

Рекордные мощностные характеристики лазеров на основе InGaAs / AlGaAs / GaAs-гетероструктур

© Д.А. Лившиц, А.Ю. Егоров, **И.В. Кочнев**, В.А. Капитонов, В.М. Лантратов, Н.Н. Леденцов, Т.А. Налет, И.С. Тарасов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 4 сентября 2000 г. Принята к печати 5 сентября 2000 г.)

Выходные мощности в непрерывном режиме 9.2 Вт при постоянной температуре теплоотвода 10°C и 12.2 Вт в режиме стабилизации температуры активной области получены в лазере на основе InGaAs/AlGaAs (длина волны 1.03 мкм) с GaAs-волноводом толщиной 0.4 мкм. Достигнуты рекордно высокие плотности мощности на выходном зеркале 29.9 и 40 МВт/см² без катастрофической оптической деградации зеркал при двух режимах термостабилизации соответственно. В лазере с длиной резонатора 2 мм достигнут максимальный коэффициент полезного действия 66%.

Мощные полосковые лазеры с активной областью на длину волны в интервале $\lambda = 0.8 - 1.06$ мкм пользуются повышенным интересом благодаря широкому спектру их применения в качестве источников оптической накачки твердотельных волоконных лазеров, для прямого удвоения частоты, для лазерной сварки, в медицине и других областях.

Работы по одномодовым и многомодовым мощным лазерам ведутся уже давно [1,2], и к настоящему времени уже освоено производство 1- и 2-ваттных лазерных диодов с шириной полоска 100 мкм, работающих в непрерывном режиме генерации. Сложность повышения рабочей мощности таких диодов обычно связывают со следующими причинами. Первая причина — катастрофическая оптическая деградация зеркала (КОДЗ), ограничивающая максимальную выходную мощность [3]. Вторая причина — увеличение рабочей температуры лазерного кристалла по сравнению с температурой теплоотвода при прохождении тока, ведущее к снижению внешней дифференциальной эффективности и ускоренной деградации лазеров.

Величиной, характеризующей КОДЗ, является \bar{P} — плотность оптической мощности на выходном зеркале лазерного диода, при которой наступает КОДЗ [3]. В обзоре [4] приводятся максимально достигнутые величины \bar{P} для лазеров, содержащих Al в активной области, 11 МВт/см². Максимальное для всех типов лазерных диодов значение выходной плотности мощности составляет, согласно [4], 19 МВт/см² и было получено в структуре InGaAs/InGaAsP/GaAs [5].

В данной работе мы показываем, что при оптимизации технологии нанесения высокоотражающего и просветляющего покрытий на зеркала лазера порог КОДЗ может быть существенно увеличен. Полученная нами в непрерывном режиме максимальная плотность оптической мощности на выходном зеркале лазера составила 29.9 МВт/см² при стабилизированной температуре теплоотвода (10°C), т.е. при традиционном охлаждении лазера, и 40 МВт/см² при стабилизации температуры чипа.

Уменьшение эффективности и ускоренная деградация лазеров на больших мощностях могут быть предотвращены за счет снижения температуры лазерного кристалла в рабочей точке. Количество тепла, выделяющегося в лазерном диоде, может быть уменьшено за счет повышения коэффициента полезного действия (кпд) прибора. Вместе с этим, перегрев активной области относительно теплоотвода можно уменьшить за счет увеличения длины лазера и, тем самым, увеличения эффективной площади, с которой осуществляется отвод тепла.

Коэффициент полезного действия лазерных диодов, согласно [6], есть

$$\eta_c = \eta_d (h\nu/q) \frac{I - I_{th}}{I(V_0 + I\sigma_s/LW)}, \quad (1)$$

$$\eta_d = \eta_i \left(\frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_f R_r} \right) / \left(\alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_f R_r} \right), \quad (2)$$

где R_f и R_r — коэффициенты отражения на передней и задней гранях лазера, I_{th} — пороговый ток, L — длина резонатора лазера, W — ширина полоска. Отсюда видно, что кпд зависит от внутренней квантовой эффективности η_i , напряжения отсечки V_0 , и σ_s — удельного электрического сопротивления структуры.

Таким образом, задача получения мощного лазерного диода сводится к повышению порога КОДЗ и к оптимизации параметров структуры с тем, чтобы достичь одновременного сочетания внутреннего квантового выхода 100%, низких оптических потерь, низкого последовательного сопротивления и напряжения отсечки, точно соответствующего ширине запрещенной зоны активной области.

Для решения этой задачи методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МВЕ) и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОСVD) было выращено более десяти гетероструктур с длиной волны генерации ~ 1 мкм. Они имеют самую простую конструкцию двойной гетероструктуры раздельного ограничения с оптимизированной схемой легирования. Структура состоит из нелегированного GaAs-волновода толщиной

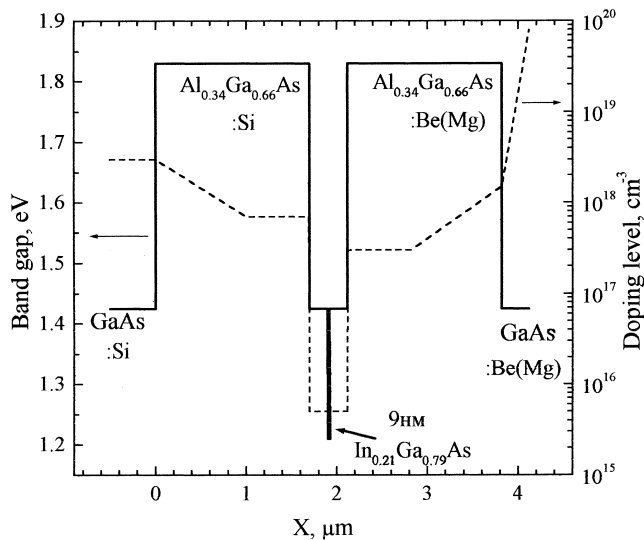


Рис. 1. Схематическая зонная диаграмма (сплошная линия) и профиль легирования (штриховая) эпитаксиальных слоев структур, выращенных методами MOCVD и MBE.

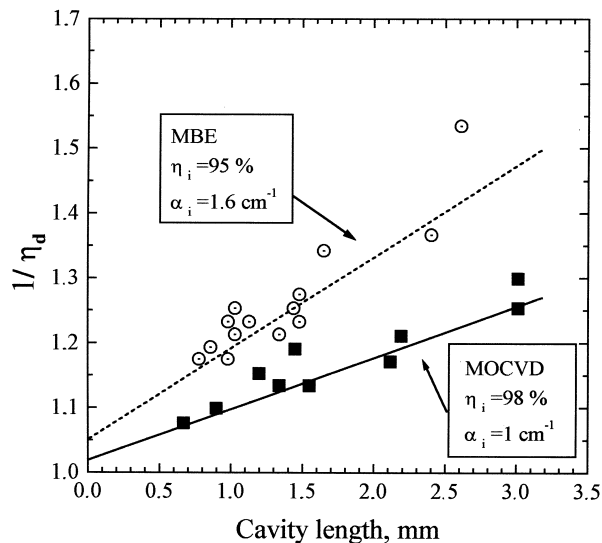


Рис. 2. Зависимость обратной дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора лазеров на основе гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs.

0.4 мкм, в середине которого расположена напряженная квантовая яма InGaAs толщиной 80 Å. Схематически толщина, состав, ширина запрещенной зоны и уровень легирования эпитаксиальных слоев представлены на рис. 1. Легирование эмиттера осуществлялось Mg в MOCVD и Be в MBE. Соответственно в MOCVD-структурах профиль *p*-легирования — более сглаженный из-за большего коэффициента диффузии магния.

Далее из структур с использованием стандартной последовательности постростовых операций изготавливались лазерные диоды конструкции "мелкая меза" с шириной полоска 100 мкм. В используемой конструк-

ции снижено растекание тока по сильно легированным слоям за счет их протравливания до середины верхнего эмиттера. Омические контактные системы к *p*- и *n*-сторонам структуры были выполнены напылением ZnAu/CrAu/Au и GeAu/Au соответственно.

Структуры раскалывались по кристаллографическим направлениям на отдельные лазеры с разной длиной резонатора *L*. В импульсном режиме измерялись ватт-амперные характеристики полученных приборов. По данным этих измерений вычислялись основные параметры: плотность тока прозрачности, внутренний квантовый выход и внутренние оптические потери α_i . Все структуры имели очень близкие характеристики, поэтому мы приводим данные для одной MOCVD- и одной MBE-структуры. На рис. 2 приведены зависимости обратной дифференциальной квантовой эффективности $1/\eta_d$ от длины резонатора для обеих структур. Из линейной аппроксимации находим внутреннюю квантовую эффективность η_i и внутренние оптические потери. Для MOCVD-структуры эти параметры составляют 98% и 1 см^{-1} , для MBE-структуры немного хуже — 95% и 1.6 см^{-1} . Ток прозрачности составлял 62 и 75 А/см^2 соответственно.

Для работы в непрерывном режиме лазеры *p*-стороной с помощью индия напаивались на медные теплоотводы. На зеркала наносились интерференционные диэлектрические покрытия SiO_2/Si , обеспечивающие коэффициенты отражения 99 и 5% для заднего и переднего зеркал соответственно. В традиционной технологии исследований и производства полупроводниковых лазеров при нанесении покрытий на зеркала происходит неконтролируемое подпыление диэлектрика на некоторую площадь *p*-контакта вблизи зеркал лазера, вследствие чего эта площадь остается непропаиваемой при монтаже чипа, и на этом участке заметно ухудшается отвод тепла в процессе работы лазера. Используемая нами технология нанесения зеркал полностью предотвращает подпыление диэлектрика и обеспечивает наилучшее охлаждение выходной грани лазера.

Для измерений в непрерывном режиме лазер на теплоотводе устанавливался на термохолодильник, позволяющий поддерживать температуру постоянной в широком диапазоне. Измерения производились в двух режимах термостабилизации. Первый режим — традиционно используемый, когда термодатчик обратной связи устанавливается на теплоотводе. Этот метод обладает существенным недостатком, связанным с тем, что реальная температура лазерного чипа сильно зависит от места установки термодатчика из-за градиента температуры по теплоотводу. Это затрудняет сравнение характеристик лазеров, измеренных на разных установках. Поэтому нами применялся и другой метод измерения. Здесь использовался второй термодатчик, установленный непосредственно на *n*-контакт лазерного чипа. Этот датчик являлся задающим в цепи обратной связи термостабилизации. Согласно [7], температура активной области лазера в таком режиме отличается от температуры, измеряемой

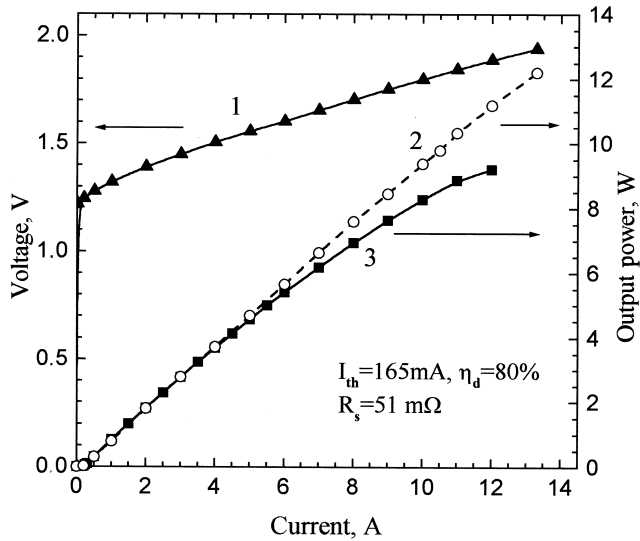


Рис. 3. Зависимости напряжения и выходной мощности лазерного диода с шириной полоска $W = 100$ мкм от тока накачки в непрерывном режиме. Длина резонатора $L = 1.34$ мм, высокоотражающее (99%) и низкоотражающее (5%) покрытия на гранях. 1 — вольт-амперная характеристика и 2 — ватт-амперная характеристика в режиме стабилизации температуры активной области 10°C . 3 — ватт-амперная характеристика в режиме стабилизации температуры теплоотвода 10°C .

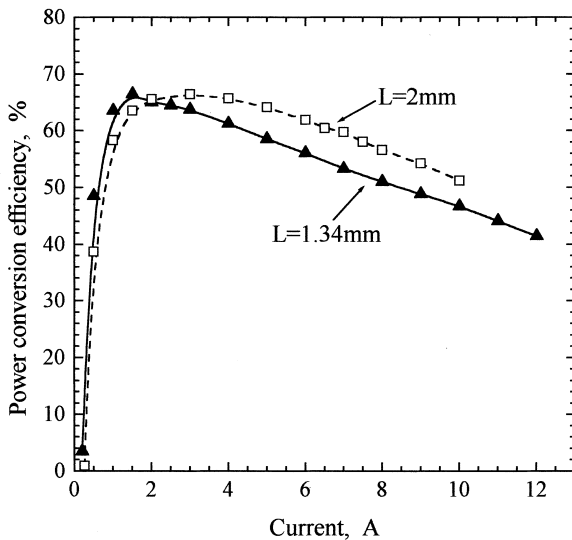


Рис. 4. Зависимости коэффициента полезного действия лазера на основе InGaAs/AlGaAs/GaAs от тока накачки.

термодатчиком, не более чем на 4°C . Таким образом, при данном измерении можно считать, что лазер находится при постоянной температуре активной области.

На рис. 3 представлены зависимости выходной мощности и напряжения от протекающего тока для лазера из структуры, выращенной методом MOCVD. Из данных, приведенных на рисунке, найдены пороговый ток 165 мА, дифференциальная эффективность и дифференциальная

квантовая эффективность, которые составили соответственно 0.97 Вт/А и 80%, напряжение отсечки ~ 1.24 В и последовательное дифференциальное сопротивление $R_s = 51$ мОм, что на единицу площади составляет $\sigma_s = 0.68 \cdot 10^{-4}$ Ом \cdot см². Сочетание внутренней квантовой эффективности, близкой к 100%, внутренних оптических потерь ~ 1 см⁻¹ и оптимальных электрических параметров соответствует лучшим из опубликованных результатов [6]. Напряжение отсечки, точно соответствующее ширине запрещенной зоны активной области, и низкое последовательное сопротивление лазерной структуры свидетельствуют об отсутствии дополнительных электрических барьеров и оптимальном профиле легирования данной структуры.

Как следствие, кпд данных лазеров является очень высоким. На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости кпд от тока накачки для лазера с длиной резонатора 1.34 и 2 мм при температуре теплоотвода 10°C . Максимальные значения кпд составляют соответственно 66 и 65%. Более того, лазер с длиной резонатора 2 мм сохраняет кпд выше 60% до выходной мощности 6 Вт. Эти результаты также являются лучшими из известных нам для всех типов полупроводниковых лазеров [7].

При традиционном измерении с поддержанием постоянной температуры 10°C на теплоотводе максимальный ток был ограничен 12 А, чтобы предотвратить деградацию гетероструктуры (рис. 3). На этом токе была зафиксирована выходная мощность 9.2 Вт, а температура активной области, измеренная вторым термодатчиком, составила $+56^\circ\text{C}$. Повышение температуры активной области вызывает увеличение порогового тока, падение квантовой эффективности и уменьшение энергии кванта. Все это приводит к загибу ватт-амперной характеристики на больших токах и препятствует получению максимальной мощности и определению порога КОДЗ. При аналогичном режиме охлаждения были получены и большие максимальные мощности на лазерах с апертурой 100 мкм в непрерывном режиме генерации. В системе InGaAs/AlGaAs/GaAs зафиксирована наибольшая мощность 10.9 Вт с использованием более эффективного алмазного теплоотвода [8], в системе InGaAs/InGaAsP/GaAs максимальная мощность составила 11 Вт [5]. Однако эти результаты были получены на структурах с расширенным волноводом (> 1 мкм), что снижает плотность мощности на выходном зеркале.

Достигнутая максимальная плотность мощности \bar{P} определяется из

$$\bar{P} = P_{\max, cw} \frac{1}{W(d/\Gamma)} \left(\frac{1 + R_f}{1 - R_f} \right), \quad (3)$$

где $P_{\max, cw}$ — максимально достигнутая выходная оптическая мощность в непрерывном режиме, d/Γ — величина, характеризующая поперечный размер световой волны (d — толщина активной области, Γ — фактор оптического ограничения активной области) [3]. При

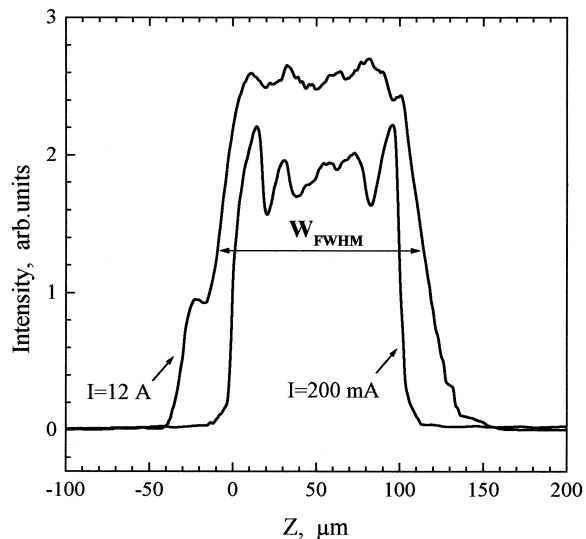


Рис. 5. Картины ближнего поля излучения лазера в плоскости $p-n$ -перехода (координата Z) при разных токах накачки.

использовании расширенного волновода ~ 1 мкм значение d/Γ составляет 0.55–0.70 мкм в зависимости от показателей преломления материалов волновода и эмиттера. В нашем случае при общей толщине волновода 0.4 мкм она составляет 0.34 мкм (на длине волны генерации $\lambda = 1.03$ мкм). Такое значение d/Γ хорошо согласуется с наблюдаемой картиной дальнего поля в направлении, перпендикулярном $p-n$ -переходу. Ширина поля на полувысоте составляла $\theta_{1/2} = 52^\circ$. Тогда вычисленная по формуле (3) плотность мощности в максимуме световой волны на переднем зеркале при выходной мощности 9.2 Вт составляет 29.9 МВт/см².

Измерение вторым способом со стабилизацией температуры ($T = 10^\circ\text{C}$) лазерного кристалла исключает разогрев активной области, что обеспечивает линейность ватт-амперной и вольт-амперной характеристик и достижение максимальной мощности излучения, которая составила 12.2 Вт при токе 13.3 А (рис. 3). Температура теплоотвода при максимальной выходной мощности составляла -26°C . Максимальная плотность оптической мощности на выходном зеркале лазера, рассчитанная по формуле (3), составила 40 МВт/см². После деградации лазера на мощности 12.2 Вт на его выходном зеркале не было отмечено каких-либо изменений, т.е. произошла деградация в объеме гетероструктуры, а не из-за разрушения зеркала, и, значит порог КОДЗ находится еще выше.

По нашему мнению, выражение (3) не совсем точно отражает картину при больших плотностях тока накачки, так как с увеличением тока ближнее поле излучения лазера расширяется за пределы "номинальной" ширины полоска W . Увеличение ширины ближнего поля по сравнению с W зависит от конструкции лазерного диода. Так, например, при использовании оксидного полоска ширина ближнего поля может в несколько раз превосходить W .

Поэтому мы предлагаем в формуле (3) вместо ширины полоска W использовать ширину ближнего поля на полувысоте W_{FWHM} при максимальном токе. В нашем случае, несмотря на использование конструкции "мелкая меза", также наблюдается небольшое расширение ближнего поля излучения лазера. Измерения на том же лазере в импульсном режиме (рис. 5) показали, что ширина ближнего поля на полувысоте над порогом составляла 98 мкм, а при токе 12 А увеличивалась до 122 мкм. Если учесть расширение ближнего поля, то максимальная плотность мощности, полученная нами, составляет 24.5 МВт/см². Даже эта величина значительно превосходит ранее достигнутые плотности мощности ~ 19 МВт/см² на лазерах с расширенным волноводом [3–5,8,9].

Лазерные диоды на базе структур, полученных методом МВЕ, также имеют хорошие мощностные и электрические характеристики. Максимальная достигнутая мощность в непрерывном режиме при стабилизированной температуре теплоотвода 20°C составила 8.5 Вт.

Были проведены исследования деградационных свойств. Испытания проводились на токе 4 А и выходной мощности 3.3 Вт при температуре теплоотвода 30°C в течение 1000 ч. На лазерах на базе МВЕ-структур изменения выходной мощности в течение испытания не превысили 3%. Лазеры на базе МOCVD-структур имели большой разброс по деградационным параметрам, что мы связываем с качеством подложек для эпитаксиального роста. В методе МOCVD применялись подложки GaAs марки АГНК-3 с плотностью дислокаций по поверхности более 10^3 см⁻², тогда как для МВЕ использовались подложки производства фирмы "АХТ" с плотностью дислокаций 10^2 см⁻².

В заключение подчеркнем, что максимальная выходная мощность лазерного диода с апертурой $W = 100$ мкм в непрерывном режиме генерации составила 9.2 Вт при температуре теплоотвода 10°C и 12.2 Вт при стабилизированной температуре активной области. Достигнуты коэффициент полезного действия 66% и рекордная плотность оптической мощности на выходном зеркале 29.9 МВт/см², более чем в 1.5 раза превышающая ранее опубликованную величину, а при более интенсивном охлаждении лазера с поддержанием температуры активной области получена величина 40 МВт/см². Мы показали, что максимальная выходная мощность, КПД, оптическая прочность зеркал и срок службы лазерных диодов зависят от качества подложки и эпитаксиальных слоев, схемы легирования гетероструктуры, а также от технологии нанесения покрытий на зеркала и монтажа лазера на теплоотвод. Полученные результаты свидетельствуют, что возможно достижение рекордных мощностных характеристик без применения сложных гетероструктур, как в [9], и сложных технологий защиты зеркал, как в [10].

Авторы выражают благодарность Е.А. Третьяковой и Т.Н. Дрокиной за помощь в проведении технологических операций.

Список литературы

- [1] D.Z. Garbuzov, N.Y. Antonishkis, A.D. Bondarev, A.B. Gulakov, S.N. Zhigulin, N.I. Katsavets, A.V. Kochergin, E.U. Rafailov. *IEEE J. Quant. Electron.*, **27**, 1531 (1991).
- [2] D.Z. Garbuzov, N.Ju. Antonishkis, S.N. Zhigulin, N.D. Il'inskaya, A.V. Kochergin, D.A. Livshits, E.U. Rafailov, M.V. Fuksman. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 1062 (1993).
- [3] D. Botez. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 3102 (1999).
- [4] D. Botez. *Compound Semiconductors*, **5** (6), 24–29 (1999).
- [5] A. Al-Muhanna, L. Mawst, D. Botez, D. Garbuzov, R. Martinnelli. *J. Connolly. Appl. Phys. Lett.*, **73**, 1182 (1998).
- [6] J. Wang, B. Smith, X. Xie, X. Wang, G.T. Burnham. *Appl. Phys. Lett.*, **74** (11), 1525 (1999).
- [7] D. Garbuzov, M. Maiorov, V. Khalfin, M. Harvey, A. Al-Muhanna, L. Mawst, D. Botez, J. Connolly. *SPIE Photonics West Conference'99* (San Jose, CA, 1999) paper 3625-93.
- [8] X. He, S. Srinivasan, S. Wilson, C. Mitchell, R. Patel. *Electron. Lett.*, **34** (22), 2126 (1998).
- [9] D.A. Livshits, E.Yu. Kotelnikov, A.A. Katsnelson, W. Richter, V.P. Evtihiev, I.S. Tarasov, Zh.I. Alferov. *Proc. 8-th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology"* (St. Petersburg, 2000) p. 31.
- [10] J.K. Lee, K.H. Park, D.H. Jang, H.S. Cho, C.S. Park, K.E. Pyun, J. Jeong. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10** (9), 1226 (1998).

Редактор Л.В. Шаронова

Record power characteristics of InGaAs / AlGaAs / GaAs-heterostructure-based lasers

D.A. Livshits, A.Yu. Egorov, **I.V. Kochnev**,
V.A. Kapitonov, V.M. Lantratov, N.N. Ledentsov,
T.A. Nalyot, I.S. Tarasov

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The 9.2 W continuous wave optical power at heatsink temperature 10°C and 12.2 W under regime of the active region stabilized temperature has been observed on the InGaAs / AlGaAs ($\lambda = 1.03 \mu\text{m}$) laser diode with the 0.4 μm width GaAs waveguide. Excessive high power densities of 29.8 MW/cm² and 40 MW/cm² have been accordingly achieved at the front facet without any catastrophic optical mirror damage (COMD). The power conversion efficiency as high as 66% has been measured for a 2 mm long laser diode.