

УДК 621.382

СМЕШЕНИЕ ЧАСТОТ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ЛАЗЕРЕ С ДВУМЯ РАЗЛИЧНЫМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ И ОДНИМ p - n -ПЕРЕХОДОМ

© 2009 г. С.М. Некоркин¹, А.А. Бирюков¹, Б.Н. Звонков¹, М.Н. Колесников¹,
В.Я. Алешкин², А.А. Дубинов², Вл.В. Кочаровский³

¹ Научно-исследовательский физико-технический институт
ННГУ им. Н.И. Лобачевского

² Институт физики микроструктур Российской академии наук, г. Нижний Новгород

³ Институт прикладной физики Российской академии наук, г. Нижний Новгород

nekorkin@nifti.unn.ru

Поступила в редакцию 19.03.2009

Сконструирован, создан и исследован полупроводниковый лазерный диод с широкозонным слоем в волноводе, содержащий две различные несимметрично расположенные квантовые ямы и генерирующий одновременно TE_0 и TE_1 моды с длинами волн 1.05 мкм и 0.9 мкм соответственно в широком диапазоне токов накачки при температуре жидкого азота. Проведены наблюдения излучения суммарной частоты, демонстрирующие возможность внутрирезонаторного нелинейного смешения мод разного порядка в разработанном двухчастотном диодном лазере.

Ключевые слова: полупроводниковый лазер, двухчастотная генерация, внутрирезонаторное смешение мод, излучение суммарной частоты.

Введение

Как известно (см., например, [1–3]), компактные маломощные источники излучения среднего и дальнего ИК-диапазонов могут быть созданы на основе диодных гетеролазеров, обеспечивающих внутрирезонаторную генерацию излучения разностной частоты за счет нелинейного смешения двух близких по частоте лазерных мод. Недавно были получены первые экспериментальные результаты [4, 5], подтверждающие техническую осуществимость этого подхода. В его простейших реализациях, однако, для соблюдения условия фазового синхронизма участвующих во взаимодействии мод необходимо, чтобы лазерная мода с большей частотой имела более высокий поперечный индекс, чем лазерная мода с меньшей частотой. Для выполнения этого условия в [4, 5] была использована двухчиповая конструкция лазера, в которой излучение моды TE_0 генерировалось в одном чипе и вводилось в другой чип, генерирующий TE_1 -моду и обеспечивающий смешение указанных мод. Подобная конструкция требует очень точного совмещения волноводов двух чипов, что является непростой задачей. Отметим, что ранее в нашей группе были созданы каскадные межзонные лазеры с туннельным p - n -переходом и двумя квантовыми ямами в едином волноводе [6], которые генерировали

одновременно две различные поперечные моды. Однако в таких лазерных диодах из-за неустойчивости тиристорного типа удалось добиться лазерной генерации только при импульсной накачке. Что касается двухчастотной генерации диодных лазеров на двух близких по частоте основных модах, то она невозможна в сколько-нибудь широкой области токов накачки из-за сильного поглощения высокочастотной моды в квантовой яме, призванной генерировать низкочастотную моду (см. [2, 3] и указанную там литературу).

В настоящей работе представлены результаты создания и исследования одночипового лазера с двумя различными квантовыми ямами и одним p - n -переходом, предназначенного для одновременной генерации различающихся по частоте TE_0 и TE_1 мод на основе гетероструктуры GaAs (волноводный слой и контакты)/InGaAs (квантовые ямы)/InGaP (ограничивающие слои). Удалось получить генерацию TE_0 и TE_1 мод в непрерывном режиме при температуре 77 К в широком диапазоне значений тока накачки и продемонстрировать их нелинейное смешение путем наблюдения излучения суммарной частоты.

Особенности конструкции волновода лазера

Казалось бы, для одновременной генерации двух мод TE_0 и TE_1 с разными частотами в полупроводниковом лазерном диоде можно ис-

пользовать волновод традиционной конструкции. Для этого следовало бы поместить квантовую яму, генерирующую TE_0 -моду (частота которой меньше), в центре волноводного слоя, где находится узел TE_1 -моды (частота которой больше), чтобы избежать сильного поглощения этой моды в квантовой яме, генерирующей TE_0 -моду. Квантовую яму для генерации TE_1 -моды следовало бы расположить в пучности этой моды.

Однако, как показывают расчеты [7], такая конструкция оказывается неэффективной, поскольку из-за малой дискриминации мод вторая квантовая яма, предназначенная для генерации TE_1 -моды, будет генерировать и TE_0 -моду с той же, более высокой частотой. Для того чтобы преодолеть эту трудность, мы ввели дополнительный тонкий слой InGaP в волноводный слой GaAs (см. табл.), аналогично тому как это было

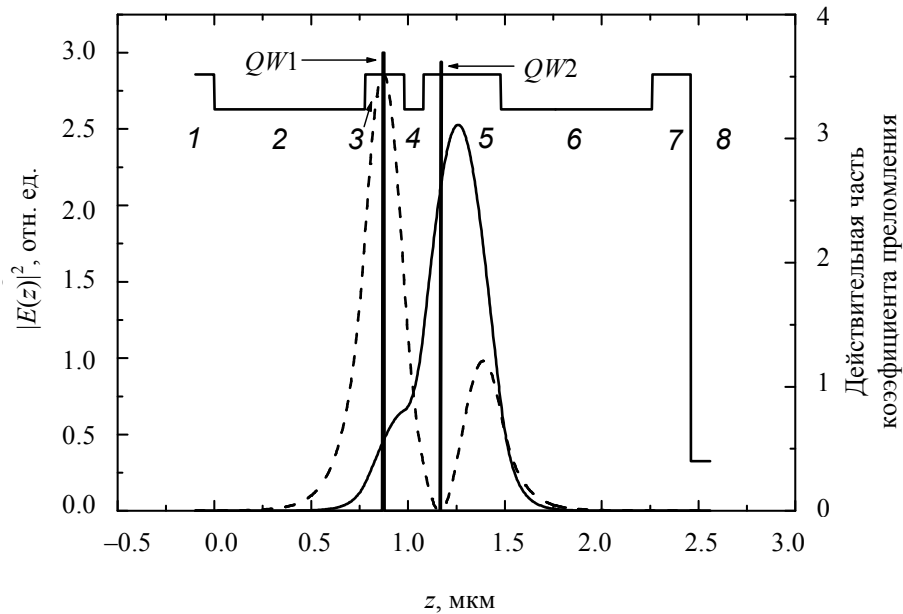


Рис. 1. Зависимости действительной части коэффициента преломления (верхняя линия) и квадратов электрических полей в модах TE_0 (сплошная кривая) и TE_1 (штриховая кривая) от координаты (в направлении поперек p - n -перехода лазера). Стрелками показано положение коротковолновой ($QW1$) и длинноволновой ($QW2$) квантовых ям в структуре. Слой структуры: 1, 3, 5, 7 – GaAs, 2, 4, 6 – InGaP, 8 – Au

Таблица

Параметры слоев гетеролазера с одним p - n -переходом и двумя квантовыми ямами в волноводе

Номер слоя	Состав слоя	Тип проводимости	Концентрация носителей, см ⁻³	Толщина слоя, нм
1	GaAs (подложка)	n	$5 \cdot 10^{17}$	~160 мкм
2	InGaP	n	10^{18}	750
3	GaAs	нелегированный	-	80
4	$\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$ (QW1)	нелегированный	-	9
5	GaAs	нелегированный	-	95
6	InGaP	p	$5 \cdot 10^{17}$	90
7	GaAs	нелегированный	-	80
8	$\text{In}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}$ (QW2)	нелегированный	-	9
9	GaAs	p	$5 \cdot 10^{17}$	235
10	InGaP	p	10^{18}	750
11	контактный слой	p	10^{19}	350

сделано в одночастотном лазере, генерирующем TE_1 -моду [7]. Этот слой значительно изменяет структуру поля обеих мод и позволяет добиться устойчивой генерации TE_1 -моды без примеси TE_0 -моды той же частоты в широком диапазоне токов накачки. Как видно из рис. 1, квантовые ямы для генерации TE_1 и TE_0 мод расположены асимметрично, вблизи соответствующих пучностей электрического поля этих мод.

Следует отметить, что предложенная конструкция весьма чувствительна к местоположению квантовой ямы, генерирующей TE_0 -моду. Дело в том, что эта длинноволновая квантовая яма очень эффективно поглощает излучение коротковолновой TE_1 -моды, и поэтому разнесение местоположений узла последней и указанной квантовой ямы из-за технологической ошибки даже в десять нанометров приводит к

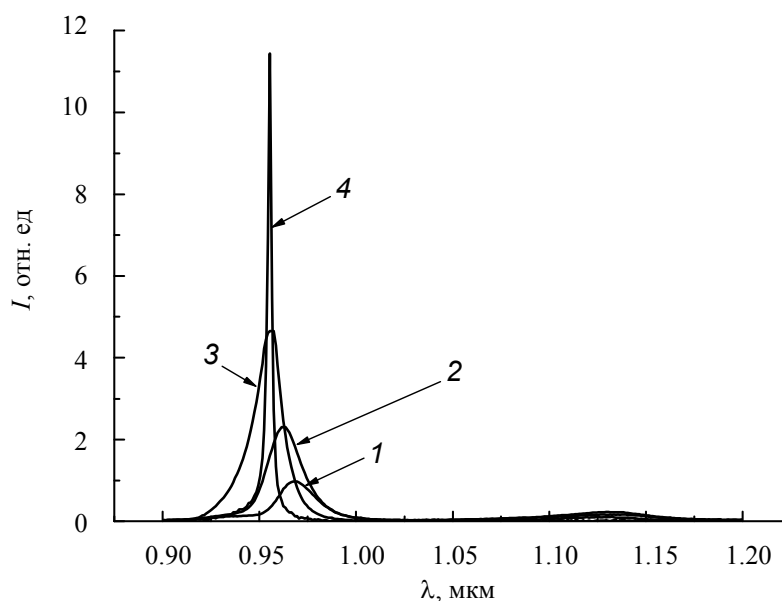


Рис. 2. Спектральные характеристики лазера, измеренные при комнатной температуре и непрерывной накачке с силой тока: 1 – 0.5 А, 2 – 0.9 А, 3 – 1.6 А, 4 – 2 А

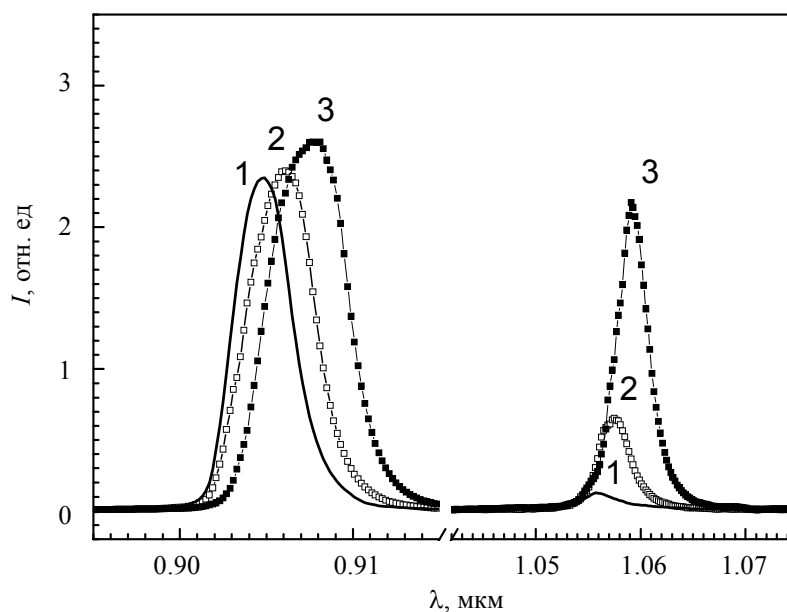


Рис. 3. Спектральные характеристики лазера, измеренные при температуре жидкого азота и непрерывной накачке с силой тока: 1 – 1 А, 2 – 2 А, 3 – 3 А

росту коэффициента поглощения TE_1 -моды на десятки обратных сантиметров и может помешать двухчастотной генерации.

Характеристики лазеров при комнатной и азотной температурах

Лазерная структура была выращена методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении. Параметры слоев приведены в таблице. Лазерные диоды с шириной активной области 100 мкм были изготовлены путем химического травления контактного слоя вне активной полоски с последующей протонной имплантацией вскрытой поверхности InGaP. После нанесения контактов и раскалывания подготовленного образца получающиеся чипы длиной около 1 мм напаивались на медные теплоотводы структурой вниз для работы лазеров в непрерывном режиме генерации.

На рис. 2 приведены спектральные характеристики, измеренные при непрерывном токе накачки при комнатной температуре. Из рисунка видно, что при токах меньше 2 А имеется электролюминесценция в двух спектральных областях с длинами волн около 0.95 мкм и 1.125 мкм. При токе около 2 А наблюдается резкий рост интенсивности и обужение коротковолновой линии, что свидетельствует о возникновении стимулированного излучения на длине волны 0.95 мкм. Стимулированное излучение на длине волны 1.25 мкм при комнатной температуре не наблюдалось.

При азотной температуре в непрерывном режиме наблюдалась не только одночастотная генерация коротковолновой моды при токе 1–2 А, но и одновременная генерация стимулированного излучения на двух длинах волн $\lambda = 0.9$ мкм и $\lambda = 1.05$ мкм в широком интервале токов 2–5 А. Измеренные спектры при 77 К приведены на рис. 3. Типичная эффективная температура лазерной генерации составляла 50 К. Увеличение тока накачки приводило к увеличению интенсивности генерации как коротковолновой линии (при токах 1–5 А), так и длинноволновой линии (при токах 2–5 А), причем при токах 3–5 А мощности излучения в обеих линиях были одного порядка (0.1–0.5 Вт каждая). Дифференциальная эффективность генерации для различных образцов лежала в пределах от 5% до 15%. При токе накачки выше 5 А лазеры быстро, за несколько минут, деградировали.

Учитывая, что для возникновения генерации необходимо, чтобы усиление в лазере превышало потери, отметим, что наиболее важными из потерь в полупроводниковых лазерах данного

типа являются потери из-за поглощения свободными дырками. Внесение в волновод дополнительного тонкого слоя InGaP, обладающего существенно большей шириной запрещенной зоны по сравнению с GaAs, приводит к необходимости сильного легирования широкой части волновода и тонкого слоя InGaP для протекания тока через p - n -переход. Это создает дополнительные потери для основной моды. В рамках настоящей работы была предпринята попытка оптимизировать разрабатываемую структуру. В частности, была уменьшена область легирования в окрестности длинноволновой квантовой ямы, что привело к существенному снижению порога генерации длинноволновой ямы. Другие результаты оптимизации такой структуры будут изложены в дальнейших публикациях.

Диаграммы направленности и излучение суммарной частоты

Для того чтобы установить модовый состав лазерной генерации, были исследованы диаграммы направленности излучения в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу. На рис. 4 представлены измеренные при $T = 77$ К и рассчитанные диаграммы направленности. Диаграмма направленности излучения с длиной волны $\lambda = 1.05$ мкм имеет один максимум, характерный для TE_0 -моды, причем рассчитанная диаграмма несколько уже наблюдаемой. Измеренная диаграмма направленности излучения на длине волны 0.9 мкм имеет характерный для TE_1 -моды двухгорбый профиль. Отметим, что различия рассчитанных и измеренных диаграмм направленности могут быть обусловлены несовершенством сколов граней чипа, которые играют роль зеркал.

Для выявления нелинейного внутррезонаторного взаимодействия полей в двух частотных полосах были проведены наблюдения генерации излучения вторых и суммарной частот. Смещение частот в резонаторе лазера происходит благодаря квадратичной нелинейности решетки полупроводника GaAs [1–3, 8]. Результаты наблюдений приведены на рис. 5. На спектрограмме присутствуют вторые гармоники для длинноволнового излучения, представленного TE_0 -модой, и для коротковолнового излучения, представленного TE_1 -модой. Наблюдается также спектральный пик с максимумом на суммарной частоте этих мод. Наблюдение излучения суммарной частоты является прямым свидетельством смещения двух мод разного порядка внутри резонатора данного лазера с одним p - n -переходом и доказывает одновременность

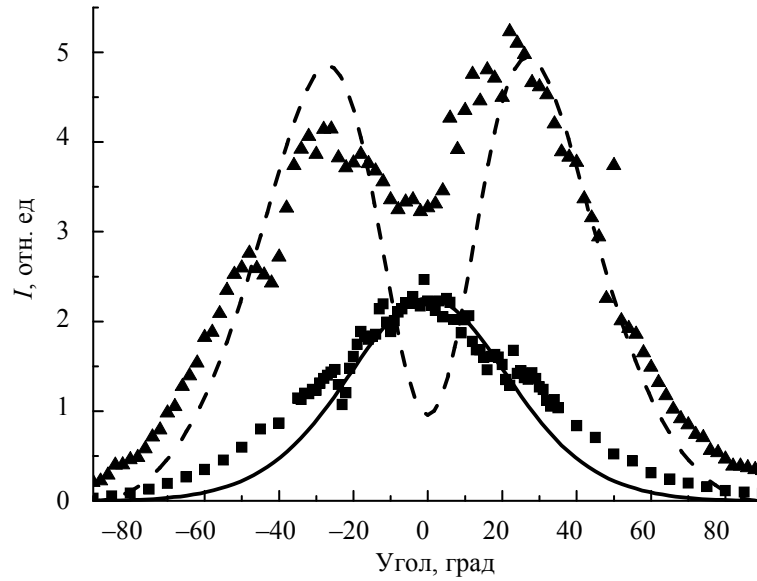


Рис. 4. Рассчитанные (сплошная кривая для TE_0 -моды, штриховая кривая для TE_1 -моды) и измеренные (квадраты для $\lambda = 1.05$ мкм, треугольники для $\lambda = 0.9$ мкм) диаграммы направленности интенсивности излучения в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу лазера

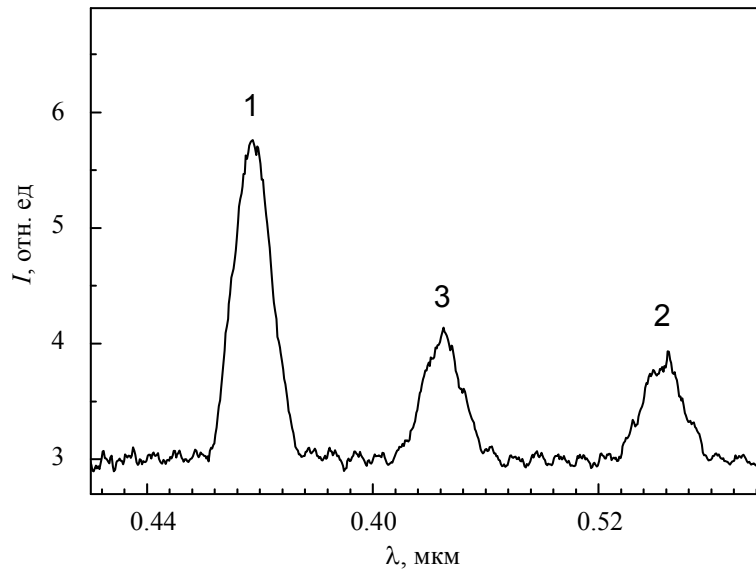


Рис. 5. Спектр генерации излучения вторых гармоник и суммарной частоты при температуре жидкого азота и постоянном токе накачки 2 А: 1, 2 – вторые гармоники для TE_1 - и TE_0 -мод соответственно; 3 – суммарная частота

генерации полей, отвечающих двум спектральным максимумам.

Заключение

Таким образом, из приведенных экспериментальных результатов следует, что разработанный лазер в непрерывном режиме в широком диапазоне токов накачки (2–5 А) одновременно генерирует две моды: TE_0 -моду с длиной

волны 1.05 мкм и TE_1 -моду с длиной волны 0.9 мкм (при температуре 77 К). При комнатной температуре наблюдалась генерация только TE_1 -моды с длиной волны 0.95 мкм. Присутствие излучения суммарной частоты указывает на возможность генерации излучения разностной частоты в одночиповой конструкции полупроводникового лазера с одним p - n -переходом за счет нелинейного смещения мод с различными поперечными индексами. Ожидаемая мощность

подобной генерации существенно зависит от выполнения условий фазового синхронизма взаимодействующих мод, особенностей вывода и поглощения излучения разностной частоты и других факторов, экспериментальное изучение которых планируется в дальнейшем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 07-02-12177-офи, 08-02-97034-р_поволжье_а, 07-02-00486), программы РАН «Современные проблемы радиофизики», программы фундаментальных исследований ОФН РАН «Физические и технологические исследования полупроводниковых лазеров, направленные на достижение предельных параметров», Президента РФ (грант МК-3344.2007.2), госконтракта Минобрнауки № 02.518.11.7031.

1. Алешкин В.Я., Афоненко А.А., Звонков Н.Б. // ФТП. 2001. Т. 35. С. 1256.
2. Белянин А.А., Демпе Д., Кочаровский В.В. и др. // Усп. физ. наук. 2003. Т. 173. С. 1015.
3. Andrianov A.V., Kukushkin V.A., Kocharovskiy V.I. et al. // Proc. SPIE. 2007. V. 6729. P. 672908.
4. Zvonkov B.N., Biryukov A.A., Ershov A.V. et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 021122.
5. Звонков Б.Н., Бирюков А.А., Некоркин С.М. и др. // ФТП. 2009. Т. 43. С. 220.
6. Nekorkin S.M., Biryukov A.A., Demina P.B. et al. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 171106.
7. Бирюков А.А., Звонков Б.Н., Некоркин С.М. и др. // ФТП. 2008. Т. 42. С. 361.

FREQUENCY MIXING IN A SEMICONDUCTOR LASER WITH TWO DIFFERENT QUANTUM WELLS AND A *p-n* JUNCTION

S.M. Nekorkin, A.A. Biryukov, B.N. Zvonkov, M.N. Kolesnikov, V.Ya. Aleshkin, A.A. Dubinov, V.I. Kocharovskiy

A semiconductor laser diode with a wide bandgap layer and two different asymmetrically located quantum wells in a waveguide has been designed, fabricated, and investigated. The laser diode generates simultaneously TE₀ and TE₁ modes at wavelengths 1.05 μm and 0.9 μm, respectively, in a broad range of pumping currents at liquid nitrogen temperature. Observations of the sum frequency radiation have demonstrated a possibility of an intracavity nonlinear different order mode mixing in the developed dual-wavelength diode laser.

Keywords: semiconductor laser, dual-wavelength generation, intracavity mode mixing, sum frequency radiation.