

Одночастотный Er:YAG-лазер с инъекцией затравки, основанный на кольцевом резонаторе типа bow-tie, с внешней синхронизацией*

Б.Ц.Яо, Ю.Дэнг, Т.Й.Дай, С.М.Дуань, Ю.Л.Ю, Ю.З.Вонг

Демонстрируется Er:YAG-лазер с инъекцией затравки и диодной накачкой, работающий в режиме модуляции добротности на длине волны 1645.2 нм. В качестве лазера затравки использован одночастотный монолитный Er:YAG-лазер с неплоским кольцевым резонатором, излучающий на длине волны 1645.24 нм с максимальной выходной мощностью 500 мВт. Излучение лазера затравки вводилось в Er:YAG-лазер с резонатором типа bow-tie с внешней синхронизацией для реализации его стабильной одночастотной работы в режиме модуляции добротности. Максимальная выходная энергия импульса одночастотного Er:YAG-лазера в режиме модуляции добротности составляла 2.9 мДж при частоте 100 Гц и длительности импульса 160 нс.

Ключевые слова: диодная накачка, Er:YAG-лазер, инъекция затравки, одночастотный лазер, модуляция добротности.

Лазерные источники, излучающие в безопасной для глаз области спектра, могут быть полезны для множества научных и технических приложений, включая когерентный доплеровский лидар, лидар дифференциального поглощения и т.д. Для лидарной системы необходим импульсный режим работы лазера с большой энергией импульса и узкой линией излучения. Кроме того, высокую точность измерений с помощью когерентных систем на основе эффекта Доплера можно обеспечить только при достаточно большой длительности импульса [1]. Удовлетворить этим требованиям может мощный лазер с модуляцией добротности (ведомый лазер) с инъекцией в его резонатор излучения одночастотного задающего генератора [2–4]. Инжекционный захват требует либо сильного инжектируемого сигнала, либо близкого совпадения его длины волны с длиной волны генератора с внешней синхронизацией (ведомого лазера) [5]. Широко исследовался лазер с инъекцией затравки, генерирующий излучение с длинами волн близки 2 мкм. Так, в [6] описан Ho:YLF-лазер с инъекцией затравки, излучающий с высокой частотой повторения импульсов. В 2011 г. сообщалось о Ho:YAG-лазере с инъекцией затравки, работающем в режиме модуляции добротности при комнатной температуре с накачкой излучением с длиной волны вблизи 1.91 мкм и выходной энергией 7.6 мДж при длительности импульсов 132 нс и частоте их повторения 100 Гц [7]. Порог повреждения глаз человека излучением лазера с длиной волны вблизи 1.6 мкм в десять раз выше, чем излучением лазера с длиной волны в области 2 мкм. Кроме того, зонды и другие компоненты лазера, излучающего вблизи длины волны 1.6 мкм, совместимы с коммуникационной полосой на длине волны 1.5 мкм, что опреде-

ляет целесообразность их практического использования в лидарных системах и коммерческое значение.

Для накачки таких систем выгодно использовать лазерные диоды, излучающие вблизи длины волны 1532 нм, поскольку это позволяет улучшить полную оптическую эффективность и уменьшить объем устройства. В 2005 г. в работе [8] был описан лазер с инъекцией затравки на длине волны 1645 нм. Недавно появилось сообщение [9] об одночастотном Er:YAG-лазере с инъекцией затравки и резонансной накачкой, работающем в режиме модуляции добротности и генерирующем излучение с длиной волны 1645 нм. В лазере с внешней синхронизацией был применен U-образный резонатор, что требовало достаточно большого объема устройства и приводило к трудностям в осуществлении инъекции. Более перспективным для использования в подобных системах является кольцевой резонатор. Его длина может быть достаточно большой при меньшем объеме и, кроме того, в нем можно реализовать два выхода для излучения, что удобно для инъекции затравки. В работе [10] сообщалось о реализации передатчика на основе одночастотного Er:YAG-лазера, излучающего на длине волны 1617 нм, при использовании прямоугонльного резонатора в лазере с внешней синхронизацией. Также прямоугонльный резонатор был использован в лазере ($\lambda = 1645$ нм) с инъекцией затравки и накачкой излучением лазерного диода [11].

В настоящей работе мы сообщаем об одночастотном Er:YAG-лазере с инъекцией затравки, диодной накачкой и конфигурацией кольцевого резонатора типа bow-tie, работающем в режиме модуляции добротности при комнатной температуре. По сравнению с прямоугонльным резонатором кольцевой резонатор типа bow-tie более компактен и более стабилен. Для ослабления эффекта тепловой линзы вместо кристалла в форме стержня использовался слэб из кристалла Er:YAG, что позволило получить стабильную конструкцию типа bow-tie. Лазером затравки служил Er:YAG-лазер с диодной накачкой и неплоским кольцевым резонатором (НКР). Для обеспечения успешной инъекции излучения затравки и исключения влияния внешней среды была использована методика «trap hold

* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

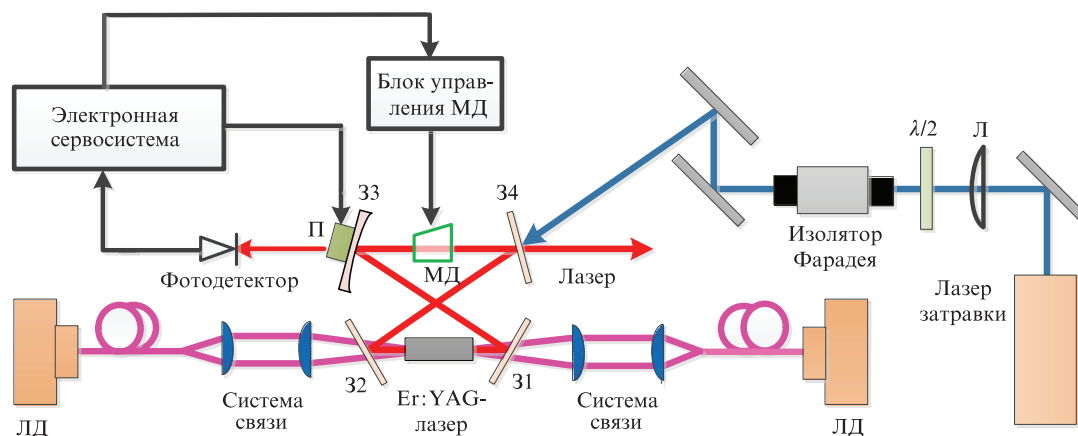


Рис.1. Схема экспериментальной установки: ЛД – лазерные диоды; 31–34 – зеркала; П – пьезопривод; МД – модулятор добротности; Л – линза.

and fire» [12]. Мы создали одночастотный Ег:YAG-лазер ($\lambda = 1645$ нм), работающий в режиме модуляции добротности, с энергией в импульсе 2.9 мДж, с длительностью импульсов 160 нс и с частотой их повторения 100 Гц.

Схема Ег:YAG-лазера с инъекцией затравки показана на рис.1. Она включает три части: непрерывный лазер затравки (задающий генератор), лазер с модуляцией добротности и внешней синхронизацией и электронную систему сервоприводов для инъекции затравки.

Лазером затравки являлся Ег:YAG-лазер с НКР и диодной накачкой. Максимальная выходная мощность одночастотного лазера затравки составляла 500 мВт, соответствующая дифференциальная эффективность – 18.2%. Лазер работал на одной продольной моде р-поляризации с центральной длиной волны 1645.24 нм.

Ег:YAG-лазер с модуляцией добротности работал в режиме лазера с внешней синхронизацией. Использовалась конфигурация кольцевого резонатора типа bow-tie. Два лазерных диода с волоконным выходом (максимальная выходная мощность каждого 20 Вт) служили источниками накачки. За счет изменения температуры лазерных диодов длина волны их излучения настраивалась на максимум полосы поглощения кристалла Ег:YAG (1532 нм). Излучения с волоконных выходов коллимировались линзами с фокусными расстояниями 20 мм и далее фокусировались в кристалл Ег:YAG объективами с фокусными расстояниями 60 мм. Диаметры перетяжек пучков накачки составляли 600 мкм, а сами они находились на расстояниях от входных граней, равных одной трети длины кристалла. Резонатор был образован тремя плоскими зеркалами и одним вогнутым. Плоские зеркала 31 и 32 были «глухими», а зеркало 34, которое использовалось в качестве зеркала инъекции и выходного зеркала кольцевого лазера, имело коэффициент отражения 85% на длине волны 1645 нм. Вогнутое зеркало 33 с радиусом кривизны 300 мм было установлено на пьезоэлектрическом приводе. Полная длина резонатора составляла 350 мм. Для получения режима модуляции добротности использовался акустооптический модулятор длиной 30 мм из кварцевого стекла с низкими потерями. Его максимальная высокочастотная мощность была 25 Вт, а собственные дифракционные потери составляли 62.5%, что было достаточно для предотвращения генерации.

Кристалл Ег:YAG с концентрацией легирующей примеси 0.25%, используемый в лазере с внешней синхронизацией, имел размеры $1.5 \times 6 \times 50$ мм. Тепло, выделяющееся

в слэб-кристалле, рассеивается лучше, чем в стержне, поэтому эффект тепловой линзы был менее выражен. Обе рабочие грани кристалла были просветлены для длин волн 1532 и 1645 нм. Кристалл был обернут индией фольгой и находился в медном радиаторе при постоянной температуре 288 К, которая поддерживалась с помощью термоэлектрического холодильника. Кроме того, схема с двухсторонней накачкой обеспечивала более равномерное распределение тепловой нагрузки. Система связи состояла из линзы и оптической развязки. Линза связи использовалась для того, чтобы оптимизировать согласование пространственной моды. С помощью линзы Л с фокусным расстоянием 200 мм пучок задающего генератора фокусировался до диаметра 0.2635 мм, почти равного диаметру пучка лазера с внешней синхронизацией. Изолятор Фарадея и пластинка $\lambda/2$ использовались для защиты лазера затравки от отраженного лазерного излучения. Генерация лазера затравки и лазера с внешней синхронизацией на одной и той же частоте обеспечивалась электронной системой сервоприводов и фотодетектором, электрически связанным с электронной сервосистемой. Сервосистема включала модулятор добротности и подстраивала частоту лазера с внешней синхронизацией к частоте лазера затравки, что позволило улучшить спектральную чистоту выходного излучения лазера. Для минимизации флуктуаций энергии выходная энергия лазера с модулированной добротностью должна слабо зависеть от времени задержки запуска модулятора.

Спектр излучения лазера затравки регистрировался анализатором спектра 721 (Bristol Company). Выходная длина волны составляла 1645.24 нм (рис.2,а). На рис.2,б показан спектр лазера на выходе сканирующего интерферометра Фабри–Перо (ИФП) с областью свободной дисперсии 3.75 ГГц. Хорошо видно, что лазер работал в режиме генерации одной продольной моды, никаких других поперечных мод в спектре ИФП не наблюдалось. Максимальная выходная мощность лазера затравки, работающего на одной продольной моде, составила 500 мВт.

Длина волны лазера с внешней синхронизацией равнялась 1645.26 нм, почти столько же, что и у лазера затравки. Это говорит о возможности хорошего согласования длин волн обоих лазеров. Выходная мощность лазера с внешней синхронизацией в непрерывном режиме генерации в зависимости от мощности накачки P_p показана на рис.3,а. Дифференциальная эффективность лазера $\eta = 11.58\%$, порог генерации – 19.55 Вт. Выходная энергия

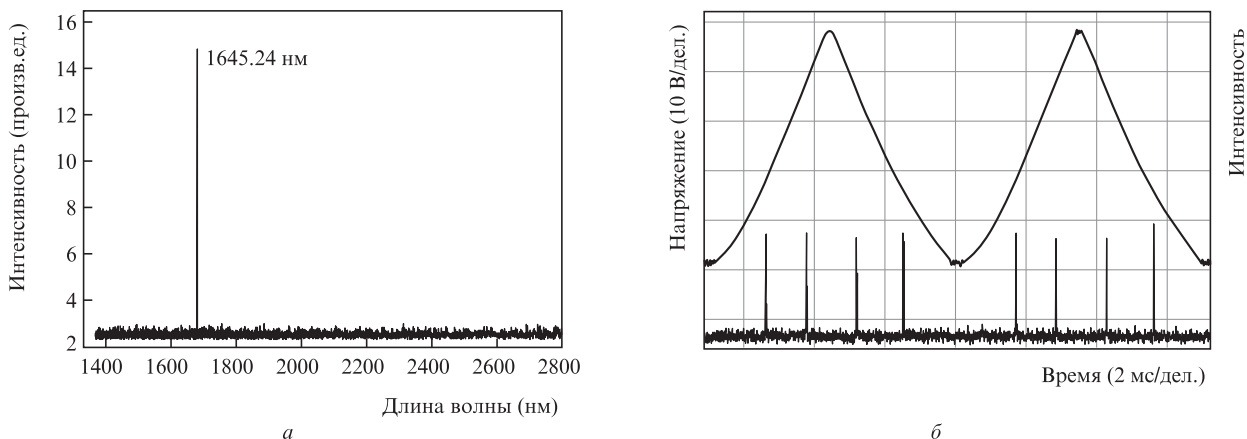


Рис.2. Длина волны лазера затравки (а) и спектр излучения лазера затравки на выходе ИФП (б).

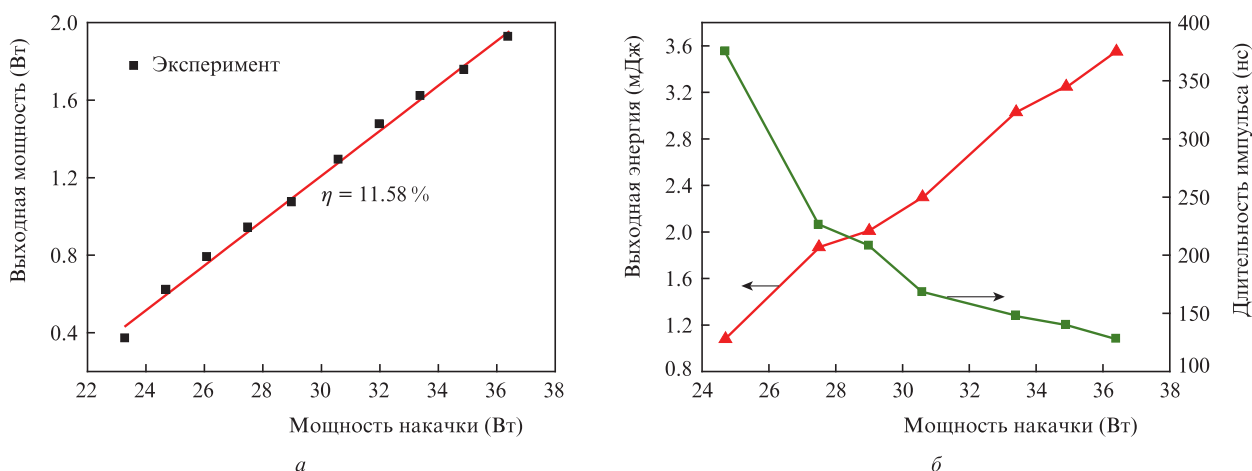


Рис.3. Зависимости от мощности накачки выходной мощности в непрерывном режиме (а) и выходной энергии и длительности импульса в режиме модуляции добротности (б) лазера с внешней синхронизацией.

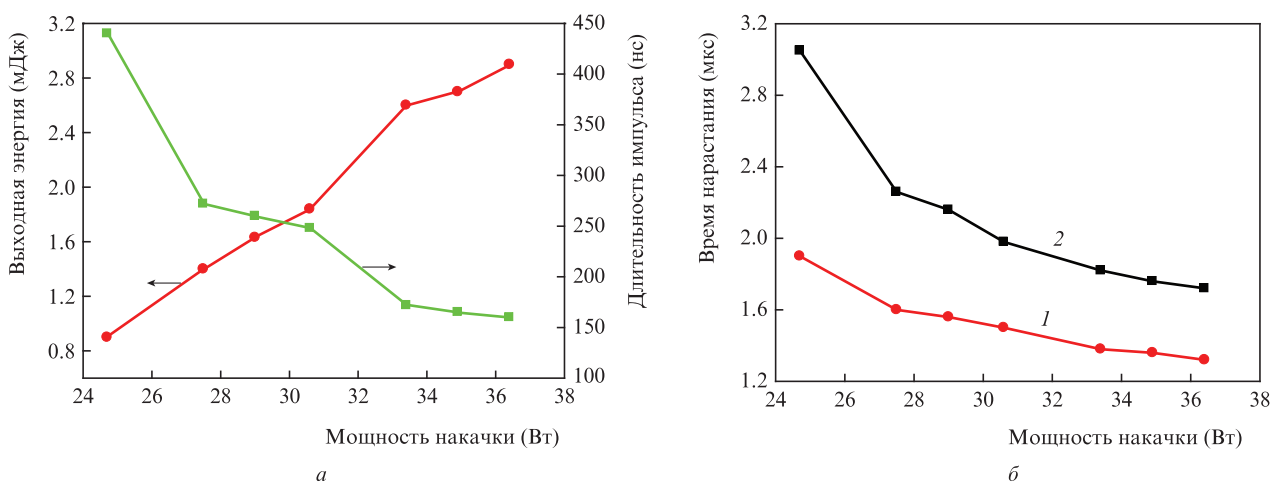


Рис.4. Зависимости от мощности накачки выходной энергии и длительности импульса для режима инъекции затравки (а), а также времени установления импульса Er:YAG-лазера при инъекции затравки (1) и без нее (2) (б).

и длительность импульса лазера с внешней синхронизацией для режима модуляции добротности как функции мощности накачки показаны на рис.3,б. Частота повторения импульсов лазера составляла 100 Гц. Порог генерации кольцевого лазера был около 22 Вт. При $P_p = 36.4$ Вт достигнуты максимальная выходная энергия 3.55 мДж и длительность импульса 128 нс.

На рис.4,а показаны зависимости от P_p выходной энергии и длительности импульса в режиме инъекции затравки. При $P_p = 36.4$ Вт получена выходная энергия 2.9 мДж при длительности импульса 160 нс. Видно, что длительность импульса резко сокращается с увеличением мощности накачки. Была также исследована зависимость выходной энергии Er:YAG-лазера от мощности накачки с

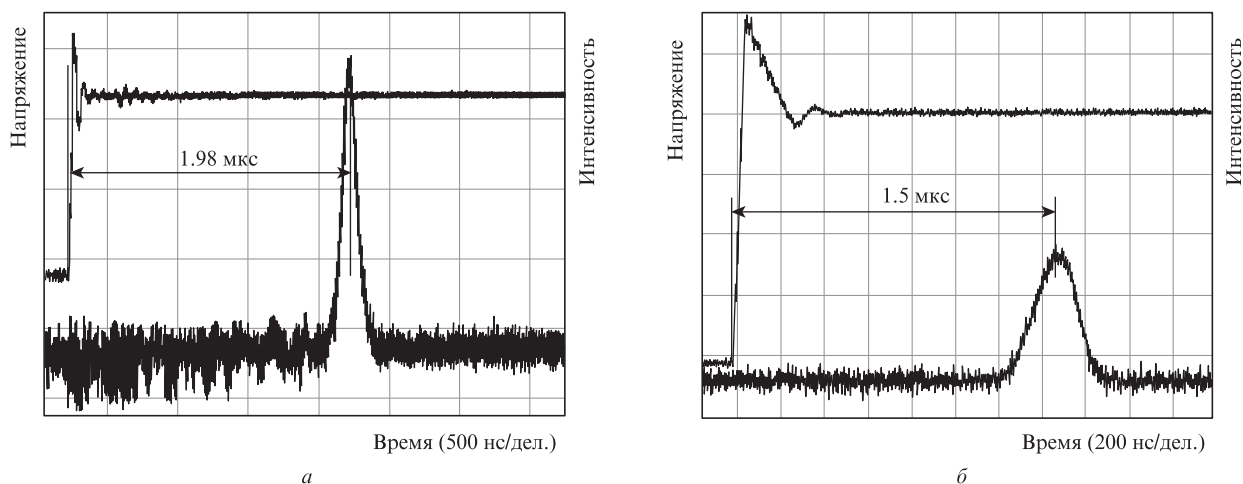


Рис.5. Время установления выходного лазерного импульса в несинхронизованном режиме (а) и в режиме инъекционной синхронизации (б).

инъекцией затравки и без нее. В режиме модуляции добротности без инъекции затравки излучение лазера выходило в двух направлениях. Однако после инъекционного захвата лазер переходил в режим генерации только в одном направлении. При той же мощности накачки выходная энергия в режиме инъекционного захвата была немного ниже, чем в случае его отсутствия. На рис.4,б показано время установления импульса Er:YAG-лазера в зависимости от мощности накачки в режимах с инъекцией затравки и без нее. В обоих случаях время установления лазерного импульса сокращалось при увеличении P_p , однако это время для частотно-синхронизованного лазера с привязкой частоты было короче.

Исследовалось также временное поведение полностью твердотельного кольцевого Er:YAG-лазера с инъекцией затравки. Скачок импульса (pulse-jumping) при переходе от несинхронизованного к синхронизованному режиму показан на рис.5. При энергии импульса 1.84 мДж в режиме частотной синхронизации время установления импульса составило около 1.5 мкс, что на 480 нс короче, чем в режиме отсутствия частотной синхронизации.

Итак, мы сообщили об Er:YAG-лазере с диодной накачкой и инъекцией затравки на основе лазера типа bow-tie с внешней синхронизацией, работающего в режиме модуляции добротности при комнатной температуре. В качестве лазера затравки использовался одночастотный Er:YAG-лазер с НПК, с диодной накачкой, с центральной длиной волны 1645.24 нм и с максимальной выходной мощностью 500 мВт. Благодаря инъекции излучения затравки получен одночастотный режим модуляции доброт-

ности Er:YAG-лазера с максимальной выходной энергией импульса 2.9 мДж при длительности импульса 160 нс и частоте повторения 100 Гц.

Работа поддержана Программой «Отличные таланты в университете для нового века» (NCET-10-0067) и Фондом фундаментальных исследований для Центральных университетов (грант № HIT.NSRIF.2015042).

1. McCarthy J.C., Budni P.A., Labrie G.W., Chicklis E.P. In: *Advanced Solid State Lasers* (Salt Lake City, Utah: Optical Society of America, 1994, HL5).
2. Koch G.J., Deyst J.P., Storm M.E. *Opt. Lett.*, **18**, 1235 (1993).
3. Wu C.T., Ju Y.L., Wang Q., Wang Z.G., Yao B.Q., Wang Y.Z. *Opt. Commun.*, **284**, 994 (2011).
4. Henderson S.W., Suni P.J.M., Hale C.P., Hannon S.M., Magee J.R., Bruns D.L., Yuen E.H. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **31**, 4 (1993).
5. Kurtz R.M., Pradhan R.D., Tun N., Aye T.M., Savant G.D., Jansson T.P., DeShazer L.G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5413**, 41 (2004).
6. Bai Y., Yu J., Petros M., Petzar P., Trieu B., Lee H., Singh U. In: *Advanced Solid-State Photonics* (Washington, DC: Optical Society of America, 2009, WB22).
7. Dai T.Y., Ju Y.L., Yao B.Q., Shen Y.J., Wang W., Wang Y.Z. *Opt. Lett.*, **37**, 1850 (2012).
8. Stoneman R.C., Hartman R., Malm A.I., Gatt P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5791**, 167 (2005).
9. Wang R., Ye Q., Zheng Y., Gao M.W., Gao C.Q. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8959**, 89590F (2014).
10. Stoneman R.C., Hartman R., Schneider E.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6552**, 65520H (2007).
11. Deng Y., Yu X., Yao B.Q., Dai T.Y., Ju Y.L. *Laser Phys.*, **24**, 045809 (2013).
12. Henderson S.W., Yuen E.H., Fry E.S. *Opt. Lett.*, **11**, 715 (1986).