

Просим повторно прочитать исправленную статью, срочно исправить опечатки и позволить в редакцию 132 66 66, 135 13 11

PACS

## Оптимизация параметров накачки импульсно-периодического эрбиевого лазера

Л.О.Бышевская-Конопко\*, И.Л.Воробьев\*, А.А.Изынцев\*, П.И.Садовский\*, С.Н.Сергеев\*\*

*Исследованы генерационные характеристики активных элементов из нового хром-иттербий-эрбиевого стекла марки ЛГС-ХЧ в режиме свободной генерации. Показаны пути оптимизации параметров накачки и конструкции излучателя. В импульсно-периодическом режиме достигнута средняя выходная мощность генерации 8 Вт при расходимости излучения 12 мрад по уровню 0.9.*

**Ключевые слова:** хром-иттербий-эрбиевое фосфатное стекло, эрбиевый лазер, импульсно-периодический режим.

### 1. Введение

Лазеры на эрбиевом стекле благодаря своей способности излучать в безопасном для зрения спектральном диапазоне (1.54 мкм) находят все более широкое применение. Ранее мы сообщали о хром-иттербий-эрбиевом стекле марки ЛГС-ХМ [1] для миниатюрных лазеров без принудительного охлаждения.

В настоящей работе исследуется созданное в ИРЭ РАН хром-иттербий-эрбиевое стекло марки ЛГС-ХЧ, которое предназначено для лазеров с принудительным жидкостным охлаждением. Кроме того, цель настоящей статьи – ознакомление разработчиков лазерных систем на эрбиевом стекле с полученными зависимостями выходных характеристик от параметров накачки. Правильный выбор параметров накачки и элементов излучателя позволяет реализовывать порог генерации и КПД лазеров на эрбиевом стекле, ненамного уступающие порогу и КПД лазеров на неодимовом стекле.

### 2. Спектральная характеристика лазерной среды

Импульсно-периодический режим работы лазера предполагает возможность реализации высокой мощности генерации и, как следствие, значительное тепловыделение в активном элементе (АЭ), которое приводит к ряду негативных последствий, например к возникновению наведенной тепловой линзы, а также к механическим напряжениям, вызывающих ограничение предельной мощности накачки из-за разрушения АЭ. Все это заставляет искать разумный компромисс при выборе концентраций активаторов, особенно в случае эрбиевых стекол.

Основной сенсibilизатор люминесценции ионов эрбия – ионы иттербия. Для более полного использования излучения лампы накачки в стекло вводят ионы хрома

[2, 3], которые имеют широкие полосы поглощения с максимумами на 450 и 660 нм (рис.1). И хотя вклад этих полос в выходную энергию при концентрации ионов хрома  $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  может достигать 100% и более (относительно вклада ионов иттербия) [4], введение хрома резко увеличивает тепловыделение в АЭ. Это обусловлено как относительно невысокой (60%) квантовой эффективностью сенсibilизации в паре хром–иттербий, так и большим стоковым разменом энергии между квантом накачки в полосы поглощения хрома и квантом генерации на  $\lambda = 1.54 \text{ мкм}$ . Даже для длинноволновой полосы поглощения хрома ( $\lambda = 660 \text{ нм}$ ) различие энергий квантов накачки и генерации составляет почти 2.5 раза.

С учетом вышесказанного в ИРЭ РАН было разработано хром-иттербий-эрбиевое стекло ЛГС-ХЧ с пониженной концентрацией ионов хрома ( $7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), предназначенное для использования в импульсно-периодических лазерных системах. Термооптическая константа стекла  $W$  была минимизирована и составляла  $1.2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ . Для компенсации потерь из-за снижения концентрации ионов хрома была увеличена концентрация ионов иттербия (в 1.5 раза по сравнению со стеклом ЛГС-Х [4]). Спектр поглощения нового стекла при концентрации ионов эрбия  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  представлен на рис.1.

Очевидно, что столь радикальное изменение концентраций активаторов должно было привести к перераспределению вклада ионов хрома и иттербия в энергетику лазера. Это в свою очередь делает актуальным поиск

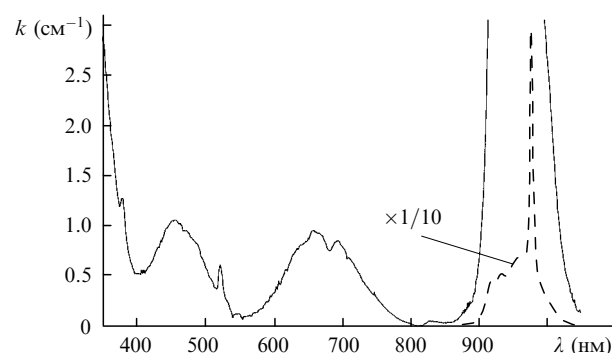


Рис.1. Спектр поглощения стекла ЛГС-ХЧ.

\*Институт радиотехники и электроники РАН, Россия, 141120 Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1; тел.: (095) 526 92 77, (256) 5 25 74, e-mail: aai219@ire216.msk.su

\*\*Центр физического приборостроения ИОФ РАН, Россия, 142092 Троицк Московской обл.; тел.: (095) 334 02 10

параметров импульса накачки, обеспечивающих оптимальное согласование спектра излучения лампы со спектром поглощения лазерного материала.

Для исследования лазерных характеристик были изготовлены АЭ диаметром 4 мм и длиной 80 мм. Выбор меньшего по сравнению с обычно используемыми в лазерах на неодимовом стекле ( $\varnothing 6-8 \times 80-100$  мм) диаметра АЭ обусловлен необходимостью снижения порога генерации и повышения предельной выходной мощности лазера. На заключительной стадии, для уменьшения толщины нарушенного слоя боковая поверхность АЭ обрабатывалась мелкозернистым шлифовальным порошком М10. Непосредственно перед испытаниями нарушенный слой на боковой поверхности удалялся методом химического травления на глубину 50–100 мкм. Для демонстрации возможности получения высокой выходной мощности АЭ стравливались до диаметра 3 мм. Механические свойства таких АЭ оставались достаточными для того, чтобы выдерживать возникающие при креплении его в излучателе воздействия. На торцы АЭ было нанесено двухслойное ( $ZrO_2$ ,  $SiO_2$ ) просветляющее покрытие с остаточным коэффициентом отражения менее 0.1 %.

### 3. Экспериментальные результаты

#### 3.1. Оптимизация параметров накачки и элементов излучателя в режиме одиночных импульсов

Испытания проводились в излучателе с посеребренным моноблочным эллиптическим отражателем из легированного желтого кварца. Резонатор длиной 130 мм был образован глухим вогнутым зеркалом с радиусом кривизны 3 м и плоским выходным зеркалом с коэффициентом отражения 86 %, близким к оптимальному. Охлаждение излучателя осуществлялось дистиллированной водой с расходом 10 л/мин. Накачка лампы производилась от блока питания модели 730, производимого в Центре физического приборостроения ИОФ РАН. Блок питания позволял регулировать ток через лампу в диапазонах 15–150 и 30–300 А, а длительность импульса – в пределах 100 мкс–50 мс. Лампа работала в режиме тока дежурной дуги.

На рис.2 представлены результаты генерационных испытаний АЭ при фиксированном токе в лампе и частоте повторения импульсов 0.1 Гц. Управление энергией импульсов производилось путем изменения длительности импульса накачки. Видно, что дифференциальный КПД лазера с лампой ИНП-3/75 при токе 20 А достигает максимального значения 4.15 %. При этом токе, очевидно, реализуется наиболее оптимальное соотношение между степенью перекрытия спектра излучения лампы со спектром поглощения ионов хрома и иттербия и потерями на люминесценцию ионов эрбия.

На рис.2 представлена также «усредненная» зависимость выходной энергии от энергии накачки для лампы ИНП-5/75. Отклонения от нее при разных токах в исследованном диапазоне 30–225 А не превышали 10 %. Учитывая зависимость спектрального распределения КПД импульсных трубчатых ксеноновых ламп от удельной мощности разряда [6], следует ожидать, что оптимальный ток для лампы ИНП-5/75 не превышает 30 А. Низкая эффективность лампы ИНП-5/75 связана, в первую очередь, с плохим согласованием диаметра АЭ и разрядного канала лампы.

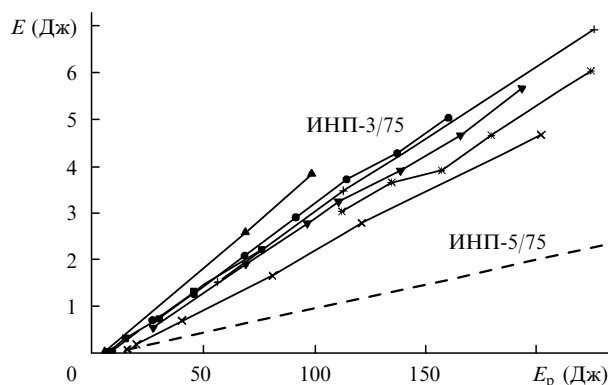


Рис.2. Зависимости энергии генерации  $E$  от энергии накачки лампы ИНП-3/75  $E_p$  при токе через лампу 17 (■), 20 (▲), 30 (●), 60 (+), 70 (▼), 100 (\*) и 150 А (x), напряжениях на лампе 100 (■), 110 (▲), 170 (●), 210 (+), 220 (▼), 250 (\*) и 300 В (x), а также «усредненная» зависимость энергии генерации от энергии накачки для лампы ИНП-5/75 при токах 30–225 А и напряжениях 225–290 В (штриховая прямая).

Другой способ управления энергией импульса накачки – изменение тока лампы при постоянной длительности импульса. Зависимость выходной энергии от энергии накачки при постоянной длительности импульса накачки может быть вычислена по кривым, приведенным на рис.2. Полученные при таком способе управления результаты показывают, что дифференциальный КПД (для лампы ИНП-3/75) возрастает при увеличении длительности импульса накачки с 2 % (1 мс) до 2.8–3 % (1–20 мс). Некоторая стабилизация КПД наблюдается при длительности импульсов накачки 4–6 мс. Однако при выборе длительности импульсов накачки следует учитывать, что по мере ее увеличения возрастает порог генерации. Полученные результаты сильно отличаются от аналогичных результатов для стекла ЛГС-Х, в котором содержание ионов хрома в 4 раза выше. Для этого стекла оптимальная длительность импульса составляла 2 мс [4].

Спектр генерации состоял из двух линий – 1535 и 1545 нм. При увеличении коэффициента отражения выходного зеркала до 96 % линии генерации смещались в сторону больших длин волн. Наблюдались линии с  $\lambda = 1545$  и 1560 нм.

На рис.3 приведены сравнительные выходные характеристики, полученные для описанного выше моноблочного отражателя и для отражателя в виде полый посеребренной кварцевой трубки диаметром 15 мм. Конструк-

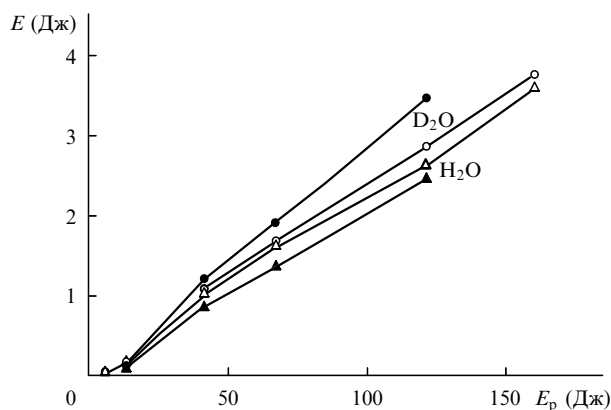


Рис.3. Зависимости энергетических параметров от  $E_p$  для моноблочного отражателя (светлые точки) и отражателя-трубки (темные точки) при охлаждении  $H_2O$  (треугольники) и  $D_2O$  (кружки).

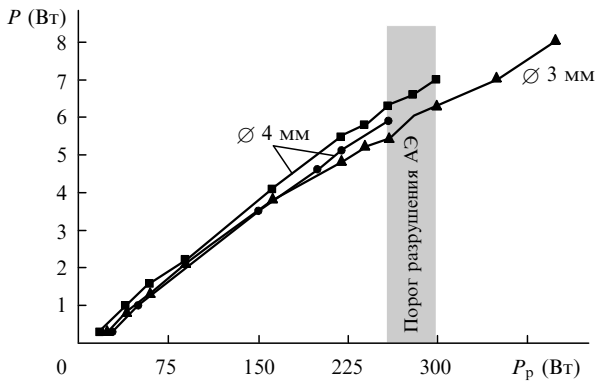


Рис.4. Зависимости средней выходной мощности  $P$  от мощности накачки  $P_p$  для АЭ разного диаметра при частоте повторения импульсов 1 (■) и 2 Гц (▲, ●).

ция предусматривала плотное размещение АЭ и лампы в отражателе – зазор между стенкой колбы лампы и боковой поверхностью АЭ составлял 2 мм. Длительность импульса накачки была равна 3 мс.

При использовании в качестве хладагента дистиллированной воды параметры излучателя с трубкой несколько уступают параметрам излучателя с моноблоком. Однако при заполнении трубчатого отражателя тяжелой водой его выходные параметры оказываются выше, чем у моноблочного. Такое поведение объясняется тем, что в случае трубчатого отражателя заполняемый хладагентом зазор намного больше, чем в случае моноблочного отражателя. Как известно, обычная вода обла-

дает полосой поглощения с максимумом на  $\lambda = 976$  нм (поглощение примерно 30 % в слое толщиной 1 см), положение которого совпадает с положением максимума полосы поглощения ионов иттербия. Как видно из полученных результатов, в ряде случаев (например, в режиме одиночных и редко повторяющихся импульсов) вместо моноблочных можно успешно использовать простые в изготовлении и дешевые трубчатые отражатели.

### 3.2. Импульсно-периодический режим

Испытания лампы ИНП-3/75 в импульсно-периодическом режиме проводились с теми же источником питания и системой охлаждения, что и выше, при длительности импульса накачки 4 мс. Результаты испытаний представлены на рис.4 и 5, где даны зависимости средней мощности генерации и расходимости излучения от мощности накачки. Для АЭ диаметром 4 мм критическая мощность накачки, при которой разрушались отдельные АЭ, составляла 260 Вт; некоторые АЭ без разрушения выдерживали до 300 Вт. Такой разброс связан с качеством обработки боковой поверхности и с возможностью ее повреждения во время сборки излучателя.

Расходимость излучения была вполне приемлемой и не превышала 12 мрад по уровню 0.9 при максимальной мощности накачки. АЭ, стравленный до диаметра 3 мм, при незначительном падении КПД генерации выдерживал мощность накачки до 400 Вт. При частоте повторения импульсов 2 Гц на нем была достигнута средняя мощность генерации 8 Вт. Для сравнения отметим, что на АЭ из неодимового стекла близких размеров ( $\varnothing 4.3 - 4.6 \times 80$  мм) максимальная достигнутая мощность генерации составила 15 Вт (стекло КНФС), а максимальная мощность накачки – 600 Вт (стекла ЛГС-Т и КНФС) [5].

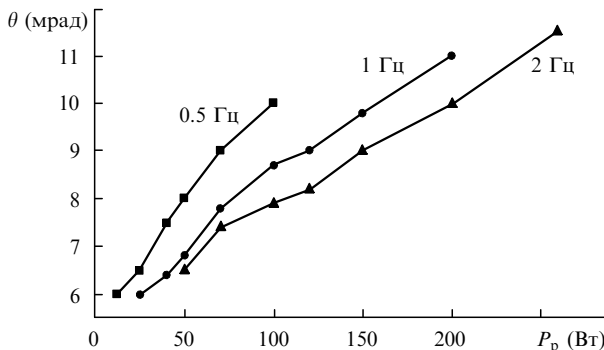


Рис.5. Зависимости расходимости  $\theta$  от мощности накачки  $P_p$  при разных частотах повторения импульсов.

1. Изъинев А.А., Садовский П.И. *Квантовая электроника*, **24**, 791 (1997).
2. Gapontsev V.P., Gromov A.K., Izyneev A.A., Kravchenko V.B., Matitsin S.M., Sirtlanov M.R., Platonov N.S. *Proc.Intern.Conf. on Lasers' 82* (New Orleans, Louisiana, STS Press, 1982, p.310).
3. Данильчук Н.В., Лунгер С.Г., Николаев Ю.П., Петровский Г.Т., Федоров Ю.К., Шаповалов В.Н. *ДАН СССР*, **266**, 1115 (1982).
4. Гапонцев В.П., Громов А.К., Изъинев А.А., Садовский П.И., Ставров А.А., Типенко Ю.С. *Квантовая электроника*, **16**, 684 (1989).
5. Берзина Г.Д., Борик М.А., Бужинский И.М. и др. *Квантовая электроника*, **12**, 694 (1985).
6. Жильцов В.И., Константинов Б.А., Розанов А.Г., Шукин Л.И. В кн. *Справочник по лазерам* (М., Сов.радио, 1978, т. 2, с. 78).

An investigation was made of performance of laser rods from chromium-ytterbium-erbium phosphate glass LGS-KhCh under free-running conditions. The ways of optimization of pumping parameters and laser design are shown. The average lasing power of 8 W and divergence less than 12 mrad on 0,9 level have been achieved under the repetitive-pulse operation.