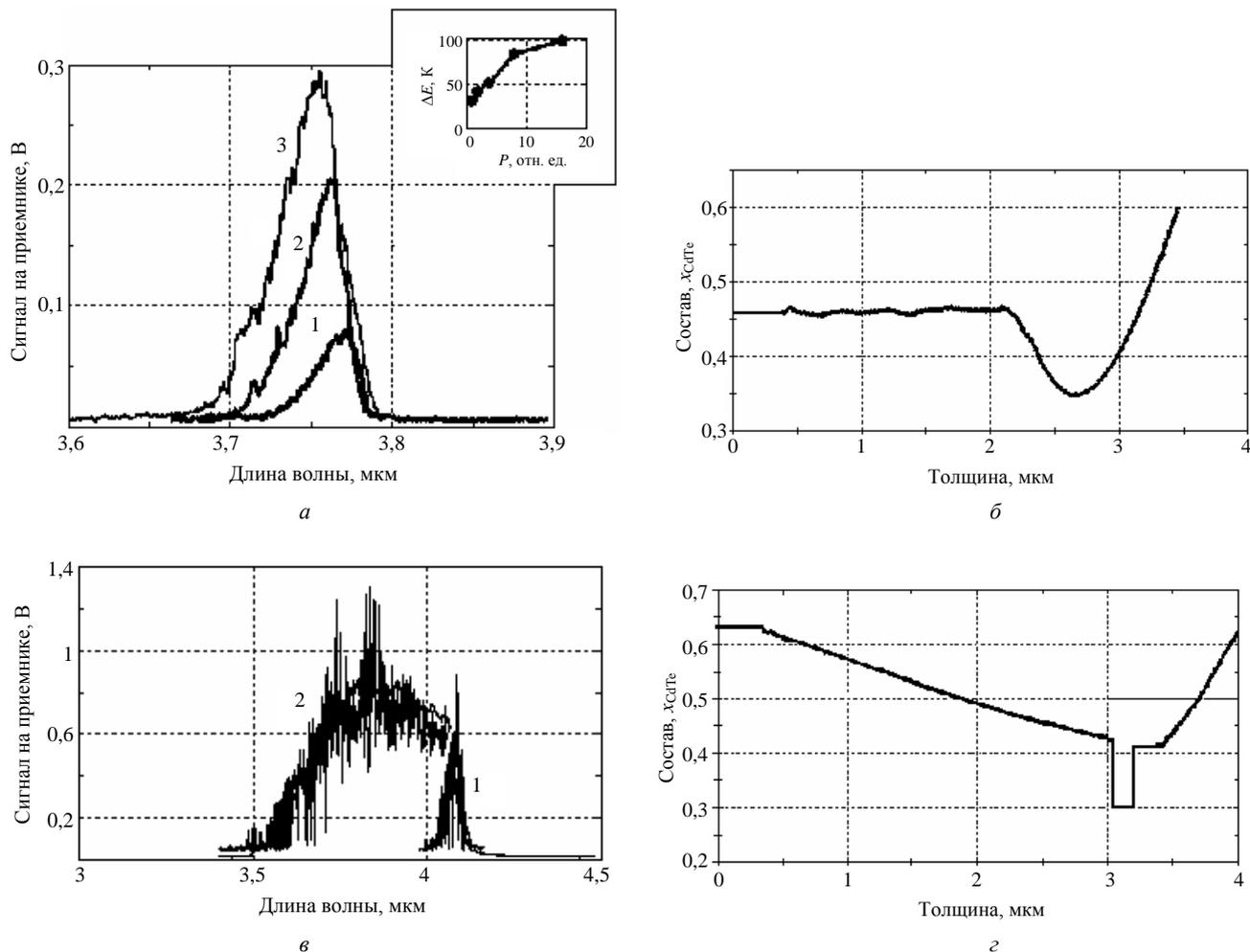


Рис. 2. Спектры стимулированного излучения:

а — для различных интенсивностей накачки $P_1 < P_2 < P_3$ при температуре $T = 77$ К для образца КРТ 050428 (после роста) на Si-подложке. На вставке, в правом верхнем углу, изображено изменение ширины спектральной линии ΔE (температурные единицы — тем. ед.) по уровню 0,5 ее максимального значения от интенсивности накачки P , отн. ед.;
б — профиль состава по толщине для образца КРТ 050428 на Si-подложке. Толщина отсчитывается от границы буферного слоя;
в — при температуре $T = 77$ К для образца КРТ 050908 на GaAs-подложке при различной величине интенсивности накачки:
 1 — измерение без усреднения; 2 — измерение также без усреднения, интенсивность накачки увеличена приблизительно в 10 раз по сравнению со случаем 1.
 Для спектра 1 ширина в тем. ед. $\Delta E = 35$ К. Для спектра 2 ширина в тем. ед. $\Delta E = 430$ К;
г — профиль состава по толщине для образца КРТ 050908 на GaAs-подложке. Толщина — см. рис. б

На рис. 2, в этот эффект иллюстрируется изменением спектра стимулированного излучения для другой КРТ-структуры. На рис. 2, г приведен график изменения состава пленки КРТ по толщине для этого случая. Как следует из измеренных величин длин волн стимулированного излучения, последнее в случаях, изображенных на рис. 2, а и в, возникает по толщине в тех пространственных областях, где

случаем, изображенном на рис. 2, а, б. Этот наблюдаемый нами эффект может быть использован для перестройки спектральной частоты в лазерных структурах на основе КРТ при изменении интенсивности оптической накачки.

Заключение

Стимулированное излучение при оптической накачке Nd:YAG-лазером существует в широком

диапазоне состава x и толщины d гетероструктур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, выращенных как на GaAs-, так и на Si-подложках. Наблюдение стимулированного излучения в довольно широком диапазоне длин волн и рабочих температур дает надежду на создание соответствующих лазеров (при успешном решении задачи создания оптических резонаторов на таких структурах) инфракрасного диапазона с помощью стандартных или почти стандартных (с учетом некоторой дальнейшей оптимизации) КРТ-структур, используемых в настоящее время для создания приемников инфракрасного излучения.

В качестве возможных приложений наших исследований отметим, что наблюдение стимулированного излучения из гетероструктур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ на длине волны около 1,5 мкм при комнатной температуре может представлять практический интерес, например, для целей спектроскопии, мониторинга окружающей среды, и для волоконно-оптических линий связи. При этом использование кремниевых подложек для создания лазерных структур может позволить интегрировать данные лазеры на одной подложке с другими элементами твердотельной электроники.

Настоящая 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.

Л и т е р а т у р а

1. Bleuse J., Bonnet-Gamard J., Mula G., Magnea N., Pautrat J.-L. // Journal of Crystal Growth. 1999. V. 197. P. 529.
2. Ongstad A. P., Kaspi R., Moeller C. E., Tilton M. L., Chavez J. R., Dente G.C. // J. Appl. Phys. 2004. V. 95. № 4. P. 1619.
3. Jiang Y., Teich M. C., Wang W. I. // Ibid. 1991. V. 69. № 10. P. 6869.
4. Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Варавин В. С., Михайлов Н. Н., Якушев М. В., Сабина И. В. // ФТП. 2001. Т. 35. Вып. 9. С. 1092.
5. Dornhaus R., Nimitz G. The Properties and Application of the $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ Alloy System. In: Springer Tracts in Modern Physics. V. 78. Solid-State Physics. P. 1—119. — Berlin. Heidelberg. New York: Springer-Verlag, 1976.
6. Ноздрин Ю. Н., Окомельков А. В., Котков А. П., Моисев А. Н., Гришинова Н. Д. // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 80. Вып. 1. С. 29.
7. Ноздрин Ю. Н., Окомельков А. В., Котков А. П., Моисев А. Н., Гришинова Н. Д. // ФТП. 2004. Т. 38. № 12. С. 1419.
8. Питер Ю., Мануэль Кардона. Основы физики полупроводников: Пер. с англ. — М: Физматлит, 2002. — 560 с.

Статья поступила в редакцию 5 марта 2008 г.

Stimulated and spontaneous emission from optically pumped $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ films on GaAs and Si substrates

A. A. Andronov, Yu. N. Nozdrin, A. V. Okomel'kov

Institute for Physics of Microstructures, Russian Acad. of Science, Nizhniy Novgorod, Russia

A. A. Babenko, V. S. Varavin, D. G. Ikusov, R. N. Smirnov

Institute for Physics of Semiconductors, Siberian Division of Russian Acad. of Science, Novosibirsk, Russia

Experimental observations of both stimulated and spontaneous emission in the range 1.4—4.5 μm 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 which have been 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. Details of the samples, experiments, spectrums of the stimulated emission and the possible applications are discussed.