

Nd:YAG ЛАЗЕР С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ, РАБОТАЮЩИЙ В ШИРОКОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ДИАПАЗОНЕ БЕЗ АКТИВНОЙ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ

Е. С. Сафронова, А. Е. Дормидонов

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова»

Достигнута работоспособность компактного монолитного Nd:YAG лазера с пассивной модуляцией добротности в широком температурном диапазоне (от минус до плюс 50 °С) при боковой накачке мощными лазерными диодными решетками без активной термостабилизации. Выходные параметры лазерного излучения стабилизированы во всем рассматриваемом температурном диапазоне: энергия импульса составляет 130 ± 10 мДж, длительность импульса – $4,0 \pm 0,5$ нс. Эффективность оптической конверсии изменяется от 12 до 21 % в зависимости от температуры. Частота следования импульсов может задаваться от одиночного выстрела до 50 Гц.

1. Введение

Наносекундные лазеры ближнего ИК-диапазона находят все больше применений в устройствах различного назначения. Для лазерных дальномеров, целеуказателей, систем обнаружения и оптической подсветки объектов требуются компактные лазерные излучатели наносекундных импульсов высокой мощности с энергией в десятки миллиджоулей и частотой повторения 10–20 Гц [1]. Похожие параметры лазерного излучения требуются в системах LIBS спектроскопии, лидарах и для формирования долгоживущих плазменных филаментов в воздухе [2]. В перспективных лазерных системах зажигания жидкостных ракетных двигателей [3], и газо-поршневых двигателях внутреннего сгорания [4] необходимы источники лазерных импульсов с энергией до 100 мДж и изменяемой частотой повторения от одиночного импульса до 50 Гц и более.

Специфика использования лазерных генераторов во внелабораторных условиях накладывает требование на работоспособность излучающих систем в широком температурном диапазоне порядка 100 °С. Условие ограниченного электропотребления и требование мгновенной готовности лазерной системы к работе, как в режиме одиночного импульса, так и на заданной частоте (т. е. в заведомо нестационарном режиме), исключают возможность активной термостабилизации. Другими основными требованиями являются устойчивость лазерного генератора к вибрациям и тряске, компактность, малый вес и себестоимость. Таким образом, разработка лазерного генератора, отвечающего всем перечисленным выше требованиям, является сложной и нетривиальной задачей современной лазерной физики.

Поколение неодимовых твердотельных лазеров с пассивной модуляцией добротности и полупроводниковой накачкой являются наиболее подходящим для решения поставленных задач. Полупроводниковые лазерные диоды характеризуются высокой, до 60 %, эффективностью преобразования мощности электрического питания в мощность оптического излучения. Спектр излучения лазерных диодов возможно эффективно согласовать с линиями поглощения ионов активного кристалла. Однако длина волны излучения лазерного диода значительно зависит от температуры. Смещение длины волны $d\lambda/dT$ составляет до 0,3 нм/°С [4]. В спектре поглощения кристалла Nd:YAG 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, эффективности и работоспособности лазера. Продольная схема накачки позволяет даже при минимальном коэффициенте поглощения можно достичь абсорбции большей части излучения накачки путем увеличения длины активного элемента [1]. Однако геометрическое несоответствие

входного торца активного кристалла и излучающей области массива лазерных диодов накачки, излучение которых имеет несимметричную угловую расходимость, не позволяет достичь требуемого значения выходной энергии лазерных импульсов. Перспективным решением является использование Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) диодов, длина волны излучения которых в несколько раз менее чувствительна к изменению температуры [5], но в настоящее время VCSEL не являются широко доступными.

В настоящем докладе представлен лазерный генератор с поперечной накачкой мощными лазерными диодными решетками (ЛДР). Геометрия осветки лазерного кристалла рассчитана таким образом, что в центре кристалла формируется устойчивая область инверсной населенности, форма которой инвариантна к изменению длины волны ЛДР накачки в широком диапазоне. Это обеспечивает стабильность работы лазерного генератора при температуре от -50 до $+50$ °C.

2. Конструкция лазера

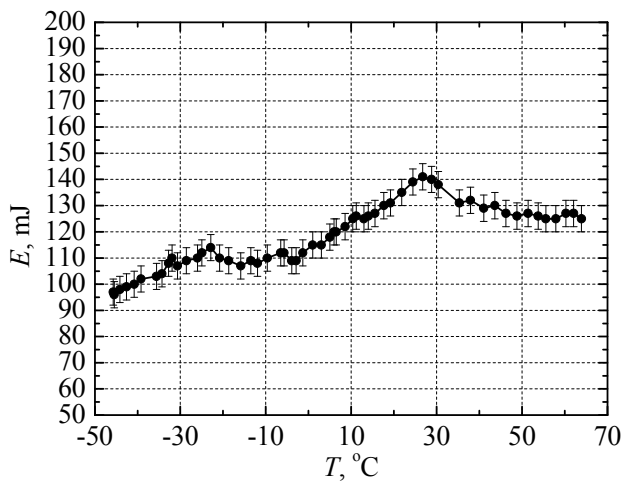
Лазерный генератор представляет собой квантрон с пятью ЛДР накачки СЛМ-3 производства ОАО «Инжект», окружающих композитный лазерный кристалл $\text{Nd}^{3+}:\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ (концентрация активных ионов Nd^{3+} составляет 1 % ат.) диаметром 5 мм и длиной 50 мм. Композитный лазерный кристалл объединяет в себе активную среду оптический резонатор и элементы управления генерацией в виде монолитного элемента, что гарантирует устойчивость лазерного генератора к вибрациям и разьюстировкам. Суммарная мощность оптической накачки составляет 6,25 кВт. Излучение накачки фокусируется в щели отражателя с помощью цилиндрической линзы. Габаритные размеры лазерного генератора без системы формирователя тока накачки ЛДР составляют 50×60 мм.

Ширина спектра ЛДР СЛМ-3 составляет около 2 нм (FWHM) и практически не меняется при изменении температуры ЛДР. Измеренное значение сдвига спектрального максимума излучения ЛДР $d\lambda/dT$ составляет около 0,28 нм/°C. При этом глубина поглощения излучения в активном кристалле в температурном диапазоне от -50 до $+50$ °C изменяется от 2 до 12 мм. Геометрия осветки лазерного кристалла рассчитана таким образом, что в центре кристалла формируется устойчивая область инверсной населенности во всем рассматриваемом температурном диапазоне.

3. Экспериментальные результаты

При комнатной температуре (24 °C) была получена лазерная генерация на длине волны 1,06 мкм при частоте повторения до 50 Гц со следующими параметрами: энергия в импульсе $E_{out} = 130 \pm 2$ мДж, длительность импульса $\tau = 4,0 \pm 0,5$ нс (FWHM), эффективность оптической конверсии составила 18 %. Центральная длина волны излучения ЛДР накачки при этом составляла $\lambda_p = 814$ нм.

Для исследования влияния температуры на параметры излучения лазерного генератора, он был помещен в термостатическую камеру, температура в которой изменялась в диапазоне от -50 до $+50$ °C. На рис. 1 приведена зависимость энергии E_{out} лазерных импульсов от температуры. Видно, что минимальное значение энергии $E_{out} = 126 \pm 2$ мДж достигается при температуре $T \approx -16$ °C. В этой точке длина волны ЛДР накачки близка к значению $\lambda_p = 802$ нм, соответствующему провалу в спектре поглощения кристалла $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$. При температуре $T \approx 29$ °C длина волны излучения ЛДР составляет $\lambda_p = 808,9$ нм и попадает в пик поглощения активного кристалла. В этом случае выходная энергия лазерных импульсов становится максимальной и составляет $E_{out} = 139 \pm 2$ мДж. Следует отметить, что во всем рассмотренном температурном диапазоне относительное изменение энергии импульсов не превышает 20 %. Эффективность оптической конверсии варьируется от 12 до 21 % в зависимости от температуры. Другие параметры лазерных импульсов, такие как длительность импульса, расходимость и форма пучка оставались стабильными во всем рассмотренном температурном диапазоне.



Зависимость энергии E_{out} лазерных импульсов от температуры

Список литературы

1. Goldberg L., Nettleton J., Schilling B., Trussel W., and Hays A. Compact laser sources for laser designation, ranging and active imaging," in Proc. of SPIE 2007, vol. 6552, pp. 65520G-1.
2. Zhou B., Akturk S., Prade B., André Y.-B., A. Houard, Y. Liu, M. Franco, C. D'Amico, E. Salmon, Hao Z.-Q., Lascoux N., and Mysyrowicz A. Revival of femtosecond laser plasma filaments in air by a nanosecond laser // Opt. Express, 2009. 17, 11450-11456.
3. Gubertov A. I., Rebrov S. G., Golikov A. N., Rubinsky V. R., Guterman V.Y., and Kosmacheva V. P. Laser ignition in rocket engines // International Scientific Journal of Astronautics, 2012. 1-2, 73-81.
4. Wintner E., Kofler H., Agarwal A. K., Deneva M. A., Nenchev M. N. Laser Ignition of Engines – A Contribution to Environmental Protection and a Challenge to Laser Technology // ANNUAL JOURNAL OF ELECTRONICS, 2014.
5. Cole B., Hays A., McIntosh C., and Goldberg L. "Wide temperature operation of a VCSEL pumped 355 nm frequency tripled Nd:YAG laser," in SPIE Proc, 2013, pp. 85991L-85991L-7.