

ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

© 2025 г. Академик РАН С. Г. Гаранин¹, А. В. Демьянов^{2,*}, В. Н. Деркач¹, К. Н. Макаров², В. А. Островский², М. И. Пергамент²

Поступило 25.09.2024 г.

После доработки 09.10.2024 г.

Принято к публикации 18.10.2024 г.

Рассматривается применение усилительного модуля, разработанного для импульсно-периодического усилителя, в качестве активной среды импульсно-периодического генератора лазерного излучения непрерывного действия. Описывается созданная компьютерная модель такого генератора. Приводятся результаты вычислительных экспериментов. Показано, что в этом генераторе в режиме свободной генерации можно получить больше 80 % преобразования энергии накачки в когерентное излучение генератора.

Ключевые слова: лазер свободной генерации, импульсно-периодический режим, усилительный модуль

DOI: 10.31857/S2686740025010106, **EDN:** GTDQVC

Рассматриваемый ниже генератор лазерного излучения позволяет реализовать оба режима: импульсный – при длительности накачки меньше 0.2–0.5 мс, и непрерывный – при длительности накачки до 2 мс и выше. Высокоэнергетические лазеры, т.е. лазеры с энергией импульсов в десятки и сотни джоулей [1, 2], равно как и мощные лазеры непрерывной генерации [3], имеют сегодня широкий круг применений, в частности, в промышленности или при ликвидации чрезвычайных ситуаций. В промышленности – прежде всего модификация поверхностной структуры металлических изделий, например, лопаток турбин авиационных двигателей (т.н. “наклеп”), позволяющая значительно увеличить ресурс изделий [4–6]; обработка металлических изделий, такая как сварка, резка, наплавка [7]. А при ликвидации чрезвычайных ситуаций – дистанционное измельчение надстроек при пожарах на газовых скважинах [8, 9]. Эта процедура должна проводиться с расстояния

50–100 м, поскольку тепловое излучение горящих скважин не позволяет подойти ближе.

Принципиальная схема рассматриваемого твердотельного генератора лазерного излучения представлена на рис. 1. Ее ключевым элементом является усилительный модуль [10], состоящий из вакуумной и криогенной камер (ВК, КК), а также шести Yb: YAG активных элементов (АЭ) толщиной 0.85 см с содержанием ионов иттербия 0.4, 0.6, 1.0, 1.0, 0.6 и 0.4 ат. %. Модуль дополнен неустойчивым телескопическим конфокальным резонатором (Z_1 , Z_2).

Сборка из шести АЭ (в дальнейшем сборка) накачивается с двух сторон излучением диодной накачки мощностью 2×200 кВт (DH_1 , DH_2). Сечение накачиваемой области 8×8 см². Параметры диодной накачки приведены в табл. 1. В расчетной модели параметры генератора лазерного излучения рассматриваются на протяжении одного импульса двусторонней накачки длительностью до 2 мс. Качество сборки, охлаждаемой гелием температурой 100 К при давлении 11 атм, демонстрирует рис. 2. Волновой фронт измерен интерферометром ФТИ – 100 (ЗАО “Дифракция”, г. Новосибирск). Цель измерения – определение влияния потоков гелия, охлаждающих АЭ, на искажение волнового фронта.

Как видно из рис. 2, термооптические искажения волнового фронта сборки в накачиваемой

¹ Российский федеральный ядерный центр
Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики,
Институт лазерно-физических исследований,
Саров, Нижегородская область, Россия

² Государственный научный центр Российской Федерации
Троицкий институт инновационных и термоядерных
исследований, Троицк, Москва, Россия
* E-mail: demyanov@triniti.ru

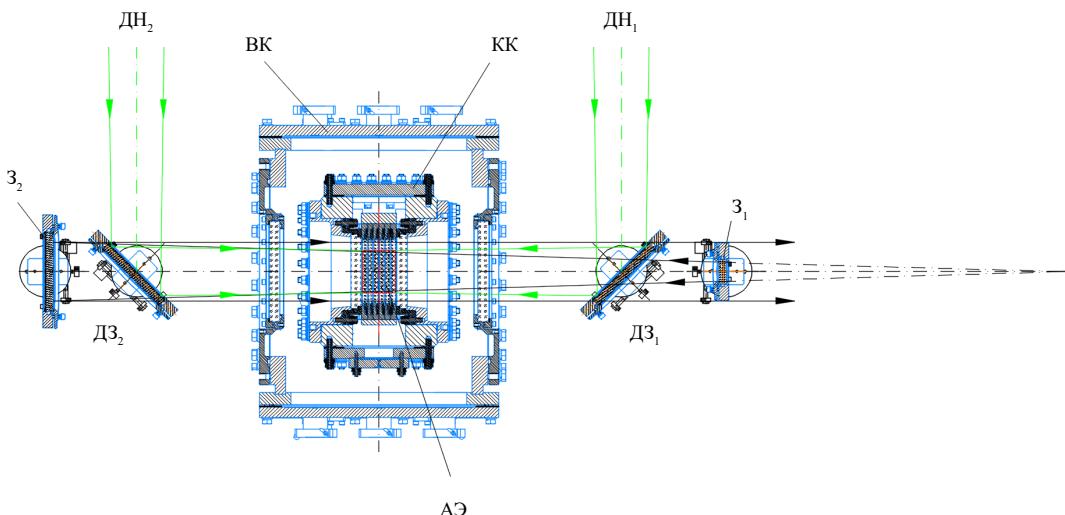


Рис. 1. Твердотельный лазер с диодной накачкой: З₁, З₂ – зеркала резонатора; ВК – вакуумная камера, КК – криогенная камера; ДН₁, ДН₂ – излучение диодной накачки; ДЗ₁, ДЗ₂ – дихроичные зеркала; АЭ – активные элементы (Yb: YAG).

Таблица 1. Параметры диодной накачки генератора

Параметр	Значение
Длина волны излучения накачки, нм	$\lambda_{dp} = 940 \pm 3$
Ширина спектральной линии излучения накачки, нм	$\Delta\lambda_{dp} \leq 5$
Длительность импульса тока накачки, мс	$\tau_{dp} = 0.3 \div 2$
Частота следования импульсов тока накачки	От однократного до 10 Гц
Продолжительность работы, ч	24

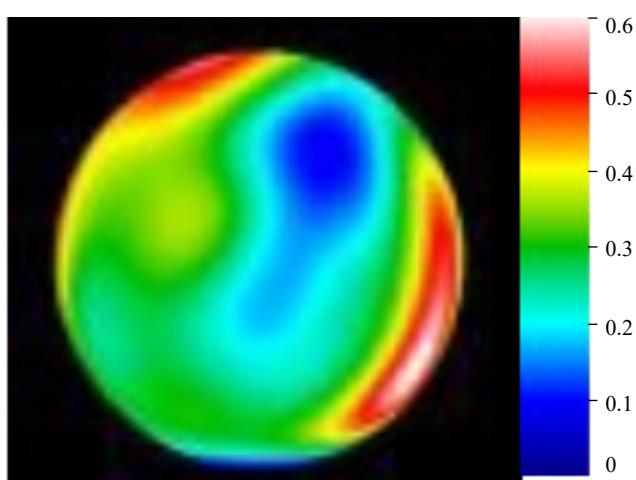


Рис. 2. Волновой фронт сборки, охлаждаемой гелием. Шкала справа – в длинах волн ($\lambda = 632$ нм). Диаметр накачиваемой области составляет 80 % от диаметра АЭ.

области не превышают 0.2λ и в стационарном режиме могут быть компенсированы либо внешней компенсирующей пластиной, либо адаптивным зеркалом, как это реализуется в работах [11, 12].

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАТОРА

В настоящей работе предложена численная модель дискового криогенного Yb: YAG генератора с диодной накачкой для генерации импульсов высокой энергии. В модели вместо неустойчивого телескопического конфокального резонатора рассматривается плоскопараллельный резонатор с одним глухим зеркалом и выходным зеркалом с коэффициентом отражения R . За основу взята модель дискового криогенного Yb: YAG усилителя [13], в которой поглощение излучения накачки и создание инверсии

рассматривается в одномерном (вдоль оптической оси) приближении, учитывающем различное содержание ионов иттербия в каждом АЭ. В поперечном оптической оси направлении предполагается однородное распределение интенсивности излучения накачки. Температура АЭ фиксирована. По мере распространения через лазерную среду форма спектра пучка накачки меняется, и этот эффект также включен в модель. Усиление спонтанного излучения (УСИ), ограничивающее инверсию, в модели рассчитывается для реальной формы спектра спонтанного излучения в трехмерной геометрии, соответствующей конструкции усилителя, причем для каждого АЭ УСИ рассчитывается в соответствии с вложенной в него энергией. Большая часть УСИ, падающая на поверхность АЭ под углами, превышающими угол полного внутреннего отражения, поглощается в кладдинге, окружающем по периметру накачиваемую область, и не зависит от количества АЭ. Остальная часть излучения проходит через несколько АЭ, поэтому интенсивность выходящего из накачиваемой области излучения зависит от ее длины вдоль оптической оси.

Входными параметрами модели являются: количество АЭ, их размер и расположение, концентрация ионов иттербия в каждом АЭ; температура АЭ; длина волны, спектр, длительность и мощность накачки; спектры поглощения и спонтанного излучения, сечения поглощения и вынужденного излучения на длинах волн излучения накачки и выходного импульса. Причем спектры и сечения поглощения и вынужденного излучения зависят от температуры. В расчетах в данной работе используются полученные нами сечения поглощения и спонтанного излучения для температур 100, 125, 150, 175 К, но имеются данные и для 200, 225, 250 и 300 К [10]. Предлагается постоянная мощность накачки заданной длительностью. Рассчитываются временные зависимости распределений вдоль оптической оси инверсии населеностей, вложенной и запасенной энергии, коэффициента усиления слабого сигнала. Зная запасенную энергию, можно найти зависимости энергии выходного импульса от энергии входного импульса при произвольном количестве проходов усилителя для различных суммарных потерь в канале усиления.

В отличие от моделирования усилителя, в котором накопленную в АЭ за время накачки энергию “снимает” импульс внешнего задающего генератора, здесь импульс излучения рождается в активной среде из спонтанного излучения и усиливается благодаря обратной связи

в резонаторе. Поэтому модель усилителя [13] дополнена уравнением (3) на плотность фотонов излучения n_{ph} , а в уравнение для относительной инверсии (2) добавлены потери на уходящее из резонатора излучение:

$$\frac{\partial \Phi_P^{+,-}(t, \lambda, z)}{\partial z} = -N_{Yb}(z) [(1 - \beta(z))\sigma_a(\lambda) - \beta(z)\sigma_e(\lambda)] \Phi_P^{+,-}(t, \lambda, z), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \beta(z)}{\partial t} &= \int [(1 - \beta(z))\sigma_a(\lambda) - \beta(z)\sigma_e(\lambda)] (\Phi_P^+(t, \lambda, z) + \\ &+ \Phi_P^-(t, \lambda, z)) d\lambda - \frac{\beta(z)M_{ASE}(t, \beta(z))}{\tau} - \frac{cg_{av}n_{ph}(t)}{N_{Yb}(z)}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_{ph}(t)}{\partial t} = -\frac{L_g}{L_c} \left[c(g_{av} - \alpha_{th})n_{ph}(t) + \frac{\langle N_U(z) \rangle_z}{\tau} \Omega \right], \quad (3)$$

где $\Phi_P^{+,-}(t, \lambda, z)$ – интенсивность излучения двухсторонней накачки в фотонах, $\beta(z) = N_U(z)/N_{Yb}(z)$ – относительная инверсия, $N_{Yb}(z)$ и $N_U(z)$ – полная концентрация Yb^{3+} и населенность верхнего уровня, $\sigma_e(\lambda)$ и $\sigma_a(\lambda)$ – сечения вынужденного излучения и поглощения, τ – время жизни возбужденного состояния, c – скорость света, $g_{av} = \langle g(z) \rangle_z$ – усредненный по оптической оси коэффициент усиления, $n_{ph}(t) = \frac{I(t)}{c \cdot h\nu_e \cdot L_g} -$ плотность фотонов в резонаторе, $\alpha_{th} = \frac{\ln(1/R)}{2L_g} -$ потери в резонаторе, R – коэффициент отражения выходного зеркала, $I(t)$ – интенсивность излучения в резонаторе, $h\nu_e$ – энергия фотона излучения, $L_g = z_m$ и L_c – длина усиления, равная длине поглощения и расстояние между зеркалами, а $\Omega = \frac{S_p}{4\pi(L_c)^2}$ – телесный угол, под которым видно выходное зеркало из центра глухого зеркала. Интенсивность накачки на торцах усилителя задается мощностью импульса накачки $P(t)$ и его спектром $f_p(\lambda)$ ($\int f_p(\lambda)d\lambda = 1$):

$$\Phi_P^+(t, \lambda, 0) = \Phi_P^-(t, \lambda, z_m) = \frac{P(t) \cdot f_p(\lambda)}{h\nu_p S_p},$$

где $h\nu_p$ – энергия фотона накачки, S_p – сечение луча накачки и $z_m = N_{A\text{Э}}d$ – длина поглощения $N_{A\text{Э}}$ АЭ толщиной d . Выходная мощность излучения находится из выражения

$$W_{out}(t) = \alpha_{th} \cdot I(t) \cdot S_p = \alpha_{th} \cdot c \cdot h\nu_e \cdot n_{ph}(t) \cdot L_g \cdot S_p.$$

Первое слагаемое в правой части уравнения (2) определяет увеличение инверсии из-за поглощения накачки, второе слагаемое – уменьшение инверсии из-за спонтанного распада, включая УСИ (фактор

M_{ASE}). Уменьшение инверсии за счет генерируемого излучения описывает третью слагаемое.

Входными параметрами предложенной модели (наряду с параметрами модели усилителя [13]) являются потери в резонаторе α_{th} и расстояние между зеркалами L_c , поэтому далее представлены результаты исследования влияния этих параметров на характеристики лазера. Заметим, что в модели рассматривается плоскопараллельный резонатор с одним глухим зеркалом как наиболее простой. Однако результаты моделирования

усилительных и энергетических характеристик можно использовать и для других типов резонаторов, с такими же потерями и расстоянием между зеркалами (табл. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Зависимости коэффициента усиления и выходной мощности от времени накачки представлены на рис. 3 для разных потерь и расстояний

Таблица 2. Параметры резонаторов, обеспечивающие заданные потери α_{th}

$\alpha_{th}, \text{см}^{-1}$	0.005	0.035	0.068	0.136	0.216
Коэффициент отражения выходного зеркала плоскопараллельного резонатора, $R, \%$	95	70	50	25	11
Неустойчивый конфокальный резонатор, M	1.026	1.2	1.41	2	3

Примечание. Здесь M – однопроходный коэффициент увеличения, который для неустойчивого конфокального резонатора равен $M = R_2/R_1$ (см. рис. 1).

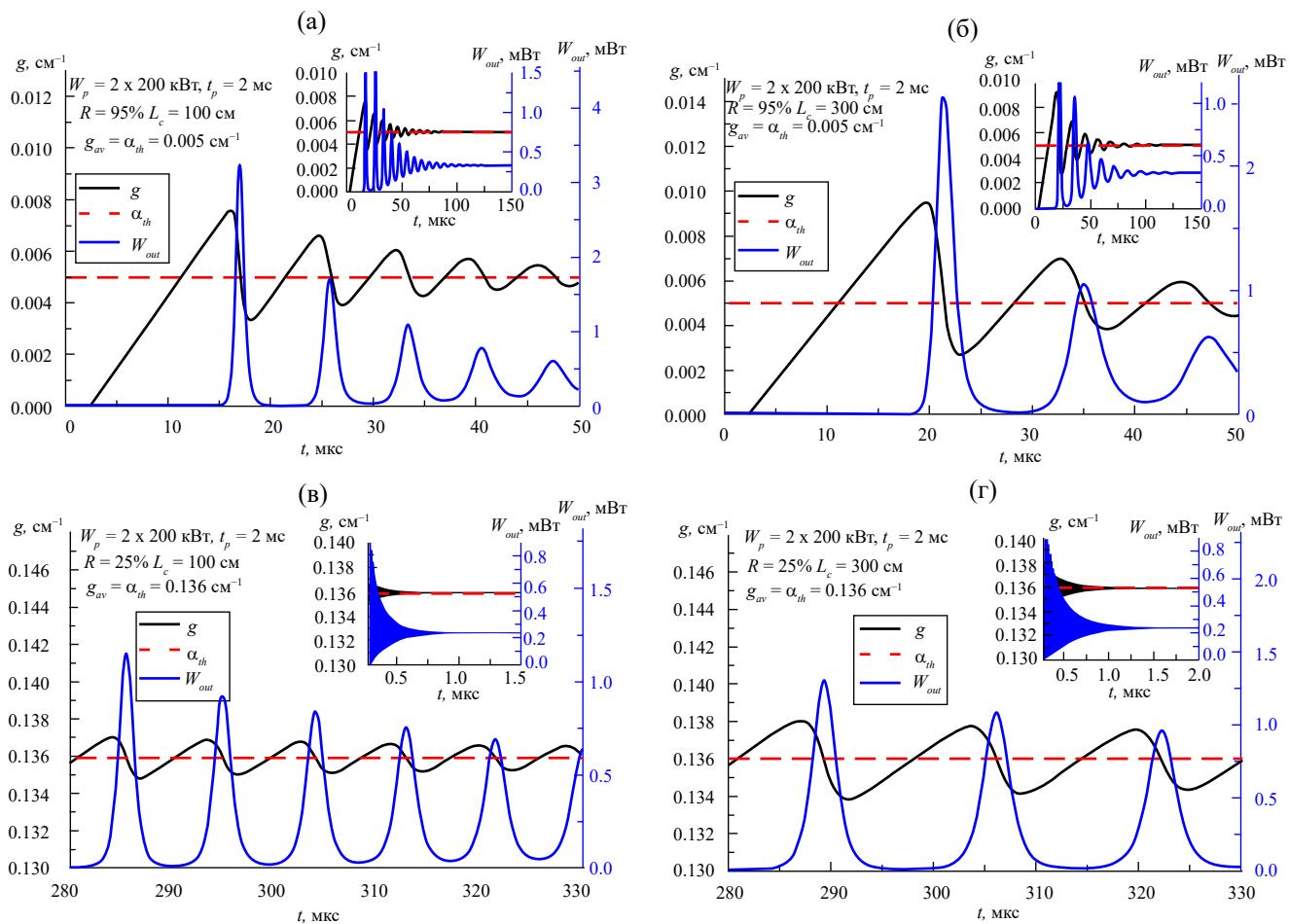


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления и выходной мощности от времени накачки. (а, б) – $\alpha_{th} = 0.005 \text{ см}^{-1}$ ($R = 95\%$); (в, г) – $\alpha_{th} = 0.136 \text{ см}^{-1}$ ($R = 25\%$); (а, в) – $L_c = 100$; (б, г) – $L_c = 300 \text{ см}$. Красная пунктирная прямая – порог генерации.

между зеркалами в резонаторе. Качественное поведение зависимостей одинаково, поэтому, для примера, рассмотрим рис. 3а. Как видно, по мере накачки коэффициент усиления в АЭ растет и на времени 11 мкс достигает порогового значения для начала генерации. С этого момента времени начинает расти плотность фотонов в резонаторе, причем затравкой для этого процесса является спонтанное излучение. Одновременно появляется выходное излучение, мощность которого экспоненциально нарастает. Коэффициент усиления (пока плотность фотонов мала) продолжает расти, достигая максимума, когда скорость накачки верхнего уровня сравняется со скоростью расселения за счет вынужденного излучения. Затем коэффициент усиления начинает уменьшаться, но остается еще выше порогового значения, поэтому выходное излучение продолжает расти. Уменьшение мощности выходного излучения начинается, когда усиление становится меньше порогового значения.

Дальше процесс повторяется, но уже не с нулевого значения усиления, поэтому требуется меньше времени для достижения порога. Однако при этом в АЭ накапливается меньше энергии, превышающей пороговый уровень, и, соответственно, меньше максимальная мощность каждого последующего выходного импульса вплоть до выхода на стационар, когда мощность выходного излучения постоянна, а коэффициент усиления равен потерям. С увеличением потерь в резонаторе от $\alpha_{th} = 0.005 \text{ см}^{-1}$ ($R = 95\%$) до 0.136 см^{-1} ($R = 25\%$) (см. рис. 3а–г) увеличивается как время до начала генерации от ~ 17 до ~ 280 мкс, так и время выхода на стационар от ~ 150 мкс до ~ 1 – 1.5 мс. Причем увеличение расстояния между зеркалами на эти времена влияет слабо, однако приводит к заметному возрастанию времени между импульсами.

На рис. 4а–г приведены доли энергии накачки, идущие на генерируемое излучение, усиленное спонтанное излучение и нагрев

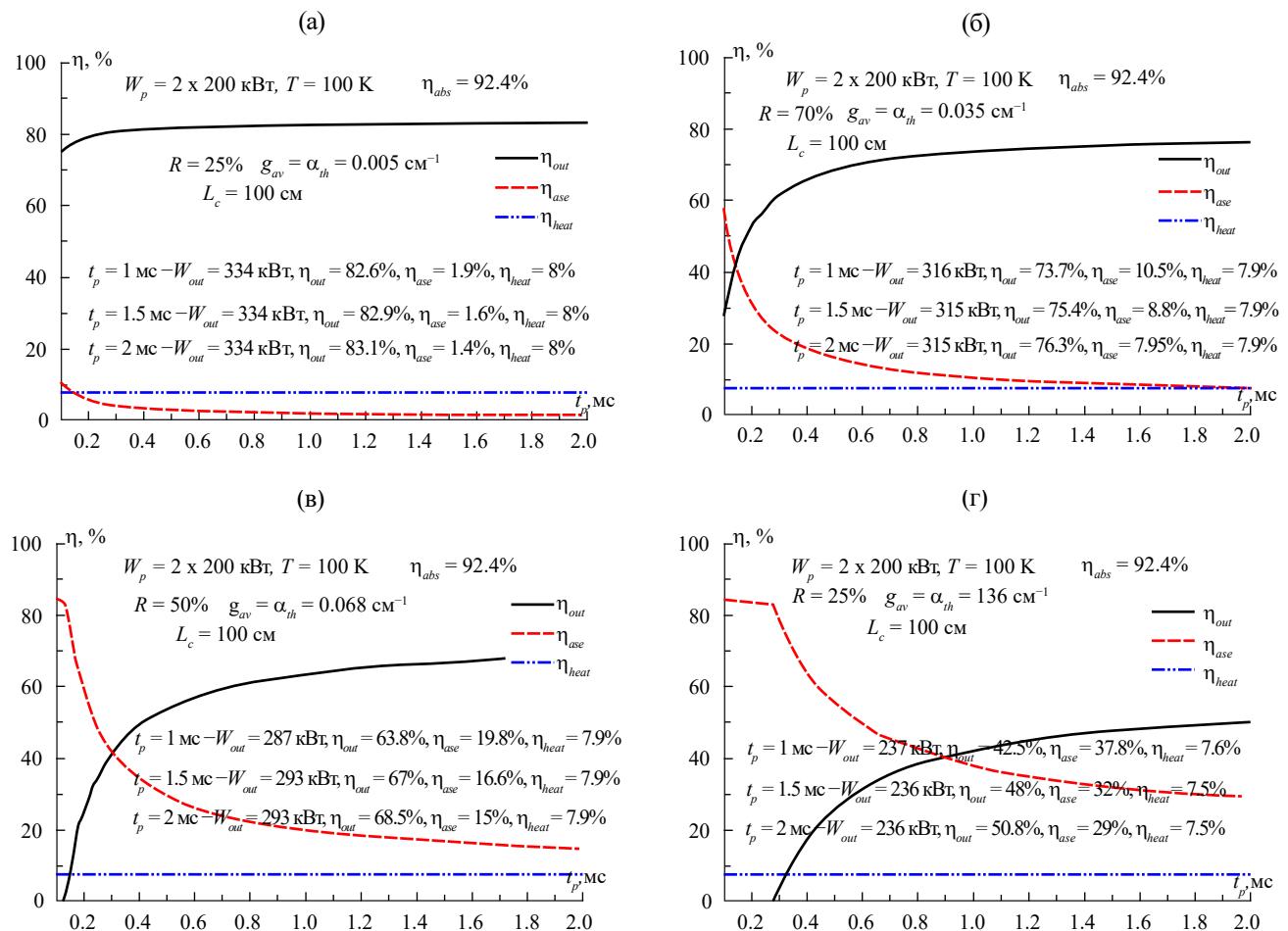


Рис. 4. Доли энергии накачки, идущие на генерируемое излучение, усиленное спонтанное излучение и нагрев накачиваемой области от длительности накачки для $L_c = 100 \text{ см}$. (а) – $\alpha_{th} = 0.005 \text{ см}^{-1}$ ($R = 95\%$), (б) – $\alpha_{th} = 0.035 \text{ см}^{-1}$ ($R = 70\%$), (в) – $\alpha_{th} = 0.068 \text{ см}^{-1}$ ($R = 50\%$), (г) – $\alpha_{th} = 0.136 \text{ см}^{-1}$ ($R = 25\%$).

накачиваемой области от длительности накачки для расстояния между зеркалами $L_c = 100$ см и потерь в резонаторе, меняющихся от $\alpha_{th} = 0.005 \text{ см}^{-1}$ ($R = 95\%$) до 0.136 см^{-1} ($R = 25\%$). На рис. 4а–г также приведены значения мощности излучения и долей энергии накачки, идущих на генерируемое излучение, усиленное спонтанное излучение и нагрев накачиваемой области в момент окончания накачки для длительности накачки 1.0, 1.5 и 2.0 мс.

ВЫВОДЫ

Показана возможность преобразования энергии накачки в лазерное излучение с КПД, превосходящим 80 %.

КПД лазера растет с увеличением длительности накачки и уменьшением потерь в резонаторе за счет уменьшения спонтанного излучения и достигает для $t_p = 2$ мс 83.1 % при $R = 95\%$ и 76.3 % при $R = 70\%$. При этом мощность генерируемого излучения на стационарной стадии равна 334 и 315 кВт.

При частоте накачки 10 Гц длительностью 2 мс средняя мощность генерации достигает значения 6.65 кВт при $R = 95\%$ и 6.1 кВт при $R = 70\%$. Средняя мощность генерации может быть увеличена в n раз при увеличении в n раз длительности накачки или частоты ее генерации.

Генерация реализуется в виде затухающих импульсов, период которых увеличивается с увеличением расстояния между зеркалами.

Доля энергии накачки, идущая в спонтанное излучение, уменьшается с увеличением длительности накачки и уменьшением потерь в резонаторе и равна 1.4 % для $R = 95\%$ и 8 % для $R = 70\%$.

Доля энергии накачки, идущая на нагрев накачиваемой области, не зависит от потерь в резонаторе и расстояния между зеркалами и равна 8 %.

Спонтанное излучение поглощается в кладдинге и также дает вклад в нагрев. Поэтому суммарная доля энергии накачки, идущая в тепло, при максимальной длительности накачки увеличивается с 9.4 % для $R = 95\%$ до 16 % для $R = 70\%$.

В импульсно-периодическом режиме с частотой 10 Гц для поддержания заданной температуры необходим холодильник мощностью 0.55 и 0.97 кВт, соответственно для $R = 95\%$ и 70 %.

БЛАГОДАРНОСТИ

В память о наставнике, учителе и прекрасном исследователе.

Михаил Иосифович Пергамент был замечательным педагогом, выдающимся специалистом и талантливым ученым в различных областях науки и техники, лауреатом Государственной премии СССР, заслуженным деятелем науки и техники РФ, являлся членом Научного Совета РАН по проблеме “Физика высокотемпературной плазмы”. Под его руководством и им лично было опубликовано более сотни работ, последние из которых относились к области, связанной с лазерной физикой. Благодаря бескрайнему уму, фантазии и опыту он всегда находил варианты добиться результата, даже в безвыходной ситуации. К величайшему сожалению, это последняя работа, выполненная под руководством и при непосредственном участии Михаила Иосифовича Пергамента.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного контракта от 21.04.2023 г. № Н.4к.241.09.23.1068.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликтов интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mason P., Banerjee S., Smith J. et al. Efficient Operation of a High Energy Yb: YAG DPSSL Amplifier // Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference. 2019. (CLEO/Europe-EQEC). <https://doi.org/10.1109/cleo-eqec.2019.8871657>
2. Sekine T., Kurita T., Hatano Y. et al. 253 J at 0.2 Hz, LD pumped cryogenic helium gas cooled Yb: YAG ceramics laser // Opt. Express. 2022. V. 30. P. 44385. <https://doi.org/10.1364/OE.470815>
3. Евтихьев Н.Н., Мясников Д.В. Волоконные лазеры и их применение в индустрии и медицине // Лазеры в науке, технике, медицине. 2023. С. 151–156.
4. Azhari A., Sulaiman S., Prasada Rao A.K. A review on the application of peening processes for surface treatment // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. February 2016. 114(1):012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/114/1/012002>
5. Jiajun Wu, Zhihu Zhou, Xingze Lin, Hongchao Qiao, Jibin Zhao, Wangwang Ding. Improving the Wear and Corrosion Resistance of Aeronautical Component Material by Laser Shock Processing: A Review // Materials. 2023. V. 16. № 11. 4124. <https://doi.org/10.3390/ma16114124>

6. Łukasz Łach. Recent Advances in Laser Surface Hardening: Techniques, Modeling Approaches, and Industrial Applications // Crystals. 2024. V. 14. № 8. P. 726.
<https://doi.org/10.3390/cryst14080726>
7. Zhang Ya., Wang C., Xu W., Zhang X. et al. Laser Cutting of Titanium Alloy Plates: A Review of Processing, Microstructure, and Mechanical Properties // Metals. 2024. V. 14. № 10. 1152.
<https://doi.org/10.3390/met14101152>
8. Парафонова В. Арктические маршруты лазера // Наука в России. 2014. № 2. С. 20–27.
9. Блохин О.А., Востриков В.Г., Красюков А.Г. Мобильный лазерный комплекс для аварийно-восстановительных работ в газовой промышленности // Газовая промышленность. 2001. № 12. С. 33–34.
10. Гаранин С.Г., Деркач В.Н., Макаров К.Н., Островский В.А., Пергамент М.И., Путилин М.В., Сизмин Д.В. Современные тенденции создания вы-
 сокоэнергетических импульсно-периодических лазеров непрерывной генерации // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2023. Т. 513. № 1. С. 18–28.
<https://doi.org/10.1134/S1028335823120029>
11. Sun L., Guo Y., Shao C. et al. 10.8 kW, 2.6 times diffraction limited laser based on a continuous wave Nd: YAG oscillator and an extra-cavity adaptive optics system // Opt. Lett. 2018. V. 43. № 17. P. 4160–4163.
<https://doi.org/10.1364/OL.43.004160>
12. Guo Y., Peng Q., Bo Y., et al. 24.6 kW near diffraction limit quasi-continuous-wave Nd: YAG slab laser based on a stable–unstable hybrid cavity // Opt. Lett. 2020. V. 45. № 5. P. 1136–1139.
<https://doi.org/10.1364/OL.385387>
13. Демьянов А.В., Макаров К.Н., Островский В.А., Пергамент М.И. Усиление в среде Yb: YAG в диапазоне криогенных температур // Письма в ЖТФ. 2024. Т. 50. № 14. С. 29–32.
<https://doi.org/10.61011/TPL.2024.07.58733.19799.9799>

CONTINUOUS PULSED-PERIODIC LASER RADIATION GENERATOR

Academician of the RAS S. G. Garanin^a, A. V. Demyanov^b, V. N. Derkach^a,
K. N. Makarov^b, V. A. Ostrovskiy^b, M. I. Pergament^b

^aThe Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute
of Experimental Physics, Institute of Laser Physical Research,
Sarov, Nizhny Novgorod Region, Russia

^bState Research Center of the Russian Federation Troitsk Institute
for Innovation and Fusion Research, Troitsk, Moscow, Russia

The application of an amplifying module developed for a pulse-periodic amplifier as an active medium of a pulse-periodic continuous-wave laser radiation generator is considered. The created computer model of such a generator is described. The results of computational experiments are presented. It is shown that in this generator in the free-running mode it is possible to obtain more than 80% of the pump energy conversion into coherent radiation of the generator.

Keywords: free-running laser, pulse-periodic mode, amplifying module