

УДК 621.373.826

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МНОГОЧАСТОТНОЙ ГЕНЕРАЦИИ
МАЛОГАБАРИТНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ СРЕДНЕГО
ИК-ДИАПАЗОНА С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

М.В. Иночкин, В.В. Назаров, Д.Ю. Сачков, Л.В. Хлопонин, В.Ю. Храмов, Н.А. Федоров

Исследована генерация Er:YLF-лазера на длинах волн 2,66 мкм, 2,71 мкм и 2,81 мкм в импульсно-периодическом режиме при селективной накачке излучением лазерных диодов на длине волны 0,98 мкм. Наблюдается существенное изменение задержек начала генерации на отдельных длинах волн в зависимости от частоты следования импульсов накачки, а также прекращение генерации на длинах волн 2,66 мкм и 2,71 мкм с увеличением частоты следования импульсов. Предложен метод управления спектром лазерной генерации за счет изменения длительности и частоты следования импульсов накачки.

Ключевые слова: эрбиевый лазер, диодная накачка, многочастотная генерация, импульсно-периодический режим.

Введение

Лазеры, излучающие в области 3 мкм, перспективны для применений в медицине, так как в данном диапазоне длин волн располагается один из основных максимумов поглощения воды. Среди лазеров трехмикронного диапазона наибольшее распространение получили лазеры на кристаллах, активированных ионами Er^{3+} [1–3]. Вследствие расщепления энергетических уровней иона Er^{3+} в кристаллическом поле длина волны генерации таких лазеров может варьироваться в довольно широких пределах [4–5]. Например, в среде Er:YLF в неселективном резонаторе может быть получена генерация на длинах волн 2,66; 2,71; 2,81 и 2,84 мкм [5]. Коэффициент поглощения воды для этих длин волн может изменяться в пределах нескольких порядков. Таким образом, изменение длины волны генерации эрбиевого лазера позволяет существенно влиять на параметры взаимодействия лазерного излучения с биологическими тканями. В настоящей работе проведено исследование изменения спектра генерации Er:YLF-лазера с диодной накачкой в зависимости от параметров накачки при импульсно-периодическом режиме работы лазера.

Модель многочастотной генерации Er:YLF-лазера

В работе [5] была предложена модель для описания свободной генерации эрбиевых лазеров в области 3 мкм, основанная на использовании усредненных населенностей верхнего (N_2) и нижнего (N_1) лазерных уровней. В данной работе эта модель развита для случая импульсно-периодического режима работы лазера, что потребовало учета процессов апконверсии с нижнего (${}^4I_{13/2}$) и с верхнего (${}^4I_{11/2}$) лазерных уровней. В этом случае для усредненных населенностей лазерных уровней N_2 и N_1 можно записать следующую систему балансных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dN_2}{dt} = -\chi_g(\lambda, t)S - N_2(A_{21} + A_{20} + W_{21}) + \gamma_1 N_1^2 - \gamma_2 N_2^2 + R(t); \\ \frac{dN_1}{dt} = \chi_g(\lambda, t)S - N_1 A_{10} + (A_{21} + W_{21})N_2 - 2\gamma_1 N_1^2, \end{cases} \quad (1)$$

где A_{mn} – скорость спонтанного излучательного перехода между уровнями m и n ; W_{mn} – скорость спонтанного безызлучательного перехода; $R(t)$ – скорость накачки; γ_2 – коэффициент апконверсии с верхнего лазерного уровня; γ_1 – коэффициент апконверсии с нижнего лазерного уровня; S – усредненная плотность потока фотонов в резонаторе; $\chi_g(\lambda, t) = (\sigma_e(\lambda)N_2 - \sigma_a(\lambda)N_1)$ – показатель усиления на длине волны λ ; $\sigma_e(\lambda)$ – сечение вынужденного излучения; $\sigma_a(\lambda)$ – сечение поглощения из возбужденного состояния.

На различных стадиях работы лазера величина относительного вклада процессов релаксации в изменение усредненных населенностей лазерных уровней $N_1(t)$ и $N_2(t)$ может существенно изменяться. На сравнительно малом промежутке времени, после включения накачки и до начала генерации, основное значение имеет скорость накачки, а релаксационными и, тем более, нелинейными слагаемыми в системе уравнений (1) можно пренебречь. При этом, в отличие от режима одиночных импульсов, в импульсно-периодическом режиме необходимо учитывать конечную населенность лазерных уровней в начале очередного импульса накачки уже при частоте следования импульсов в десятки герц, поскольку времена релаксации верхнего (${}^4I_{11/2}$) и нижнего (${}^4I_{13/2}$) лазерных уровней (4 и 10 мс соответственно, [6]) становятся сравнимы с периодом повторения импульсов.

Из условия порога генерации $\chi_g(\lambda, t) = \delta(\lambda)$ можно получить зависимость задержки начала генерации от начальных населенностей лазерных уровней в виде

$$td(\lambda) = \frac{\delta(\lambda)}{\sigma_e(\lambda)R} + \left(\frac{1}{F(\lambda)} - 1 \right) \frac{N_{10}}{R} - \frac{N_{20}}{R}, \quad (2)$$

где, как и в [5], введен нормированный безразмерный спектральный форм-фактор

$$F(\lambda) = \frac{\sigma_e(\lambda)}{\sigma_e(\lambda) + \sigma_a(\lambda)} = \frac{1}{1 + \frac{Z_u}{Z_l} \exp\left(\frac{hc}{kT} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right) \right)}, \quad (3)$$

где Z_u и Z_l – числа заполнения для верхнего (${}^4I_{11/2}$) и нижнего (${}^4I_{13/2}$) лазерных уровней; k – постоянная Больцмана; T – температура; λ_0 – длина волны перехода между самыми нижними подуровнями штарковской структуры уровней ${}^4I_{11/2}$ и ${}^4I_{13/2}$.

Из уравнения (3) следует, что функция $F(\lambda)$ является монотонно возрастающей функцией длины волны и изменяется в диапазоне $0 < F(\lambda) < 1$.

В случае использования селективной накачки после начала генерации происходит последовательная смена длин волн генерации от более коротких к более длинным. Например, в [5] была реализована последовательная генерация лазера на четырех длинах волн (2,66 мкм, 2,71 мкм, 2,81 мкм и 2,84 мкм) при длительности импульса накачки 2 мс. В настоящей работе длительность импульса накачки была ограничена значением 0,5 мс и условия возникновения генерации на длине волны 2,84 мкм не выполнялись. В связи с этим в дальнейшем рассмотрение процессов генерации будет ограничено тремя длинами волн, что не является принципиальным ограничением.

После окончания импульсов накачки и генерации ($R=0$, $S=0$) усредненные населенности лазерных уровней N_1 и N_2 релаксируют согласно выражениям (1). При этом величина нелинейных слагаемых в системе (1), соответствующих переходам по кросс-релаксационным схемам, сравнима с величиной линейных слагаемых. Таким образом, на промежутке между импульсами накачки необходимо учитывать процессы кросс-релаксации. В этом случае проблематично получить аналитическое решение системы (1) и проще выполнить ее численное интегрирование. Заметим, что на участке релаксации нахождение решений $N_1(t)$ и $N_2(t)$ происходит существенно быстрее, так как отсутствует излучение накачки и генерации ($R=0$, $S=0$). Итогом этого расчета являются значения усредненных населенностей уровней N_{10} и N_{20} перед началом следующего импульса накачки.

Исследования многочастотной генерации Er:YLF-лазера при импульсно-периодической накачке

На рис. 1 представлен результат расчета зависимости задержек начала генерации $td(f)$ на длинах волн 2,66; 2,71 и 2,81 мкм от частоты следования импульсов f при длительности импульса накачки 0,5 мс. Для всех длин волн коэффициент отражения выходного зеркала был принят равным 95%, а показатель вредных потерь – $0,006 \text{ см}^{-1}$. Скорость накачки была принята равной $R=2,3 \times 10^{22} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Форма импульса накачки задавалась прямоугольной во времени. Зависимости $td(f)$ на рис. 1, а, соответствуют условию $\gamma_1=\gamma_2=0$, т.е. случаю отсутствия апконверсионных взаимодействий. Расчет, соответствующий рис. 1, б, выполнен при коэффициентах апконверсии $\gamma_1=2 \times 10^{-17} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, $\gamma_2=1 \times 10^{-18} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$.

Анализ зависимостей $td(f)$, представленных на рис. 1, показывает, что можно выделить 3 диапазона характерного изменения величин $td(f)$. В области I ($f=0-15$ Гц) значения $td(f)$ для всех длин волн примерно постоянны и не зависят от частоты следования импульсов. При этих частотах повторения импульсов установившиеся значения усредненных населенностей лазерных уровней в момент включения накачки N_{10} и N_{20} малы, так как после выключения импульса накачки усредненные населенности лазерных уровней успевают релаксировать к нулевым значениям практически полностью.

Во II области ($f=15-35$ Гц для $\gamma_1=\gamma_2=0$ и $f=15-65$ Гц для $\gamma_1 \neq 0$, $\gamma_2 \neq 0$) длительность задержки $td(f)$ на длине волны 2,66 мкм возрастает, а для двух других длин волн убывает. Такое поведение можно объяснить тем, что в этой области частот повторения импульсов установившееся начальное значение населенности нижнего лазерного уровня N_{10} растет с увеличением частоты f , а верхний лазерный уровень все еще успевает расселяться из-за меньшего времени жизни уровня ${}^4I_{11/2}$ по сравнению с ${}^4I_{13/2}$. При этом согласно выражению (2) рост начального значения населенности нижнего лазерного уровня N_{10} в большей степени влияет на задержки генерации для более коротких длин волн, так как $F(\lambda)$ является возрастающей функцией длины волны. Таким образом, при достижении определенного значения населенности N_{10} генерация излучения сразу начнется на переходах с большей длиной волны. Процессы межзонного взаимодействия приводят к уменьшению населенности нижнего лазерного уровня N_1 , что приводит к увеличению максимальной частоты для области II с 35–60 Гц.

В выделенной на рис. 1 области III, когда генерация реализуется только на длине волны 2,81 мкм, поведение задержки генерации $td(f)$ для случая отсутствия (рис. 1, а) и наличия (рис. 1, б) процессов ап-

конверсии кардинально противоположно. При отсутствии апконверсии задержка генерации $td(f)$ заметно возрастает, что можно объяснить увеличением начальных населенностей уровня ${}^4I_{13/2} N_{10}$ и уровня ${}^4I_{11/2} N_{20}$ из-за уменьшения промежутка времени между импульсами. При наличии процессов апконверсии длительность задержки генерации $td(f)$ на длине волны 2,81 мкм практически не меняется. Это в первую очередь связано с тем, что наличие апконверсии с уровня ${}^4I_{13/2}$ приводит к дополнительному заселению верхнего лазерного уровня ${}^4I_{11/2}$ и расселению нижнего лазерного уровня ${}^4I_{13/2}$.

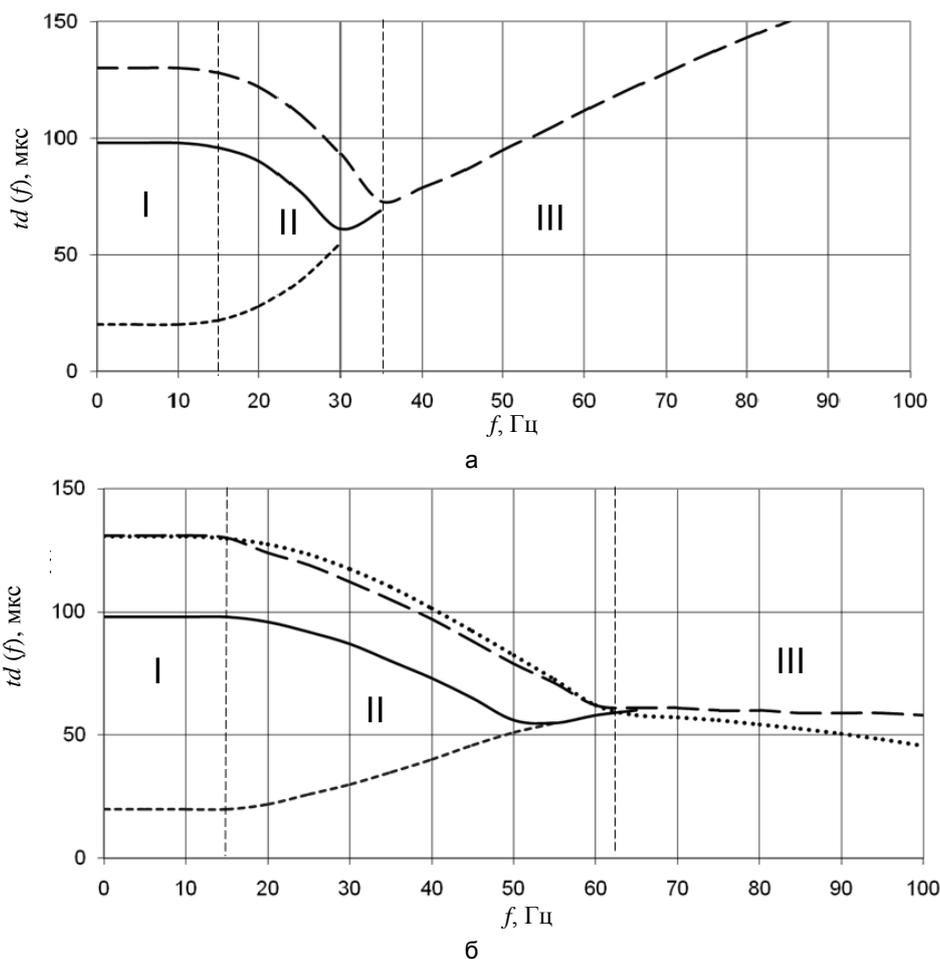


Рис. 1. Результаты расчета зависимостей задержек начала генерации $td(f)$ от частоты следования импульсов (длительность импульса накачки 0,5 мс, мощность излучения накачки 340 Вт): $\gamma_1=0, \gamma_2=0$ (а); б) $\gamma_1=2 \times 10^{-17} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}, \gamma_2=1 \times 10^{-18} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ (б); $\lambda=2,66 \text{ мкм}$ – короткий штрих, $\lambda=2,71 \text{ мкм}$ – сплошная линия, $\lambda=2,81 \text{ мкм}$ – длинный штрих. На рис. 1, б, линия в виде точек представляет зависимость $td(f)$ для $\gamma_1=\gamma_2=2 \times 10^{-17} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$

Оценка влияния параметров γ_1 и γ_2 на зависимость времен задержек генерации $td(f)$ показала, что характер влияния апконверсии с уровнями ${}^4I_{11/2}$ и ${}^4I_{13/2}$ несколько различен. Теоретические расчеты системы уравнений (1) показали, что уменьшение соотношения γ_1/γ_2 приводит к уменьшению скорости падения времени задержки от частоты. В случае $\gamma_1/\gamma_2 > \sim 1$ падение значения задержки генерации $td(f)$ от частоты сменяется ростом.

Наблюдаемая зависимость набора длин волн генерации от параметров накачки может быть использована для целенаправленного изменения спектра генерации лазера. Из рис. 1 видно, что при длительности импульса накачки 500 мкс и частоте следования импульсов более 50 Гц генерация реализуется только на одной длине волны 2,81 мкм. При использовании импульсов накачки длительностью 30–75 мкс при частоте следования импульсов f не более 30 Гц можно получить генерацию только на длине волны 2,66 мкм. Данная особенность многочастотной генерации может быть использована для управления спектром генерации лазера только за счет изменения параметров накачки (мощность, длительность импульса, частота следования импульсов, применение пакетного режима следования импульсов). На рис. 2 представлены две области изменения параметров накачки. В пределах области 1 наблюдается генерация исключительно на длине волны 2,66 мкм, для получения генерации на длине волны 2,81 мкм необходимо использовать длительность Tp и частоту следования импульсов накачки f , соответствующие области 2.

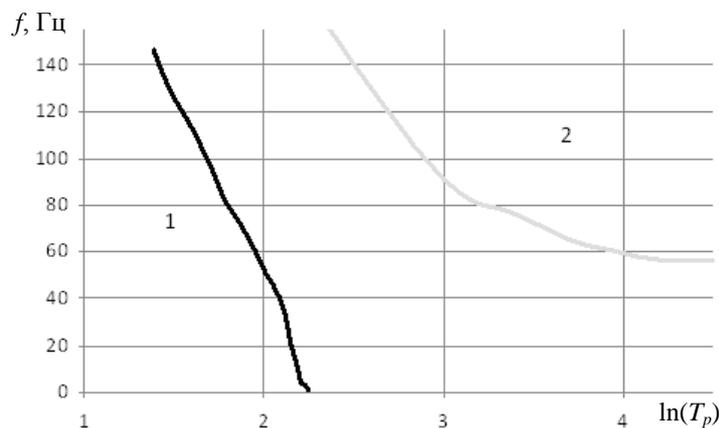


Рис. 2. Области изменения параметров накачки для получения генерации на длине волны 2,66 мкм (область 1) и 2,81 мкм (область 2)

Заключение

В работе проведено исследование зависимости спектра генерации Er:YLF-лазера от параметров селективной накачки в импульсно-периодическом режиме работы лазера. Предложенная расчетная модель многочастотной генерации излучения в эрбиевых кристаллах может быть использована для определения параметров источника накачки и оптических элементов резонаторов, необходимых для получения генерации на требуемых длинах волн или их сочетании. Для ряда медицинских задач может представлять определенный интерес реализация режимов работы лазера, переключение между которыми обеспечивает значительное изменение поглощения излучения лазера водой и биологическими тканями. Для Er:YLF-лазера такими режимами могут быть режимы генерации на длинах волн 2,66 мкм и 2,81 мкм.

Литература

1. Jensen T., Dienes A., Huber G. Investigation of diode-pumped 2,8-mm Er:LiYF₄ lasers with various doping levels // Optics Letters. – 1996. – V. 21. – Is. 8. – P. 585–587.
2. Zajac A., Skorczakowski M., Swiderski J., Nyga P. Electrooptically Q-switched mid-infrared Er:YAG laser for medical applications // Optics Express. – 2004. – V. 12. – Is. 21. – P. 5125–5130.
3. Жариков Е.В., Ильичев Н.Н., Калитин С.П., Лаптев В.В., Малютин А.А., Осико В.В., Пашинин П.П., Прохоров А.М., Саидов З.С., Смирнов В.А., Умысков А.Ф., Щербаков И.А. Спектрально-люминесцентные и генерационные свойства кристалла иттрий-скандий-галлиевого граната с хромом и эрбием // Квантовая электроника. – 1986. – Т. 13. – № 5. – С. 973–979.
4. Auzel F., Hubert S., Meichenin D. Multifrequency room-temperature continuous diode and Ar* laser-pumped Er³⁺ laser emission between 2,66 and 2,85 μm // Appl. Phys. Lett. – 1989. – V. 54. – Is. 8. – P. 681–683.
5. Иночкин М.В., Назаров В.В., Сачков Д.Ю., Хлопонин Л.В., Храмов В.Ю. Динамика спектра генерации трехмикронного Er:YLF-лазера при полупроводниковой накачке // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. – № 11. – С. 62–67.
6. Ткачук А.М., Разумова И.К., Мирзаева А.А., Малышев А.В., Гапонцев В.П. Ур-конверсия и заселение возбужденных уровней иона эрбия в кристаллах LiY_{1-x}Er_xF₄ (x=0,003–1) при непрерывной накачке излучением InGaAs-лазерных диодов // Оптика и спектроскопия. – 2002. – Т. 92. – № 1. – С. 73–88.

Иночкин Михаил Владимирович	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, m_inochkin@mail.ru
Назаров Вячеслав Валерьевич	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, v_v_nazarov@mail.ru
Сачков Дмитрий Юрьевич	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, dsachkov@gmail.com
Хлопонин Леонид Викторович	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, l_khloponin@yahoo.com
Храмов Валерий Юрьевич	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, vkhramov@gmail.com
Федоров Никита Анатольевич	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, nikifedorov@mail.ru