

Конкуренция мод, неустойчивость и генерация вторых гармоник в двухчастотных лазерах InGaAs/GaAs/InGaP

© В.Я. Алешкин[¶], Б.Н. Звонков*, С.М. Некоркин*, Вл.В. Кочаровский[†]

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

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

[†] Институт прикладной физики Российской академии наук,
603000 Нижний Новгород, Россия

(Получена 1 июня 2004 г. Принята к печати 16 июня 2004 г.)

Сконструированы гетеролазеры InGaAs/GaAs/InGaP с асимметрично расположенными квантовыми ямами двух типов и экспериментально исследованы их двухчастотная генерация и генерация вторых гармоник, впервые реализованные в широком диапазоне токов от 0.2 А при постоянной накачке до более чем 10 А при импульсной 200-наносекундной накачке. Обнаружены неизвестные ранее особенности подобной генерации, и дана их физическая интерпретация, основанная на анализе конкуренции и сосуществования различных коротковолновых и длинноволновых мод лазера включая моды „шепчущей галереи“.

В работе проведено экспериментальное исследование особенностей стимулированной двухчастотной генерации на длинах волн около 1 мкм и генерации вторых гармоник в инжекционных лазерах на гетероструктуре InGaAs/GaAs/InGaP с квантовыми ямами шириной 9 нм двух типов, отличающимися по концентрации индия примерно на 10%. Для лазеров с размером активной области $0.1 \times 0.25 \text{ мм}^2$ двухчастотный режим генерации (с разницей частот в 2.5%) наблюдался в широком диапазоне токов — от 0.2 А при постоянной накачке до более чем 10 А при импульсной накачке с длительностью импульса 200 нс (при комнатных температурах в пределах 4–33°C).

Для сравнения отметим, что в ранних экспериментах [1–3] двухчастотная генерация в гетеролазерах достигалась только в узком диапазоне токов накачки порядка нескольких процентов от тока на пороге генерации. Принципиальным в использованной нами конструкции является асимметричное расположение квантовых ям: две ямы, разделенные барьером *i*-GaAs шириной 24 нм и генерирующие наиболее коротковолновое излучение, располагались почти в центре волноведущего слоя, а одна квантовая яма, генерирующая более длинноволновое излучение, была смещена от центра волноведущего слоя примерно на 1/7 его толщины (рис. 1). Лазерный волновод был вполне стандартным и состоял из центрального слоя *i*-GaAs толщиной 0.84 мкм и двух обкладок из *n*- и *p*-InGaP толщиной 0.6 мкм с легированием на уровне $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Разность энергий квантов в линиях генерации составляла $\sim 30 \text{ мэВ}$ и зависела от температуры и уровня накачки. О различных схемах двухчастотных лазеров см. [4–6] и указанную там литературу.

Поскольку волноводная дисперсия и дисперсия поглощения гетероструктуры вряд ли сильно дискриминируют ТЕ-моды на частотах, отличающихся на 2.5%, естествен-

но ожидать, что при равных условиях токовой накачки порог генерации на двух коротковолновых ямах будет ниже, чем на одной длинноволновой яме, поскольку, хотя она и является дополнительным поглощающим элементом для коротковолновой генерации, ее связь с модами ТЕ₀ и ТЕ₂ слабее, чем у расположенных по центру коротковолновых ям.

Спектральные характеристики лазерного излучения, измеренные с помощью решеточного монохроматора МДР-24 в области комнатных температур в пределах 4–33°C (рис. 2) подтвердили ожидания. По мере увеличения тока накачки сначала действительно возникала стимулированная генерация излучения более высокой частоты (при токе $\sim 0.15\text{--}0.2 \text{ А}$), а затем начиналась одновременная генерация обеих частот на модах ТЕ-типа. Последняя возникала при токе, который превышал пороговый ток лазерной генерации на высокой частоте в 1.3–3 раза (в зависимости от конкретного образца и температуры) — см. пример на рис. 3.

В небольшом интервале токов, соответствующих началу генерации двух частот, имела место неустойчивость, благодаря которой спектральная мощность генерации и диаграмма направленности изменялись во времени. При дальнейшем увеличении тока наблюдалась устойчивая генерация на обеих частотах, вплоть до токов, разрушающих лазер.

Измеренные ватт-амперные характеристики для суммарной мощности генерации качественно отличаются от линейных характеристик, типичных для одночастотной генерации в обычных гетеролазерах. После начала двухчастотной генерации наблюдаемая суммарная мощность сначала резко падала примерно вдвое (рис. 3), а затем почти не изменялась с увеличением тока (большие безызлучательные потери), хотя при этом относительная мощность генерации двух частот значительно менялась. Критический ток, отвечающий указанному скачку, существенно снижался с уменьшением температуры лазера.

[¶] E-mail: Aleshkin@ipm.sci-nnov.ru

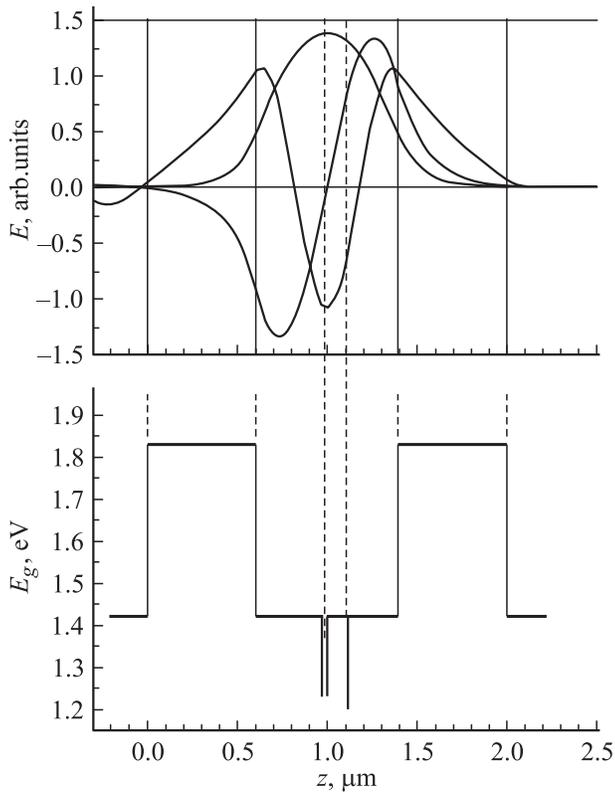


Рис. 1. Профили поперечных $TE_{0,1,2}$ -мод (E) и энергетическая диаграмма (E_g) вдоль направления роста z для двухцветной гетероструктуры InGaAs/GaAs/InGaP.

Диаграмма направленности коротковолнового излучения имеет обычный вид, а длинноволнового излучения оказывается очень размытой в плоскости $p-n$ -перехода (рис. 4 и 5). Последнее можно объяснить, если предположить, что длинноволновое поле представлено модами типа „шепчущей галереи“ (связанными с полным внутренним отражением излучения от границ активной области), а коротковолновое — нет, хотя и неоднородно в плоскости $p-n$ -перехода. В частности, слабая зависимость мощности выходного излучения от тока накачки после перехода в двухчастотный режим генерации может объясняться существенным поглощением коротковолнового излучения в длинноволновой яме, излучение которой, в свою очередь, в значительной мере поглощается (как моды „шепчущей галереи“) в боковых частях гетероструктуры, куда не проникает ток накачки. При этом боковые отражения длинноволнового поля, необходимые для формирования мод „шепчущей галереи“, скорее всего происходят не на боковых гранях гетеролазера, а в области краев полоски верхнего металлического контакта из-за скачка концентрации носителей там (плазменный и тепловой эффекты) и благодаря частично протравливанию верхнего волноводного слоя в этих местах в процессе изготовления лазера (скачок диэлектрических свойств волновода).

Были проведены также измерения спектра и диаграммы направленности генерации на удвоенных частотах, которые возникают благодаря решеточной нелинейности 2-го порядка GaAs в узком слое толщиной ~ 0.1 мкм вблизи выходных торцов лазера. Оказалось, что эти вторые гармоники излучения обладают ТМ-поляризацией и имеют близкие параметры, причем с увеличением тока накачки мощность генерации удвоенной частоты

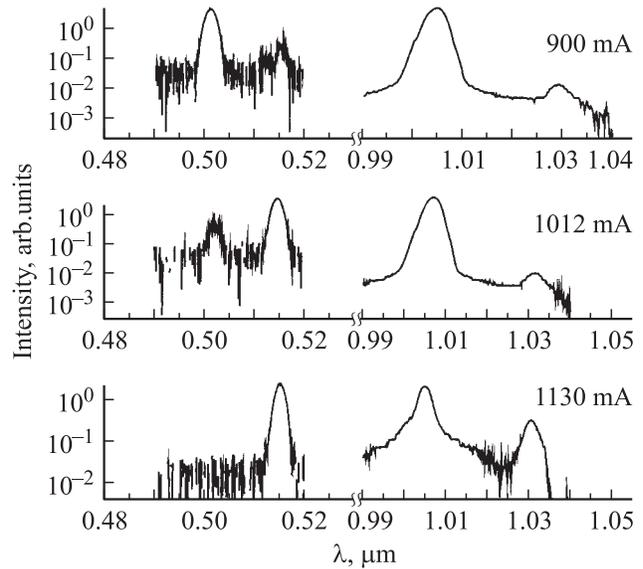


Рис. 2. Типичные спектры непрерывной двухцветной генерации, сопровождаемой вторыми гармониками, в образце длиной 0.25 мм при комнатной температуре. Указаны значения тока накачки. Узкая угловая апертура приемника излучения приводит к кажущемуся занижению уровня генерации на большей длине волны 1.03 мкм, для которой диаграмма направленности лазера шире (см. рис. 4).

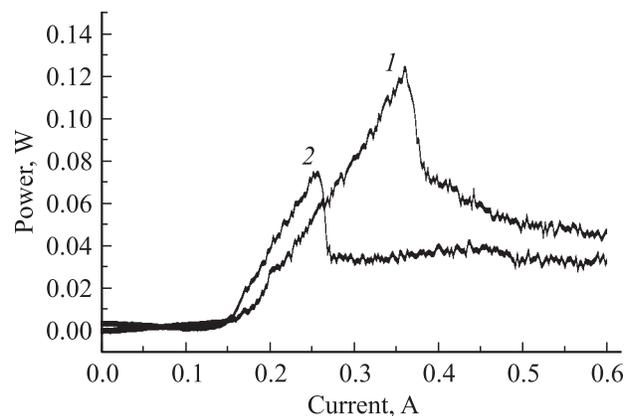


Рис. 3. Ватт-амперные характеристики диодного лазера длиной 0.25 мм с непрерывной накачкой при температурах 33 (1) и 10°C (2). Гладкие участки кривых с линейным ростом соответствуют одночастотной генерации. Выше порогов, где полная излучаемая мощность резко падает, начинается двухчастотная генерация, мощность которой почти не зависит от тока накачки.

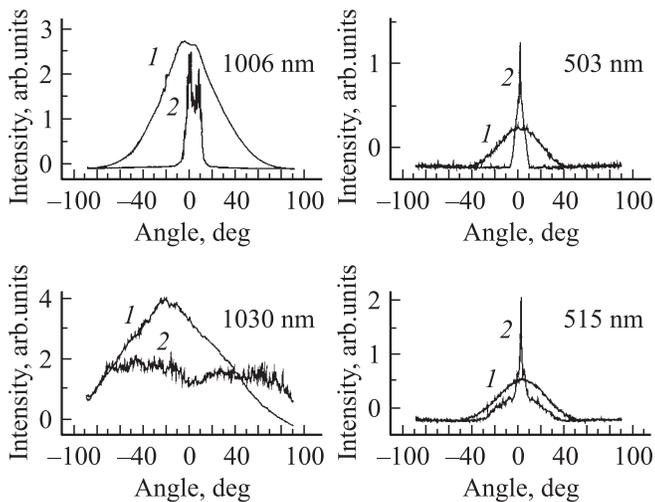


Рис. 4. Видимые с торца диаграммы направленности излучения в плоскости, перпендикулярной (1) и параллельной (2) квантовым ямам, для лазера длиной 0.25 мкм в условиях непрерывной накачки током 1.01 А при комнатной температуре. $\lambda = 1030$ нм — наблюдается 20-градусный сдвиг и асимметрия длинноволновой кривой 1, которые, по-видимому, связаны с наличием в излучении TE_1 -моды, искажающей TE_0 -моду.

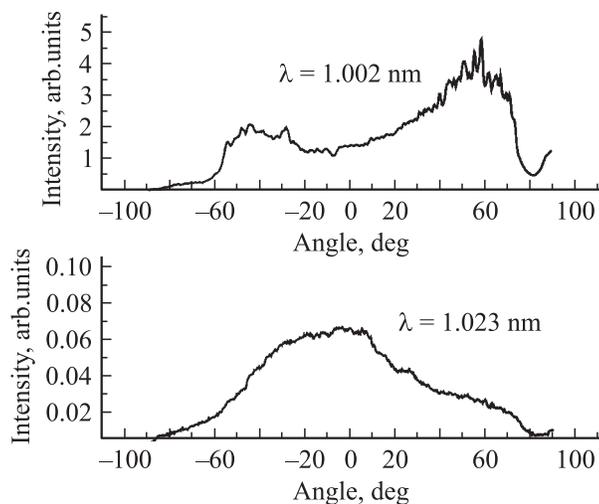


Рис. 5. Видимая с боковой грани диаграмма направленности излучения в плоскости, перпендикулярной квантовым ямам, для лазера длиной 0.25 мкм в условиях непрерывной накачки током 1.34 А при комнатной температуре. Большая ширина углового спектра говорит о том, что высшие TE -моды в непрокачанной током части лазерной гетероструктуры поглощаются слабее, чем основная TE_0 -мода, которая может даже трансформироваться в высшие моды из-за несовершенства волновода.

для длинноволнового излучения растет, а для коротковолнового падает (рис. 2). Их отношение и отношение порогов лазерной генерации сильно зависят не только от длины лазера, но и от температуры и положения полоска токовой накачки относительно границ гетероструктуры.

Генерация суммарной частоты не наблюдалась, что, по-видимому, означает пространственную разделенность областей генерации длинно- и коротковолновых мод (их поля слабо перекрываются на выходной грани лазера).

Интерпретация наблюдаемых режимов работы исследованных лазеров в существенной мере основана на предположении о том, что длинноволновое излучение представляет собой моды типа „шепчущей галереи“, а коротковолновое — обычные моды широкого (100 мкм) волновода. Последние имеют сильно неоднородную структуру в плоскости квантовых ям не столько благодаря большой ширине волновода, сколько вследствие филаментации тока накачки в достаточно узких каналах шириной ~ 10 мкм. Сказанное подтверждается экспериментальными исследованиями поля излучения на выходном торце лазера [7], проведенными с использованием сканирующей ближнепольной микроскопии, обеспечивающей спектральное разрешение коротко- и длинноволновых мод. Вместе с обычной оптической микроскопией эти исследования показывают, что коротковолновое излучение образует на торце лазера несколько ярких пятен и их поперечная структура имеет вид TE_0 -моды (возможно, с небольшой примесью TE_2 -моды). Длинноволновое излучение также образует несколько пятен (~ 10 мкм) на выходном торце лазера, но они, вообще говоря, смещены относительно пятен коротковолнового излучения и, вероятно, имеют мелкомасштабную структуру вплоть до размера ~ 1 мкм. О последнем свидетельствуют широкая диаграмма направленности на основной частоте и пьедестал у пика на второй гармонике (рис. 4, $\lambda = 1030$ и 515 нм, кривые 2), которые можно отнести на счет мод „шепчущей галереи“ и многомодовой структуры длинноволнового излучения в плоскости квантовых ям. Интересно, что относительный вес поперечных TE_0 -, TE_1 - и TE_2 -мод в длинноволновом излучении зависит от тока накачки и от местоположения на выходном торце лазера, причем высшие моды могут быть сравнимы по амплитуде с основной модой [7].

В целом эволюция генерации рассмотренного лазера при увеличении тока накачки представляется следующей. Превышение порога коротковолновой генерации осложняется протеканием тока по отдельным каналам, т. е. его филаментацией, ведущей к формированию нескольких трасс индуцированного усиления излучения (на двух коротковолновых ямах), почти напрямую соединяющих выходные торцы лазера. Генерация коротковолновых мод „шепчущей галереи“, в которых лучи в существенной мере неортогональны торцам лазера, исключена из-за поглощения излучения между каналами тока. Что касается длинноволнового излучения, то порог его генерации для указанных трасс не достигается при существенных превышениях тока накачки над порогом коротковолновой генерации, поскольку длинноволновая яма всего одна и к тому же она смещена относительно центра волновода. Однако, как только мощность коротковолнового излучения становится достаточной для

того, чтобы в значительной мере просветлить длинноволновую яму и повысить в ней уровень инверсии (дополнительная оптическая накачка, в том числе между каналами тока), возникает генерация длинноволновых мод „шепчущей галереи“. Их добротность растет с ростом тока, в частности, благодаря усилению отражений из-за плазменно-тепловых эффектов рефракции на границах активной области (и краях токовых каналов) и оказывается выше добротности обычных мод, проходящих преимущественно через каналы тока. Эксперимент показывает, что в подобных лазерах с длиной активной области 0.5–1 мм длинноволновая генерация на модах „шепчущей галереи“ не возникает — и это обусловлено невозможностью полного внутреннего отражения от торцов гетеролазера при фиксированной ширине активной области 0.1 мм. Впрочем, для полного обоснования и детализации предложенного сценария необходимы дополнительные экспериментальные и теоретические исследования.

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 02-02-17536, 04-02-17432, 02-02-81036, НШ-1744.2003.2 и ISTC 2293.

Список литературы

- [1] Y. Tokuda, N. Tsukada, K. Fujiwara, K. Hamanaka, T. Nakayama. *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 1629 (1986).
- [2] S. Ikeda, A. Shimizu. *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 504 (1991).
- [3] T.R. Chen, Y. Zhuang, Y.J. Xu, B. Zhao, A. Yariv, J. Ungar, S. Oh. *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 2954 (1992).
- [4] В.Я. Алешкин, В.И. Гавриленко, С.В. Морозов, А.А. Афоненко, Б.Н. Звонков, Ю.В. Кутергина, С.М. Некоркин. В сб.: *Нанопотоника, Материалы совещания*, под ред. З.Ф. Красильника (Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2003) т. 2, с. 315.
- [5] Н.В. Байдусь, А.А. Бирюков, Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин, В.Я. Алешкин. *ФТП*, **38**, 366 (2004).
- [6] А.А. Белянин, Д. Демпе, В.В. Кочаровский, Вл.В. Кочаровский, Д.С. Пестов, М.О. Скалли. *УФН*, **173**, 1015 (2003).
- [7] D.O. Filatov, G.A. Maximov, V.P. Mishkin, V.V. Levichev, S.M. Nekorkin, S.V. Morozov. *Scanning Probe Microscopy, Proceedings of International Workshop*, ed. by S.V. Gaponov (Nizhny Novgorod, IPM RAS, 2004).

Редактор Л.В. Шаронова

Mode interplay, instability, and second-harmonic generation in dual-frequency InGaAs/GaAs/InGaP lasers

V.Ya. Aleshkin, B.N. Zvonkov*, S.M. Nekorkin*, V.V. Kocharovskiy†

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

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

† Institute of Applied Physics,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract InGaAs/GaAs/InGaP heterolasers with two kinds of quantum wells grown asymmetrically within a waveguide are fabricated, and their dual-wavelength operation and second-harmonic generation are observed under pumping ranging from 0.2 A CW to more than 10 A 200-ns-pulsed injection current in $0.1 \times 0.25\text{-mm}^2$ -size lasers at room temperatures. New features of the dual-wavelength generation are found and their interpretation is given, based on the analysis of interplay and coexistence of various short- and long-wavelength laser modes, including whispering-gallery ones.