

Многочастотный межзонный двухкаскадный лазер

© А.А. Бирюков, Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин, П.Б. Демина, Н.Н. Семенов,
В.Я. Алешкин*, В.И. Гавриленко*, А.А. Дубинов*[¶], К.В. Маремьянин*,
С.В. Морозов*, А.А. Белянин⁺, В.В. Кочаровский^{+•}, Вл.В. Кочаровский[•]

Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета,
603950 Нижний Новгород, Россия

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

⁺ Department of Physics, Texas A&M University, USA

[•] Институт прикладной физики Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 18 января 2007 г. Принята к печати 25 января 2007 г.)

Получена и исследована многочастотная генерация в новом классе инжекционных гетеролазеров — межзонном двухкаскадном лазере с туннельным $p-n$ -переходом, разделяющим две активные области квантовых ям, расположенные в одном и том же волноводе. Созданная конструкция лазера с импульсной накачкой обеспечила одновременную генерацию двух мод 1-го порядка с длинами волн 1.063 и 0.98 мкм и двух мод 3-го порядка с длинами волн 0.951 и 0.894 мкм. Благодаря нелинейному смещению мод внутри лазерного резонатора наблюдалась генерация вторых гармоник и суммарных частот.

PACS: 42.55.Px, 42.65.An, 42.70.Nq, 78.67.De

1. Введение

В последние годы возник значительный интерес к исследованию лазерных диодов, обеспечивающих многочастотную генерацию. Среди их различных применений можно указать двухполосную спектроскопию, ускоренную обработку информации, генерацию разностной частоты в среднем и дальнем инфракрасных диапазонах длин волн и др. (см., например, [1] и указанную там литературу).

Лазерный диод с одновременной генерацией излучения нескольких частот основан на использовании квантовых ям (КЯ) с различающимися энергиями основных межзонных переходов. К сожалению, генерация в нем часто оказывается неустойчивой из-за неконтролируемой конкуренции квантовых ям за носители заряда. Решить эту проблему и обеспечить внутрирезонаторное нелинейное смещение мод позволяют схемы отдельной накачки квантовых ям, находящихся в общем резонаторе.

Перспективным вариантом такой схемы является межзонный двухкаскадный лазер с узким сильно легированным туннельным переходом [1–3]. Он разделяет соседние области различных квантовых ям, размещенных в одном и том же лазерном волноводе. В результате каждый электрон (дырка), поставляемый инжекционной накачкой, дважды проходит через запрещенную зону полупроводника, испуская соответственно длинноволновые и коротковолновые фотоны в квантовых ямах сначала одной, а потом другой активной области. При этом возможна генерация носителей как с основного, так и с возбужденного состояний в квантовой яме. Отметим, что межзонные двухкаскадные лазеры с отдельными оптическими резонаторами для каждого каскада, генерирующие одну частоту, исследовались ранее [4–10].

Такие лазеры генерировали основную моду волновода. В лазере с общим резонатором генерация основной моды для нескольких частот затруднительна из-за больших потерь коротковолнового излучения в наиболее глубокой квантовой яме.

В оптимальном варианте двухкаскадного лазера с единым резонатором длинноволновую (наиболее глубокую) квантовую яму (или ямы) необходимо располагать вблизи узла поля коротковолновой моды и максимума поля длинноволновой моды, а коротковолновую (наименее глубокую) квантовую яму — вблизи максимума поля этой моды. Тогда при достаточно мощной накачке коротковолновое излучение будет не слишком сильно поглощаться в длинноволновой квантовой яме, и лазер сможет генерировать несколько частот. Это условие играет определяющую роль для генерации коротковолновой моды, так как при неоптимальном расположении длинноволновой квантовой ямы поглощение коротковолновой моды может на 1–2 порядка превышать поглощение при ее оптимальном расположении, обусловленное сильно легированным туннельным переходом. Расположение туннельного перехода является определяющим для потерь длинноволновой моды. Поэтому туннельный переход желательно располагать вблизи узлов обоих генерируемых мод.

Данная работа посвящена созданию и исследованию подобного многочастотного межзонного двухкаскадного гетеролазера InGaP/GaAs/InGaAs, содержащего в общем волноводном слое две области квантовых ям, соединенные узким (менее 0.1 мкм) туннельным $p-n$ -переходом. Поставленной целью, которую удалось реализовать, являлось получение многочастотной генерации на модах разного порядка в предложенном лазере с туннельным переходом при импульсной накачке и наблюдение нелинейного смещения этих мод за счет квадратичной нелинейности параметров решетки GaAs.

[¶] E-mail: sanya@ipm.sci-nnov.ru

2. Конструкция лазера

Структуры для изготовления лазеров были выращены в НИФТИ ННГУ методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении на подложке из n -GaAs с концентрацией доноров 10^{18} см^{-3} . Последовательность слоев в структуре межзонного двухкаскадного лазера показана в таблице. Структуры состояли из двух p - n -переходов, разделенных тонким туннельным p - n -переходом (толщины высоколегированных n - и p -областей составляли 55 и 40 нм соответственно). Лазерный волновод был сформирован слоем n -InGaP толщиной 0.78 мкм в области нижнего p - n -перехода и слоем p -InGaP той же толщины в области верхнего p - n -перехода. Коротковолновая квантовая яма в области верхнего p - n -перехода и длинноволновая квантовая яма в области нижнего p - n -перехода имели одинаковую толщину 10 нм, но различались процентным содержанием индия (14.5 и 28% соответственно). Общая толщина активной области, включая туннельный переход, составляла 1.5 мкм. Для формирования активной области в плоскости p - n -перехода структура была имплантирована ионами водорода с энергиями 80 кэВ, за исключением полос шириной 100 мкм, через которые и протекал ток, обеспечивающий лазерную генерацию. Зеркалами служили сколотые грани структуры. Типичная длина резонаторов лазеров составляла 1 мм.

Конструкция волновода и положение квантовых ям были рассчитаны таким образом, чтобы генерировать моду 3-го порядка на частоте, соответствующей переходу между основными состояниями электронов и дырок в коротковолновой квантовой яме, и моду 1-го порядка на частоте, соответствующей переходу между основными состояниями электронов и дырок в длинноволновой квантовой яме. На рис. 1 показана зависимость показателя преломления от координаты z (вдоль направления роста структуры) и рассчитанные квадраты электрического поля мод TE_1 и TE_3 . Стрелками показано положение квантовых ям. Начало координат выбрано на ближайшей к подложке гетерогранице GaAs/InGaP. В расчете был

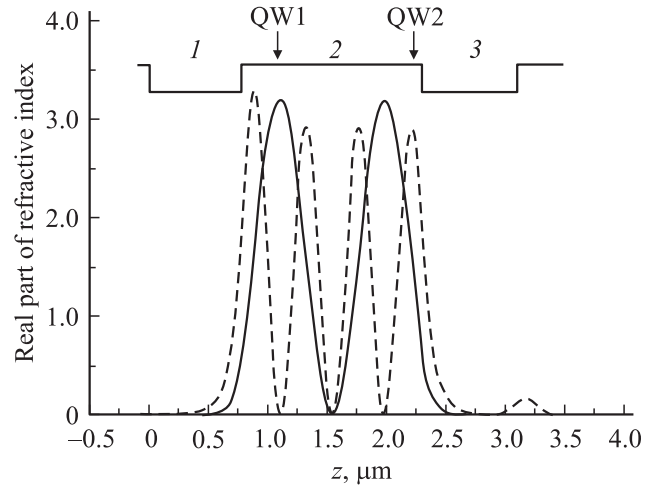


Рис. 1. Зависимости от координаты z (в направлении поперек p - n -перехода) действительной части коэффициента преломления (верхняя линия) и квадратов электрических полей в модах TE_1 (сплошная кривая) и TE_3 (штриховая кривая). Стрелками показано положение длинноволновой (QW1) и коротковолновой (QW2) квантовых ям в структуре. Слои структуры: 1, 3 — InGaP, 2 — GaAs.

принят во внимание контактный слой Au, закрывающий структуру сверху.

3. Результаты измерений

Исследование полученных лазерных диодов включало измерения вольт-амперных и спектральных характеристик, а также диаграмм направленности излучения при накачке импульсами тока (длительностью 350 нс) от нескольких ампер до нескольких десятков ампер с частотой повторения 1.6 кГц при комнатной температуре.

На рис. 2 приведены спектры излучения лазера с длиной резонатора 1 мм при двух значениях тока накачки. Из рисунка видно, что в спектре присутствуют 4 линии. Две из них ($\lambda_1 = 0.951 \text{ мкм}$, $\lambda_2 = 1.063 \text{ мкм}$) соответствуют переходам между первыми электронными и дырочными подзонами в квантовых ямах, расположенных в различных p - n -переходах. Две другие линии ($\lambda_3 = 0.894 \text{ мкм}$, $\lambda_4 = 0.98 \text{ мкм}$) соответствуют переходам между вторыми электронными и дырочными уровнями. Каждая линия имеет свой пороговый ток возникновения. Для $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ это соответственно 25, 10, 30, 15 А. С увеличением тока интенсивность всех линий растет, но, начиная с некоторых значений тока, интенсивность излучения на длине волны λ_2 насыщается. Изменение длины резонатора в пределах 0.4–1.5 мкм позволяло изменять относительные интенсивности линий генерации и величину пороговых токов. Например, при длине резонатора 1.5 мм превалировала линия λ_2 , а при длине 0.4 мм — линия λ_1 .

Параметры слоев структуры № 4949-1(2)

n^+ -GaAs	Буферный слой + подложка
n^+ -InGaP	780 нм
i -GaAs	300 нм
i -In _{0.28} Ga _{0.72} As	Длинноволновая КЯ (QW1), 10 нм
i -GaAs	115 нм
p^+ -GaAs	300 нм
p^{++} -GaAs	40 нм
n^{++} -GaAs	55 нм
n^+ -GaAs	300 нм
i -GaAs	300 нм
i -In _{0.145} Ga _{0.855} As	Коротковолновая КЯ (QW2), 10 нм
i -GaAs	90 нм
p^+ -InGaP	780 нм
p^{++} -GaAs	300 нм
Au	Контакт

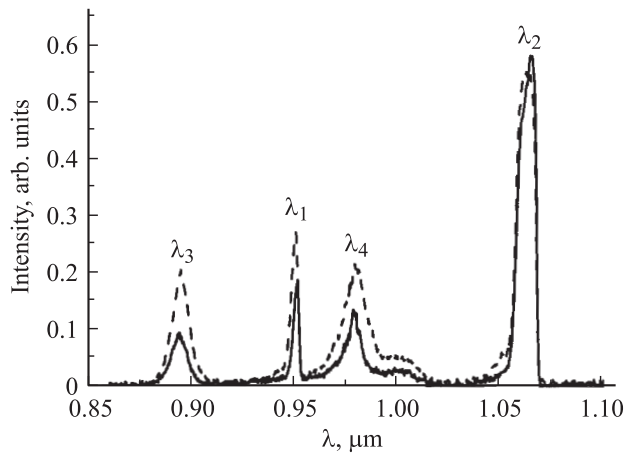


Рис. 2. Спектр лазерной генерации для двух значений амплитуды импульса тока: 45 А (сплошная кривая) и 60 А (штриховая кривая).

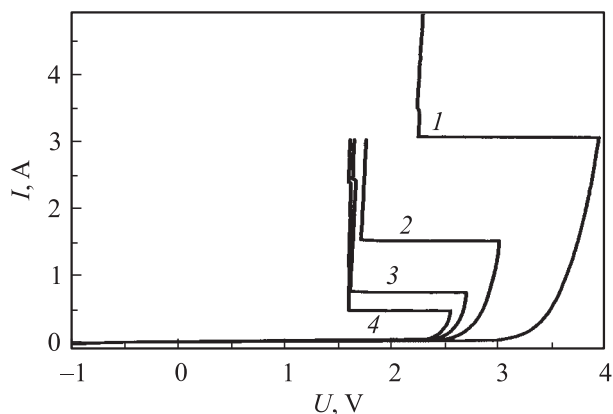


Рис. 3. Типичные вольт-амперные характеристики исследованного межзонного двухкаскадного лазера с туннельным переходом при постоянной накачке и различных температурах T , К: 1 — 77, 2 — 233, 3 — 273, 4 — 303.

Вольт-амперные характеристики лазеров показаны на рис. 3. Измерения проводились в режиме постоянного тока. При напряжении, отвечающем удвоенному значению энергии запрещенной зоны GaAs, возникает переключение тока и наблюдается участок отрицательной дифференциальной проводимости S -типа, аналогичный существующему в тиристорах. Он свидетельствует об инжекции неосновных носителей в туннельный переход, которая резко уменьшает падение напряжения на нем и интенсивность наблюдаемого излучения при постоянном токе накачки. При использовании возбуждения импульсами тока неустойчивость не проявляется. Причина этого, вероятно, состоит в том, что в течение импульса не успевают перезарядиться емкости p - n -переходов, отвечающие за развитие неустойчивости.

На рис. 4 представлены осциллограммы импульсов излучения для трех длин волн. Линии 1, 2, 3 соответствуют длинам волн $\lambda_1 = 0.951$, $\lambda_2 = 1.063$ и $\lambda_4 = 0.98$ мкм.

Длины волн λ_2 и λ_4 генерируются в одной квантовой яме. Из рисунка видно, что импульсы излучения на длинах волн λ_1 , λ_2 , соответствующих переходам между первыми уровнями электронов и дырок, начинаются и заканчиваются практически одновременно. Из сравнения линий 2 и 3 видно, что сначала возникает генерация излучения с длиной волны λ_2 , а излучение с длиной волны λ_4 появляется с задержкой примерно 100 нс, что, вероятно, связано с более поздним заполнением более высоких (вторых) подзон электронами и дырками.

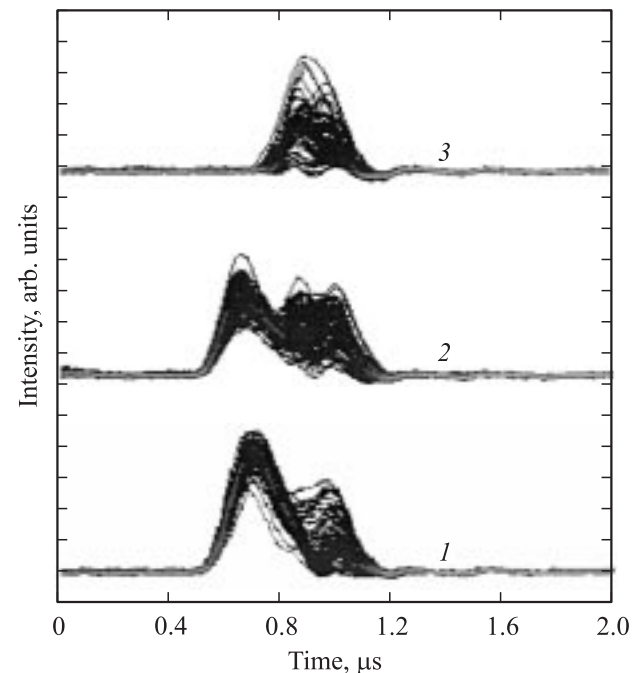


Рис. 4. Зависимости интенсивности излучения от времени на длинах волн λ , мкм: 1 — 0.951, 2 — 1.063, 3 — 0.98. Длительность возбуждающего импульса тока 350 нс.

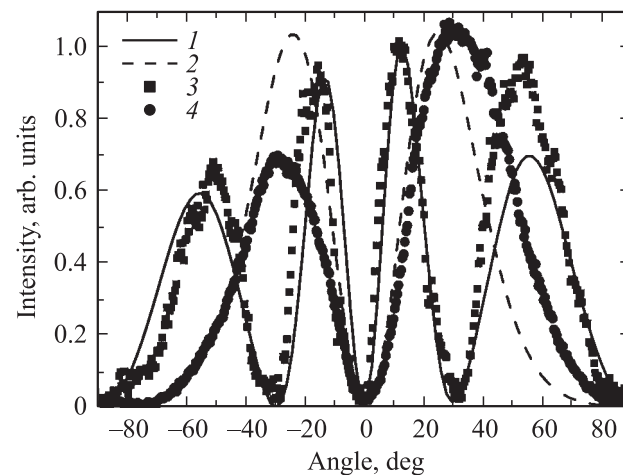


Рис. 5. Рассчитанные (кривые 1, 2) и экспериментальные (кривые 3, 4) диаграммы направленности интенсивности излучения в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу. Длины волн λ , мкм: 1, 3 — 0.951, 2, 4 — 1.063.

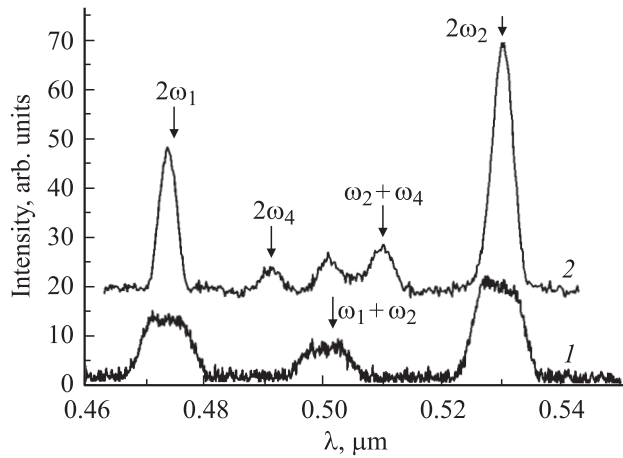


Рис. 6. Измеренные спектры генерации вторых гармоник и суммарных частот при двух токах накачки 20 А (1) и 35 А (2). Стрелками показано положение вторых гармоник и суммарных частот. Частоты ω_i соответствуют длинам волн λ_i .

Из рисунка ясно, что генерация на переходах между вторыми подзонами приводит к существенному подавлению генерации на переходах между первыми подзонами. Однако в течение некоторого времени генерация на этих переходах идет одновременно. Отметим, что нестабильность формы импульса излучения можно объяснить модовым шумом [11].

Для исследования модового состава излучения были проведены измерения диаграмм направленности излучения для всех четырех длин волн. На рис. 5 показаны измеренные диаграммы направленности на длинах волн $\lambda_1 = 0.951$ и $\lambda_2 = 1.063$ мкм. Из него видно, что для излучения на длине волны λ_1 в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу, имеются 4 хорошо различимых максимума, положения и относительные амплитуды которых согласуются с полученными из расчета для моды 3-го порядка TE_3 . Для излучения с длиной волны λ_2 видно присутствие двух пиков. Такая диаграмма направленности соответствует рассчитанной для моды 1-го порядка TE_1 . Диаграммы направленности излучения в плоскости p - n -перехода имели один максимум с полушириной около 10° для всех длин волн. Таким образом, можно заключить, что выбор параметров волновода и расположения квантовых ям позволил получить генерацию на модах заданных порядков.

Диаграмма направленности излучения с длиной волны λ_3 соответствовала моде TE_3 и была подобна той, что наблюдалась для излучения с длиной волны λ_1 . Аналогично диаграмма направленности излучения с длиной волны λ_4 соответствовала моде TE_1 и была подобна той, что наблюдалась для излучения с длиной волны λ_2 . Отметим, что диаграмма направленности в плоскости p - n -перехода близка к наблюдаемой в обычных полупроводниковых лазерных диодах с шириной волновода 100 мкм [12].

Для проверки одновременности генерации нескольких частот в пространственно пересекающихся модах были проведены наблюдения генерации вторых гармоник и суммарных частот. Смещение частот в резонаторе лазера происходит благодаря квадратичной нелинейности параметров решетки GaAs [13]. Результаты наблюдений приведены на рис. 6 и демонстрируют присутствие вторых гармоник для мод с длинами волн λ_1 и λ_2 , а также сигнала с суммарной частотой этих мод $\omega_1 + \omega_2$. При большем токе накачки в этом спектре появляются еще две линии. Они соответствуют второй гармонике для линии λ_4 и суммарной частоте линий λ_2 и λ_4 ($\omega_2 + \omega_4$). Обратим внимание на то обстоятельство, что линии λ_2 и λ_4 генерируются одной и той же квантовой ямой. Это наблюдение является прямым доказательством возможности смещения частот внутри резонатора лазера и одновременной генерации излучения четырех линий λ_1 , λ_2 , λ_3 и λ_4 .

4. Заключение

В работе получена и исследована многочастотная генерация в новом классе диодных лазеров — межзонном двухкаскадном лазере с туннельным переходом, разделяющим две активные области квантовых ям, сосредоточенные в одном и том же волноводе. Данная конструкция лазера снижает конкуренцию при генерации длинноволновых и коротковолновых мод и обеспечивает одновременную генерацию нескольких частот. Величина мощности излучения в исследованных образцах была таковой, что позволила наблюдать генерацию суммарных и удвоенных частот в резонаторе лазера.

Работа поддержана грантами CRDF (грант RUE1-2657-NN-05), AFOSR, NSF, the Research Corporation, Отделения физических наук РАН (программа „Когерентное оптическое излучение полупроводниковых соединений и структур“), президиума РАН (программа „Электромагнитные волны терагерцового диапазона“), Совета по поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (грант 1744.2003.2), РФФИ (гранты №№ 04-02-17432, 06-02-81020, 07-02-00486), Министерства образования РФ (BRHE, REC-NN-001, грант Y1-P-01-06), NATO (SfP-973799 Semiconductors).

Список литературы

- [1] А.А. Белянин, Д. Дёппе, В.В. Кочаровский, Вл.В. Кочаровский, Д.С. Пестов, М.О. Скалли. УФН, **173**, 1015 (2003).
- [2] S.A. Akhlestina, V.Ya. Aleshkin, A.A. Belyanin, A.A. Biryukov, D. Deppe, A.A. Dubinov, N.G. Kalugin, V.V. Kocharovskiy, V.I.V. Kocharovskiy, S.M. Nekorkin, D.S. Pestov, M.O. Scully, B.N. Zvonkov, N.B. Zvonkov. *Proc. 12th Int. Symp. „Nanostructures: Physics and Technology“* (St. Petersburg, Russia, 2004) p. 81.

- [3] K.V. Marem'yanin, A.A. Biryukov, S.M. Nekorkin, B.N. Zvonkov, V.Ya. Aleshkin, A.A. Dubinov, V.I. Gavrilenko, S.V. Morozov, A.A. Belyanin, V.V. Kocharovsky, V.I. Kocharovsky. *Proc. 14th Int. Symp. „Nanostructures: Physics and Technology“* (St. Petersburg, Russia, 2006) p. 17.
- [4] J.P. van der Ziel, W.T. Tsang. *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 499 (1982).
- [5] J.K. Kim, E. Hall, O. Sjolung, L.A. Coldren. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 3251 (1999).
- [6] J.K. Kim, S. Nakagawa, E. Hall, L.A. Coldren. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 3137 (2000).
- [7] I. Ozden, E. Makarona, A.V. Nurmikko, T. Takeuchi, M. Krames. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 2532 (2001).
- [8] V. Malyarchuk, J.W. Tomm, Ch. Lienau, M. Behringer, J. Luft. *J. Appl. Phys.*, **92**, 2729 (2002).
- [9] Ch. Garcia, E. Rosencher, Ph. Collot, N. Luarent, J. Guyaux, B. Vinter, J. Nagle. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 3752 (1997).
- [10] S.G. Patterson, E.K. Lau, K.P. Pipe, R.J. Ram. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 172 (2000).
- [11] В.Ю. Петрунькин, В.М. Николаев, В.В. Жахов, О.И. Котов, В.Н. Филиппов. *ЖТФ*, **55**, 1317 (1985).
- [12] Х. Кейси, М. Паниш. *Лазеры на гетероструктурах* (М., Мир, 1981) т. 1, гл. 2, с. 95.
- [13] C. Flytzanis. *Phys. Rev. B*, **6**, 1264 (1972).

Редактор Т.А. Полянская

The multifrequency interband two-cascade laser

A.A. Biryukov, B.N. Zvonkov, S.M. Nekorkin, P.B. Demina, N.N. Semenov, V.Ya. Aleshkin, V.I. Gavrilenko*, A.A. Dubinov*, K.V. Marem'yanin*, S.V. Morozov*, A.A. Belyanin⁺, V.V. Kocharovsky^{+•}, V.I. Kocharovsky[•]*

Research Physical-Technical Institute
of the Nizhny Novgorod State University,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

* Institute for Physics of Microstructures
of the Russian Academy of Science,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

⁺ Department of Physics, Texas A&M University, USA

[•] Institute of Applied Physics
of the Russian Academy of Science,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The multifrequency generation in a new class of injection heterolasers — interband two-cascade laser with a tunnel junction, which separates two active regions of quantum wells in one waveguide has been obtained and investigated. The fabricated laser oscillator with pulsed injection demonstrates simultaneous generation of a couple of the first-order modes at wavelengths 1.063 and 0.98 μm , and a couple of the third-order modes at wavelengths 0.951 and 0.894 μm . The second mode and sum frequency generation was observed due to nonlinear mode mixing in the laser cavity.