

# Непрерывная генерация излучения с $\lambda = 1.54$ мкм на иттербий-эрбиевом стекле при ламповой накачке

Н.Е.Алексеев, Л.О.Бышевская-Конопко, И.Л.Воробьев, А.А.Изынцев, П.И.Садовский

*Впервые получена непрерывная генерация на иттербий-эрбиевом стекле с ламповой накачкой.*

*Ключевые слова:* иттербий-эрбиевое фосфатное стекло, эрбиевый лазер, непрерывная генерация.

## 1. Введение

Несмотря на привлекательность эрбиевых стекол с точки зрения генерации на безопасной для зрения длине волны, они долгое время не представляли интереса для разработчиков лазерных приборов из-за низкой эффективности генерации. Ситуация изменилась после того, как была показана возможность резкого повышения эффективности генерации в эрбиевых стеклах за счет введения дополнительного сенсбилизатора – ионов трехвалентного хрома [1, 2]. В дальнейшем удалось поднять КПД эрбиевых лазеров с ламповой накачкой до 4.5 % [3]. Однако все это относится к лазерам, работающим в импульсном режиме. Что касается непрерывной генерации, то она стала возможна лишь в последнее время благодаря созданию селективных источников накачки – полупроводниковых InGaAs-диодов. В итоге в настоящее время создан целый ряд лазерных приборов на эрбиевом стекле как с ламповой, так и с диодной накачкой, работающих в диапазоне режимов от единичных импульсов до непрерывной генерации с энергией в импульсе от десятков микроджоулей до десятков джоулей; возможна работа в режиме модуляции добротности.

Цель настоящей работы – продемонстрировать дополнительные потенциальные возможности эрбиевого стекла, а именно получить на нем непрерывную генерацию при ламповой накачке.

Из большого числа известных в настоящее время активных сред практический интерес для создания непрерывных лазерных источников с ламповой накачкой представляют только кристаллы алюмоиттриевого граната с неодимом. Попытка же реализовать этот режим на фосфатном неодимовом стекле из-за его низкой механической прочности не увенчалась успехом, а генерация, полученная на силикатном неодимовом стекле, характеризуется очень низкими энергетическими параметрами (КПД равен 0.02 % – 0.1 %) [4].

Существенным положительным фактором, оправдывающим попытку получения непрерывной генерации на эрбиевом стекле, является большое время жизни мета-

стабильного уровня  $^4I_{13/2}$  ионов эрбия – свыше 8 мс. Однако трехуровневая схема генерации, наряду с низкой по сравнению с кристаллами теплопроводностью и механической прочностью, может свести это преимущество к нулю. Поэтому ожидать получения хороших энергетических параметров лазеров на эрбиевом стекле, так же как и на других стеклянных средах, в режиме непрерывной генерации не приходится.

## 2. Лазерная среда и активный элемент

Прежде всего необходимо было определить оптимальные концентрации активаторов – ионов иттербия и эрбия. Соактивация ионами хрома в этом случае полностью исключена, т. к. только 60 % поглощенной ионами хрома мощности передается ионам эрбия, а оставшаяся часть идет на нагрев активного элемента (АЭ). Кроме того, из-за большого стоксова сдвига (максимум поглощения  $\text{Cr}^{3+}$  – на  $\lambda = 0.66$  мкм, а генерация – на  $\lambda = 1.54$  мкм) появляется дополнительный мощный источник тепловыделения.

Что касается концентрации ионов иттербия, то ее необходимо выбирать как можно большей как для увеличения коэффициента поглощения излучения лампы, так и для повышения эффективности передачи поглощенной энергии от ионов иттербия к ионам эрбия. Ранее [5] было показано, что для инверсий  $(0 - 0.1)N_{\text{Er}}$ , характерных для непрерывного режима генерации, эффективность передачи энергии в паре иттербий – эрбий становится максимальной при концентрации ионов иттербия  $2 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$  и практически не меняется вплоть до максимально возможного для фосфатного стекла значения  $4 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ , в то время как для режима накопления энергии (в случае модуляции добротности) при инверсии  $(0.5 - 0.8)N_{\text{Er}}$  оптимальной является концентрация ионов иттербия  $(2 - 2.5) \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ . В нашем случае факторами, ограничивающими концентрацию ионов иттербия значением  $2.2 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ , являются:

- технологичность синтеза стекла (при высокой концентрации ионов иттербия резко возрастает склонность стекла к кристаллизации);

- желание ограничить термооптическую постоянную  $W$  значением  $(30 - 40) \times 10^7 \text{ К}^{-1}$ ;

- сохранение максимальной для фосфатных стекол теплопроводности  $\lambda_h = 0.7 - 0.8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ .

Последние две величины крайне важны для реализации режима непрерывной генерации. Параметр  $W$  опре-

Н.Е.Алексеев, Л.О.Бышевская-Конопко, И.Л.Воробьев, А.А.Изынцев, П.И.Садовский. Институт радиотехники и электроники РАН, Россия, 141120 Фрязино, Московская обл., пл. акад. Введенского, 1; тел.: (095) 526 92 77, (256) 525 74; e-mail: aai219@ire216.msk.su

деляет разность оптических путей  $\delta r$  для точек сечения, в которых температуры различаются на  $\delta T$  согласно простому выражению

$$\delta r = LW\delta T, \quad (1)$$

где  $L$  – длина АЭ. Таким образом, в стеклах с большим  $W$  будет образовываться сильная тепловая линза, что создаст проблемы при получении непрерывной генерации. Теплопроводность определяет перепад температур между центром АЭ и боковой поверхностью. Для установившегося стационарного режима выражение для этого перепада имеет вид

$$\delta T_{st} = \frac{qr^2}{4\lambda_h}, \quad (2)$$

где  $q$  – мощность тепловыделения в единице объема;  $r$  – радиус АЭ.

Теплопроводность  $\lambda_h$ , определяя  $\delta T$ , оказывает влияние также и на величину тепловой линзы. Однако еще более существенно влияние  $\lambda_h$  с точки зрения механической прочности АЭ. Так как перепад температур обуславливает возникновение в АЭ механических напряжений, которые при превышении порога прочности стекла приводят к разрушению АЭ, то необходимо стремиться к максимально возможному значению  $\lambda_h$ .

Поиск компромиссного состава, удовлетворяющего изложенным выше требованиям к  $W$  и  $\lambda_h$ , даже для неодимовых стекол является крайне сложной задачей, а необходимость в случае эрбиевого стекла вводить не менее 20 % (весовых) оксида иттербия еще более сужает поле для маневра. В результате мы остановились на составе стекла, включающем в себя оксиды щелочных металлов и алюминия с технологическими добавками. В связи с тем, что нашей целью было получение непрерывной генерации, основное внимание уделялось обеспечению высокой механической прочности стекла, поскольку главным на первом этапе было достижение порога генерации. Расчетные значения основных параметров стекла по шихте таковы:  $\lambda_h = 0.75 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ,  $W = 40 \times 10^{-7} \text{ К}^{-1}$ , линейный коэффициент термического расширения  $\alpha = 80 \times 10^{-7} \text{ К}^{-1}$ .

Путем численного решения системы кинетических уравнений была найдена необходимая для достижения порога генерации мощность накачки, поглощенная АЭ диаметром 2.7 мм, в зависимости от концентрации ионов эрбия (рис. 1). Расчет проводился для длины волны накачки 0.976 мкм, являющейся центром единственной полосы поглощения иттербия (интенсивности полос поглощения ионов эрбия при его рабочей концентрации, не превышающей  $1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , столь малы, что ими можно смело пренебречь). Исходя из имеющегося в наличии осветителя для лампы ИНП-3/75, в расчете использовалась длина АЭ, равная 80 мм. Порог генерации определялся как момент достижения в лазерной среде линейного коэффициента усиления  $k_{th} = 0.0045 \text{ см}^{-1}$ , который обусловлен резонаторными потерями  $k_p = \ln(1/R_{out})/(2L)$ , где  $R_{out}$  – коэффициент отражения выходного зеркала, равный 96 %,  $L = 75$  мм (освещенная часть), и неактивными потерями  $k_n$  в АЭ и неосвещенных участках, примыкающих к торцам. Предполагалось равномерное поглощение накачки по диаметру и длине АЭ.

Из рис. 1 видно, что минимальная пороговая погло-

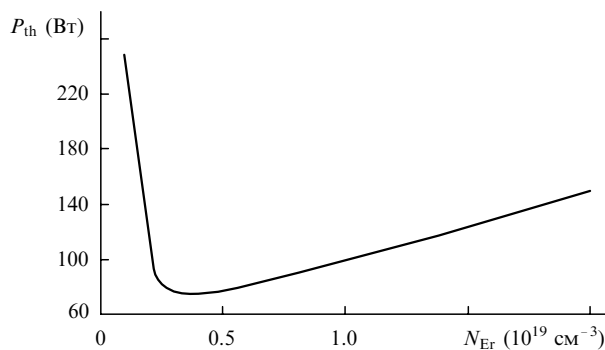


Рис. 1. Расчетная зависимость пороговой мощности накачки  $P_{th}$  от концентрации ионов эрбия  $N_{Er}$  для АЭ размером  $\varnothing 2.7 \times 80$  мм и  $R_{out} = 96\%$ .

щенная мощность накачки составляет 76 Вт при концентрации ионов эрбия  $(0.3-0.5) \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . На основании полученных данных при варке в стекло были введены ионы эрбия с концентрацией  $0.4 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

### 3. Эксперимент

Был использован осветитель типа «плотной упаковки», который представлял собой посеребренную кварцевую трубку диаметром 10 мм с симметрично расположенными в ней АЭ и лампой. Эта конструкция крепилась в металлическом кожухе и охлаждалась проточной дистиллированной водой с растворенным в ней хромпиком. Скорость прокачки составляла 3 л/мин. Необходимость использования импульсной ксеноновой лампы ИНП-3/75 в качестве непрерывного источника накачки объяснялась тем, что спектр излучения широко применяемых для накачки неодимовых лазеров дуговых криптоновых ламп (линии переходов Кг расположены в области 750–900 нм) не совпадает со спектром поглощения иттербия (900–1000 нм). АЭ длиной 80 мм был механически скруглен до диаметра 4 мм, а затем путем химического травления его диаметр, за исключением участков длиной 5 мм, примыкающих к торцам, был уменьшен до 2.7 мм. Длина резонатора, образованного плоским выходным зеркалом с коэффициентом отражения 96 % и сменным глухим зеркалом, составляла 22 см.

Как отмечалось выше, при нагреве под воздействием накачки в АЭ образуется тепловая линза. Для стационарного режима при однородной накачке в АЭ устанавливается симметричное относительно его оси распределение температуры, что приводит в соответствии с выражением (1) к возникновению в АЭ сферической линзы без астигматизма. Отсюда представляется естественным попытаться компенсировать кривизну лазерного резонатора с помощью выпуклого зеркала с соответствующим радиусом кривизны.

Для этой цели мы поочередно устанавливали в качестве глухого зеркала плоское и выпуклые сферические зеркала с радиусом кривизны 2 и 1 м. В случае первых двух зеркал генерацию получить не удалось. На рис. 2 приведены результаты, полученные при использовании выпуклого глухого зеркала с радиусом кривизны 1 м. Расходимость излучения при токе 12.5 А была равна 10 мрад. Пучок излучения на выходном зеркале имел диаметр около 1 мм.

Пороговая мощность накачки  $P_{th}$  составляла около 1050 Вт (при напряжении на лампе примерно 100 В). Вы-

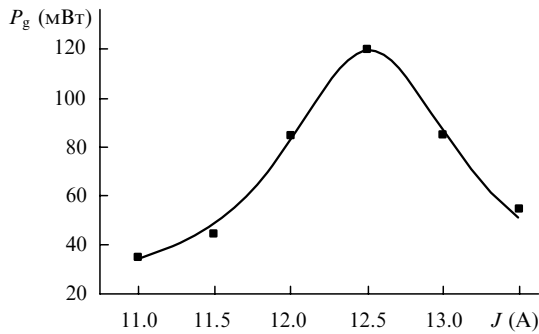


Рис.2. Экспериментальная зависимость мощности генерации  $P_g$  от тока  $J$  через лампу.

численный с учетом этого коэффициент преобразования  $\eta_p$  электрической мощности накачки в поглощенную АЭ оптическую мощность, получаемый делением расчетной оптической мощности (рис.1) на реальную пороговую мощность накачки, равен 7.2 %.

К сожалению, условия эксперимента были далеки от идеальных и не позволили получить интересный с точки зрения практического применения результат. Во-первых, отражатель типа «плотной упаковки» из-за маленького расстояния между АЭ и лампой создает очень неравномерный нагрев АЭ по сечению, что наряду с фотоупругим эффектом, возникающим из-за механических напряжений, приводит к астигматизму и аберациям, которые не могут быть скорректированы с помощью выпуклого сферического зеркала. Из-за этого генерация происходит только в небольшой центральной части АЭ диаметром 1 мм. Во-вторых, область устойчивости резонатора оказалась слишком узкой. Поэтому факт достижения мощности генерации 120 мВт следует рассматривать исключительно как первую демонстрацию режима непрерывной генерации.

Представляет интерес оценить на основании полученных экспериментальных данных максимально достигимые КПД лазера  $\eta_{las}$  и мощность генерации, которые могли бы быть получены в таком АЭ, если бы удалось полностью устранить резонаторные потери, вызванные термооптическими искажениями.

Выражение для КПД лазера  $\eta_{las}$  в случае эрбиевой активной среды может быть получено из известного соотношения, приведенного, в частности, в [6], при дополнении его коэффициентом  $\eta_s$ , характеризующим эффективность передачи энергии возбуждения от ионов иттербия к ионам эрбия:

$$\eta_{las} = \frac{P_g}{P_p} = \left(1 - \frac{P_{th}}{P_p}\right) \eta_p \eta_{st} \eta_s k_p k_{th}, \quad (3)$$

где  $\eta_{st} = 0.976/1.54 = 0.63$  – коэффициент, описывающий стоксовы потери;  $\eta_s = 0.6$  при пороговой инверсии. Для мощности накачки  $P_p = 1800$  Вт, которая была достигнута в эксперименте и которую АЭ был способен выдерживать без разрушения, из (3) получаем  $\eta_{las} = 0.67\%$  и мощность генерации  $P_g = 12$  Вт. При этом предполагалось, что поглощаемое АЭ излучение накачки распределено равномерно по всему сечению и в генерации участвует весь объем АЭ.

#### 4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе впервые продемонстрирована возможность реализации непрерывной генерации на эрбиевом стекле. Проведенные оценки показывают, что при использовании фосфатного эрбиевого стекла можно получить выходную мощность до 12 Вт для АЭ размером  $\varnothing 2.7 \times 80$  мм. Однако для этого необходимо решить крайне сложную задачу по улучшению термооптических характеристик стекла.

1. 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).
2. Данильчук Н.В., Лунтер С.Г., Николаев Ю.П., Петровский Г.Т., Федоров Ю.К., Шаповалов В.Н. *ДАН СССР*, **266**, 1115 (1982).
3. Бышевская-Конопко Л.О., Воробьев И.Л., Изынеев А.А., Садовский П.И., Сергеев С.Н. *Квантовая электроника*, **31**, 861 (2001).
4. Галактионова Н.М., Гаркави Г.А., Зубкова В.С. и др. *Оптика и спектроскопия*, **37**, 162 (1974).
5. Izyneev A.A., Sadovski P.I. *Proc. Intern. Conf. on Laser Optics' 2000* (St. Petersburg, SPIE, vol. 4350, 2000, p. 62).
6. Зверев Г.М., Голяев Ю.Д. *Лазеры на кристаллах и их применение* (М.: Радио и связь, 1994, с. 167).