

ЭФФЕКТИВНАЯ ДИОДНАЯ НАКАЧКА ЛАЗЕРНОГО КВАНТРОНА В ШИРОКОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ДИАПАЗОНЕ

Е. С. Сафронова, А. Е. Дормидонов

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», 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.

Поклоение 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 (SandiaNLs) и Франции (TDA ARMEMENTS SAS) на основе радиационно-стойких твердотельных лазеров сламповой 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 –50 °С до +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, легированных 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.

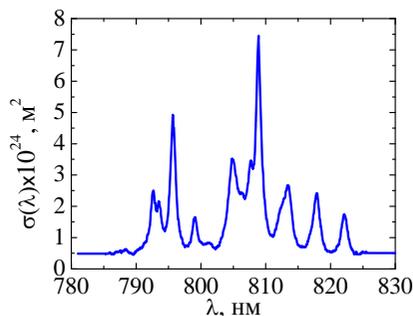


Рис. 1. Сечение поглощения $\sigma(\lambda)$ кристалла $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$

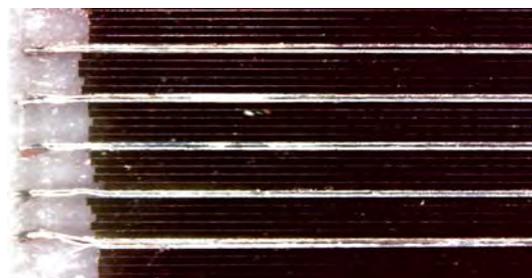


Рис. 2. Фотография фрагмента излучающей области ЛДР

В качестве оптической накачки для лазерных генераторов предлагается использовать ЛДР СЛМ-П-2Н специально разработанные ОАО НПП «Инжект» по заказу 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 $9,5 \times 5$ 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/см². Эффективность конверсии η_M мощности электрического питания в мощность оптического излучения составляет 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. Схема измерительного стенда представлена на рис.3.

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 пироэлектрическим сенсором Ophir PE-50.

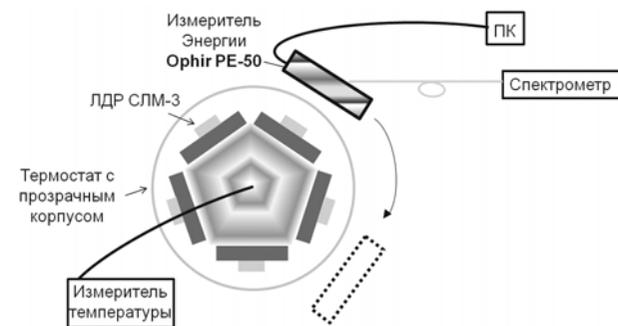


Рис. 3. Схема измерительного стенда

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 изменением 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.

Зависимости центральной длины волны спектра и мощности ЛДР от температуры приведены на рис. 5. 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.5б). При температуре 70 °С уменьшение мощности составляет около 15 %.

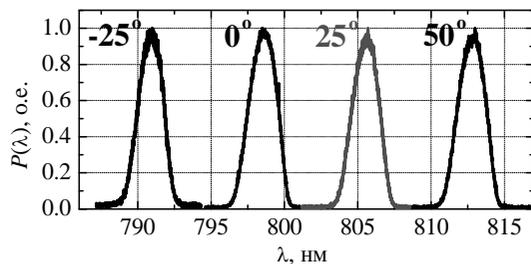


Рис. 4. Спектр $P(\lambda)$ ЛДР СЛМ-3 при различной температуре

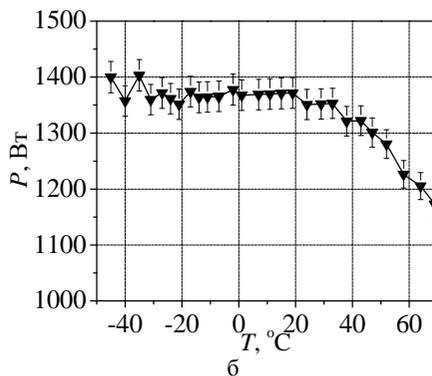
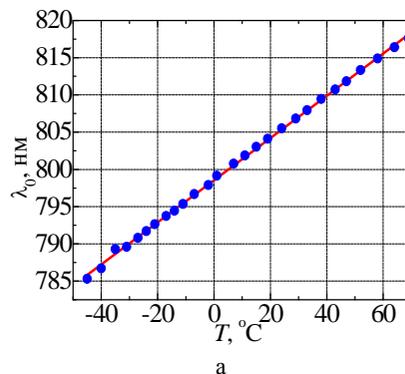


Рис. 5. Зависимости от температуры: а – центральной длины волны спектра, б – мощности ЛДР СЛМ-3

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

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

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

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

В окрестности 800 нм расчетное значение $d\lambda/dT \approx 0,25$ нм/°С, 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

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

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 -25°C до $+75^\circ\text{C}$ при концентрации ионов Nd^{3+} 1 % ат. В рассмотренном диапазоне величина l_{abs} изменяется от 2 до 12 мм.

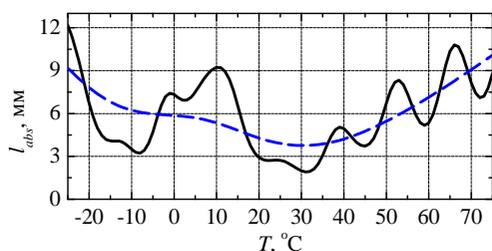


Рис. 6. Длина поглощения l_{abs} излучения ЛДР СЛМ-3 в кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 1 % ат

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 де-

шевле, так как при их изготовлении не требуется точная спектральная селекция составляющих линеек.

Из анализа экспериментальных и теоретических исследований характеристик ЛДР в температурном диапазоне от -50°C до $+50^\circ\text{C}$ определены оптимальные спектральные характеристики ЛДР, для обеспечения эффективного поглощения излучения активным 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.

Литература

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.