

УДК 681.7.069.24

Энергоэффективный источник импульсного лазерного излучения на кольцевой линии задержки

© 2021 г. **В. А. Алексеев***, доктор техн. наук; **М. Р. Зарипов****;
С. И. Юран***, доктор техн. наук; **В. П. Усольцев***, канд. техн. наук

*Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, Ижевск

**Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Ижевск

***Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, Ижевск

E-mail: zaripov.istu@gmail.com

Поступила в редакцию 19.02.2021

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-07-12-17

Приведена структурная схема и описан принцип действия системы с синхронным некогерентным суммированием лазерных импульсов на кольцевой линии задержки. Проведен анализ эффективности таких систем при применении в качестве кольцевой задержки кварцевых или полимерных волоконных световодов, в которых циркулирует излучение с длинами волн 450, 532, 650, 850, 1310 или 1550 нм. Получены графики зависимости предельного коэффициента энергетической эффективности от частоты следования исходных лазерных импульсов. Показано, что система становится энергетически эффективной, когда частота следования исходных импульсов превышает определенную частоту отсечки, значения которой составляют от единиц килогерц до десятков мегагерц.

Ключевые слова: пиковая мощность, линия оптической задержки, энергетическая эффективность, некогерентное суммирование пучков.

Коды OCIS: 140.3298, 060.2340

ВВЕДЕНИЕ

Одной из проблем современной лазерной техники является создание лазерных источников с экономией потребляемой электроэнергии. Решение этой проблемы наиболее актуально для авиационной техники, подводных аппаратов, лазерных установок специального назначения, автономных медицинских приборов и устройств, работающих в условиях космоса. Экономия электроэнергии влияет на массогабаритные характеристики аппаратуры, продолжительность работы в автономном режиме и энергетические характеристики излучения лазерного источника, входящего в состав аппаратуры.

Повышения таких энергетических характеристик импульсных лазеров, как пиковая мощность и энергия импульса, можно добиться различными путями, например, компрессией лазерных импульсов [1–3], введением в систему оптических усилителей [3–5], некогерентным [6–12] и когерентным [12–15] суммированием лазерных пучков от нескольких источников излучения.

В статье предложен один из вариантов решения обозначенной проблемы для импульсных лазеров. Энергия и пиковая мощность импульса лазера могут быть увеличены в несколько раз путем синхронного некогерентного сложения нескольких импульсов с исполь-

зованием оптических линий задержки. При этом частота повторения импульсов уменьшится, но потребляемая лазером энергия питания останется прежней. Это позволяет получить лазерный импульс большой амплитуды без увеличения энергоемкости внешнего источника питания, что важно при решении таких задач как увеличение дальности зондирования среды лазерным импульсом и передача лазерного сигнала на большее расстояние лазерными локационными системами, дальномерами, установками экологического мониторинга, а также воздействие на объекты лазерным импульсом с увеличенной энергией в лазерных технологических и медицинских установках.

НЕКОГЕРЕНТНОЕ СИНХРОННОЕ СУММИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Предложенный вариант решения проблемы ранее был реализован в лазерном источнике, в состав которого входили $1 \times N$ волоконно-оптический коммутатор, N волоконно-оптических линий задержки и $N \times 1$ волоконно-оптический сумматор [7]. Синхронное сложение сгенерированных лазерных импульсов при этом обеспечивалось за счет их последовательного направления из N выходов коммутатора через N элементов волоконно-оптической задержки разной длины на N входов сумматора. Такой способ обеспечивает формирование импульса, пиковая мощность которого равна сумме пиковых мощностей импульсов лазерного излучения за исключением потерь в компонентах системы суммирования. Данный источник позволяет значительно увеличивать пиковую мощность и энергию импульса лазерного излучения без применения дополнительных источников электропитания. Тем не менее, повышение суммарной пиковой мощности источника сопряжено с необходимостью наращивания числа линий задержки и увеличения их длины, что в свою очередь неизбежно приведет к ухудшению массогабаритных характеристик и снижению надежности работы подобного устройства.

Замена N волоконно-оптических линий задержки на одну кольцевую волоконно-оптическую линию позволяет уменьшить габаритные размеры системы синхронного суммирования импульсов и повысить надежность ее работы,

обеспечивая вместе с этим реализацию представленного варианта решения проблемы. Впервые такой способ синхронного суммирования лазерных импульсов с использованием оптической задержки на волоконном «кольце» с управлением выдачи просуммированного лазерного импульса был предложен и описан в патенте [16], а анализ его практической реализации рассмотрен в публикации [8]. На рис. 1 представлена его общая схема.

На схеме импульсный сигнал с задающего генератора поступает на вход импульсного лазера и управляет его работой. Исходные импульсы лазерного излучения с лазера поступают на средство кольцевой оптической задержки через заданный период времени T следования импульсов. Импульс излучения совершает обход по «кольцу» оптоволоконна до момента поступления в линию задержки нового импульса от лазера, и цикл продолжается до определенного количества оборотов N_{RF} , зависящего от допустимого затухания в линии задержки. При этом на управляющий вход коммутирующего устройства поступают электрические импульсы с выхода счетчика импульсов с частотой в N_{RF} раз меньше частоты f импульсов, вырабатываемых генератором. После поступления электрического импульса со счетчика на управляющий вход коммутирующего устройства оно переключает лазерное излучение, циркулирующее по средству кольцевой оптической задержки, на выход коммутирующего устройства. В результате

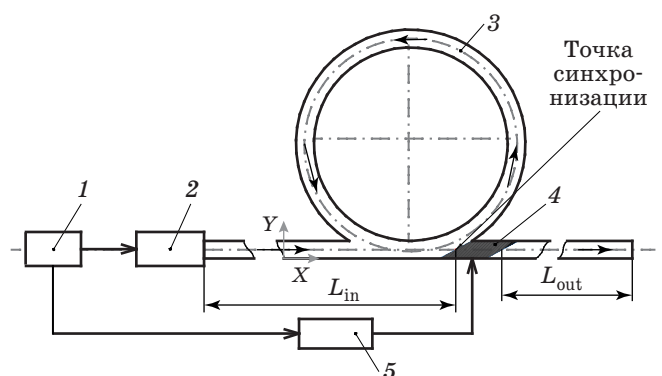


Рис. 1. Общая схема суммирования и накопления лазерных импульсов на основе кольцевой волоконной задержки. 1 — задающий генератор, 2 — импульсный лазер, 3 — средство кольцевой волоконно-оптической задержки, 4 — коммутирующее устройство, 5 — счетчик импульсов.

этого на выходе системы будут формироваться импульсы лазерного излучения с частотой следования f/N_{RF} и пиковой мощностью P_{RF} , равной сумме пиковых мощностей P_0 исходных импульсов лазерного излучения, поступивших на вход средства кольцевой оптической задержки в течение периода $N_{\text{RF}}T$, за исключением оптических потерь в системе σ

$$P_{\text{RF}} = N_{\text{RF}}P_0 - \sigma, \quad (1)$$

где N_{RF} — количество исходных лазерных импульсов, поступивших на вход волоконного «кольца», и число циркуляций первого исходного лазерного импульса в кольцевой линии задержки до момента переключения коммутирующего устройства на вывод излучения.

Следует учесть, что увеличение числа циркуляций пучка в «кольце» N_{RF} также приведет к нарастанию длины пути в волоконном световоде (ВС), который проходит пучок с каждым обходом, и соответственно — к повышению суммарных оптических потерь в системе. Вследствие этого энергетическая эффективность предлагаемого источника излучения в свою очередь будет ограничена потерями в оптическом волокне.

Настоящая работа посвящена оценке зависимости энергетической эффективности предлагаемой системы с синхронным некогерентным суммированием лазерных импульсов на волоконной кольцевой линии задержки от частоты следования исходных лазерных импульсов, поступающих на ее вход.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для количественной оценки энергетической эффективности системы синхронного суммирования будет использоваться коэффициент энергетической эффективности, показывающий, во сколько раз возрастает выходная пиковая мощность суммарного импульса P_{RF} по сравнению с пиковой мощностью исходного импульса P_0 ,

$$\eta = P_{\text{RF}}/P_0. \quad (2)$$

Ранее авторами [8] была проанализирована зависимость коэффициента η от числа циркуляций N_{RF} . При этом было показано, что с увеличением числа циркуляций исходного

импульса в кольцевой задержке N_{RF} коэффициент энергетической эффективности η стремится к предельному значению η_{L} и остается неизменным при возрастании числа N_{RF} .

Теперь важно проанализировать зависимость $\eta_{\text{L}}(f)$ предельного коэффициента энергетической эффективности системы от частоты следования исходных импульсов f и определить значение частоты отсечки f_{C} как частоты следования исходных импульсов, меньше которой коэффициент η_{L} не превышает единицы, а система в целом становится энергетически неэффективной. Зависимость $\eta_{\text{L}}(f)$ позволит оценить быстродействие коммутирующих устройств, которые способны обеспечить работу рассматриваемой системы, и определить диапазон выбора лазерных источников по их частотам следования импульсов, для которых целесообразно применение данной системы.

Каждый исходный импульс, распространяясь в данной системе, претерпевает

- потери на оптическом коннекторе, соединяющем выход лазерного источника и вход в ВС кольцевой задержки,
- потери при распространении излучения в ВС, из которого изготовлены отрезок кольцевой линии задержки, ее входной участок длиной L_{in} , подключаемый к лазерному источнику и выходной участок длиной L_{out} , содержащий оптический затвор, который выступает в роли коммутирующего устройства,
- потери на оптическом затворе при его работе на отражение или пропускание,
- потери при выводе лазерного излучения из ВС, которые можно связать с потерями на оптическом коннекторе, установленном на выходе из рассматриваемой системы.

С учетом отмеченных выше особенностей работы системы связь ее предельного коэффициента энергетической эффективности с частотой следования исходных импульсов представлена в формуле

$$\eta_{\text{L}}(f) = 10^{-0,1[2A_{\text{OC}} + A_{\text{F}}(L_{\text{in}} + L_{\text{out}})]} \times T_{\text{CD}} \left[1 - R_{\text{CD}} 10^{-(0,1A_{\text{F}}c)/(nf)} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где A_{OC} — потери на оптическом коннекторе (дБ), A_{F} — удельные потери выбранного ВС (дБ/м), L_{in} — длина отрезка волокна входного участка кольцевой линии задержки (м), L_{out} — длина отрезка волокна выходного участка

Удельные потери волоконных световодов

Тип волоконного световода	Длина волны, нм	Удельные потери, дБ/км
Кварцевый	1550	0,2
	1310	0,4
	850	2
Полимерный из ПММА	650	150
	532	76,5
	450	101
Полимерный из СУТОР*	1310	18
	850	15
	650	55

Примечание. *СУТОР — сополимер перфторированных диоксидов.

кольцевой линии задержки (m), T_{CD} — коэффициент пропускания коммутирующего устройства, работающего в проходящем свете, R_{CD} — коэффициент отражения коммутирующего устройства, работающего в отраженном свете, c — скорость света в вакууме (м/с), n — показатель преломления материала оптического волокна.

Расчет частотных зависимостей $\eta_L(f)$ был выполнен для систем, построенных на основе кварцевого ВС [17], полимерного ВС из полиметилметакрилата (ПММА) [18] и полимерного ВС из СУТОР [19], при условии распространения в них лазерного излучения длинами волн λ 450, 532, 630, 850, 1310 или 1550 нм. Значения потерь в коннекторах в соответствии с работой [20] были приняты $A_{OC} = 0,15$ дБ (оптические коннекторы семейства F-3000TM или типа APC и UPC), для коммутирующего устройства значения отражения и пропускания приняты $R_{CD} = T_{CD} = 0,87$, что соответствует внутренним потерям коммутатора 1×2 0,6 дБ [8], а длины входного и выходного участков линии задержки $L_{in} = L_{out} = 1$ м. Согласно данным, указанным в публикациях [17–19], значения удельных потерь A_F различных ВС сведены в таблицу.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчета предельных коэффициентов энергетической эффективности представлены в виде графических зависимостей $\eta_L(f)$

для ВС различных типов на разных длинах волн излучения на рис. 2 и 3.

Источник с синхронным некогерентным суммированием на основе кварцевого волоконного «кольца» энергетически эффективен ($\eta_L > 1$) при частотах следования импульсов не меньше единиц килогерц при длине волны поступающего излучения 1550 нм (кривая 1 на рис. 2), не менее десятков килогерц на $\lambda = 1310$ нм (кривая 2 на рис. 2) и до 100 кГц

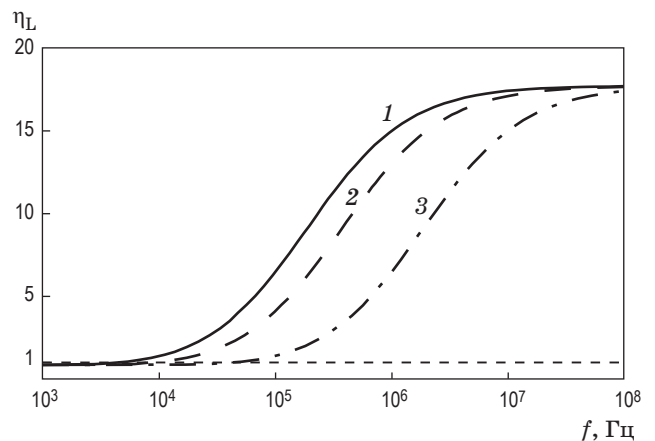


Рис. 2. Зависимости предельно достижимого коэффициента энергетической эффективности η_L от частоты следования импульсов лазера f при использовании кварцевого световода на длинах волн 1550 (1), 1310 (2), 850 (3) нм.

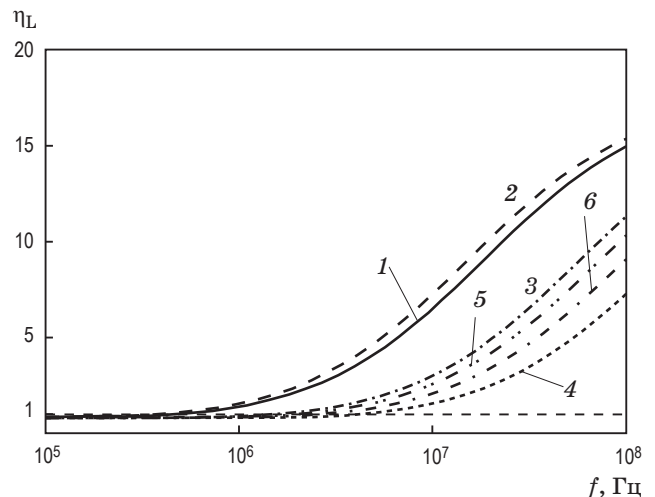


Рис. 3. Зависимости предельно достижимого коэффициента энергетической эффективности η_L от частоты следования импульсов лазера f при использовании полимерного световода из СУТОР на длинах волн 1310 (1), 850 (2), 650 (3) нм и при использовании полимерного световода из ПММА на длинах волн 650 (4), 532 (5), 450 (6) нм.

на $\lambda = 850$ нм (кривая 3 на рис. 2). Такой сдвиг частоты отсечки импульсов лазера в область высоких частот, при котором η_L превышает единицу, непосредственно связан с ростом удельных потерь в кварцевом световоде при уменьшении длины волны излучения.

Построение источника на основе кольцевых линий задержки из СУТОР ведет к дальнейшему сдвигу частоты отсечки к сотням килогерц на длинах волн 1310 и 850 нм (кривые 1 и 2 на рис. 3) и к единицам мегагерц на $\lambda = 650$ нм (кривая 3 на рис. 3). Вместе с тем нарастание коэффициента η_L с увеличением f в системе, построенной на основе данных ВС, происходит медленнее, чем при использовании кварцевых ВС: если в системе с кварцевыми световодами при $f = 10^8$ Гц $\eta_L > 15$, то в системе с полимерными световодами из СУТОР на данной частоте $\eta_L \leq 15$. Это объясняется сравнительно большими удельными потерями в полимерных ВС из СУТОР: десятки децибелов на километр против единиц и десятых долей децибелов на километр в кварцевых ВС.

Применение полимерных волокон из ПММА в качестве линий задержки в видимой области оптического диапазона длин волн ведет к дальнейшему сдвигу частоты отсечки в область единиц и десятков мегагерц и общему спаду предельного коэффициента энергетической эффективности системы до 10 при $f = 10^8$ Гц (кривые 4–6 на рис. 3).

В целом, если судить по частотным зависимостям, приведенным на рис. 2 и 3, можно отметить, что значения частот следования импульсов, при которых $\eta_L > 1$, лежат в диапазоне $f = 10^3$ – 10^7 Гц и зависят от материала ВС, применяемого в качестве линии задержки в рассматриваемой системе, и от длины волны излучения, введенного в систему. Отсюда следует, что максимально допустимое время переключения коммутирующего устройства между его выходами при выводе излучения из волоконного «кольца» будет принимать значения в пределах от 10^{-7} до 10^{-3} с, что подразумевает применение в рассматриваемой систе-

ме синхронного суммирования на кольцевой волоконной задержке высокоскоростных оптических коммутирующих устройств с временами переключения не более 1 мс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрировано основное достоинство источника, построенного на синхронном некогерентном суммировании лазерных импульсов на кольцевой волоконной линии задержки по сравнению с системами с множеством волоконных линий задержки, которое заключается в улучшении его массогабаритных характеристик, упрощении конструкции и повышении надежности за счет уменьшения числа линий задержки до одной. При этом источник с кольцевой задержкой обеспечивает повышение пиковой мощности одиночного импульсного лазерного источника без применения дополнительных источников лазерного излучения, оптических усилителей, увеличения энергии питания или изменения режима работы исходного лазера.

Кроме того, подтверждена возможность энергетически эффективного функционирования исследуемой системы с $\eta_L > 1$ при переходе от ближнего инфракрасного диапазона спектра (850, 1310, 1550 нм) к видимому диапазону (450, 532, 650 нм) и при замене кварцевой волоконной кольцевой линии задержки с удельными потерями порядка десятых долей и единиц децибелов на километр на волоконное «кольцо», изготовленное из полимерных СУТОР или ПММА ВС с удельными потерями порядка десятков и сотен децибелов на километр.

Также показано, что увеличение удельных потерь ведет к повышению частоты отсечки и уменьшению времени переключения коммутирующего устройства. Таким образом, при сборке исследуемой системы следует искать компромисс между снижением себестоимости волоконной кольцевой линии задержки за счет применения полимерных ВС и использованием дорогостоящих коммутирующих устройств с высоким быстродействием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев А.А. Сверхсильный свет (достижения и перспективы) // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 11. С. 19–28.
2. Chang G., Wei Z. Ultrafast fiber lasers: An expanding versatile toolbox // iScience. 2020. V. 23. № 5. P. 101101.

3. *Bartulevicius T., Veselis L., Madeikis K., Michailovas A., Rusteika N.* Compact femtosecond 10 μ J pulse energy fiber laser with a CFBG stretcher and CVBG compressor // *Optical Fiber Technol.* 2018. V. 45. P. 77–80.
4. *Обронов И.В., Демкин А.С., Мясников Д.В.* Твердотельный усилитель на основе кристалла Yb:YAG с одномодовой лазерной накачкой на длине волны 920 нм // *Квант. электрон.* 2018. Т. 48. № 3. С. 212–214.
5. *Алешкина С.С., Липатов Д.С., Кочергина Т.А., Вельмискин В.В., Темялко В.Л., Котов Л.В., Бардина Т.Л., Бубнов М.М., Гурьянов А.Н., Лихачев М.Е.* Полностью волоконный одномодовый усилитель слабого сигнала для спектрального диапазона около 0.976 мкм // *Квант. электрон.* 2019. Т. 49. № 10. С. 919–924.
6. *Motes A.* Laser beam combining. Rio-Rancho: AM Photonics, 2015. 132 p.
7. *Алексеев В.А., Перминов А.С., Юран С.И.* Повышение пиковой мощности источника импульсного лазерного излучения с применением оптических линий задержки // *Оптический журнал.* 2018. Т. 85. № 12. С. 8–14.
8. *Алексеев В.А., Зарилов М.Р., Перминов А.С., Ситникова Е.А., Усольцев В.П., Юран С.И.* Повышение пиковой мощности импульсного источника лазерного излучения с применением кольцевой волоконной линии задержки // *Приборы и методы измерений.* 2019. Т. 10. № 2. С. 151–159.
9. *Bai Y., Lei G., Chen H., Feng X., Li D., Bai J.* Incoherent space beam combining of fiber-transmitted semiconductor lasers for oil well laser perforation // *IEEE Access.* 2019. V. 7. P. 154457–154465.
10. *Yang G., Liu L., Jiang Z., Wang T., Guo J.* Incoherent beam combining using fast steering mirrors // *J. Modern Opt.* 2016. V. 64. № 3. P. 251–258.
11. *Glebov L.B., Drachenberg D., Andrusyak O., Venus G., Smirnov V., Lumeau J.* Ultimate efficiency of spectral beam combining by volume Bragg gratings // *Appl. Opt.* 2013. V. 52. № 30. P. 7233–7242.
12. *Van Zandt N.R., Cusumano S.J., Bartell R.J., Basu S., McCrae Jr.J.E., Fiorino S.T.* Comparison of coherent and incoherent laser beam combination for tactical engagements // *Opt. Eng.* 2012. V. 51. № 10. P. 104301.
13. *Brignon A.* Coherent laser beam combining. Weinheim: Wiley-VCH, 2013. 509 p.
14. *Yang Y., Geng C., Li F., Huang G., Li X.* Multi-aperture all-fiber active coherent beam combining for free-space optical communication receivers // *Opt. Exp.* 2017. V. 25. № 22. P. 27519–27532.
15. *Богатов А.П., Дракин А.Е., Микаелян Г.Т.* Когерентное сложение оптических пучков диодных излучателей в системе задающий генератор — зигзагообразный усилитель мощности // *Квант. электрон.* 2019. Т. 49. № 11. С. 1014–1018.
16. *Алексеев В.А., Юран С.И., Перминов А.С. и др.* Источник импульсного лазерного излучения // Патент России № 189439. 2019.
17. *Слепов Н.Н.* Оптическое волокно как среда передачи // *Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы* / Под ред. Дмитриева С.А. и Слепова Н.Н. М.: Техносфера, 2010. С. 25–50.
18. *Ziemann O., Krauser J., Zamzow P.E., Daum W.* POF handbook. Optical short range transmission systems. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 880 p.
19. Thorlabs — Graded-index polymer optical fiber (GI-POF). <https://www.thorlabs.com/catalogPages/1100.pdf>
20. *Никоноров Н.В., Сидоров А.И.* Материалы и технологии волоконной оптики: специальные оптические волокна: учеб. пособ., курс лекций. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 130 с.