

Мини-лазер на иттербий-эрбиевом стекле с продольной полупроводниковой накачкой

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

Создан макет эрбиевого лазера с продольной накачкой от полупроводниковых лазерных диодов и пассивным затвором в качестве модулятора излучения. В режиме свободной генерации был получен дифференциальный КПД 38%. Показано, что для получения моноимпульса с длительностью 9 нс и энергией 1.8 мДж требуется энергия накачки всего 42 мДж (КПД 4.2%).

Ключевые слова: эрбиевый лазер, иттербий-эрбиевое фосфатное стекло, пассивный затвор, алюмомагниева шпинель $MgAl_2O_4:Co^{2+}$, монокристаллы гексаалюмината лантана-магния $Co^{2+}:LaMgAl_{11}O_{19}$.

1. Введение

Прогресс, достигнутый в последние годы в производстве лазерных диодов и диодных линеек, открыл новые перспективы для использования лазеров на эрбиевом стекле в импульсных радарах и дальномерах в безопасной для зрения области спектра. Для многих радарных систем требуется высокая частота повторения импульсов. Низкая теплопроводность эрбиевых стекол является основным фактором, ограничивающим частоту повторения импульсов при ламповой накачке на уровне 0.2–1 Гц (без принудительного охлаждения). По сравнению с традиционными импульсными лампами полупроводниковые лазеры как источники накачки более эффективны и выделяют меньше тепла. Диодная накачка позволяет в лазерах на эрбиевом стекле увеличить частоту следования импульсов (с энергией в моноимпульсе 1 мДж и выше) до 50 Гц [1].

Большое время жизни ионов эрбия (8 мс) и широкая полоса поглощения ионов иттербия (910–970 нм) дают возможность использовать относительно маломощные лазерные диоды и диодные линейки, работающие в режиме длинного (до 5–8 мс) импульса без термостабилизации длины волны. Нагрев эрбиевого элемента происходит только за счет стоксовой разности квантов накачки ($E = 10400 \text{ см}^{-1}$) и генерации ($E = 6510 \text{ см}^{-1}$). Вся оставшаяся поглощенная энергия выделяется в виде люминесценции ионов иттербия и эрбия, квантовый выход которой близок к единице.

В настоящее время на рынке предлагается ряд коммерческих эрбиевых лазеров с полупроводниковой накачкой. Их выходная энергия составляет от 1 до 15 мДж в импульсе с длительностью 10–30 нс и частотой повторения до 10 Гц. В качестве источника накачки используются диодные лазерные линейки мощностью 25–100 Вт, воз-

буждающие активный элемент через боковую поверхность.

При таком способе накачки, как и при ламповом, трудно добиться равномерного распределения возбужденных ионов эрбия по сечению активного элемента (АЭ). Данная проблема решается либо с помощью нескольких линеек, излучение в которых направлено на АЭ под разными углами к боковой поверхности (наиболее часто используется Y-конфигурация), либо, как и при ламповой накачке, с помощью отражателя с прорезью для введения излучения от линейки. И в том и другом случае усложняется конструкция и, следовательно, растет стоимость изделия. Встречаются также попытки создать более-менее однородно прокачиваемую область с помощью подбора соответствующего коэффициента поглощения накачки и надлежащего фокусирования пучка накачки.

В последнее время на рынке появился новый класс модуляторов излучения 1.5-микрометрового диапазона – фототропные затворы на базе ионов двухвалентного кобальта. Как следует из публикаций [2–5], хорошие результаты были получены при использовании ситаллов, содержащих нанокристаллы (5–10 нм) алюмомагниевого [2] или алюмоцинковой [5] шпинели $MgAl_2O_4$ с примесными ионами Co^{2+} в концентрации 0.1%–0.3%, монокристаллов алюмомагниевого шпинели с кобальтом $Co^{2+}:MgAl_2O_4$ (сечение поглощения из основного состояния $\sigma = 3 \times 10^{-19} \text{ см}^2$) [3], монокристаллов гексаалюмината лантана-магния $Co^{2+}:LaMgAl_{11}O_{19}$ ($\sigma = 4.4 \times 10^{-19} \text{ см}^2$ при $E \parallel c$ и $\sigma = 1.4 \times 10^{-19} \text{ см}^2$ при $E \perp c$) [4].

Особенность работы эрбиевого лазера с пассивным затвором такова, что если поле резонатора не ограничено основной ТЕМ₀₀-модой, то более высокие моды генерируются с временной задержкой относительно основной [6]. Использование в импульсной дальнометрии излучения, состоящего из нескольких хаотично испускаемых пачков, проблематично, и разработчики обычно стремятся к выделению одного импульса. Одним из способов селекции основной моды является увеличение ее размера, в основном за счет увеличения базы резонатора. Это позволяет получать импульсы с энергией до 10–12 мДж, однако их длительность при этом возрастает до 70–75 нс [7]. Другой способ заключается в диафрагмиро-

Л.О.Бышевская-Конопко, И.Л.Воробьев, А.А.Изынцев, П.И.Садовский. Фрязинское отделение Института радиотехники и электроники РАН, Россия, 141120 Фрязино, Московская обл., пл. Введенского, 1; e-mail: aai219@ire216.msk.su; тел.: (095) 526 9277, (256) 52574

вании высших мод и работе с малой базой резонатора. В этом случае поперечный диаметр активной среды, с которой снимается энергия, ограничен областью 0.8 – 1 мм (длительность импульса генерации составляет не более 30 нс). Такое ограничение объема приводит к тому, что энергия в импульсе для моды TEM_{00} не превышает 3 мДж [8]. Из-за плохого согласования объема, возбуждаемого при боковой накачке, и объема моды генерации КПД эрбиевых лазеров с модуляцией добротности при боковой накачке лазерными диодами невысок.

В силу вышеизложенного представляется целесообразным использовать продольную накачку диодными лазерами. Учитывая, что мощность одиночных лазерных диодов в диапазоне 940 – 970 нм пока еще ограничена несколькими ваттами, для получения мощности, необходимой для продольной накачки эрбиевых лазеров, нужно использовать схемы, позволяющие сводить и фокусировать излучение от нескольких диодных излучателей. Такие конструкции давно известны и дают возможность получать пучки диаметром до 0.4 мм с числовой апертурой $NA = 0.1$ [9]. В настоящее время мощности этих устройств достигают нескольких киловатт.

Известны работы, посвященные иттербий-эрбиевым лазерам с непрерывной продольной накачкой [10 – 12]. В этих работах мощность накачки лежала в диапазоне 100 мВт – 1 Вт. Их цель заключалась в получении либо одночастотной генерации [10], либо импульсного излучения с относительно невысокой мощностью [11]. В работе [12] был продемонстрирован эрбиевый лазер с энергией в импульсе 100 мДж и дифференциальным КПД 16%, работающий в режиме свободной генерации. Излучение от диодной линейки (мощность 80 Вт, $\lambda = 980$ нм) с помощью оптического концентратора направлялось на торец АЭ, образуя пятно сечением 1.5×1.5 мм.

2. Эксперимент

В качестве активной среды мы использовали синтезированное в ИРЭ РАН иттербий-эрбиевое фосфатное стекло марки ЛГС-ДЕ с концентрацией ионов эрбия 8.5×10^{19} см⁻³. Лазерный элемент был выполнен в виде плоскопараллельной (непараллельность составляла 20") пластинки толщиной 3 мм и сечением 7×7 мм. На полированных рабочих плоскостях диэлектрическое покрытие отсутствовало. Схема макета приведена на рис.1. Излучение источника накачки 1 с $\lambda = 960$ нм, диаметром пучка 200 мкм и $NA = 0.2$ (диодная лазерная система с волоконным выходом DL-20 производства НТО «ИРЭ-Полус») фокусировалось объективом 2 внутрь эрбиевого активного элемента 4. Диаметр прокачиваемой зоны в АЭ ($\lambda = 1535$ нм) составлял 600 – 700 мкм. Резонатор лазера был образован двумя плоскими зеркалами – глухим зеркалом 3 с $R = 100\%$, $T_{960\text{ нм}} = 90\%$ и выходным зеркалом 6 с

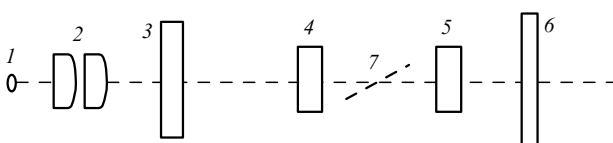


Рис.1. Схема макета лазера:
1 – источник накачки; 2 – объектив; 3 – глухое зеркало; 4 – АЭ; 5 – пассивный затвор; 6 – выходное зеркало; 7 – стеклянная пластинка.

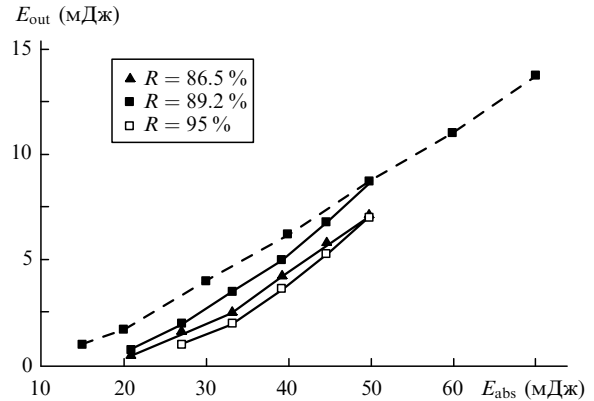


Рис.2. Экспериментальные зависимости выходной энергии от энергии накачки в режиме свободной генерации при разных коэффициентах отражения выходного зеркала, а также зависимость выходной мощности при постоянной мощности накачки (10 Вт) и варьировании длительности импульса накачки (штриховая кривая).

$R = 86.5\%$, 89.2% и 95% . База резонатора составляла 35 мм. Между АЭ и выходным зеркалом помещался пассивный затвор, юстировка которого не предусматривалась. Длительность накачки могла варьироваться в широких пределах – от нескольких микросекунд до непрерывной. Максимальная мощность накачки на выходе из объектива составляла 14 Вт. В АЭ поглощалось 80% падающей на него мощности.

На рис. 2 приведены зависимости выходной энергии в импульсе E_{out} от поглощенной энергии накачки E_{abs} для разных коэффициентов отражения выходного зеркала. Частота повторения импульсов была равна 2 Гц. Длительность импульса накачки составляла 5 мс, энергия накачки варьировалась изменением тока питания лазерных диодов. Максимальный дифференциальный КПД для зеркала с $R = 89.2\%$ составил 38%. Здесь же (штриховая кривая) приведена зависимость выходной энергии от поглощенной энергии для этого зеркала, полученная при постоянной поглощенной импульсной мощности 10 Вт и варьировании длительности импульса накачки.

Зависимость выходной мощности P_{out} от частоты следования F импульсов накачки для $R = 86.5\%$ приведена на рис.3 (кривая 1). Энергия, поглощаемая АЭ за импульс, в этом случае составляла 50 мДж (10 Вт, 5 мс). Видно, что зависимость остается линейной при увеличении частоты повторения вплоть до 20 Гц.

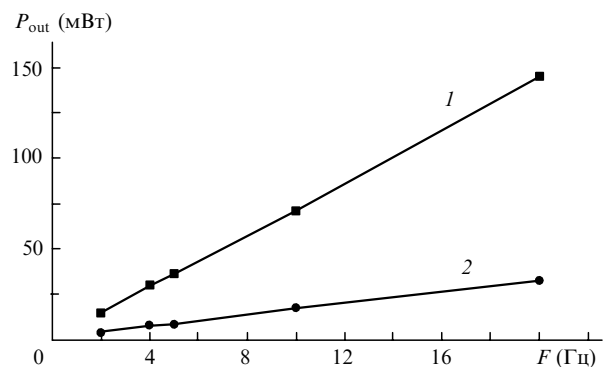


Рис.3. Зависимости выходной мощности от частоты следования импульсов накачки в режимах свободной генерации (1) и модулированной добротности затвором из ситалла с Co^{2+} : $ZnAl_2O_4$ с начальным пропусканием 89% (2).

Табл.1.

Материал модулятора	T_0 (%)	R (%)	T_{p1} (мс)	T_{p2} (мс)	E (мДж)	τ_p (нс)
LaMgAl ₁₁ O ₁₉ : Co ²⁺ ($E c$)	90	86.5	–	–	нет	–
		89.2	3.0	5.0	1.2	8–9
		95	2.9	4.8	1.0	8–9
LaMgAl ₁₁ O ₁₉ : Co ²⁺ (без поляризатора)	97**	86.5			1.5	150
Ситалл с MgAl ₂ O ₄ : Co ²⁺	91.4*	89.2	2.5	2.9	0.7	9–10
Ситалл с ZnAl ₂ O ₄ : Co ²⁺	89*	89.2	4.2	6.3	1.8	9

Примечание: T_{p1} – длительность импульса накачки, при которой имел место один импульс излучения с максимальной энергией; T_{p2} – длительность импульса накачки, при которой возник второй импульс излучения; T_0 – начальное пропускание затвора; E – выходная энергия; τ_p – длительность импульса излучения; * – паспортные данные; ** – пропускание получено пересчетом его паспортного значения (90 %, $E||c$) с учетом разности сечений поглощения $E||c$ и $E\perp c$ [7].

В табл.1 приведены экспериментальные результаты, полученные при введении в резонатор пассивных затворов из монокристалла гексаалюмината лантана-магния Co²⁺:LaMgAl₁₁O₁₉ и ситалла с нанокристаллами Co²⁺:ZnAl₂O₄ (оба затвора изготовлены в НПЦ «ЭЛС-94», Москва), а также из ситалла Co²⁺:MgAl₂O₄. Рабочие плоскости затворов были просветлены на длину волны 1535 нм. В случае использования Co²⁺:LaMgAl₁₁O₁₉ для выделения поляризации ($E||c$) в резонатор вводилась тонкая плоскопараллельная стеклянная пластинка 7 под углом, близким к углу Брюстера. При удалении пластинки генерация осуществлялась с $E\perp c$.

Частота следования импульсов накачки была равна 2 Гц. Мощность накачки, поглощаемая активным элементом, составляла 10 Вт, а длительность импульса накачки варьировалась. При использовании модулятора на основе LaMgAl₁₁O₁₉:Co²⁺ без поляризационной пластинки выходной импульс состоял из серии коротких (15–20 нс) импульсов. Длительность огибающей этих импульсов возрастала с увеличением энергии накачки. Параметры такого импульса, полученные при энергии накачки 30 мДж (10 Вт, 3 мс), приведены в табл.1.

В случае, когда модуляция осуществлялась с помощью затвора из ситалла с Co²⁺:ZnAl₂O₄ (рис.3, кривая 2) или монокристалла Co²⁺:LaMgAl₁₁O₁₉ без поляризационной пластинки, энергия излучаемого импульса практически не менялась при увеличении частоты повторения вплоть до 20 Гц. Иная картина наблюдалась при работе с затвором Co²⁺:LaMgAl₁₁O₁₉, когда $E||c$. Такой лазер работал устойчиво, если частота не превышала 3 Гц. На частоте 5 Гц генерация полностью срывалась. Подобное поведение объясняется деполяризацией излучения при нагреве АЭ.

3. Заключение

Таким образом, в настоящей работе наглядно продемонстрирована перспективность использования продольной схемы накачки иттербий-эрбиевых лазерных элементов полупроводниковыми лазерными диодами. В режиме модулированной добротности получены импульсы с энергией 1.8 мДж при длительности 9 нс. Поглощенная энергия накачки составляла всего 42 мДж. Эти результаты являются рекордными с точки зрения КПД. Для получения моноимпульса с энергией 0.7 мДж необходима накачка с энергией 25 мДж.

Оптимизация параметров лазера – просветление тор-

цов активного элемента на длине волны генерации и нанесение отражающего покрытия на длине волны накачки на выходной торец – позволит уменьшить внутрирезонаторные потери и увеличить однородность инверсной населенности ионов эрбия вдоль АЭ, что должно привести к увеличению эффективности лазера. Правильный подбор коэффициентов отражения выходного зеркала и пропускания затвора, выбор оптимальной концентрации ионов эрбия является резервом для существенного увеличения выходной энергии [7].

По нашим оценкам одномодовые иттербий-эрбиевые лазеры с продольной накачкой способны излучать энергию в импульсе 2–3 мДж с длительностью 5–8 нс при частоте повторения импульсов 10–20 Гц. В этих расчетах учитываются ограничения, накладываемые реально достижимыми в настоящее время значениями лучевой прочности диэлектрических зеркал и просветляющих покрытий. Импульсы с такой энергией могут использоваться в дальнометрии (в диапазоне 10–20 км).

Авторы выражают глубокую признательность руководству и сотрудникам НТО «ИРЭ–Полнос» за техническую поддержку в проведении эксперимента. Авторы также благодарны руководителю НПЦ «ЭЛС-94» (Москва) А.В.Шестакову за образцы пассивных затворов.

1. Wu R., Myers J., Myers M., Wisniewski T. *Proc. OSA Adv. Sol. State Laser (ASSL)* (Boston, USA, 1999, p. 236).
2. Yumashev K.V., Denisov I.A., Kuleshov N.V. *OSA Tops on Adv. Sol. State Lasers*, **27**, 204 (2000).
3. Yumashev K.V., Denisov I.A., Posnov N.N., Prokoshin P.V., Mikhailov V.P. *Appl. Phys. B*, **70**, 179 (2000).
4. Yumashev K.V., Denisov I.A., Posnov N.N., Mikhailov V.P., Moncorge R., Vivien D., Ferrand B., Guyot Y. *J. Opt. Soc. Am. B*, **16**, 2189 (1999).
5. Boiko R.M., Ohkrimchuk A.G., Shestakov A.V. *OSA Tops on Adv. Sol. State Lasers*, **19**, 185 (1998).
6. Быков В.Н., Садовой А.Г. *Квантовая электроника*, **32** (3), 202 (2002).
7. Kalashnikov V.L., Shcherbitsky V.G., Kuleshov N.V., Girard S., Moncorge R. *Appl. Phys. B*, **75**, 35 (2002).
8. <http://www.kigre.com/er140.PDF>.
9. Albers P., Heimbeck H.J., Langenbach E. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1780**, 486 (1993).
10. Laporta P., Taccheo S., Longhi S., Svelto O. *Opt. Lett.*, **18**, 1232 (1993).
11. Tanguy E., Formont S., Pocholle J.P. *Topical Meeting. Digest ser.*, **14**, 356 (1997).
12. Tanguy E., Feugnet G., Pocholle J.P., Blondeau R., Poisson M.A., Duchemin J.P. *Opt. Commun.*, **145**, 105 (1998).