

МОЩНЫЙ КОМПАКТНЫЙ Nd:YAG-ЛАЗЕР

© 2009 г. В. В. Назаров, канд. техн. наук; Л. В. Хлопонин; В. Ю. Храмов, доктор техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: v_v_nazarov@mail.ru

Разработан компактный импульсный Nd:YAG-лазер с ламповой накачкой, генерирующий цуги импульсов на длинах волн 1,064 и 0,532 мкм. Проведена оптимизация оптической схемы резонатора и параметров выходного градиентного зеркала для достижения квазиравномерного поперечного распределения выходного излучения. Проведена оптимизация режимов накачки, позволившая достичь суммарной энергии лазерного излучения порядка 1 Дж в цуге из 4-х импульсов при частоте следования 5 Гц в течение одного импульса накачки. Малые габариты лазера (объем лазерного излучателя порядка 150 см³) позволяют его успешно использовать в лазерной медицине.

Ключевые слова: импульсный лазер, ламповая накачка, неустойчивый резонатор, пассивный затвор.

Коды OCIS: 140.0140 140.3530

*Поступила в редакцию 26.03.2009***Введение**

Излучение твердотельных лазеров в области ближнего инфракрасного диапазона широко используется в технике и лазерной медицине [1–3]. В лазерной косметологии применение лазерного излучения на длинах волн 1,064 мкм и 0,532 мкм позволяет эффективно удалять татуировки и пигментные пятна [3]. К лазерным излучателям предъявляются особые требования, касающиеся как энергетических характеристик излучения (средняя мощность, энергия), так и пространственных характеристик излучения (равномерность поперечного распределения интенсивности излучения, расходимость), а также габаритных характеристик излучателей. Характерная плотность энергии импульсного излучения этих лазеров составляет примерно 10 Дж/см² [3]. Оптимальное для воздействия на кожу распределение плотности энергии в ближней зоне должно быть квазиравномерным. Дополнительные требования, связанные с необходимостью размещения лазерного излучателя в манипуляторе лазерной косметологической установки, накладывают ограничения на габариты устройства: объем, занимаемый лазерным излучателем, должен быть порядка 100–120 см³.

Исходя из требований, предъявляемых к характеристикам лазерного излучения, была проведена сравнительная оценка типов оптиче-

ских схем резонаторов по следующим основным критериям: обеспечение необходимого уровня энергии, расходимости и длительности импульса генерации, минимальная база резонатора, отсутствие “горячих точек” в распределении излучения внутри и вне резонатора.

С точки зрения наилучшего заполнения лазерным излучением активного элемента и увеличения энергии генерации наиболее перспективными вариантами являются режим многомодовой генерации в устойчивом резонаторе или использование неустойчивого резонатора [4]. Минимальную расходимость выходного излучения могут обеспечить как устойчивый резонатор при условии квазиодномодовой генерации, так и неустойчивый резонатор. Кроме того, в отличие от устойчивого неустойчивый резонатор позволяет минимизировать влияние внутрирезонаторных термооптических неоднородностей на расходимость выходного излучения [5]. В устойчивом резонаторе наименьшую длительность импульса лазерного излучения проще получить в близком к одномодовому режим генерации, поскольку при многомодовом режиме длительность импульса увеличивается вследствие дифференциации в потерях для различных мод. Из вариантов неустойчивого резонатора минимальную длительность импульса может обеспечить резонатор положительной ветви с наиболее короткой базой. Для этих двух типов резонаторов характерно от-

существование “горячих точек” в пространственном распределении излучения внутри резонатора. Наиболее короткой базой из рассмотренных типов резонаторов обладают многомодовый вариант устойчивого резонатора, характеризующийся относительно большими числами Френеля, и неустойчивый резонатор положительной ветви [5]. В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что наиболее перспективным в соответствии с выбранными критериями является неустойчивый резонатор положительной ветви.

Для лазера с неустойчивым резонатором характерно наличие дифракционных колец в поперечном распределении интенсивности выходного излучения. Использование градиентного зеркала в качестве выходного отражателя позволяет предотвратить появление дифракционных колец, а также улучшить селекцию поперечных мод при условии сокращения базы резонатора. Дополнительным условием, позволяющим сократить базу резонатора монопольного лазера, может являться использование вместо электрооптических модуляторов добротности пассивных затворов, обладающих существенно меньшими габаритами.

Оптимизация схемы Nd:YAG-лазера с неустойчивым резонатором

Свойства неустойчивого резонатора твердотельных лазеров в значительной мере зависят от оптической силы тепловой линзы в активном элементе. В связи с этим для ее оценки была проведена серия экспериментов, позволившая с достаточной точностью определить диапазон ее изменения при варьировании средней мощности накачки. Результаты измерений показали, что оптическая сила тепловой линзы находится в интервале $0,4\text{--}0,5\text{ м}^{-1}$ при изменении средней мощности накачки в пределах рабочего интервала $300\text{--}400\text{ Вт}$.

Параметры оптических элементов, входящих в состав оптической схемы неустойчивого резонатора, в частности, радиусы кривизны зеркал резонатора, были определены в результате компьютерной оптимизации с учетом оптической силы тепловой линзы. Радиусы кривизны зеркал резонатора были определены в зависимости от заданного значения коэффициента увеличения неустойчивого резонатора. С целью снижения потерь резонатор имел небольшой коэффициент увеличения, который находился в диапазоне $M = 1,1\text{--}1,3$ при изменении оптической силы тепловой линзы. Значения радиусов кривизны

зеркал были определены в результате компьютерного моделирования с использованием аппарата лучевых матриц. Компьютерная модель основана на применении аналитической процедуры, позволяющей с учетом существования тепловой линзы в активном элементе, определить параметры эквивалентной схемы неустойчивого резонатора с заданным коэффициентом увеличения. Процедура сводится к решению системы трех алгебраических уравнений, включающей условие, связывающее параметры оптических элементов, оптическую силу тепловой линзы и коэффициент увеличения резонатора

$$\begin{aligned} L_1 \left(-\frac{2}{R_1} (1 - DL_1) - 2D \right) &= -\frac{2L_{1e}}{R_{1e}} \\ (1 - DL_1) \left(-\frac{2}{R_1} (1 - DL_1) - 2D \right) &= -\frac{2}{R_{1e}} \\ \frac{2L_{1e}}{R_{1e}} &= \frac{M-1}{M} - \frac{2L_2}{R_{1e}}, \end{aligned}$$

где L_1, L_2 – расстояния от главных плоскостей тепловой линзы до “глухого” и выходного зеркал реального резонатора соответственно, L_{1e}, R_{1e} – расстояние от главных плоскостей тепловой линзы до “глухого” зеркала и радиус кривизны “глухого” зеркала эквивалентного резонатора соответственно, D, M – оптическая сила тепловой линзы и коэффициент увеличения резонатора соответственно.

Данная процедура позволяет при помощи простых соотношений получить параметры оптических элементов для реального и эквивалентного резонаторов при сохранении требуемого коэффициента увеличения резонатора. Процедура предусматривает выполнение следующих действий:

1. Определение исходных данных

M – коэффициент увеличения эквивалентного неустойчивого резонатора,

$L = L_1 + L_2$ – оптическая база резонатора, определяемая габаритными требованиями, предъявляемыми к излучателю,

D – оптическая сила тепловой линзы в активном элементе.

2. Расчет параметров эквивалентного неустойчивого резонатора

$$R_{1e}^{-1} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{M} \right) \left(L_2 + \frac{L_1}{1 - DL_1} \right)^{-1},$$

$$L_{1e} = L_1 R_{1e} \left(\frac{1 - DL_1}{R_1} + D \right).$$

3. Расчет радиусов кривизны “глухого” зеркала R_1 и выходного зеркала R_2 реального неустойчивого резонатора

$$R_1^{-1} = \frac{1}{1 - DL_1} \left(\frac{R_{1e}^{-1}}{1 - DL_1} - D \right), \quad R_2 = -R_{1e}/M.$$

В процессе расчета с использованием данной процедуры были определены радиусы кривизны зеркал резонатора, а также оптимальный коэффициент увеличения неустойчивого резонатора. При оптической силе тепловой лизны порядка 0,4 дптр и коэффициенте увеличения 1,3 радиусы кривизны “глухого” и выходного зеркал резонатора составили 0,66 м и 0,5 м соответственно.

С целью обеспечения квазиравномерного поперечного распределения выходного излучения в ближней зоне были определены параметры профиля коэффициента отражения выходного градиентного зеркала. На рис. 1 приведена теоретическая кривая зависимости коэффициента отражения выходного градиентного зеркала от поперечной координаты, а также экспериментально полученная кривая этой зависимости. Теоретическая кривая зависимости коэффициента отражения от поперечной координаты определялась выражением $R(x) = R_0 \exp[-(x/w_a)^n]$, где $R_0 = 0,25$ – максимальное значение коэффициента отражения выходного зеркала, $w_a = 2,5$ мм – поперечный размер отражающего покрытия, $n = 3$ – показатель степени супергауссова профиля коэффициента отражения. С целью достижения максимальных значений выходной энергии генерации максимальное значение коэффициента отражения было оптимизировано при

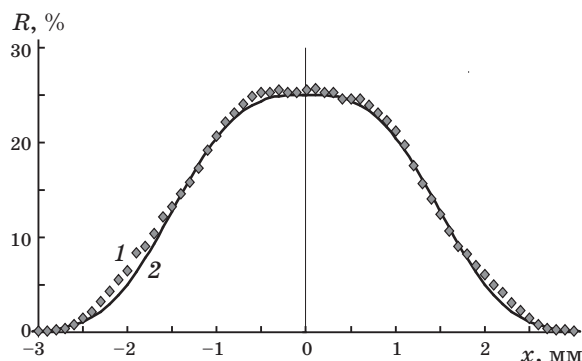


Рис. 1. Поперечное распределение коэффициента отражения выходного зеркала резонатора. 1 – экспериментальные данные, 2 – теоретическая кривая.

номинальной мощности накачки с учетом начальных и остаточных потерь, вносимых пассивным затвором. В качестве пассивных затворов использовались оптические элементы, изготовленные из YAG:Cr (начальный коэффициент пропускания 10–12%, контраст ≈ 8) и YSGG:Cr (начальный коэффициент пропускания 13–16%, контраст ≈ 6).

Экспериментальные исследования характеристик лазерной генерации

В ходе проектирования моноимпульсного твердотельного лазерного излучателя с ламповой накачкой была реализована схема неустойчивого резонатора (рис. 2), включающая “глухое” и выходное зеркала, активный элемент Nd:YAG, пассивный затвор, поляризатор для получения линейно-поляризованного лазерного излучения. На выходе резонатора находится нелинейный кристалл титанил-фосфата калия (КТР), предназначенный для получения излучения второй гармоники.

При создании макета моноимпульсного лазерного излучателя проводился контроль пространственных характеристик лазерного излучения в ближней и дальней зонах, регистрировались временные диаграммы импульсов накачки и лазерной генерации, измерялись энергии импульсов лазерного излучения.

На рис. 3 приведены поперечные распределения интенсивности излучения на выходе лазера, а также распределения интенсивности в дальней зоне, полученные при помощи ПЗС камеры *BeamStar-FX-50*. Поперечное распределение интенсивности в ближней зоне (рис. 3а) – достаточно равномерное без крупномасштабных неоднородностей, что несомненно является следствием применения в качестве выходного отражателя резонатора градиентного зеркала. Характер поперечного распределения интенсивности в дальней зоне (рис. 3б) свидетельствует о том, что угловой спектр выходного излучения

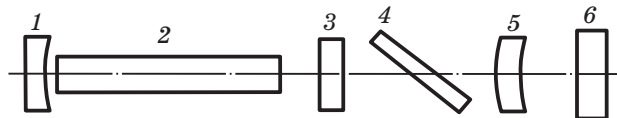


Рис. 2. Оптическая схема моноимпульсного Nd:YAG-лазера с неустойчивым резонатором. 1, 5 – зеркала резонатора, 2 – активный элемент Nd:YAG 6×100 мм, 3 – пассивный лазерный затвор, 4 – поляризатор, 6 – генератор второй гармоники КТР 10×10×5 мм.

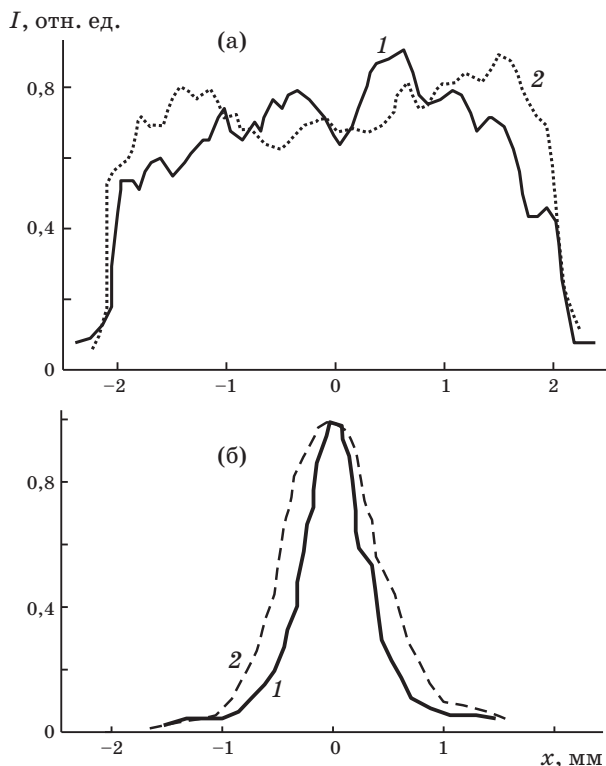


Рис. 3. Поперечные профили распределения интенсивности излучения в ближней (а) и в дальней (б) зонах. 1 – в вертикальной плоскости, 2 – в горизонтальной плоскости.

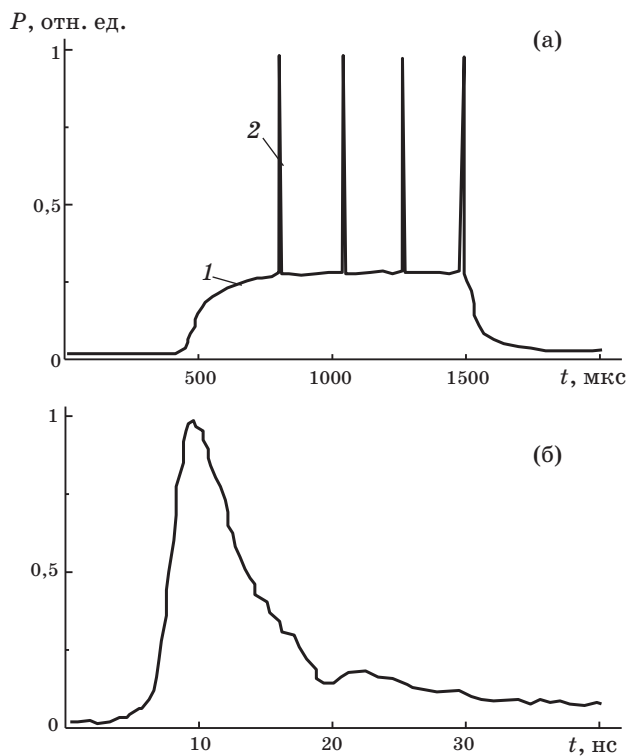


Рис. 4. а – временные диаграммы импульса накачки (1) совместно с импульсами лазерной генерации (2). б – временная диаграмма одиночного импульса лазерной генерации.

в вертикальной плоскости примерно в 2 раза шире, чем в горизонтальной. Тем не менее, измерения показали, что расходимость выходного излучения на длине волны 1,064 мкм не превышает 1 мрад.

В результате исследования временных и энергетических характеристик лазерного излучения были оптимизированы режимы накачки, позволяющие достичь максимальной суммарной энергии импульсов лазерного излучения в течение одного импульса накачки. На рис. 4а приведены временные диаграммы импульса накачки совместно с импульсами лазерного излучения, полученными с помощью осциллографа *Tektronix 2022*. Суммарная энергия четырех моноимпульсов лазерного излучения, приходящихся на один импульс накачки, достигала 760 мДж при средней мощности накачки 300 Вт и частоте следования импульсов накачки 5 Гц. Длительность одного моноимпульса не превышала 6 нс (рис. 4б). Энергия излучения на частоте второй гармоники достигала при этом 400 мДж.

Заключение

Проведена численная оптимизация оптической схемы неустойчивого резонатора твердотельного лазера (рис. 5) с выходным градиентным зеркалом. Определены характеристики излучения твердотельного лазера в режиме пассивной модуляции добротности. По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что применение неустойчивых резонаторов с градиентными зеркалами, а также малогабаритных пассивных затворов позволяет

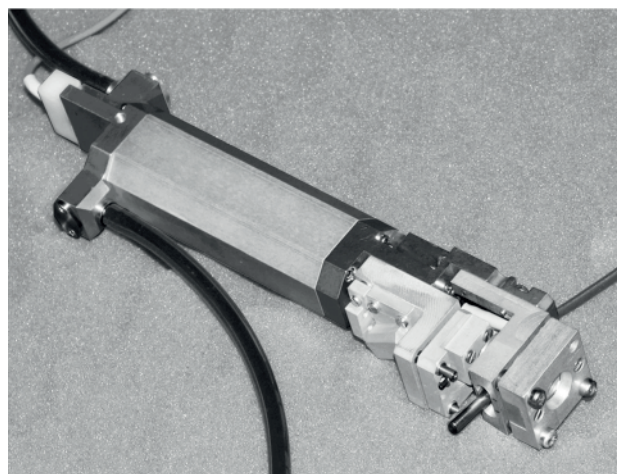


Рис. 5. Внешний вид лазерного излучателя.

создавать высокоэффективные компактные лазерные излучатели с высокими пространственно-энергетическими характеристиками, которые могут найти применение в биомедицинских и технологических приложениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Altshuler G.B., Belashenkov N.R., Karasev V.B., Skripnik A.V., Solounin A.A.* Application of ultrashort laser pulses in dentistry // Proc. SPIE. Dental Application of Lasers. 1993. V. 2080. P. 77–81.
 2. *Беликов А.В., Сандуленко А.В., Скрипник А.В., Ткачук А.М.* Исследование абляции твердых тканей зуба человека излучением YAG:Cr,Tm,Er лазера // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 2. С. 11–16.
 3. *Ross E.V.* Split Treatment of Photodamaged Skin with KTP 532 nm Laser with 10 mm Handpiece Versus IPL: A Check-to-Check Comparison // Lasers in Surgery and Medicine. 2005. V. 9999. P. 1–5.
 4. *Koechner W.* Solid-state laser engineering. Second completely revised and updated edition. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 604 p.
 5. *Ананьев Ю.А.* Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М.: Наука, 1979. 328 с.
-