

Наблюдение излучения среднего инфракрасного диапазона в полупроводниковых лазерах, генерирующих две частотные полосы в ближнем инфракрасном диапазоне

© В.Я. Алешкин, В.И. Гавриленко, С.В. Морозов[†], К.В. Маремьянин, Б.Н. Звонков*, С.М. Некоркин*

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

* Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 1 июня 2004 г. Принята к печати 14 июня 2004 г.)

Проведено экспериментальное исследование одновременной генерации нескольких частотных полос стимулированного излучения в полупроводниковом лазере с тремя квантовыми ямами. Показано, что разные частоты могут генерироваться как в основных, так и в возбужденных поперечных модах волновода. Обнаружено, что возможна одновременная генерация стимулированного излучения в двух и трех частотных полосах. Исследованы зависимости мощности генерации в различных полосах от тока. В полупроводниковом лазере, генерирующем две полосы излучения с энергетической разностью между пиками 50 мэВ (длина волны $\lambda \approx 25$ мкм), с помощью широкополосного примесного фотоприемника Si:V зарегистрировано излучение в среднем инфракрасном диапазоне, которое предположительно связано с генерацией разностной гармоники.

1. Введение

Интерес к полупроводниковым лазерным источникам среднего и дальнего инфракрасного (ИК) диапазонов обусловлен широкими потенциальными возможностями их применения для связи, газового анализа, спектроскопии. Созданные каскадные лазеры среднего ИК диапазона успешно работают при комнатной температуре [1], в то время как в области дальнего ИК диапазона получить генерацию на каскадных структурах удается только при криогенных температурах [2]. Полупроводниковые лазеры на германии *p*-типа проводимости [3,4], генерирующие излучение дальнего ИК диапазона, также работают только при низких температурах. Альтернативный подход к получению среднего и дальнего ИК излучения, который может обеспечить генерацию при комнатной температуре, состоит в использовании нелинейных эффектов. Для генерации разностной моды в лазере, генерирующем две коротковолновые моды, предлагалось использовать электронную нелинейность в квантовой яме (КЯ), содержащей три уровня [5], или нелинейные свойства кристаллической решетки материала активной области [6].

В данной работе исследуется генерация излучения среднего ИК диапазона, основанная на разностной частоте (за счет решеточной нелинейности GaAs) в двухчастотных лазерах, работающих при комнатной температуре, на основе гетероструктур InGaAs/GaAs с квантовыми ямами InGaAs.

2. Эксперимент

Лазерные структуры, содержащие в активной области три квантовые ямы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, были выращены

[†] E-mail: more@ipm.sci-nnov.ru

методом газофазной эпитаксии с применением металлургических соединений при атмосферном давлении. В структурах для лазеров с двухчастотной генерацией доля индия варьировалась в двух крайних ямах от 0.15 до 0.25, а в средней яме от 0.3 до 0.35. Ширина активной области и длина резонатора были равны соответственно 100 и 500–1000 мкм при геометрических размерах лазерного чипа $L = 1000$, $b = 400$ и $d = 170$ мкм, где L — длина чипа (длина резонатора), b — ширина чипа и d — полная толщина структуры. Модовый состав лазерного излучения в ближнем ИК диапазоне и зависимость интенсивности линий генерации от тока накачки исследовались на спектральном комплексе КСВУ-23 при температурах $T = 300$, 77 и 4.2 К при постоянной и импульсной накачке. Излучение в среднем ИК диапазоне детектировалось широкополосным примесным фотоприемником Si:V в режиме импульсной накачки лазерных диодов с длительностью импульса 1–15 мкс и частотой повторения 100 Гц при температуре $T = 4.2$ К.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены спектральные зависимости интенсивности двухчастотной генерации (I_{LG}) в шкале энергий фотонов $h\nu$ при разных величинах тока накачки I . Наблюдалось пороговое включение лазерной генерации длинноволновой линии при протекании постоянного тока, превышающего ~ 220 мА. При дальнейшем увеличении тока также начинала проявляться коротковолновая линия, амплитуда которой линейно нарастала с увеличением тока, и при токе $I = 414$ мА интенсивность коротковолновой линии становится равной интенсивности длинноволновой линии. На основании данных экспери-

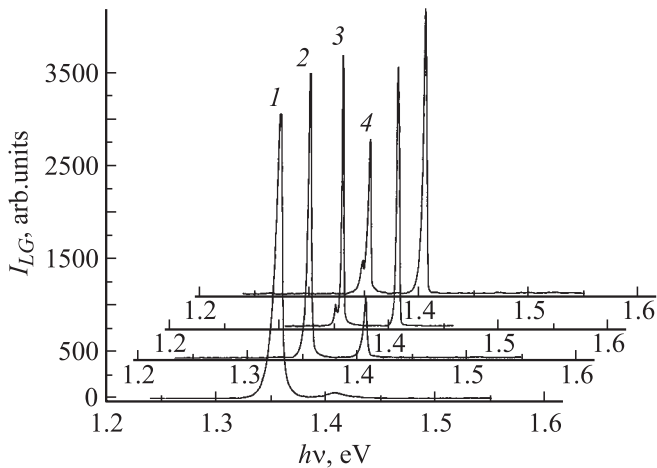


Рис. 1. Спектры двухчастотной генерации лазерного диода при токах накачки I , мА: 1 — 150, 2 — 251, 3 — 414, 4 — 483. $T = 77$ К.

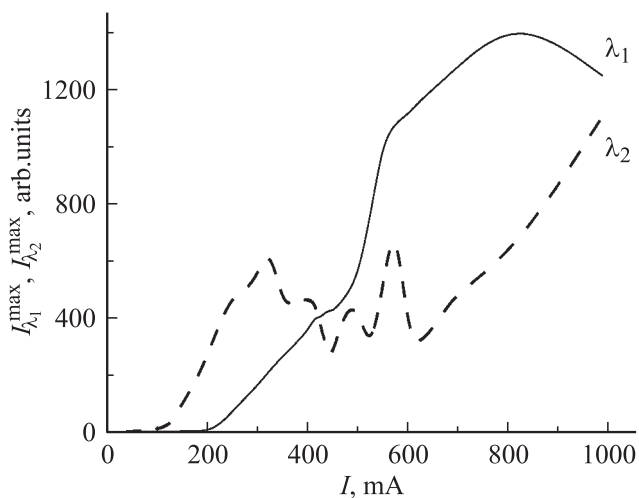


Рис. 2. Зависимость интенсивности пиков генерации от величины тока накачки: $I_{\lambda_1}^{\max}$ — коротковолновый пик, $I_{\lambda_2}^{\max}$ — длинноволновый пик. $T = 77$ К.

мента, приведенных на рис. 1, были построены зависимости интенсивности пиков $I_{\lambda_1}^{\max}$, $I_{\lambda_2}^{\max}$ полос с длинами волн λ_1 и λ_2 от величины тока накачки для двухчастотной генерации (рис. 2). Из рисунка хорошо видна немотонная зависимость интенсивности длинноволнового пика в интервале токов 300–600 мА. Вероятно, падение интенсивности с ростом тока обусловлено тем, что фотоны, излучаемые коротковолновой ямой, стимулируют рекомбинацию тех электронов в длинноволновой КЯ, энергия которых соответствует энергии переходов из основного состояния электронов в коротковолновой КЯ. Тем самым уменьшается населенность основного состояния электронов в длинноволновой КЯ и возможно уменьшение интенсивности излучения длинноволнового пика с ростом тока.

Для анализа модового состава излучения были изменены диаграммы направленности. Наблюдались два типа диаграмм направленности в разных лазерных чипах, которые приведены на рис. 3. Отметим, что диаграммы направленности были одинаковыми для обеих полос излучения. Диаграмма направленности, изображаемая кривой 1, соответствует генерации основной ТЕ-моды волновода (имеется в виду поперечная мода). Необычная диаграмма направленности, изображаемая кривой 2, может соответствовать одновременной генерации нескольких поперечных мод.

На рис. 4 приведены спектры двух видов двухчастотной генерации лазеров, измеренные при комнатной температуре в импульсном режиме токовой накачки. Из рисунка видно, что энергии фотонов в разных полосах различаются примерно на 50 мэВ (кривая 1) и 15 мэВ (кривая 2), что соответствует среднему и дальнему ИК диапазонам. Отметим, что двухполосная генерация наблюдалась при комнатной температуре и в непрерывном режиме.

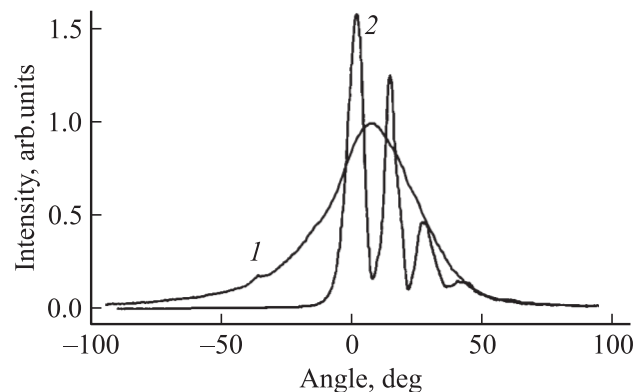


Рис. 3. Наблюдаемые диаграммы направленности излучения в плоскости, перпендикулярной слою квантовой ямы: 1 — генерация основной моды волновода, 2 — генерация нескольких поперечных мод волновода.

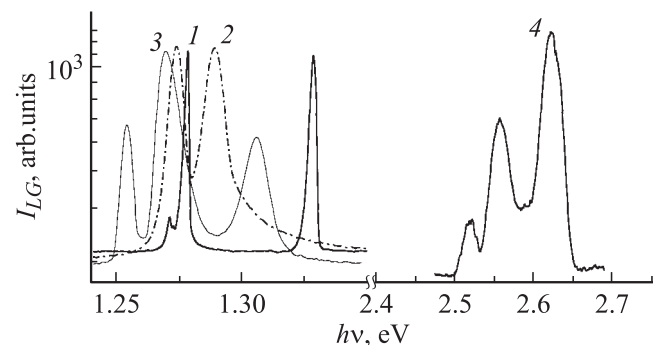


Рис. 4. Спектры двухчастотной (1, 2) и трехчастотной (3) генерации лазеров, содержащих в активной области три квантовые ямы. 4 — спектр вторых гармоник для трехчастотной генерации. $T = 300$ К.

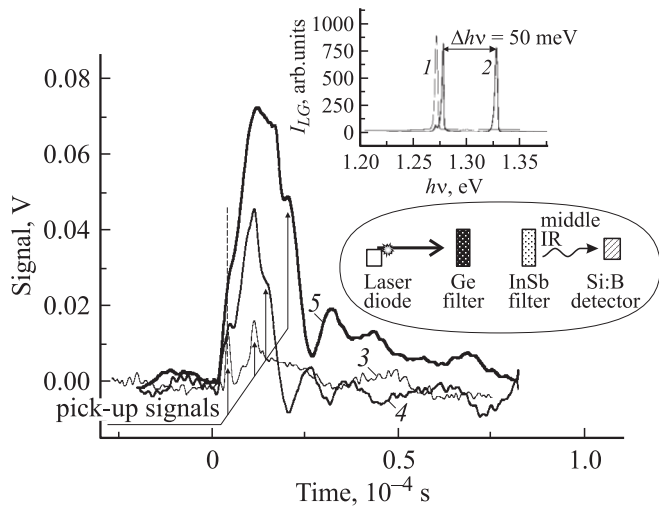


Рис. 5. Осциллограммы сигналов в среднем ИК диапазоне в случае двухчастотной (4, 5 соответствуют спектру 2 на верхней вставке) и одночастотной (3 соответствует спектру 1 на верхней вставке) лазерной генерации при импульсной накачке. Длительность импульса τ , мкс: 3 — 7, 4 — 9, 5 — 15. Верхняя вставка — основные моды одночастотной (1) и двухчастотной (2) лазерной генерации. Нижняя вставка — схема эксперимента; ближнее ИК излучение исключалось фильтрами Ge и InSb.

Как уже было отмечено, для экспериментов выращивались структуры с тремя квантовыми ямами, две из которых с меньшим содержанием In, расположенные симметрично относительно центральной КЯ, были одинаковыми. Это делалось для того, чтобы уменьшить пороговый ток коротковолновой генерации. Однако на некоторых лазерных структурах с тремя квантовыми ямами в активной области наблюдалась трехчастотная генерация в среднем ИК диапазоне, очевидно, связанная с различным составом всех трех ям (рис. 4, кривая 3). На рис. 4 также приведен спектр генерации вторых гармоник для трехчастотной генерации (кривая 4), что лишним раз доказывает ярко выраженную нелинейность в GaAs.

На рис. 5 представлены осциллограммы сигналов в случае двухчастотной (кривые 4, 5) и одночастотной (кривая 3) лазерной генерации, зарегистрированные широкополосным Si:B-приемником (полоса чувствительности от ~ 10 до 30 мкм). Ближнее ИК излучение основных мод лазерной генерации (верхняя вставка) отсекалось фильтрами Ge и InSb (см. нижнюю вставку). Измерения проводились при импульсной токовой накачке ($I \approx 3$ А) с длительностью импульсов $\tau = 7-15$ мкс при $T = 4.2$ К. Из рисунка видно, что в случае одночастотной генерации (кривая 3) какой-либо сигнал отсутствует, а хорошо заметны лишь наводки на фронтах импульса; в случае двухчастотной генерации (кривые 4, 5) появляется сигнал, амплитуда которого растет при увеличении длительности импульса. Зависимость амплитуды сигнала от длительности импульса связана

с инерционностью детектора Si:B. Характерное время установления сигнала на детекторе, определенное из RC-связи измерительной схемы, составляет ~ 10 мкс и сравнимо с длительностью импульса.

4. Заключение

В работе продемонстрирована одновременная генерация стимулированного излучения в двух и трех частотных полосах в полупроводниковых лазерах с квантовыми ямами; показано, что могут возникать как основные, так и возбужденные поперечные ТЕ-моды волновода; экспериментально исследована зависимость мощности генерации в различных частотных полосах от величины тока накачки; в лазерных структурах с различными по составу тремя квантовыми ямами в активной области обнаружены два типа двухчастотной генерации с разностью между полосами излучения 15 и 50 мЭВ, что соответствует дальнему и среднему ИК диапазону. В случае двухчастотной генерации с разностью между полосами излучения 50 мЭВ обнаружен сигнал в среднем ИК диапазоне, который может быть связан с генерацией разностной гармоники.

Работа проводилась при финансовой поддержке совместной программы Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF) и Министерства образования РФ „Фундаментальное исследование и высшее образование“ (BRHE) (REC-NN-001), грантов РФФИ-БРФФИ (№ 02-02-81036), РФФИ (№ 04-02-17432), МНТЦ (№ 2293), NATO (SfP-973799 Semiconductors), РАН и Министерства промышленности, науки и технологий РФ.

Список литературы

- [1] F. Capasso, A. Tredicucci, C. Gmachl et al. IEEE J. Select. Topics. Quant. Electron., **5** (3), 792 (1999).
- [2] M. Rochat, L. Ajili, H. Willenberg, J. Faist. Appl. Phys. Lett., **81** (8), 1381 (2002).
- [3] A. Andronov, E. Gornik. Optical and Quant. Electron., **23**, 2 (1991).
- [4] И.В. Алтухов, М.С. Каган, К.А. Королев, В.П. Синис, Ф.А. Смирнов. ЖЭТФ, **74**, 404 (1992).
- [5] А.А. Belyanin, F. Capasso, V.V. Kocharovskiy et. al. Phys. Rev. A, **63**, 53 803 (2001).
- [6] В.Я. Алешкин, А.А. Афоненко, Н.Б. Звонков. ФТП, **35**, 1256 (2001).

Редактор Л.В. Шаронова

Experimental observation of emission in the mid IR in semiconductor lasers generating two frequency lines in the near IR range

V.Ya. Aleshkin, V.I. Gavrilenko, S.V. Morozov, K.V. Maremjanin, B.N. Zvonkov, S.M. Nekorkin**

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

* Research Physical Technical Institute
of N.I. Lobachevsky Nizhniy Novgorod State University,
603950 Nizhniy Novgorod, Russia

Abstract Simultaneous generation of several frequency lines of the stimulated emission in a semiconductor laser with three quantum InGaP/InGaAs/GaAs wells has been observed experimentally. It is shown that different frequencies can be generated in both fundamental and excited transverse modes of the waveguide. It is found, that the simultaneous generation of stimulated emission in two and three frequency lines is possible. Dependences of the generation power in different lines on current are investigated. In two-frequency semiconductor lasers with a spectral difference between emission lines of 50 meV, a mid IR radiation has been detected, the radiation being attributed to the parametric generation of the difference harmonic.