

Эффективный одномодовый (TEM₀₀) Nd:YVO₄-лазер с продольной диодной накачкой на длине волны 808 нм

В.И.Донин, Д.В.Яковин, М.Д.Яковин

Исследован одномодовый Nd:YVO₄-лазер с продольной односторонней накачкой излучением лазерных диодов на $\lambda = 808$ нм мощностью 40 Вт. В режиме генерации TEM₀₀-моды выходная мощность лазера составила 24 Вт при оптической эффективности $\eta_{\text{opt}} = 57.1\%$ (дифференциальная эффективность 63.3%), что является, по данным авторов, наилучшим результатом для лазеров на YVO₄ с ионами Nd³⁺ при продольной накачке на $\lambda = 808$ нм с одного торца активного кристалла. Оценки термических эффектов показывают, что при использовании кристалла Nd:YVO₄ (длина 20 мм, диаметр 3 мм, допирование 0.27 ат.%) с двумя недопированными концами и двухсторонней диодной накачки с общей мощностью 170 Вт можно получить выходную мощность ~ 100 Вт в режиме TEM₀₀-моды с одного активного элемента.

Ключевые слова: диодно-накачиваемый лазер, кристалл YVO₄/Nd:YVO₄, продольная накачка, термические эффекты, высокая эффективность.

1. Введение

В настоящее время Nd:YAG- и Nd:YVO₄-лазеры с диодной накачкой на длине волны $\lambda = 808$ нм получили широкое распространение. Их оптическая эффективность (по мощности диодной накачки) η_{opt} в многомодовом режиме генерации довольно высока. Например, Nd:YAG-лазер с активным кристаллом диаметром 5 мм в оптимальных условиях имеет $\eta_{\text{opt}} = 52.5\%$ и 54% соответственно для поперечной [1] и продольной [2] схем накачки на $\lambda = 808$ нм.

Для большинства применений, таких как прецизионная обработка материалов, накачка генераторов гармоник излучения и оптических параметрических генераторов, медицина и др., необходим одномодовый (TEM₀₀) режим работы. В случае газовых лазеров с пониженной концентрацией частиц в активной среде, например в мощных широкоапертурных аргоновых лазерах, эффективная селекция TEM₀₀-моды сравнительно легко может проводиться с помощью V- или Z-образных резонаторов с большой эффективной длиной (телескопических) [3–5]*. Однако в твердотельных лазерах выделение TEM₀₀-моды наталкивается на серьезные трудности из-за высокой концентрации частиц в активных средах, приводящей к наведению термооптических искажений. Так, согласно работе [6] указанные искажения ограничивают диаметр основной моды примерно до 2 мм независимо от физических размеров активного стержня. Кроме того, вызываемые термическими эффектами внутренние напряжения могут приводить к разрушению кристалла, что ограничивает максималь-

ную выходную мощность лазера. В результате даже для лазера с двумя стержнями из Nd:YAG эффективность в режиме генерации TEM₀₀-моды не превышает $\eta_{\text{opt}} = 18.9\%$ и 28% соответственно для поперечной и продольной схем накачки [7, 8].

В настоящей работе исследуется одномодовый Nd:YVO₄-лазер с продольной односторонней накачкой излучением лазерных диодов на $\lambda = 808$ нм мощностью 40 Вт. В режиме TEM₀₀-моды выходная мощность лазера составила 24 Вт при оптической эффективности $\eta_{\text{opt}} = 57.1\%$ (дифференциальная эффективность 63.3%). По данным авторов, это наибольшая мощность для лазеров на иттриевом ортованадате с ионами Nd³⁺ при продольной накачке на $\lambda = 808$ нм с одного торца активного кристалла.

2. Экспериментальная установка и основные результаты

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. Для накачки использовался диодный лазер 1 (Lumics, Германия) с воздушным охлаждением и выходной мощностью неполяризованного излучения ~ 40 Вт на $\lambda = 808$ нм. Его излучение выводилось волокном диаметром 400 мкм (NA = 0.22) и через согласующую систему 2 подавалось на входную поверхность активного элемента.

Активный элемент 5 представлял собой диффузно-сваренный (композитный) кристалл YVO₄/Nd:YVO₄ прямоугольной формы размером 3×3×11 мм, вырезанный вдоль кристаллографической оси *a*. Торцы недопированной части кристалла длиной $l_n = 2$ мм был просветлен на

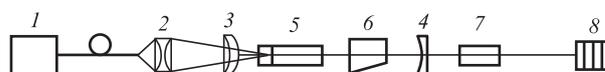


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

1 – диодный лазер ($\lambda = 808$ нм) с выводом излучения через волокно; 2 – согласующая оптическая система; 3, 4 – зеркала резонатора лазера; 5 – активный элемент из YVO₄/Nd:YVO₄; 6 – акустооптический модулятор; 7 – нелинейный кристалл; 8 – измеритель мощности.

* К сожалению, в работе [3] в формуле (1) допущена опечатка – отсутствует цифра 2 перед R_3 в знаменателе, которая в последующих работах [4] была исправлена.

В.И.Донин, Д.В.Яковин, М.Д.Яковин. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; e-mail: donin@iae.nsk.su

Поступила в редакцию 20 марта 2013 г., после доработки – 7 мая 2013 г.

длины волн накачки и генерации ($r_{808} < 2.5\%$ и $r_{1064} < 0.2\%$), а выходной торец допированной ионами Nd^{3+} с концентрацией 0.27 ат.% части длиной $l_d = 9$ мм – на длину волны генерации ($r_{1064} < 0.1\%$). Кристалл через теплопроводящие прокладки крепился к медному блоку, который через элемент Пельтье присоединялся к радиатору воздушного охлаждения.

Согласующая оптическая система 2 содержала две линзы с фокусными расстояниями 2.5 и 6 см. Поверхности линз просветлялись на $\lambda = 808$ нм ($r_{808} < 0.1\%$). Излучение накачки фокусировалось этой системой через недопированную часть на торец допированной части кристалла в пятно диаметром ~ 1 мм.

Резонатор лазера состоял из двух зеркал: менискового зеркала 3 с радиусами кривизны ± 500 мм ($r_{808} < 0.5\%$ на обеих сторонах и $r_{1064} > 99.7\%$ на выпуклой стороне), через которое осуществлялась накачка, и сферического зеркала 4 с радиусом кривизны 9600 мм и коэффициентом пропускания $\tau_{1064} = 20\%$. Между зеркалами на расстоянии 15 мм от зеркала 3 помещался активный элемент. Общая длина резонатора варьировалась в диапазоне 75–280 мм.

Для реализации режима модуляции добротности в резонатор лазера помещался акустооптический модулятор 6. Максимальная мощность управляющего сигнала модулятора составляла 15 Вт (рабочая частота 80 МГц), что позволяло в случае необходимости получать импульсы генерации с частотой следования 50–100 кГц и длительностью 40–100 нс. Для визуализации пучка лазера использовалась вторая гармоника излучения, генерируемая в нелинейном кристалле 7 (LBO, $4 \times 4 \times 18$ мм, II тип синхронизма, $\Theta = 22.5^\circ$), помещенном вне резонатора. Выходная мощность лазера и диодов накачки на выходе волокна контролировалась измерителем мощности 8 (Gentek, Канада).

Спектр генерации диодного лазера при температуре $T = 23^\circ\text{C}$ представлен на рис.2. Ширина линии излучения накачки составляла 2.5 нм, что близко к ширине линии поглощения активного кристалла Nd:YVO₄ [9]. Измерения спектра проводились с использованием монохроматора МДР-23 с дифракционной решеткой 1200 штр./мм (аппаратурная ширина 0.13 нм).

Оценочные расчеты распределения температуры, параметров тепловой линзы и внутренних напряжений в кристалле YVO₄/Nd:YVO₄ выполнялись с помощью пакета программ Comsol Multyphysics и MATLAB. Стационарное распределение температуры в кристалле рассчитывалось путем численного решения трехмерного уравнения Пуассона

$$K_x \frac{\partial^2 T(x,y,z)}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T(x,y,z)}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T(x,y,z)}{\partial z^2} + q(x,y,z) = 0, \tag{1}$$

где $q(x,y,z)$ – поглощенная объемная мощность накачки, а K_x, K_y и K_z – коэффициенты теплопроводности кристалла вдоль осей x, y, z .

Предполагалось, что распределение $q(x,y,z)$ является гауссовым:

$$q(x,y,z) = \frac{Q\alpha_\sigma \exp[-2(x^2 + y^2)/w_p^2 - \alpha_\sigma z]}{\pi w_p^2 [1 - \exp(-\alpha_\sigma l_d)]} + \frac{Q\alpha_\pi \exp[-2(x^2 + y^2)/w_p^2 - \alpha_\pi z]}{\pi w_p^2 [1 - \exp(-\alpha_\pi l_d)]}, \tag{2}$$

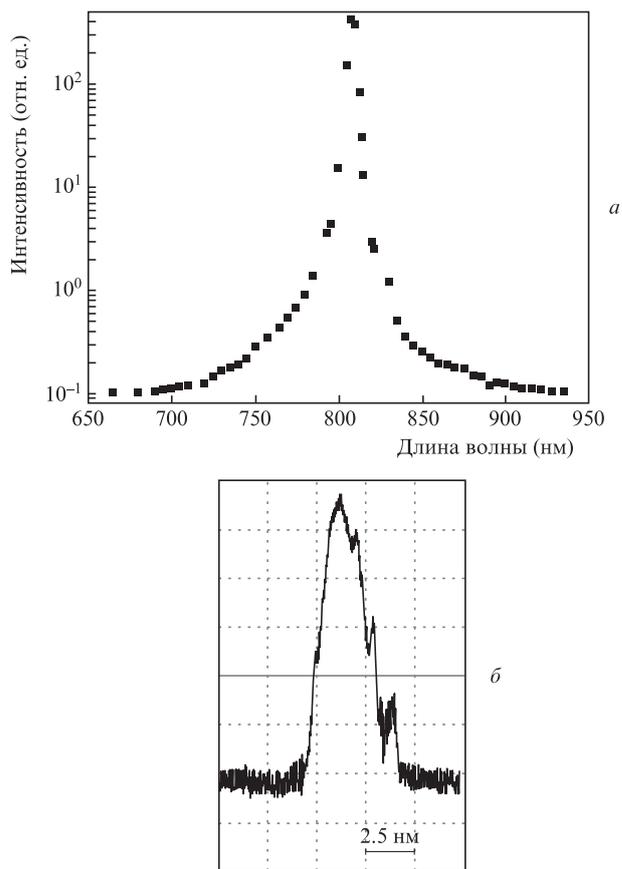


Рис.2. Спектр генерации диодного лазера в логарифмическом масштабе по оси ординат (а) и в линейном масштабе (область вблизи 808 нм) (б).

где $Q = P_{in}\eta$ – тепловая нагрузка, определяемая мощностью накачки P_{in} и квантовым дефектом $\eta = 1 - \lambda_{808}/\lambda_{1064} = 1 - \eta_S$; α_σ и α_π – коэффициенты поглощения на $\lambda = 808$ нм для σ - и π -поляризации; w_p – радиус перетяжки пучка накачки на торец допированной части кристалла; η_S – фактор Стокса.

Граничные условия для уравнения (1) были следующими:

$$T(x = \pm b/2, y = \pm b/2) = T_0, \\ -K_z \frac{\partial T(x,y,z)}{\partial z} \Big|_{z = \pm (l_n + l_d)/2} = h \{ T[z = \pm (l_n + l_d)/2] - T_a \}, \tag{3}$$

где b – поперечные размеры кристалла по осям x и y ; T_0 и T_a – температуры медного блока и окружающего воздуха соответственно; h – коэффициент конвективного охлаждения торцов кристалла. Эти граничные условия означают, что входной и выходной торцы кристалла охлаждаются путем конвекции, а температура боковых граней поддерживается равной T_0 ; система координат x,y,z помещена в геометрический центр кристалла, а ось z направлена вдоль кристаллографической оси a .

В расчетах использовались следующие параметры: $K_z = 5.23 \times 10^{-2}$ Вт·см⁻¹·К⁻¹, $K_x = K_y = 5.1 \times 10^{-2}$ Вт·см⁻¹·К⁻¹, $\alpha_\pi = 8.4$ см⁻¹, $\alpha_\sigma = 2.4$ см⁻¹, $P_{in} = 0-40$ Вт, $\eta = 0.24$, $w_p = 5 \times 10^{-2}$ см, $T_0 = T_a = 293$ К, $h = 2.5 \times 10^{-3}$ Вт·см⁻²·К⁻¹.

Для определения характеристик тепловой линзы вычислялось следующее выражение (оптическая разность путей) [10]:

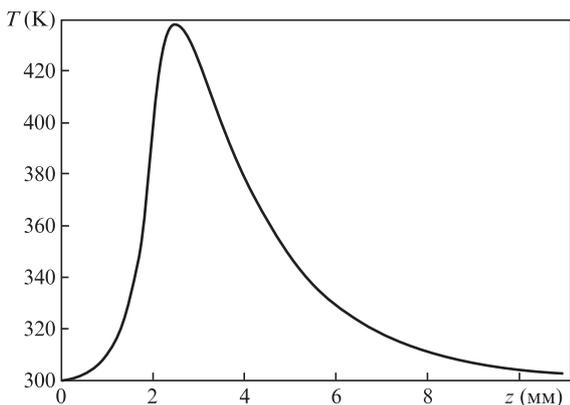


Рис.3. Расчетное распределение температуры вдоль продольной оси кристалла.

$$OPD(x, y) = \int_{-(l_n+l_d)/2}^{(l_n+l_d)/2} \left[\frac{\partial n}{\partial T} T(x, y) + \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial n}{\partial \epsilon_{i,j}} \epsilon_{ij}(x, y) \right] dz + n_0 \Delta l(x, y), \quad (4)$$

где $\partial n / \partial T$ – термооптический коэффициент ($8.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$); $\partial n / \partial \epsilon_{ij}$ – упругооптический коэффициент (для Nd:YVO₄ этим коэффициентом можно пренебречь); ϵ_{ij} – тензор деформаций; n_0 – показатель преломления при температуре T_0 ;

$$\Delta l = \alpha_z \int_{-(l_n+l_d)/2}^{(l_n+l_d)/2} [T(x, y, z) - T(x = b/2, y = b/2, z = 0)] dz;$$

$\alpha_z = 4.43 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ – коэффициент линейного расширения вдоль кристаллографической оси a . Фокусное расстояние линзы оценивалось из выражения [10]

$$f = b^2 / \{2 [OPD_0 - OPD(x = b/2, y = b/2)]\}, \quad (5)$$

где $OPD_0 = OPD(x = 0, y = 0)$.

Проведенные расчеты показывают, что при мощности накачки 40 Вт максимальная расчетная разность температур на продольной оси кристалла и его краях составляет $\sim 140^\circ\text{C}$ (рис.3), а фокусное расстояние $f \approx 200 \text{ мм}$.

На рис.4 представлена зависимость выходной мощности лазера от длины резонатора. С увеличением длины резонатор приближается к границе области устойчивости

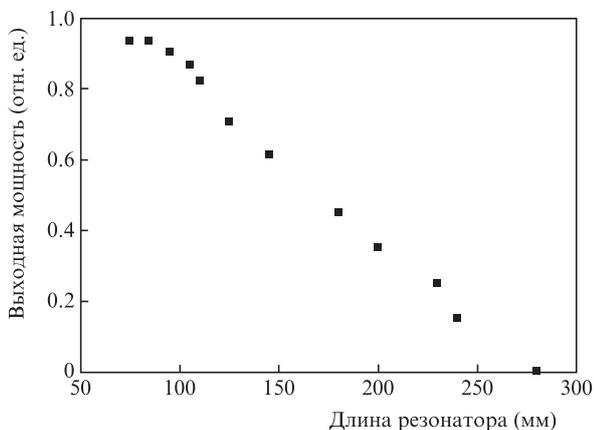


Рис.4. Зависимость выходной мощности Nd:YVO₄-лазера от длины резонатора.

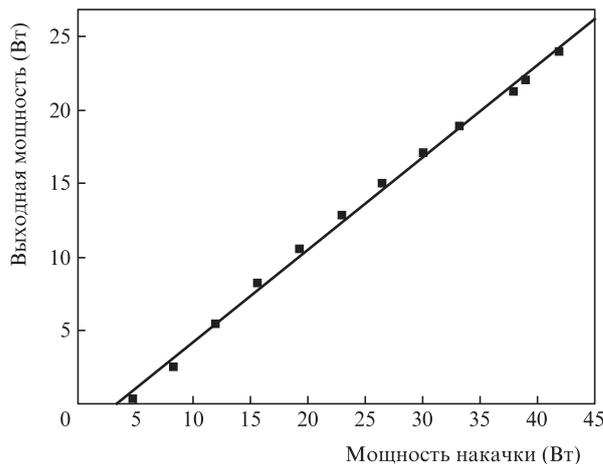


Рис.5. Выходная мощность Nd:YVO₄-лазера в зависимости от мощности диодной накачки.

и при критической длине $\sim 280 \text{ мм}$ становится неустойчивым – генерация прекращается. Рассчитанное исходя из критической длины резонатора фокусное расстояние тепловой линзы составляет $\sim 200 \text{ мм}$, что подтверждает достоверность расчетов. При этом расчетное значение диаметра основной моды равно $\sim 0.7 \text{ мм}$.

Зависимость выходной мощности лазера от мощности накачки показана на рис.5. Максимальная выходная мощность в одномодовом режиме составила 24 Вт при мощности накачки 42 Вт и пороге генерации 2.1 Вт. Приведенная зависимость является линейной с дифференциальной эффективностью 63.3%. Оптическая эффективность лазера $\eta_{opt} = 57.1\%$. По поглощенной мощности (5% излучения накачки проходило сквозь кристалл) дифференциальная и оптическая эффективности равны 66.6% и 60% соответственно.

3. Обсуждение результатов

Как уже отмечалось, основной проблемой в мощных твердотельных лазерах являются большие температурные градиенты, которые приводят к вредным термооптическим явлениям. Снижения градиентов температуры можно ожидать за счет перехода к более длинноволновой накачке [11, 12]. Если вместо излучения с $\lambda = 808 \text{ нм}$ использовать излучение лазерных диодов с $\lambda = 888$ или 914 нм , то за счет изменения фактора Стокса тепловая нагрузка снизится с 24% от мощности накачки до 17% и 14% соответственно. Но у такого способа имеются недостатки. Во-первых, из-за малых коэффициентов поглощения излучения накачки на этих длинах волн часть мощности теряется. Например, при накачке на $\lambda = 914 \text{ нм}$ для нашего кристалла эти потери составят $\sim 90\%$. Увеличить коэффициент поглощения можно, если использовать активные среды с более высоким содержанием ионов Nd³⁺. Однако при концентрациях Nd³⁺ свыше 1 ат.% начинается концентрационное тушение, которое приводит к снижению эффективности лазера и увеличению тепловых нагрузок. Во-вторых, с увеличением мощности накачки начинает проявляться ап-конверсия, также приводящая к этим вредным эффектам. Рассмотрение совместного действия тушения и ап-конверсии проведено в [12], где отмечалось их вредное влияние на работу лазера в режиме модуляции добротности или усилителя. В связи с этим отметим, что и в обычном режиме генерации при случайной расстрой-

ке резонатора мощного лазера указанные эффекты могут вызвать резкое повышение тепловыделения и разрушение активного элемента.

Термические напряжения в активных кристаллах, которые могут приводить к их разрушению, являются другой важной проблемой. Напряжение σ_{\max} , при котором начинается разрушение кристалла Nd:YVO₄, составляет 53 МПа [9]. Для цилиндрического стержня с продольной накачкой в [13] было получено следующее выражение для термических напряжений:

$$\sigma = \alpha E \frac{P_{\text{in}} \chi}{4\pi K} \frac{\alpha_p}{1 - \exp(-\alpha_p l)} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{w_p(z)}{r_0} \right]^2 \right\}, \quad (6)$$

где α – коэффициент линейного расширения; E – модуль Юнга; α_p – коэффициент поглощения излучения накачки ($\alpha_p \approx \alpha_\sigma/2 + \alpha_\pi/2$); l – длина кристалла ($l = l_d$); K – коэффициент теплопроводности; χ – доля поглощенной мощности; r_0 – радиус кристалла. Из этого выражения видно, что при заданных мощности P_{in} и длине волны накачки можно уменьшить термические напряжения путем уменьшения α_p или r_0 , а также увеличения w_p . По сравнению с работой [13] в нашем композитном кристалле достигается дальнейшее снижение температурных градиентов (приблизительно в 1.5 раза) с соответствующим уменьшением σ . Согласно оценкам по формуле (6) используемый нами композитный кристалл мог «выдержать» мощность накачки ~ 70 Вт ($\sigma < \sigma_{\max}$), что позволяет надеяться на получение в рассматриваемой конфигурации (односторонняя накачка, $\lambda = 808$ нм) выходной мощности лазера ~ 40 Вт.

Кроме того, оценки по формуле (6) показывают, что в случае одного кристалла YVO₄/Nd:YVO₄ с двумя недопированными концами ($l = 20$ мм, $r_0 = 1.5$ мм, $2 \times l_n = 4$ мм) и двухсторонней диодной накачки ($w_p = 1$ мм) на $\lambda = 808$ нм при общей мощности 2×85 Вт = 170 Вт можно получить мощность генерации 100 Вт в режиме TEM₀₀-моды. Как и в нашем случае, концентрация ионов Nd³⁺ полагалась равной 0.27 ат.%. Термические напряжения в таком кристалле составят $\sim 0.8\sigma_{\max}$, а разность температур на продольной оси кристалла и его краях равна ~ 170 °С.

Остановимся на вопросе селекции TEM₀₀-моды. Помимо очевидного главного фактора – близости диаметров пучка продольной накачки и основной моды – отметим

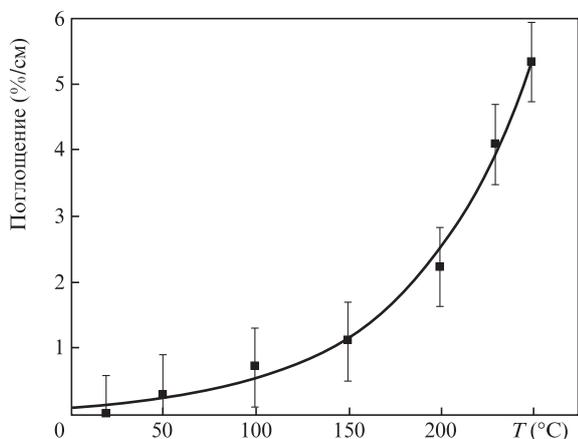


Рис.6. Поглощение излучения с π -поляризацией на $\lambda = 1064$ нм в кристалле Nd:YVO₄ в зависимости от его температуры.

следующее. В наших условиях можно было ожидать появления поглощения в активном кристалле на $\lambda = 1064$ нм вне области накачки за счет фононного заселения нижнего рабочего уровня со штарковских подуровней основного уровня. С целью проверки этого предположения был поставлен специальный эксперимент по обнаружению указанного поглощения.

На рис.6 представлено изменение поглощения на рабочем переходе излучения с π -поляризацией в исследуемом кристалле (помещенном в термостат) в зависимости от его температуры. Зависимость была получена путем прямого измерения поглощения в кристалле ослабленного излучения Nd:YAG-лазера с поперечной накачкой (ширина линии 180 ГГц) [14]. При $T = 20$ °С поглощение полагалось равным нулю. Температурные сдвиги линий в активных элементах взяты из работы [15], а температурные уширения линий – из работы [16]. Обнаруженное поглощение приводит к дополнительным потерям вне области накачки кристалла (для внеосевых мод), что наряду с конкуренцией мод способствует получению одномодовой генерации при мощной продольной накачке лазера. Таким образом, отмеченный температурный эффект играет положительную роль.

4. Заключение

Впервые создан лазер с воздушным охлаждением и выходной мощностью 24 Вт в одномодовом режиме при односторонней накачке мощностью 40 Вт. Лазер имеет высокие дифференциальную (63.3%) и оптическую ($\eta_{\text{opt}} = 57.1\%$) эффективности. Проведенные в настоящей работе оценки термических эффектов показывают, что для одного кристалла YVO₄/Nd:YVO₄ ($l = 20$ мм, $r_0 = 1.5$ мм, концентрация ионов Nd³⁺ 0.27 ат.%) при двухсторонней диодной накачке с общей мощностью 170 Вт на $\lambda = 808$ нм можно получить мощность генерации 100 Вт в режиме генерации TEM₀₀-моды.

1. Qi Y., Zhu X., Lou Q., et al. *Opt. Express*, **13**, 8725 (2005).
2. Kracht D., Wilhelm R., Fredeet M., et al. *Opt. Express*, **13**, 10140 (2005).
3. Алферов Г.Н., Григорьев В.А., Донин В.И. *Квантовая электроника*, **5**, 29 (1978).
4. Донин В.И. *Мощные ионные газовые лазеры* (Новосибирск: Наука, 1991).
5. Ананьев Ю.А., Белоусова И.М., Данилов О.Б., Спиридонов В.В., Трофимов Н.П. *Квантовая электроника*, **1**, 296 (1974).
6. Murdough M.P., Denman C.A. *Appl. Opt.*, **35**, 5925 (1996).
7. Hirano Y., Koyata Y., Yamamoto S., et al. *Opt. Lett.*, **24**, 679 (1999).
8. Frede M., Wilhelm R., Brendel M., et al. *Opt. Express*, **12**, 3581 (2004).
9. Koechner W. *Solid-State Laser Engineering* (New York: Springer Science and Business Media Inc., 2006).
10. Xiong Z., Li Zhigang G., Moore N., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **39**, 979 (2003).
11. McDonagh L., Wallenstein R., Knappe R., Nebel A. *Opt. Lett.*, **31**, 3297 (2006).
12. Delen X., Balembois F., Musset O., Georges P. *J. Opt. Soc. Am. B*, **28**, 52 (2011).
13. Chen Y.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **35**, 234 (1999).
14. Донин В.И., Никонов А.В., Яковин Д.В. *Квантовая электроника*, **34**, 930 (2004).
15. Delen X., Balembois F., Georges P. *J. Opt. Soc. Am. B*, **28**, 972 (2011).
16. Каминский А.А., Богомолова Г.А., Ли Л. *Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы*, **5**, 673 (1969).