

УДК 681.7.069

ЛАЗЕРНЫЕ ДИОДНЫЕ РЕШЕТКИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ДЛЯ НАКАЧКИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ В ШИРОКОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ДИАПАЗОНЕ

Е. С. Травина, А. Е. Дормидонов

Представлено исследование основных параметров лазерных диодных решеток СЛМ-3 ООО “НПП “Инжект” при изменении температуры от -50 до $+70$ °С. Приведена теоретическая оценка эффективности поглощения излучения ЛДР в лазерном кристалле $Nd^{3+}:YAG$ в указанном температурном диапазоне. Установлено, что увеличение ширины спектра излучения ЛДР до 10 нм обеспечит эффективную накачку $Nd^{3+}:YAG$ лазеров в широком температурном диапазоне без термостабилизации ЛДР.

Ключевые слова: лазерная диодная решетка, твердотельные лазеры.

Введение. Лазерные диоды (ЛД) представляют собой эффективные источники оптического излучения и широко применяются для накачки лазерных систем. В настоящее время существует большое количество типов ЛД, отличающихся длиной волны, шириной спектра, расходимостью выходного излучения, режимом работы и другими свойствами [1]. Для накачки мощных твердотельных лазеров используются лазерные диодные решетки (ЛДР) или матрицы, которые представляют собой линейки ЛД, объединение на одной подложке.

Наиболее распространенными типами ЛДР являются “Bar in groove” и “Rack and Stack” [1, 2], которые представляют собой серию параллельно соединенных лазерных линейных диодов (ЛЛД), установленных на пассивный теплоотвод.

Различие этих типов заключается в том, что в конструкции импульсных ЛДР типа “Bar in groove” применяются единые монокристаллические подложки BeO , а в конструкции ЛДР типа “Rack and Stack” на диэлектрическую, теплопроводящую

Федеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова”, 101000 Россия, Москва, ул. Сущевская, 22; e-mail: bujakas@yandex.ru.

подложку из ВеО напаяны медные теплоотводы, между которыми напаяны распорки и сами диодные линейки.

Существуют и другие варианты конструкции ЛДР типа “Rack and Stack”, предложенные, например, в [3–5]. Однако эти варианты конструкции не изменяют общего принципа.

В России существуют два отечественных производителя серийных мощных импульсных ЛДР ООО “НПП “Инжект” (г. Саратов) [6] и ООО Лассард (Обнинск). Обе компании используют конструктив, разработанный ООО “НПП “Инжект”. Конструкция решетки типа СЛМ-3 относится к типу конструкции “Rack and Stack” и представляет собой ЛЛД, смонтированные на теплоотводы. Расходимость излучения данного типа ЛДР составляет $15^\circ \times 40^\circ$ вдоль и поперек направлениям ЛЛД в решетке [6].

Длина волны излучения лазерного диода значительно зависит от температуры. Для диодов AlGaAs смещение длины волны $d\lambda/dT$ составляет от 0.22 до 0.33 нм/°С [7]. При изменении температуры лазерного диода на десятки градусов излучение накачки попадает в провалы спектра поглощения лазерных кристаллов, что приводит к увеличению длины поглощения и сказывается на режиме генерации и эффективности лазера. В связи со значительным температурным изменением спектра генерации лазерного диода, в лазерах с диодной накачкой обычно стабилизируют температуру диода с высокой точностью. Однако существуют задачи, когда термостабилизация невозможна и необходима готовность лазера к работе без предварительного нагрева или охлаждения ЛДР. Перспективным решением является использование поверхностно-излучающих лазерных диодов с вертикальным резонатором (VCSEL), длина волны излучения которых в несколько раз менее чувствительна к изменению температуры [8], но в настоящее время мощные VCSEL не являются широко доступными. Поэтому исследование возможности накачки лазеров обычными ЛДР в широком температурном диапазоне является актуальной задачей.

Экспериментальные результаты. Для изучения зависимости параметров лазерной диодной накачки при изменении температуры были исследованы пять ЛДР СЛМ-3 (№№ 1–5), являющимися серийной продукцией ООО НПП “Инжект”. ЛДР СЛМ-3 состоит из 50 линеек световой мощностью 25 Вт каждая. Суммарная световая мощность ЛДР СЛМ-3 составляет не менее 1.2 кВт при токе электрической накачки 28 А и напряжении питания 110 В. Размер излучающей области решетки равен 25×5.0 мм², при этом соответствующая плотность мощности излучения составляет около 1 кВт/см².

Центральная длина волны исследуемых ЛДР при температуре $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ лежит в окрестности 805 нм, ширина спектра $\Delta\lambda$ по полувысоте составляет около 2 нм.

Исследуемые ЛДР СЛМ-3 закреплялись внутри термостатической камеры с прозрачным корпусом, обеспечивающим возможность вывода излучения ЛДР. Для измерения спектра излучения использовался калиброванный спектрометр с перестраиваемой рабочей полосой шириной до 100 нм и спектральным разрешением 0.1 нм, мощность излучения регистрировалась пироэлектрическим сенсором Ophir PE-50. Питание ЛДР осуществлялось прямоугольным импульсом тока длительностью 250 мкс и стабилизированной амплитудой на уровне 28 А.

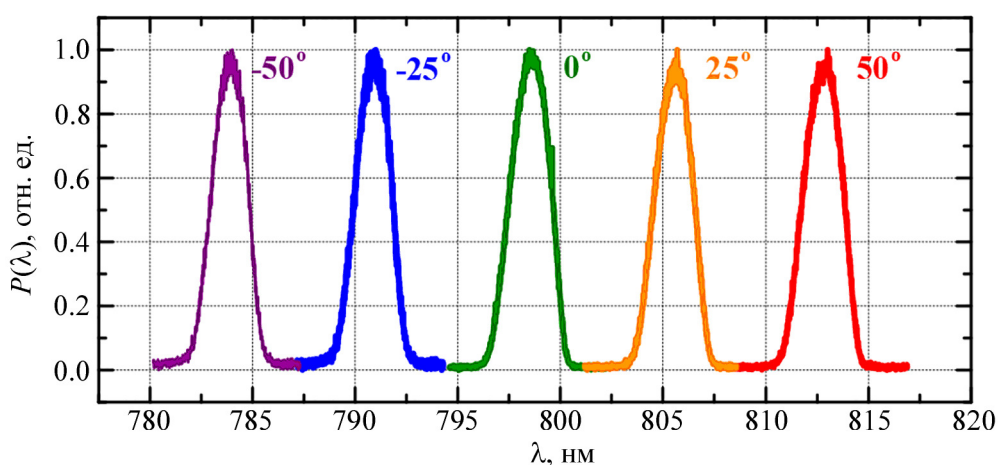


Рис. 1: Спектр $P(\lambda)$ ЛДР СЛМ-3 при различной температуре.

На рис. 1 в относительных единицах приведен спектр излучения $P(\lambda)$ ЛДР СЛМ-3 № 1, измеренный при различной температуре. При $25\text{ }^\circ\text{C}$ центр спектральной кривой находится на длине волны $\lambda_0 = 805.7\text{ нм}$. С изменением температуры происходит сдвиг спектрального максимума излучения ЛДР, достигающий $\Delta\lambda_0 \approx 21.5\text{ нм}$ при $\Delta T = 75\text{ }^\circ\text{C}$. При этом форма и ширина спектра остаются практически неизменными.

Зависимости от температуры центральной длины волны спектра исследуемых ЛДР приведены на рис. 2(а). Центральная длина волны излучения ЛДР линейно зависит от температуры во всем рассмотренном диапазоне. Рассчитанное методом наименьших квадратов смещение длины волны $d\lambda_0/dT$ составляет в среднем $0.28\text{ нм}/^\circ\text{C}$.

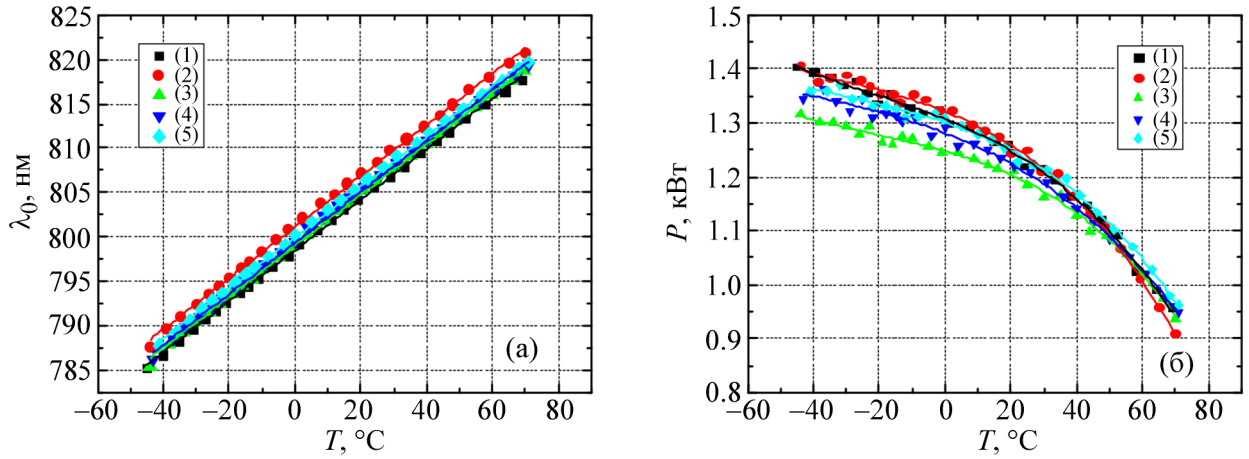


Рис. 2: Зависимость от температуры центральной длины волны спектра (а) и мощности (б) ЛДР СЛМ-3 (№№ 1–5).

Данная величина хорошо согласуется с оценкой $d\lambda_0/dT \approx 0.24$ нм/°С, полученной в окрестности $\lambda_0 = 800$ нм по формуле

$$\frac{d\lambda_0}{dT} = -\frac{\lambda_0^2}{c} \frac{1}{h} \frac{dE_g}{dT}, \quad (1)$$

где $E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T+\beta}$ – эмпирическая аппроксимация Варшни ширины запрещенной зоны полупроводника. Для GaAs коэффициенты $\alpha \approx -5.41 \cdot 10^{-4}$ эВ/К, $\beta \approx 204$ К [9].

На рис. 2(б) представлены изменения мощности излучения ЛДР, измеренные в режиме стабилизации амплитуды тока (28.0 ± 0.2 А). С ростом температуры происходит экспоненциальное уменьшение мощности излучения, которое при нагреве до 70 °С достигает 20% от номинального значения. При этом КПД ЛДР падает от $\eta = 45\%$ при $T = 25$ °С до $\eta = 38\%$ при $T = 70$ °С, однако ЛДР остаются работоспособными и пригодными для накачки лазерных кристаллов.

Накачка Nd³⁺:YAG лазера. Специфика использования Nd³⁺:YAG лазеров в составе дальномеров, целеуказателей и других устройств в условиях ограниченного электропотребления и требований мгновенной готовности к работе в широком диапазоне температур исключает возможность термостабилизации ЛДР накачки. В спектре сечения поглощения $\sigma(\lambda)$ лазерного кристалла Nd³⁺:YAG [10] присутствуют острые пики сильного поглощения и провалы, в которых поглощение мало. При изменении температуры ЛДР на десятки градусов излучение накачки попадет в провалы спектра поглощения Nd³⁺, что приводит к увеличению длины поглощения от нескольких миллиметров до сантиметра и более. В поперечной схеме накачки, когда ЛДР расположены вокруг лазерного

кристалла диаметром 2–5 мм, распределение плотности инверсной населенности и эффективность генерации лазера очень чувствительны к увеличению длины поглощения.

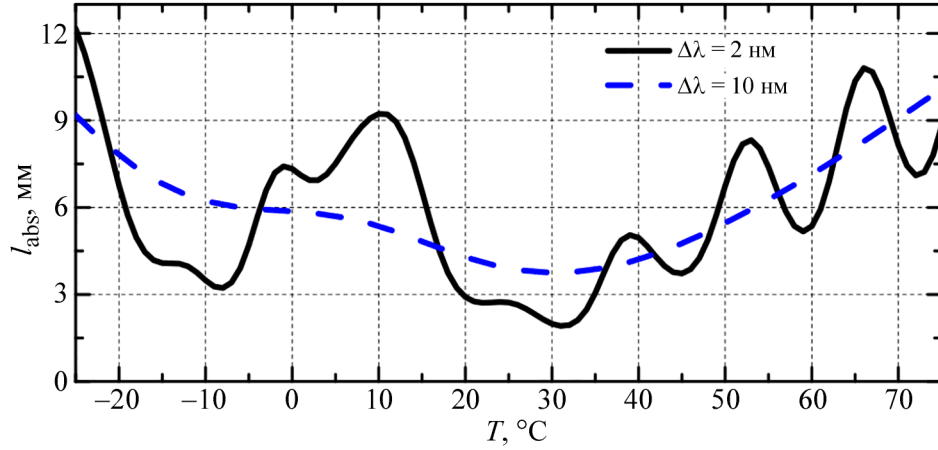


Рис. 3: Длина поглощения l_{abs} излучения ЛДР СЛМ-3 в кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 1% ат.

Длина поглощения по уровню мощности $e^{-1} l_{\text{abs}}$ излучения накачки в лазерном кристалле находится из решения трансцендентного интегрального уравнения

$$\int P(\lambda, T) \exp\{-\sigma(\lambda) N_{\text{GM}} l_{\text{abs}}(T)\} d\lambda = e^{-1} \int P(\lambda, T) d\lambda, \quad (2)$$

где $P(\lambda, T)$ – спектральная плотность мощности излучения накачки, N_{GM} – концентрация активных ионов в кристалле. На рис. 3 сплошной линией приведено решение данного уравнения для излучения ЛДР СЛМ-3 № 1 с шириной спектра 2 нм в диапазоне изменения температуры от минус 25 до плюс 75 °C при концентрации ионов Nd^{3+} 1% ат. В рассмотренном диапазоне величина l_{abs} изменяется от 2 до 12 мм, что приводит к значительному снижению эффективности поглощения накачки в лазерном кристалле. При увеличении ширины спектра излучения ЛДР до 10 нм амплитуда изменения l_{abs} становится меньше в три раза, по сравнению с узкополосной накачкой (рис. 3). Таким образом, использование накачки с шириной спектра излучения порядка 10 нм позволит обеспечить работоспособность $\text{Nd}:\text{YAG}$ в широком температурном диапазоне без предварительной термостабилизации ЛДР.

Заключение. Показана работоспособность и исследованы основные параметры ЛДР СЛМ-3 в температурном диапазоне от -50 до $+70$ °C. Установлено, что зависимость центральной длины волны излучения ЛДР от температуры является линейной во всем рассмотренном диапазоне. При этом ширина и форма спектра излучения остаются неиз-

менными. Приведена теоретическая оценка длины поглощения излучения ЛДР в лазерном кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ при изменении температуры. Увеличение ширины спектра излучения ЛДР до 10 нм позволяет сократить в три раза амплитуду изменения глубины поглощения накачки, что обеспечит работоспособность $\text{Nd}:\text{YAG}$ лазеров в широком температурном диапазоне без предварительной термостабилизации ЛДР.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] X. Liu, W. Zhao, L. Xiong, H. Liu, *Packaging of High Power Semiconductor Lasers*, (Springer New York, 2015). DOI: 10.1007/978-1-4614-9263-4.
- [2] Farzin Amzajerdian, Byron L. Meadows, et al., *Proc. of SPIE* **5887**, 58870E (2005). DOI: 10.1117/12.620102.
- [3] Paul Rosenberg, Patrick Reichert, Jihua Du, et al., *Proc. of SPIE* **6456**, 645618 (2007). DOI: 10.1117/12.701303.
- [4] E. Deichsel, D. Schröder, J. Meusel, et al., *Proc. of SPIE* **6876**, 68760K (2008). DOI: 10.1117/12.761476.
- [5] Brian P. Hoden, Method for modular laser diode assembly, patent US 6352873 B1, 2002.
- [6] Г. Т. Микаелян, В. А. Панарин, Т. Б. Жиздюк и др. Решетка лазерных диодов и спорсыбы ее изготовления, патент RU 2396654, 2008.
- [7] B. Schilling, S. Chinn, A. Hays, et al., *Applied Optics* **45**, issue 25, 6607 (2006). <https://DOI.org/10.1364/AO.45.006607>.
- [8] Brian Cole, Alan Hays, Chris McIntosh, and Lew Goldberg, Wide temperature operation of a VCSEL pumped 355nm frequency tripled $\text{Nd}:\text{YAG}$ laser, in *SPIE Proc*, 85991L (2013). DOI: 10.1117/12.2006254.
- [9] D. E. Aspnes, *Phys. Rev. B* **14**(12), 5331 (1976). DOI: 10.1103/PhysRevB.14.5331.
- [10] Л. В. Тарасов, *Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения* (М., Радио и связь, 1981).

Поступила в редакцию 6 февраля 2021 г.

После доработки 24 февраля 2021 г.

Принята к публикации 25 февраля 2021 г.