

ЛАЗЕРНЫЕ ДИОДНЫЕ РЕШЕТКИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКИ АКТИВНОГО КРИСТАЛЛА В ШИРОКОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ДИАПАЗОНЕ

А. Е. Дормидонов, Е. С. Сафронова

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», г. Москва

В докладе рассмотрена возможность использования мощных лазерных диодных решеток (ЛДР) плотной упаковки с интенсивностью излучения более 10 кВт/см^2 для накачки активных лазерных кристаллов твердотельных лазерных генераторов. Экспериментально и теоретически исследованы характеристики ЛДР в температурном диапазоне от минус 50 до плюс 50 °С. Определены оптимальные спектральные характеристики ЛДР, для обеспечения эффективного поглощения излучения активным кристаллом во всем рассмотренном температурном диапазоне.

Поколение твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой, по сравнению с лазерами с ламповой накачкой, обладает рядом важных преимуществ. Полупроводниковые лазерные диоды характеризуются высокой, до 60 %, эффективностью преобразования мощности электрического питания в мощность оптического излучения. Спектр излучения лазерных диодов представляет собой сравнительно узкую линию (2–4 нм), которую возможно эффективно согласовать с линиями поглощения ионов активного кристалла. Поэтому применение относительно дорогостоящей полупроводниковой накачки позволит достичь значения суммарного КПД лазера на уровне 2–3 %, тогда как КПД аналогичных ламповых систем на порядок ниже. Так, системы лазерной инициации взрывчатых составов, разрабатываемые в национальных лабораториях США (Sandia NLs) и Франции (TDA ARMEMENTS SAS) на основе радиационно-стойких твердотельных лазеров с ламповой накачкой, имеют КПД порядка 0,5 % при времени срабатывания от 50 до 100 мкс [1, 2].

Длина волны излучения лазерного диода значительно зависит от его температуры. Смещение длины волны $d\lambda/dT$ составляет от 0,22 до 0,33 нм/°С [3]. В диапазоне от минус 50 до плюс 50 °С, соответствующем условиям, в которых необходимо обеспечить работоспособность лазерного генератора, сдвиг $\Delta\lambda_p$ центральной длины волны достигает до 33 нм. Так, если при 20 °С центральная длина волны λ_p полупроводникового излучателя равна 812 нм, то при изменении температуры лазерного диода в указанном диапазоне λ_p будет смещаться в интервале от 795 до 820 нм. Сечение поглощения $\sigma(\lambda)$ кристаллов легированного ионами Nd^{3+} , использующихся в качестве активного элемента лазерного генератора, практически не зависит от температуры [4]. В спектре $\sigma(\lambda)$ кристалла $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ (рис. 1) присутствуют острые пики сильного поглощения и провалы, в которых поглощение мало. При изменении температуры лазерного диода на десятки градусов излучение накачки попадает в провалы спектра поглощения активных ионов Nd^{3+} , что приводит к увеличению длины поглощения от нескольких миллиметров до сантиметра и более. Поэтому может происходить изменение распределения инверсной населенности в активном кристалле, что сказывается на режиме генерации и эффективности лазерного генератора.

В качестве оптической накачки для лазерных генераторов предлагается использовать ЛДР СЛМ-П-2Н специально разработанные ОАО НПП «Инжект» по заказу ФГУП ВНИИА. ЛДР СЛМ-П-2Н состоит из 16 плотно упакованных блоков (80 линеек), разделенных промежуточными охлаждающими пластинами. Отдельный блок состоит из пяти диодных линеек GaAlAs длиной 5 мм и толщиной 100 мкм. Мощность излучения каждой линейки в блоке составляет около 50 Вт при амплитуде силы тока питания 55 А. Размер излучающей области решетки равен $9,5 \times 5 \text{ мм}$. Заявленная производителем максимальная световая мощность решетки составляет не менее 4 кВт, при этом плотность оптического излучения ЛДР СЛМ-П-2Н достигает значения 8 кВт/см^2 . Эффективность конверсии η_M мощности электрического питания в мощность оптического излучения со-

ставляет около 50 %. Расходимость излучения не превышает 40° по быстрой оси и 15° по медленной оси. На рис. 2 приведена фотография увеличенного фрагмента излучающей области ЛДР серии СЛМ-П. Для исследования характеристик ЛДР накачки при изменении температуры рассмотрим ЛДР СЛМ-3, спектральные свойства которых аналогичны ЛДР СЛМ-П-2Н. ЛДР СЛМ-3 является серийной продукцией ОАО НПП «Инжект» и состоит из 50-ти 25-ваттных линеек GaAlAs. Суммарная световая мощность данной ЛДР составляет 1,25 кВт при амплитуде силы тока питания 30 А. Размер излучающей области решетки равен 25×5 мм.

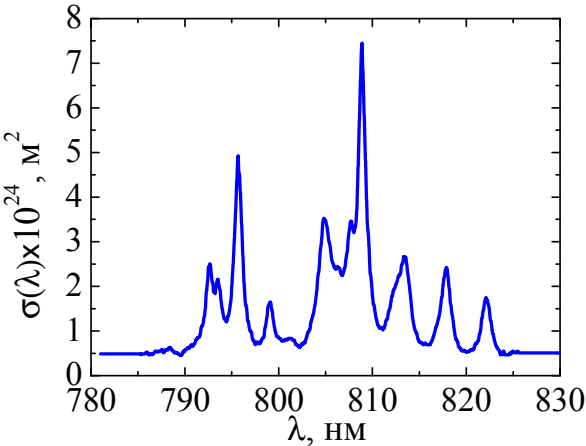


Рис. 1. Сечение поглощения $\sigma(\lambda)$ кристалла $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$

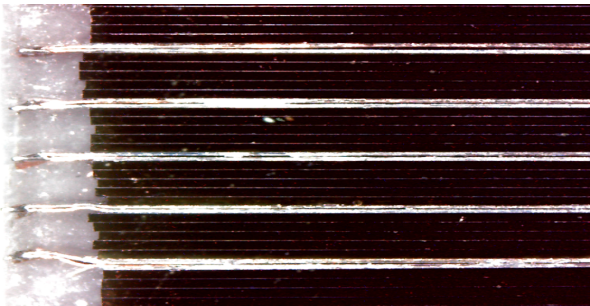


Рис. 2. Фотография фрагмента излучающей области ЛДР

Пять ЛДР СЛМ-3 закреплялись внутри термостата с прозрачным корпусом. Охлаждение термостата осуществлялось жидким азотом, а повышение температуры – омическим нагревателем. Измерение температуры ЛДР производилось калиброванной платиновой термопарой. Через прозрачный корпус термостата поочередно регистрировались параметры излучения каждой из пяти ЛДР. Для измерения спектра использовался оригинальный спектрометр с перестраиваемой рабочей полосой шириной до 100 нм и спектральным разрешением 0,3 нм. Мощность излучения регистрировалась пирозлектрическим сенсором Ophir PE-50.

Схема измерительного стенда представлена на рис. 3.

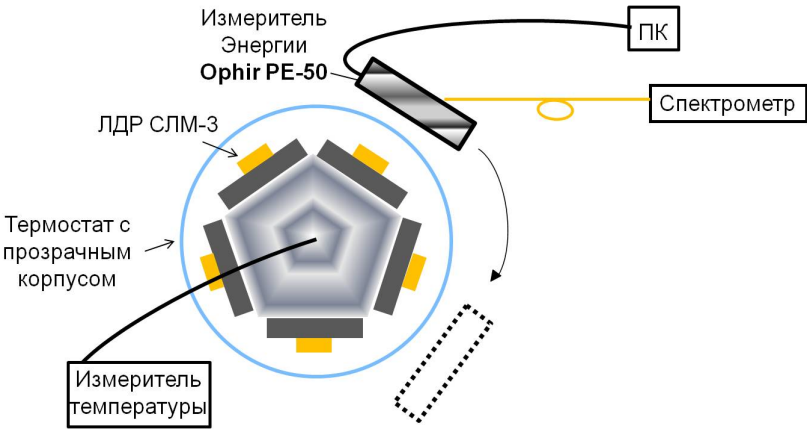


Рис. 3. Схема измерительного стенда

На рис. 4 в относительных единицах приведен спектр излучения $P(\lambda)$ ЛДР СЛМ-3 (серийный номер SM4), измеренный при различной температуре. При 25 °С центр спектральной кривой находится на длине волны 805,7 нм. Ширина спектра по полувысоте составляет около 2 нм. С изменени-

ем температуры происходит сдвиг спектрального максимума излучения ЛДР, достигающий $\Delta\lambda_p \approx 14$ нм при $\Delta T = 50$ °С. При этом форма спектра остается практически неизменной.

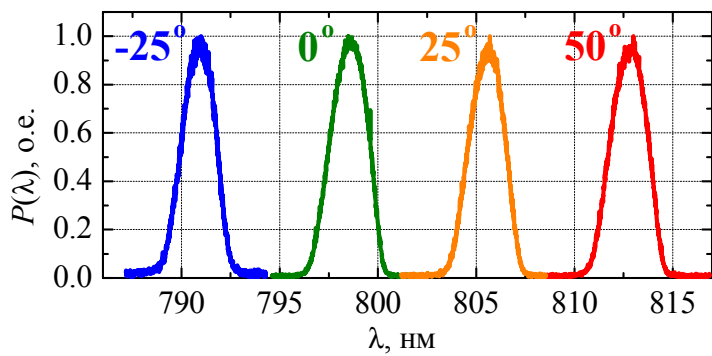


Рис. 4. Спектр $P(\lambda)$ ЛДР СЛИМ-3 при различной температуре

Зависимость от температуры центральной длины волны спектра и мощности ЛДР приведена на рис. 5,а,б, соответственно. Как видно из рис. 5,а центральная длина волны излучения практически линейно зависит от температуры. Рассчитанное методом наименьших квадратов смещение длины волны $d\lambda/dT$ составляет в среднем 0,28 нм/°С. Световая мощность начинает падать с нагревом ЛДР (рис. 5,б). При температуре 70 °С уменьшение мощности составляет около 15 %.

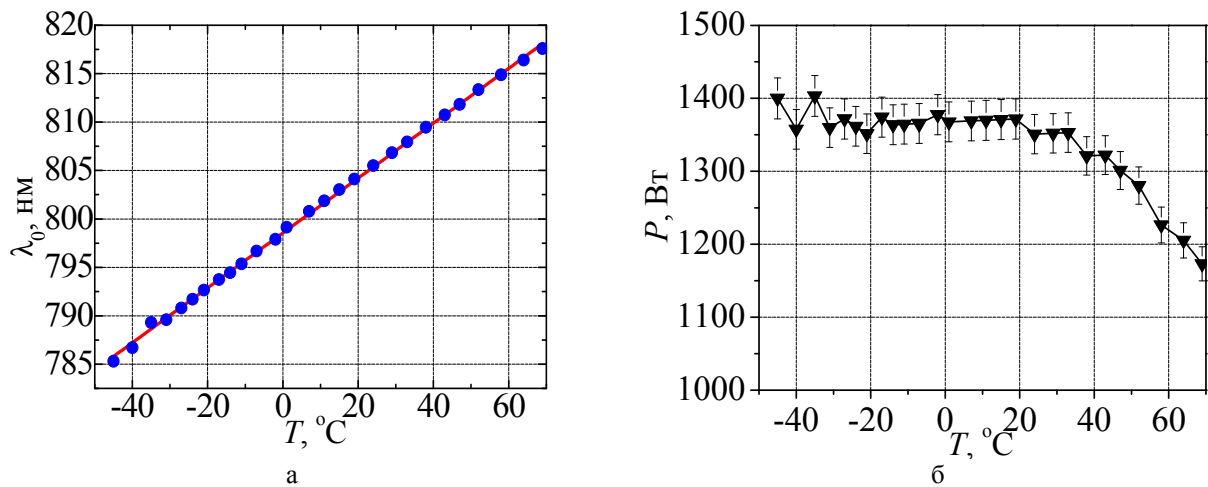


Рис. 5. Зависимость от температуры центральной длины волны спектра (а) и мощности (б) ЛДР СЛИМ-3

Зависимость ширины запрещенной зоны от температуры описывает эмпирическая формула, применимая для многих полупроводников:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}. \tag{1}$$

Для GaAs $E_g(0) = 1,519$, коэффициенты $\alpha \approx -0,9 \cdot 10^{-4}$ мЭв/К, $\beta \approx 204$ К. Из выражения (1) получим смещение длины волны генерации:

$$\frac{d\lambda}{dT} = -\frac{\lambda^2}{c} \frac{1}{h} \frac{dE_g}{dT} = \frac{\alpha \lambda^2}{hc} \left(1 - \left(\frac{\beta}{T + \beta} \right)^2 \right). \tag{2}$$

В окрестности 800 нм расчетное значение $d\lambda/dT \approx 0,25 \text{ нм/}^\circ\text{C}$, что хорошо согласуется с экспериментальным значением.

Длина поглощения (по уровню мощности e^{-1}) $l_{abs}(T)$ излучения накачки в активном кристалле находится из решения трансцендентного интегрального уравнения

$$\int P_p(\lambda,T)\exp\{-\sigma(\lambda)N_{GM}l_{abs}(T)\}d\lambda=e^{-1}\int P_p(\lambda,T)d\lambda, \tag{3}$$

где $\sigma(\lambda)$ – сечение поглощения активного элемента (рис. 1), N_{GM} – концентрация активных ионов в кристалле. На рис. 6 сплошной линией приведено решение данного уравнения для ЛДР СЛМ-3 в диапазоне изменения температуры от минус 25 до плюс 75 °С при концентрации ионов Nd^{3+} 1 % ат. В рассмотренном диапазоне величина l_{abs} изменяется от 2 до 12 мм. Пунктирной линией представлена длина поглощения излучения с шириной спектра 10 нм. Видно, что в данном случае амплитуда изменения l_{abs} становится меньше в три раза, по сравнению с узкополосной ЛДР. Кроме того, ЛДР с широким спектром дешевле, так как при их изготовлении не требуется точная спектральная селекция составляющих линеек.

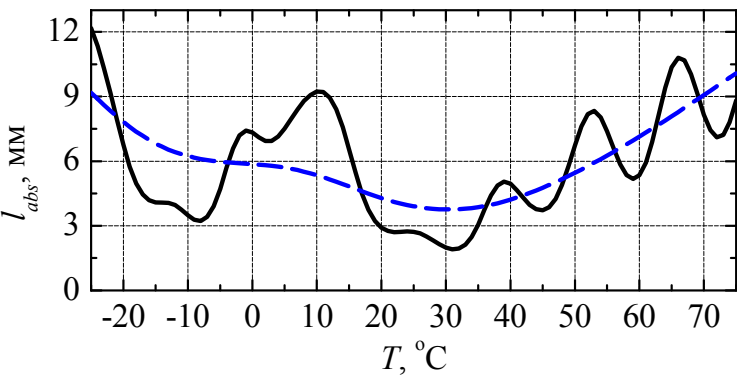


Рис. 6. Длина поглощения l_{abs} излучения ЛДР СЛМ-3 в кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 1 % ат.

Из анализа экспериментальных и теоретических исследований характеристик ЛДР в температурном диапазоне от минус 50 до плюс 50 °С. определены оптимальные спектральные характеристики ЛДР, для обеспечения эффективного поглощения излучения активном кристаллом во всем рассмотренном температурном диапазоне. Установлено, что для эффективной накачки активных кристаллов лазерного генератора необходимо использовать ЛДР с шириной спектра излучения 8–10 нм и центральной длиной волны 812 нм при 24 °С.

Список литературы

1. Morelli G. Design and Assembly Strategies for Two Laser-Optical Firing Systems. Proc. of SPIE, 2007. 6662: p. 666202.
2. Goujon, J. et al. Synchronous initiation of optical detonators by Q-Switched solid laser sources. Proc. of SPIE, 2008. 7115: p. 71150P.
3. Schilling, B. W. et al. End-pumped monoblock laser for eyesafe targeting systems, 2006, US ARMY RDECOM CERDEC Night Vision and Electronic Sensors Directorate (NVESD) Ft. Belvoir, VA 22060.
4. Ernst Wintner et al. Laser Ignition of Engines – A Contribution to Environmental Protection and a Challenge to Laser Technology. ANNUAL JOURNAL OF ELECTRONICS, 2014.