

ЛАЗЕРЫ

Двухволновая генерация в лазере с линзоподобным активным элементом Nd:YLF в режиме с модуляции добротности резонатора с пассивным Cr⁴⁺:YAG-затвором

А.Л.Коромыслов, И.М.Тупицын, Е.А.Чешев

В лазере с линзоподобным активным элементом Nd:YLF и продольной диодной накачкой получена двухволновая генерация на длинах волн 1047 и 1053 нм в режиме модуляции добротности резонатора с пассивным Cr⁴⁺:YAG-затвором. Двухволновая генерация достигнута в результате синхронизации поперечных мод, которая обусловлена выбором длины резонатора, соответствующей конфигурации, близкой к полуконфокальной; при этом обеспечивается выравнивание усиления для двух указанных длин волн генерации.

Ключевые слова: твердотельные лазеры, продольная диодная накачка, синхронизация поперечных мод, двухволновая генерация.

Двухволновые лазеры применяются в различных областях техники, таких как оптическая связь, лидарные системы, генерация суммарных и разностных частот [1–3]. Следовательно, разработка новых конструкций и методов генерации двух длин волн в одном лазере весьма актуальна. В настоящее время имеется много разнообразных схем и методов осуществления режима двухволновой генерации в лазерах с диодной накачкой, например введение в резонатор дисперсионных элементов, применение двух независимых резонаторов с общим выходным зеркалом, использование температурной зависимости длины резонатора для настройки на две длины генерации, использование термооптических эффектов, генерация частот в нелинейных средах [4–11]. Двухволновая генерация получена в целом ряде активных сред: в кристаллах Nd:YAG, Nd:YVO₄, Nd:YAP, Nd:GdVO₄, Nd:YLF и пр. [7, 8, 12–17].

Одним из широко используемых кристаллов является Nd:YLF. К его привлекательным свойствам относятся сравнительно большое время жизни лазерного уровня (в два раза превышающее таковое в Nd:YAG) и малые термооптические эффекты. Так, тепловая линза в кристалле Nd:YAG в несколько раз больше, чем в Nd:YLF [18]. Кроме того, поскольку Nd:YLF является одноосным кристаллом, то, вырезав его в срезе *a-cut*, можно получить генерацию с разной поляризацией излучения – π -поляризацией и σ -поляризацией с длинами волн 1047 и 1053 нм соответственно [19, 20].

Известны работы, в которых получена двухволновая генерация в лазерах с пассивной модуляцией добротности [14, 21]. Однако при этом существуют сложности совмещения импульсов во времени или возникает необходимость введения дополнительных потерь в резонатор. В то же время привлекательной стороной лазеров с пас-

сивным затвором является относительная простота и компактность. Цель настоящей работы – выяснение возможности получения режима двухволновой генерации в лазерах с модуляцией добротности и пассивным Cr⁴⁺:YAG-затвором при выравнивании усиления на двух различных длинах волн в условиях синхронизации поперечных мод (как, например, в [22]), а также установление особенностей реализации такого режима в случае расщепления областей частотного вырождения мод для линзоподобного активного элемента.

При синхронизации поперечных мод в твердотельных лазерах с продольной диодной накачкой в областях вырождения порог генерации снижается, а в пространственной структуре излучения наблюдается большое число поперечных мод с высокими пространственными индексами, т.е. профиль пучка на выходе имеет структуру множества концентрических колец. При этом распределение излучения генерации концентрируется в ряде приосевых областей резонатора [23]. Известно, что пассивный затвор выделяет нулевую моду резонатора [24], это, в свою очередь, может приводить к большим потерям для высших мод и срыву синхронизации поперечных мод.

Принципиальная схема эксперимента представлена на рис.1. В качестве активного элемента (АЭ) лазера использовался кристалл Nd:YLF *a*-среза длиной 6 мм. Одна его грань выполнена плоской, другая – сферической с радиусом кривизны $R = 60$ мм. Плоская грань АЭ была просветлена на длину волны излучения накачки 808 нм и имела отражающие покрытия для длин волн генерации 1047 и 1053 нм. Сферическая грань АЭ была просветлена на длины волн накачки и генерации. Для накачки АЭ использовался лазерный диод (ЛД) с длиной волны $\lambda_p \approx 808$ нм и выходной мощностью до 8 Вт. Для уменьшения тепловой нагрузки на АЭ излучение ЛД было квазинепрерывным с длительностью импульсов 2 мс и скважностью 20. Излучение накачки фокусировалось на входной торец АЭ, радиус пятна накачки составлял 60 мкм.

Резонатор лазера был образован плоской гранью АЭ и плоским выходным зеркалом 32, коэффициент отражения которого на длинах волн генерации составлял 96%. Модуляция потерь резонатора осуществлялась с помощью

А.Л.Коромыслов, И.М.Тупицын, Е.А.Чешев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: akorom@mail.ru

Поступила в редакцию 10 сентября 2018 г., после доработки – 16 ноября 2018 г.

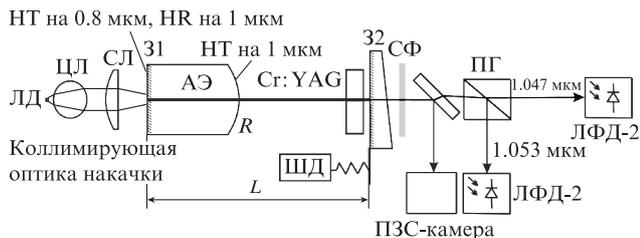


Рис.1. Схема лазера с пассивной модуляцией добротности: ЛД – лазерный диод; ЦЛ – цилиндрическая линза; СЛ – сферическая линза; 31 – входное зеркало; АЭ – активный элемент; Cr:YAG – пассивный затвор; 32 – выходное зеркало резонатора; СФ – светофильтр; ШД – шаговый двигатель; ПГ – призма Глана – Тейлора; ЛФД-2 – лавинный фотодиод. Торцевые поверхности АЭ были просветленными (НТ) на 0.8 и 1 мкм, а плоская грань АЭ имела высокий коэффициент отражения (HR) на 1 мкм.

затворов на основе $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ с различным начальным пропусканием: $T_0 = 87\%, 89\%, 94\%$ и 97% . Затворы были просветлены на длины волн генерации. Конфигурация резонатора варьировалась путем изменения длины резонатора L посредством перемещения зеркала 32 с помощью шагового двигателя. Генерация лазера регистрировалась ПЗС-камерой и лавинными фотодиодами ЛФД-2.

Экспериментально измеренные зависимости пороговой мощности накачки от длины резонатора для Nd:YLF-лазеров с пассивными затворами, имеющими различные значения T_0 , приведены на рис.2. Длина резонатора L изменялась в пределах 55–80 мм, что соответствует области частотного вырождения мод $r/s = 1/4$ (зависит от параметров устойчивости резонатора [25]).

Области двухволновой генерации схематично показаны рис.3. Видно, что вблизи области частотного вырождения мод резонатора, где $r/s = 1/4$, наблюдается падение пороговой мощности накачки, что, очевидно, связано с

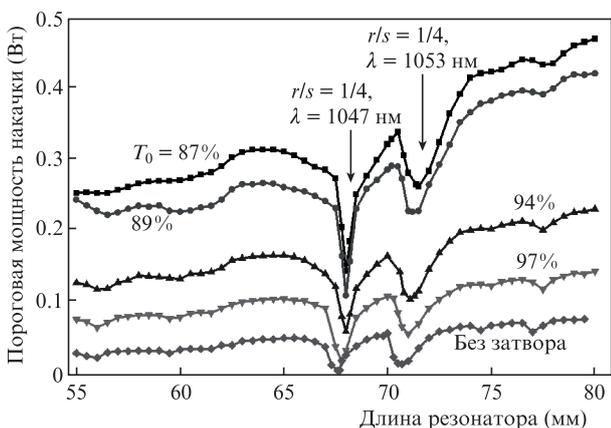


Рис.2. Зависимость пороговой мощности накачки от длины резонатора.

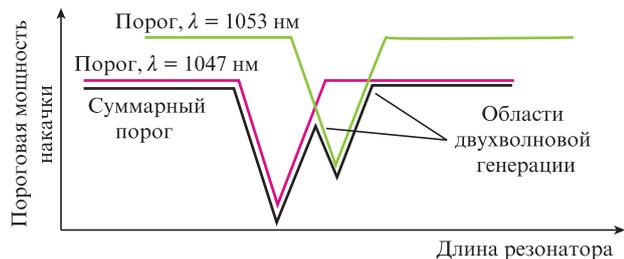


Рис.3. Области двухволновой генерации.

синхронизацией поперечных мод резонатора. Кроме того, вследствие бифокальности АЭ для излучения с длинами волн генерации 1047 и 1053 нм и взаимно ортогональными поляризациями имеет место расщепление областей частотного вырождения мод и, следовательно, расщепление минимумов порога генерации [22], т. е. перекрытие порогов генерации для разных длин волн. Таким образом, при определенной длине резонатора можно получить устойчивую двухволновую генерацию в импульсном режиме.

Осциллограммы импульсов двухволновой генерации при использовании затворов с разными T_0 представлены на рис.4. Разделение излучения с длинами волн 1047 и

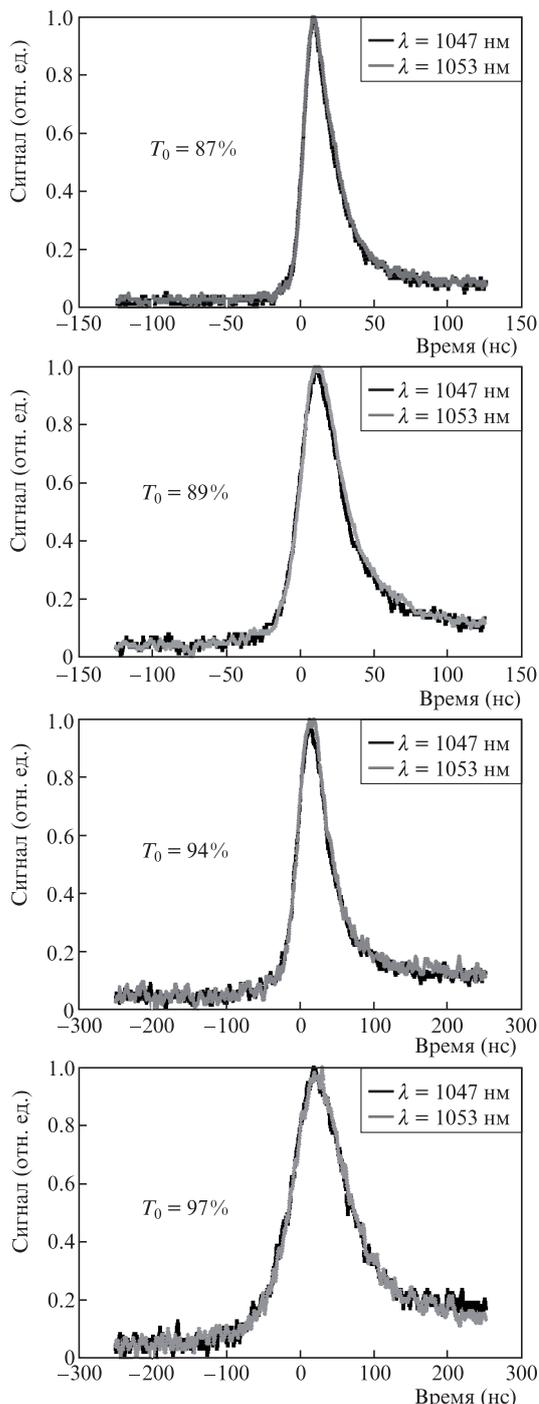


Рис.4. Импульсы излучения при двухволновой генерации вблизи области частотного вырождения мод резонатора при разных T_0 .

1053 нм осуществлялось с помощью призмы Глана–Тейлора. Сигналы регистрировались на осциллографе TDS 2012C с полосой пропускания 100 МГц.

При начальном пропускании пассивного затвора $T_0 = 87\%$, 89% , 94% и 97% и средней мощности излучения двухволнового лазера 30, 50, 90 и 110 мВт получены импульсы длительностью 24, 34, 51 и 88 нс с суммарной импульсной мощностью 1.9, 1.1, 0.35 и 0.09 кВт соответственно. Во всех режимах наблюдалось практически полное совпадение во времени импульсов генерации с разными длинами волн.

Итак, получена двухволновая генерация в лазере с линзоподобным активным элементом Nd³⁺:YLF и продольной диодной накачкой в режиме модуляции добротности резонатора с пассивным Cr⁴⁺:YAG-затвором вблизи областей частотного вырождения мод. Это открывает перспективы использования полностью твердотельных компактных двухволновых лазеров, востребованных в системах лазерной локации и ТГц видения.

Авторы благодарны В.В.Безотосному, М.В.Горбункову и Ю.М.Попову за содействие при проведении работ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты мол_а 16-32-00834, а 18-02-00285), Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные и прикладные проблемы фотоники и физика новых оптических материалов».

1. Козлов В.Л. *Датчики и системы*, **1**, 37 (2011).
2. Козлов В.Л. *Изв. вузов. Сер. Приборостроение*, **9**, 68 (2009).
3. Zhong H., Redo-Sanchez A., Zhang X.-C. *Intern. J. High Speed Electronics and Systems*, **17** (2), 239 (2007).
4. Willer U., Wilk R., Schippers W., Bottger S., Nodop D., Schossing T., Schade W., Mikulics M., Koch M., Walther M., Niemann H., Guttler G. *Appl. Phys. B*, **87**, 13 (2007).
5. Zhao P., Ragam S., Ding Y.J., Zotova I.B. *Opt. Lett.*, **35** (23), 3979 (2010).
6. Kleine-Ostmann T., Knobloch P., Koch M., Hoffmann S., Breede M., Hofmann M., Hen G., et al. *Electron. Lett.*, **37**, 1461 (2001).
7. Birnbaum M., Klein C.F. *Appl. Phys.*, **44**, 2928 (1973).
8. Иевлев И.В., Корюкин И.В., Лебедева Ю.С., Хандохин П.А. *Квантовая электроника*, **41** (8), 715 (2011) [*Quantum Electron.*, **41** (8), 715 (2011)].
9. Kaminskii A.A., Ueda K., Eichler H.J., Kuwano Y., Kouta H., Bagaev S.N., Chyba T.H., Barnes J. C., Gad G.M.A., Murai T., Lu J. *Opt. Commun.*, **194** (13), 201 (2001).
10. Безотосный В.В., Горбунков М.В., Коромыслов А.Л., Певцов В.Ф., Попов Ю.М., Тункин В.Г., Чешев Е.А. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, **44** (1), 1 (2017).
11. Басиев Т.Т., Дорошенко М.Е., Ивлева Л.И., Осико В.В., Космына М.Б., Комарь В.К., Шульц Я., Елинкова Х. *Квантовая электроника*, **36** (8), 720 (2006) [*Quantum Electron.*, **36** (8), 720 (2006)].
12. Shen H.Y., Zeng R.R., Zhou Y.P., Yu G.F., Huang C.H., Zeng Z.D., Zhang W.J., Ye Q.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **27**, 2315 (1991).
13. Chen Y.F. *Appl. Phys. B*, **70**, 475 (2000).
14. Сироткин А.А., Гарнов С.В., Власов В.И., Загуменный А.И., Заварцев Ю.Д., Кутовой С.А., Щербаков И.А. *Квантовая электроника*, **42** (5), 420 (2012) [*Quantum Electron.*, **42** (5), 420 (2012)].
15. Shen H.Y., Zeng R.R., Zhou Y.P., Yu G.F., Huang C.H., Zeng Z.D., Zhang W.J., Ye Q.J. *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 1937 (1990).
16. He J.L., Du J., Sun J., Liu S., Fan Y.X., Wang H.T., Zhang L.H., Hang Y. *Appl. Phys. B*, **79**, 301 (2004).
17. Vollmer W., Knight M.G., Rines G.A., McCarthy J.C., Chicklis E.P. *Proc. Conf. Lasers and Electro-Optics* (Washington, DC., USA, 1983, Paper THM 2).
18. Murray O. *IEEE J. Quantum Electron.*, **19** (4), 488 (1983).
19. Zhao P., Ragam S., Ding Y.J., Zotova I.B. *Opt. Lett.*, **35** (23), 3979 (2010).
20. Zhang S.L., Tan Y.D., Li Y. *Measurement Science and Technology*, **21** (5), 9 (2010).
21. Zhao P., Ragam S., Ding Y.J., Zotova I.B. *Opt. Lett.*, **36** (24), 4818 (2011).
22. Безотосный В.В., Горбунков М.В., Кострюков П.В. и др. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, **38** (10), 43 (2011).
23. Горбунков М.В., Кострюков П.В., Телегин Л.С., Тункин В.Г., Яковлев Д.В. *Квантовая электроника*, **37** (2), 173 (2007) [*Quantum Electron.*, **37** (2), 173 (2007)].
24. Sooy W. R. *Appl. Phys. Lett.*, **7**, 36 (1965).
25. Zhang Q., Ozygus B., Weber H. *Eur. Phys. J. AP*, **6**, 293 (1999).