

Исследование сложения лазерных пучков в кольцевой волоконно-оптической линии задержки

М.Р. Зарипов¹, В.А. Алексеев², А.И. Кириллов¹, А.В. Офицерова²

¹Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия

²Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия

Поступила 09.12.2022

Принята к печати 18.01.2023

Широкое распространение в настоящее время автономных лазерных систем предполагает снижение энергии питания, потребляемой входящими в их состав лазерными источниками, при одновременном повышении их выходных энергетических характеристик. Целью настоящей работы являлось практическое подтверждение возможности сложения лазерных пучков в системах, построенных на основе кольцевой линии задержки.

Изготовлена экспериментальная установка, реализующая принцип схемы синхронного сложения лазерных пучков на кольцевой волоконно-оптической линии задержки, разработанной ранее авторами. Представлена схема изготовленной установки, подробно описан её принцип действия и рассмотрен её состав. Отмечено, что для достижения поставленной цели выполнялись измерения электрических сигналов, снимаемых с фотоприёмного устройства установки, и отводимой сплиттером доли мощности лазерного излучения, сформированного в волоконно-оптическом тракте установки. Приведены результаты измерений в виде осциллограмм временных зависимостей электрических сигналов фотоприёмного устройства и значений мощности на выходе сплиттера. Представлены графики зависимости мощности вывода и мощности циркуляции от мощности исходного лазерного пучка, вводимого в установку.

Анализ результатов показал, что в кольцевой волоконно-оптической линии задержки происходит сложение лазерных пучков. При этом установлено, что предложенная схема обеспечивает увеличение мощности исходного пучка в 1,05...1,11 раз.

Ключевые слова: лазерный источник излучения, сложение лазерных пучков, кольцевая волоконная линия задержки.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-44-53

Адрес для переписки:

Зарипов М.Р.
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
ул. имени Т. Барамзиной, 34, Ижевск 426067, Россия
e-mail: zaripov.istu@gmail.com

Address for correspondence:

Zaripov M.R.
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia
e-mail: zaripov.istu@gmail.com

Для цитирования:

М.Р. Зарипов, В.А. Алексеев, А.И. Кириллов, А.В. Офицерова.
Исследование сложения лазерных пучков в кольцевой
волоконно-оптической линии задержки.
Приборы и методы измерений.
2023. – Т. 14, № 1. – С. 44–53.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-44-53

For citation:

M.R. Zaripov, V.A. Alekseev, A.I. Kirillov, A.V. Oficerova.
[Research of Laser Beam Combining in Ring Fiber-Optic Delay Line].
Devices and Methods of Measurements.
2023, vol. 14, no. 1, pp. 44–53 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-44-53

Research of Laser Beam Combining in Ring Fiber-Optic Delay Line

M.R. Zaripov¹, V.A. Alekseev², A.I. Kirillov¹, A.V. Oficerova²

¹Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia

²Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia

Received 09.12.2022

Accepted for publication 18.01.2023

Abstract

At present time widespread use of autonomous laser systems supposes reducing of supply energy, consumed by laser sources that are included in their composition and at the same time increasing of their output energy characteristics. The objective of this work was practical confirmation of possibility of laser beam combining in systems based on a ring delay line.

The experimental setup that implements the principle of synchronous laser beam combining scheme on the ring fiber-optic delay line, developed by authors earlier, is made. The schematic diagram of the manufactured setup is presented, its operation principle is described in detail and its composition is considered. It is noted that in order to achieve the objective measurements of electrical signals received from the photodetector of the setup and measurements of the part of laser radiation power removed by the splitter and formed in the fiber-optic path of the setup are performed. Results of measurements are presented as the waveforms of electrical signals from the photodetector and of power values at the output of the splitter. Plots of dependence of the output power and the circulation power on the power of the initial laser beam introduced into the setup are presented.

Analysis of results showed that the laser beam combining occurs in the ring fiber-optic delay line. Besides, it was found that the proposed scheme provides an increase in the power of the initial beam by 1.05...1.11 times.

Keywords: laser source, laser beam combining, ring fiber-optic delay line.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-44-53

Адрес для переписки:

Зарипов М.Р.
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
ул. имени Т. Барамзиной, 34, Ижевск 426067, Россия
e-mail: zaripov.istu@gmail.com

Address for correspondence:

Zaripov M.R.
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia
e-mail: zaripov.istu@gmail.com

Для цитирования:

М.Р. Зарипов, В.А. Алексеев, А.И. Кириллов, А.В. Офицерова.
Исследование сложения лазерных пучков в кольцевой
волоконно-оптической линии задержки.
Приборы и методы измерений.
2023. – Т. 14, № 1. – С. 44–53.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-44-53

For citation:

M.R. Zaripov, V.A. Alekseev, A.I. Kirillov, A.V. Oficerova.
[Research of Laser Beam Combining in Ring Fiber-Optic Delay Line].
Devices and Methods of Measurements.
2023, vol. 14, no. 1, pp. 44–53 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-44-53

Введение

К настоящему моменту существенно расширился парк автономных лазерных систем и комплексов различного назначения: экологического, военного, технологического. Их примером могут служить ряд комплексов экологического мониторинга, применяемых для обнаружения загрязнений в атмосфере и водной среде, наблюдения за погодными явлениями, контроля состава сточных вод на промышленных предприятиях и очистных сооружениях, приборы военного назначения, в том числе транспортируемые на беспилотных летательных аппаратах или переносные устройства, лидары и средства наведения высокоточных боеприпасов на цель, компактные портативные технологические лазерные установки и другие лазерные системы, которые работают в условиях ограничения энергопитания [1, 2]. Актуальным для них является повышение эффективности их работы (увеличение глубины зондирования сред, что повышает дальность действия системы, расширяет климатические условия работы, снижает вероятность ложного срабатывания и др.) без возрастания потребляемой энергии питания или сохранения их эффективности на прежнем уровне при увеличении времени автономной работы при условии использования одного и того же источника питания.

В связи с этим возникает задача создания экономичных импульсных лазерных источников с существенным повышением амплитуды импульса лазерного излучения без дополнительных энергетических затрат на обеспечение их питания. Такие лазеры могут найти широкое применение во всех автономных системах, исключающих возможность дополнительных энергозатрат и работающих в условиях экономии потребляемой электрической энергии.

К настоящему времени существует большое количество практических и теоретических работ [3–9], посвящённых решению вопроса о повышении амплитуды лазерного импульса и направленных на реализацию следующих групп способов:

- компрессия лазерных импульсов [3, 4], результатом которой является уменьшение длительности импульса, при этом происходит перераспределение энергии одного лазерного

импульса в пределах его длительности и не происходит увеличение энергии импульса;

- применение оптических усилителей [5, 6], в состав которых входят усиливающие активные среды, которые требуют использования собственных систем накачки и дополнительных источников питания соответственно, но при этом происходит увеличение энергии и амплитуды импульса;

- сложение пучков лазерного излучения [7–9], которое предполагает использование нескольких лазерных источников, при этом не всегда соблюдается синхронное суммирование импульсов лазерного излучения (за исключением когерентных способов), а импульсы, как правило, не идентичны по длительности и амплитуде.

Очевидно, что применение последних двух из указанных способов сопряжено с увеличением энергии питания, которая будет потребляться либо несколькими устройствами накачки в оптических усилителях, либо совокупностью лазерных источников в системах сложения пучков. Кроме того, повышение амплитуды лазерного импульса не всегда допустимо за счёт его компрессии, так как уменьшение длительности импульса может привести к изменению механизма воздействия излучения на объект для силовых лазерных установок или изменению точностных характеристик лазерных устройств мониторинга и, как следствие, нарушению функционирования автономной лазерной системы в целом.

Очевидно, что наилучшим решением в данном случае может стать перераспределение энергии не в пределах одного импульса, как это происходит в случае компрессии импульсов, а в пределах серии N импульсов и её концентрации в одиночном импульсе без изменения его длительности и дополнительного потребления энергии питания. Такой способ повышения амплитуды лазерного импульса был реализован авторами в виде синхронного сложения N импульсов лазерного излучения, формируемых одним источником. При этом был разработан ряд схемных решений [10, 11].

Целью настоящей работы являлось практическое подтверждение возможности сложения лазерных пучков в системах, построенных на основе кольцевой линии задержки.

Экспериментальная установка

Одной из наиболее простых в плане практической реализации стала схема с так называемой кольцевой волоконно-оптической линией задержки [11], так как в ней, в отличие от систем [10], не требуется применение множества волоконно-оптических линий задержки, длины которых должны точно подгоняться для обеспечения синхронного сложения лазерных пучков. Авторами изготовлена экспериментальная установка, которая по своему конструктивному исполнению соответствует варианту системы с одиночной волоконной кольцевой линией оптической задержки, формируемой на основе волоконно-оптического сумматора 2×1 (далее – ВОС 2×1) и волоконно-оптического коммутатора 1×2 (далее – ВОК 1×2).

Следует отметить, что максимальная длительность суммарного импульса, формируемого на выходе из таких систем, будет связана с оптической длиной пути излучения в «кольце» задержки и при типичных длинах волоконных световодов ВОК 1×2 и ВОС 2×1 порядка 1 м составит не более 10 нс. Это свидетельствует о необходимости применения в составе системы дорогостоящих электрооптических ВОК 1×2 с временами переключения порядка единиц наносекунд. Однако доступные для изготовления установки электромеханические ВОК 1×2 не обладали таким быстродействием (минимальное время переключения, применяемого в установке ВОК 1×2 , не более 3 мс) и, следовательно, не могли обеспечить вывод таких коротких лазерных импульсов. Поэтому разработанная экспериментальная установка предназначена только для подтверждения возможности сложения пучков в кольцевой линии задержки.

Схема разработанной установки представлена на рисунке 1. Установка действует следующим образом. Основной лазерный источник с волоконным выходом 1 соединён с входом *A* ВОС 2×1 2, через который сформированный лазером исходный пучок излучения вводится в кольцевую волоконно-оптическую линию задержки. При этом ВОС 2×1 , в отличие от исходного конструктивного исполнения исследуемой системы, подключается к входу ВОК 1×2 4 не напрямую, а

через волоконный сплиттер 1×2 3. Сплиттер выполняет в установке функцию светоделительного элемента и разделяет пучок, поступивший на его вход, в соотношении 95:5. Причём 5 % энергии пучка, вошедшего в сплиттер, отводится через выход *A*, а оставшаяся доля энергии остаётся в рабочей части установки. Выход *B* сплиттера подключён к входу ВОК 1×2 , при этом поступивший в волоконное «кольцо» лазерный пучок через выход *A* ВОК 1×2 проходит на вход *B* ВОС 2×1 и продолжает распространяться в кольцевой задержке при подаче на ВОК 1×2 сигнала высокого логического уровня с блока управления 6. Таким способом обеспечивается циркуляция наложенных друг на друга лазерных пучков в кольцевом элементе задержки и их сложение с каждым следующим исходным лазерным пучком, введённым через первый вход ВОС 2×1 . Процесс накопления энергии излучения идет до тех пор, пока суммарный пучок в «кольце» не будет выведен через выход *B* ВОК 1×2 при переключении коммутатора по сигналу низкого логического уровня с блока управления 6.

При выполнении измерений с помощью осциллографа излучение, отводимое через выход *A* сплиттера 3, поступает на первое фотоприёмное устройство с волоконным входом (далее – ФПУ-1) 5. При этом ФПУ-1 преобразует оптическое излучение в электрический сигнал, который поступает на осциллограф для его измерения и последующего анализа. Причём при переключении ВОК 1×2 на вывод излучения наружу из установки через его выход *B* ФПУ-1 позволит зарегистрировать сигнал, пропорциональный мощности излучения исходного пучка (далее – сигнал вывода). Вместе с тем переключение ВОК 1×2 на циркуляцию излучения в волоконном «кольце» через его выход *A* обеспечит регистрацию ФПУ-1 сигнала, пропорционального мощности суммарного пучка (далее – сигнал циркуляции). Для снижения влияния температурного дрейфа ФПУ-1 в состав установки добавлено второе фотоприёмное устройство с волоконным входом (далее – ФПУ-2) 7, включённое в электрическую схему встречно ФПУ-1. На оптический вход ФПУ-2 поступает непрерывное излучение опорного лазера 8. Для лучшей термокомпенсации ФПУ-1 и ФПУ-2

должны располагаться рядом. Аналогично, лазеры 1 и 8 также размещались рядом. Для уменьшения уровня электромагнитных помех измерения выполнялись с помощью дифференциального пробника. Таким образом, сигнал U_m , регистрируемый от ФПУ-1 и ФПУ-2 с помощью осциллографа (далее – регистрируемый сигнал), представляет собой разность сигнала U_r , формируемого ФПУ-2 (далее – опорный сигнал), и сигнала U_o , формируемого ФПУ-1 (далее – основной сигнал):

$$U_m = U_r - U_o. \quad (1)$$

Поэтому в дальнейшем при обработке осциллограмм следует учитывать, что получаемые сигналы вывода и циркуляции будут в итоге инвертированы относительно основных сигналов, формируемых ФПУ-1.

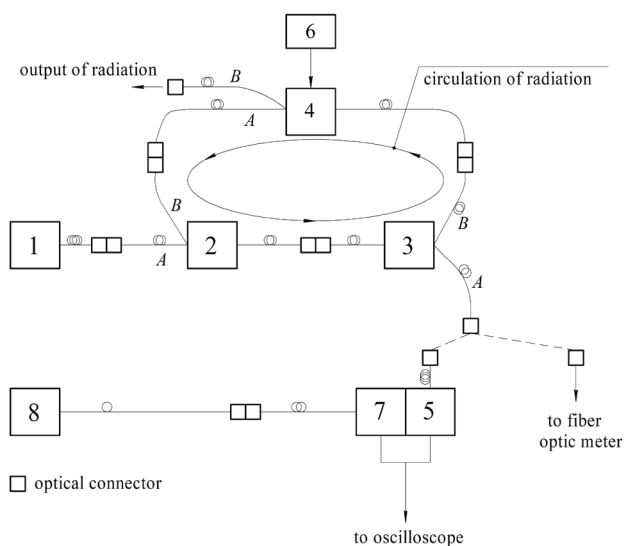


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – основной лазерный источник; 2 – 2×1 волоконно-оптический сумматор; 3 – волоконный сплиттер 95:5; 4 – 1×2 волоконно-оптический коммутатор; 5 – первое фотоприёмное устройство; 6 – блок управления; 7 – второе фотоприёмное устройство; 8 – опорный лазерный источник

Figure 1 – Schematic diagram of the experimental setup: 1 – main laser source; 2 – 2×1 fiber-optic combiner; 3 – fiber-optic splitter 95:5; 4 – 1×2 fiber-optic switch; 5 – first photodetector; 6 – control circuit; 7 – second photodetector; 8 – reference laser source

Непосредственное измерение мощности лазерного излучения осуществлялось с помощью

волоконно-оптического мультиметра (далее – ВОМ), который оптически подключался к выходу *A* сплиттера 3 вместо ФПУ-1 с помощью коннектора *FC/UPC*. Причём при переключении ВОК 1×2 на вывод излучения наружу из установки через его выход *B* с помощью ВОМ будет измерена мощность, соответствующая доле мощности излучения исходного пучка (далее – мощность вывода). Вместе с тем переключение ВОК 1×2 на циркуляцию излучения в волоконном «кольце» через его выход *A* обеспечит измерение с помощью ВОМ мощности, соответствующей доле мощности суммарного пучка (далее – мощность циркуляции). Сравнение результатов измерений, полученных с помощью ВОМ, в виде мощностей вывода и циркуляции позволит количественно оценить возможность сложения лазерных пучков в кольцевой волоконно-оптической линии задержки.

В качестве основного лазера 1 и опорного лазера 8 используются лазерные диоды с одномодовым волоконным выходом *LSLD155-4-S*, способные генерировать непрерывное или импульсное излучение. Роль ВОК 2×1 2 выполняет сплиттер 50:50 *FBT-MM-62.5/125-5050*, развёрнутый так, что излучение вводится через его два многомодовых волоконных выхода, а выводится через многомодовый волоконный вход. В качестве волоконного сплиттера 3 в установке применялся сплиттер 95:5 *FBT-MM-62.5/125-0595*. В роли ВОК 1×2 4 выступал электромеханический ВОК с поворотным микрозеркалом *FSW-2-L-15-90-10-FA*. Приём излучения осуществляется с помощью ФПУ-1 5 и ФПУ-2 7, в качестве которых используются *InGaAs* фотодиоды с одномодовым волоконным входом *BLPD-PFA1-60BR*. Блок управления 6 реализован на основе электронного ключа *ADG736*, контролируемого одноплатным компьютером *Raspberry Pi Zero*. С помощью этих компонент осуществлялась подача напряжений высокого и низкого уровней на электрический вход ВОК 1×2, чтобы обеспечить его переключение между выходами *A* и *B*.

Несмотря на полностью волоконное исполнение установки, внешнее фоновое оптическое излучение естественных и искусственных источников света проникает в кварцевый волоконный световод (далее –

ВС), рассеиваясь на его защитной полимерной оболочке. Помимо этого, изменение температуры ВС, происходящее из-за изменения температуры окружающего воздуха и нагрева под действием падающих на ВС солнечных лучей, приводит к случайному изменению длины ВС компонент установки. Следствием всего этого становятся искажение и случайные колебания оптических сигналов циркуляции и вывода и, как следствие, измеряемого с помощью осциллографа электрического сигнала. Чтобы снизить влияние данных факторов на ВС, экспериментальная установка при выполнении измерений помещалась в оптическую камеру, представлявшую собой помещение с гладкими чёрными стенками, в котором исключалось распространение внешнего фонового излучения.

Для качественной оценки возможности сложения лазерных пучков в системе с кольцевой линией оптической задержки осуществлялись измерения регистрируемого сигнала U_m и сигнала переключения U_s , поступающего с блока управления на ВОК 1×2. Для этого применялся цифровой четырёхканальный цифровой осциллограф MSO64. При этом одновременно на первом канале осциллографа регистрировался сигнал U_m , а на втором – сигнал U_s . Это необходимо для определения на осциллограмме временных участков,

соответствующих оптическим сигналам циркуляции и вывода.

Для количественной оценки возможности сложения лазерных пучков в исследуемой системе с волоконным «кольцом» осуществлялись измерения мощности лазерного излучения. Для этого применялся BOM FF-3217A.

Результаты и обсуждение

Выполненные с помощью осциллографа измерения позволяют качественно оценить возможность сложения лазерных пучков в системах с кольцевой волоконной линией задержки. Это было обеспечено за счёт регистрации временных зависимостей сигналов $U_s(t)$ (рисунок 2, зависимость 3) и $U_m(t)$ (рисунок 2, зависимость 4) в виде осциллограмм при интервалах переключения между сигналами циркуляции и вывода 5 мс (рисунок 2a) и 50 мс (рисунок 2b).

Установленная цена деления горизонтальной развёртки составила 10 мс (рисунок 2a) и 100 мс (рисунок 2b), вертикальной развёртки первого канала – 0,5 В и вертикальной развёртки второго канала – 20 мВ. При этом во время проведения измерений с помощью программы управления задавался период переключения между выходами ВОК 1×2 10 мс и 100 мс.

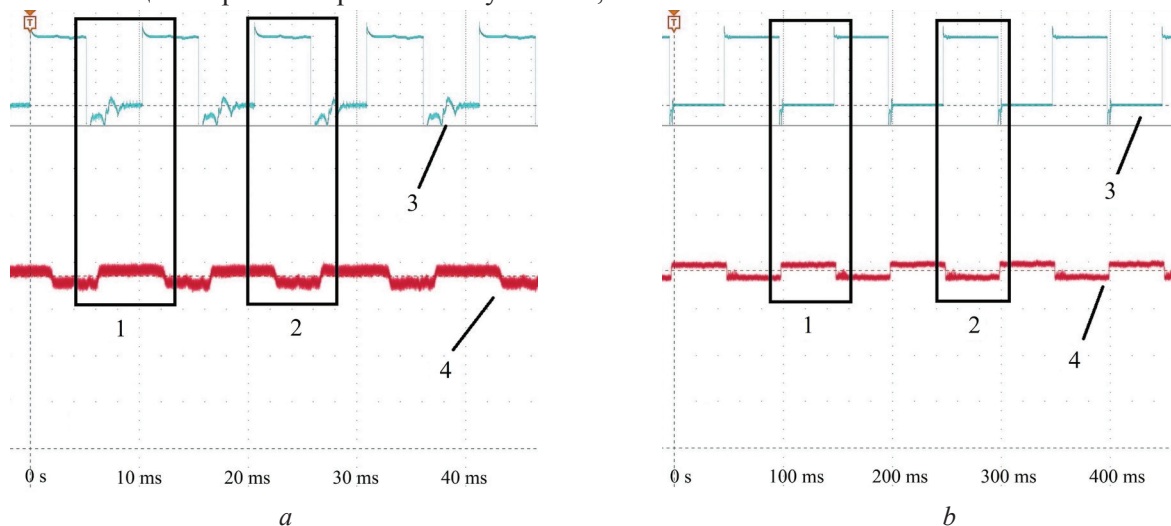


Рисунок 2 – Снимок экрана осциллографа при интервалах переключения 5 мс (a) и 50 мс (b): 1 – временной участок сигнала вывода U_{m1} ; 2 – временной участок сигнала циркуляции U_{m2} ; 3 – сигнал переключения $U_s(t)$; 4 – регистрируемый сигнал $U_m(t)$

Figure 2 – Oscilloscope screenshot for switch times 5 ms (a) and 50 ms (b): 1 – temporal section of output signal U_{m1} ; 2 – temporal section of circulation signal U_{m2} ; 3 – switch signal $U_s(t)$; 4 – registered signal $U_m(t)$

В пределах временного участка 1 на ВОК 1×2 подаётся сигнал $U_s(t)$ низкого логического уровня, это свидетельствует о том, что ВОК 1×2 переключён на волоконный выход B , а на ФПУ-1 поступает оптический сигнал вывода, т. е. сложения лазерных пучков в волоконном «кольце» установки не происходит. При этом на первом канале осциллографа регистрируется сигнал величиной $U_m = U_{m1}$. На временном участке 2 можно заметить, что на электрический вход ВОК 1×2 поступило управляющее напряжение U_s высокого уровня, а значит, ВОК 1×2 переключился на волоконный выход A , соединённый с входом B ВОС 2×1 . При этом на первом канале осциллографа регистрируется сигнал величиной $U_m = U_{m2}$.

С учётом того, что основной сигнал U_o , формируемый ФПУ-1, инвертирован относительно сигнала U_m , регистрируемого осциллографом, справедливым будет утверждение, что основной сигнал циркуляции (участок 2 на рисунке 2) превышает основной сигнал вывода (участок 1 на рисунке 2): $U_{o2} > U_{o1}$. Известно, что величина электрического сигнала U_o , сформированного фотодиодом, прямо пропорциональна мощности P поступающего на него оптического излучения. Таким образом, приведённые осциллограммы наглядно демонстрируют превышение мощности циркуляции над мощностью вывода, что в свою очередь свидетельствует о сложении лазерных пучков в кольцевой линии задержки разработанной системы.

Помимо этого, были проведены измерения в эксплуатационных условиях на установке, извлечённой из оптической камеры, т. е. в условиях воздействия на её компоненты излучения внешних естественных и искусственных источников света и при отсутствии термостабилизации. При этом получен ряд осциллограмм (рисунок 3).

По осциллограммам на рисунке 3 видно, что в эксплуатационных условиях регистрируемый сигнал $U_m(t)$ становится нестабильным, причём его изменение происходит главным образом на временных участках 2, соответствующих сигналу циркуляции U_{m2} . Для наглядности приведены осциллограммы сигнала $U_m(t)$ для разных случаев. На рисунке 3а видно, что сигнал $U_m(t)$ изменяется от времени с сигналом $U_s(t)$ так же, как на рисунке 2, что

свидетельствует о сложении лазерных пучков в кольцевой линии задержки для этого случая. Однако на рисунке 3б можно заметить, что величина сигнала U_{m2} на участке 2 существенно изменилась по сравнению с предыдущим случаем (рисунок 3а) так, что стало выполняться неравенство $U_{m2} > U_{m1}$, а это, в свою очередь, говорит об уменьшении основного сигнала циркуляции относительно основного сигнала вывода $U_{o2} < U_{o1}$ и, как следствие, отсутствии сложения лазерных пучков в этом случае. На временном участке 5 последней осциллограммы (рисунок 3с) можно увидеть переход от случая, показанного на рисунке 3б, к случаю со сложением пучков (рисунок 3а).

Такое нестабильное развитие сигнала $U_m(t)$ в эксплуатационных условиях подтверждает необходимость размещения волоконно-оптических компонент внутри защитного светонепроницаемого корпуса при изготовлении в дальнейшем прототипов системы сложения лазерных пучков на кольцевой линии задержки.

Ранее в [11] авторами было показано, что энергетическая эффективность системы с кольцевой волоконной задержкой не нарастает бесконечно с увеличением числа циркуляций в ней, а стремится к некоторому предельному значению η_L , которое зависит от величины потерь в системе. Причём в схеме с ВОС 2×1 и ВОК 1×2 это значение достигалось уже при числе циркуляций N от 25 до 34. С учётом того, что длина кольцевого волоконного участка в экспериментальной установке составляет не менее 6 м, можно достоверно сказать, что предельное значение η_L будет достигнуто в эксперименте за время не менее 0,1 мкс. Принимая во внимание, что ВОК 1×2 , применяемый в составе установки, имеет время переключения не меньше 3 мс, можно уверенно утверждать, что в системе в процессе циркуляции будет всегда формироваться излучение с предельной мощностью P_N , которая может быть зарегистрирована с помощью ВОМ.

Для количественной оценки в изготовленной установке, собранной по схеме на рисунке 1, осуществлялись прямые измерения мощностей циркуляции P_c и вывода P_{ex} , формируемых на выходе A сплиттера, при условии, что мощность вводимого в систему излучения от лазера 1 P_0 изменялась. Авторами было

выполнено по 6 измерений мощностей P_c и P_{ex} при P_0 , установленной в пределах от 2 до 4,5 мВт с шагом 0,5 мВт. Данные результаты сопоставлены в графическом виде на рисунке 4,

для приведённых точек измерений выполнена аппроксимация функциями $P_c(P_0)$ и $P_{ex}(P_0)$, демонстрирующими ожидаемую линейную зависимость измеренных мощностей.

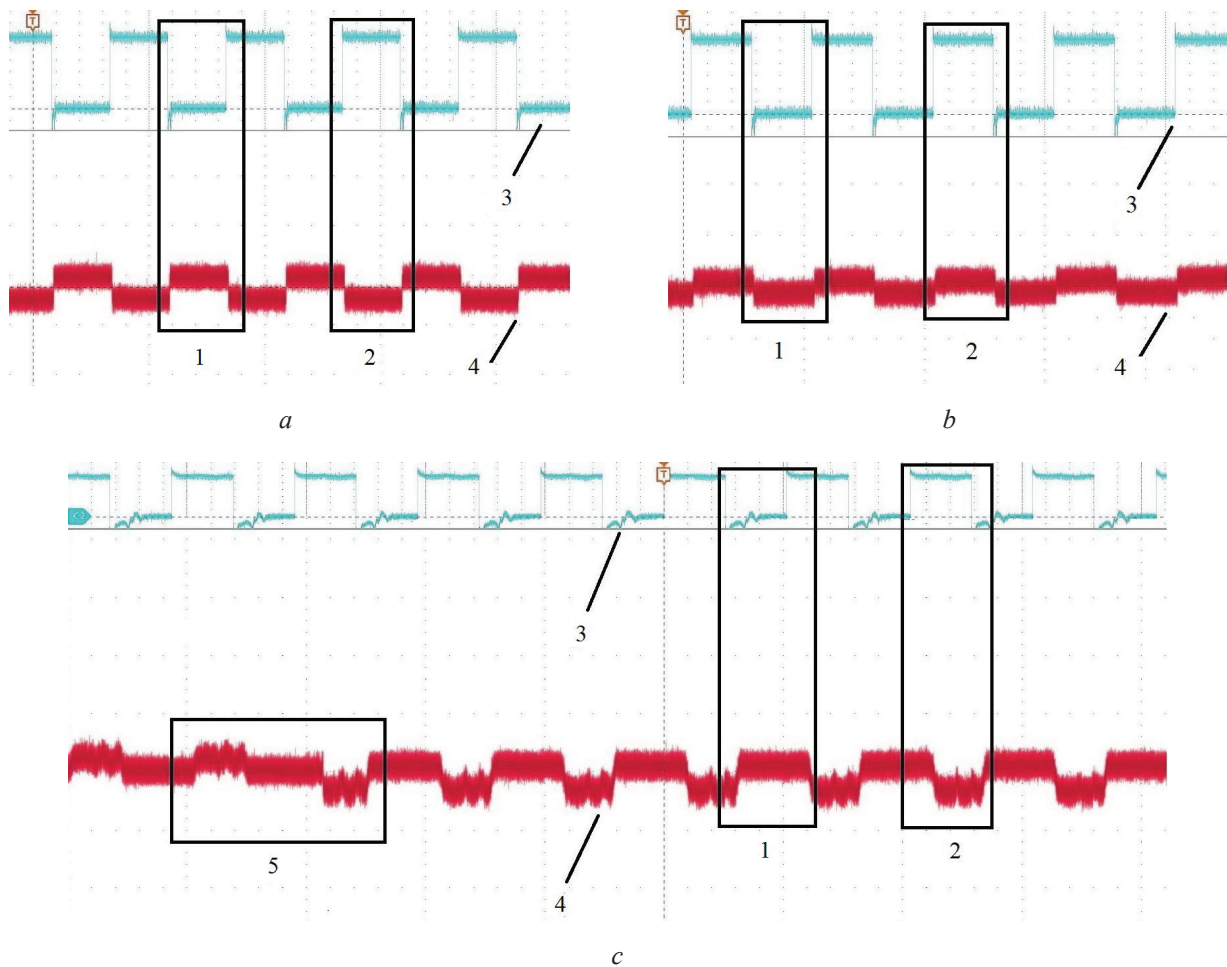


Рисунок 3 – Снимок экрана осциллографа, полученный для установки в эксплуатационных условиях, при наличии сложения лазерных пучков в кольцевой линии задержки (a), при отсутствии этого сложения (b) и при возникновении этого сложения (c): 1 – временной участок сигнала вывода U_{m1} ; 2 – временной участок сигнала циркуляции U_{m2} ; 3 – сигнал переключения $U_s(t)$; 4 – регистрируемый сигнал $U_m(t)$; 5 – временной участок уменьшения сигнала циркуляции U_{m2} и возникновения сложения лазерных пучков

Figure 3 – Oscilloscope screenshot, obtained for setup in operation conditions, with the presence of laser beam combining in the ring delay line (a), without this combining (b) and in case when this combining begins (c): 1 – temporal section of output signal U_{m1} ; 2 – temporal section of circulation signal U_{m2} ; 3 – switch signal $U_s(t)$; 4 – registered signal $U_m(t)$; 5 – temporal section of the decrease in the circulation signal U_{m2} and the onset of laser beam combining

Как расположение точек, соответствующих мощности P_c , выше точек P_{ex} , так и увеличение угла наклона линейной характеристики $P_c(P_0)$ относительно зависимости $P_{ex}(P_0)$ на рисунке 4 также свидетельствуют о наличии процесса сложения лазерных пучков в кольцевой линии задержки. Причём результаты прямых измерений показали, что мощность циркуляции P_c , пропорциональная предельной

мощности суммарного пучка P_N , больше мощности вывода P_{ex} , пропорциональной мощности исходного пучка, в 1.05...1.11 раз. Величина этого увеличения, называемого также предельным коэффициентом энергетической эффективности системы синхронного сложения, ранее в [11] достигала 2 по результатам моделирования подобной системы.

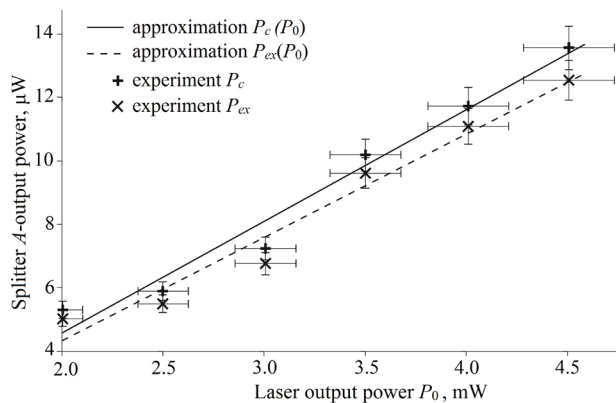


Рисунок 4 – Измеренные мощности циркуляции P_c и мощности вывода P_{ex} в зависимости от выходной мощности лазерного источника P_0

Figure 4 – Measured circulation power P_c and output power P_{ex} depended on the output power of laser source P_0

Такое отличие расчётного коэффициента от полученного на практике свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования установки, которое должно пойти по нескольким путям. Среди них следует выделить: применение волоконно-оптических устройств и ВС высокого качества с меньшим коэффициентом внутренних потерь; использование коннекторов с улучшенной обработкой торцов заделанных в них ВС, обеспечивающей более высокий коэффициент передачи излучения между ВС; совершенствование компоновочной схемы, в которой при размещении компонент установки будет существенно уменьшено число участков с перегибом ВС, а также увеличен радиус сгиба ВС на таких участках.

Закключение

Представлена экспериментальная установка, реализующая действие разработанной авторами схемы синхронного сложения лазерных пучков в кольцевой волоконной линии задержки и предназначенная для демонстрации этого сложения. Путём сравнения измеренных мощности излучения, распространяющегося внутри кольцевой линии задержки установки, и мощности излучения, выводимого без циркуляции в ней, подтверждён факт сложения лазерных пучков в такой системе.

Измерения в эксплуатационных условиях продемонстрировали существенную нестабильность сигнала циркуляции и подтвердили необходимость размещения волоконно-

оптических компонент системы синхронного сложения пучков в закрытом светонепроницаемом корпусе.

Показано, что возрастание мощности излучения, которое зависит от уровня оптических потерь в элементах установки, при его циркуляции в линии задержки происходит в 1.05...1.11 раз. А это, в свою очередь, свидетельствует о возможности создания на практике устройств с синхронным сложением лазерных пучков, как на одиночной кольцевой волоконной линии задержки, так и на множестве линий задержки, которые могут быть использованы для повышения энергетической эффективности автономных лазерных систем.

Следует отметить, что указанные выше результаты достигнуты с применением стандартных серийно изготавливаемых волоконно-оптических компонент и устройств, используемых в сетях связи, без внедрения в изготовленную установку специальных волоконно-оптических узлов с пониженным уровнем оптических потерь. Кроме того, непосредственное сложение лазерных пучков и их ввод в волоконное «кольцо» в установке осуществлялись с помощью обычного сплиттера, развёрнутого в обратную сторону по ходу распространения пучка. Все это говорит об открывающихся перспективах дальнейшего увеличения на практике энергетической эффективности и, как следствие, мощности циркуляции за счёт применения компонент с улучшенными характеристиками и снижения потерь в данной системе.

Авторами планируется доработка существующей установки путём замены электромеханического ВОК 1×2 на электрооптический ВОК 1×2 с высоким быстродействием и проведение с помощью неё измерений коэффициента энергетической эффективности системы синхронного сложения, построенной на основе волоконного «кольца». Вместе с тем, такая доработка даёт также возможность создания прототипа лазерного источника, в котором повышение энергетической эффективности происходит без увеличения потребляемого им электропитания.

Список использованных источников

1. Агеев Б.Г. Лазерный двухканальный газоанализатор / Б.Г. Агеев, А.Н. Грицута, А.В. Климкин [и

др.] // Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – № 10. – С. 956–959. DOI: 10.1070/QEL16438

2. Кульчин Ю.Н. Фотонные методы и технологии мониторинга океана и атмосферы / Ю.Н. Кульчин, С.С. Вознесенский, Е.Л. Гамаюнов [и др.] // Квантовая электроника. – 2020. – Т. 50. – № 5. – С. 475–488. DOI: 10.1070/QEL17222

3. Хазанов Е.А. Нелинейное сжатие сверхмощных лазерных импульсов: компрессия после компрессора / Е.А. Хазанов, С.Ю. Миронов, Ж. Муру // Успехи физических наук. – 2019. – Т. 189. – № 11. – С. 1173–1200. DOI: 10.3367/UFN.2019.05.038564

4. Хазанов Е.А. Повышение временного контраста и мощности фемтосекундных лазерных импульсов с помощью оптического клина с кубической нелинейностью / Е.А. Хазанов // Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51. – № 5. – С. 433–436. DOI: 10.1070/QEL17551

5. Goldberg L. High-power, near-diffraction-limited large-area traveling-wave semiconductor amplifiers / L. Goldberg, D. Mehuys, M.R. Surette, D.C. Hall // IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, vol. 29, no. 6, pp. 2028–2043. DOI: 10.1109/3.234466

6. Webb B. Divided-pulse amplification to the joule level / B. Webb, A. Azim, N. Bodnar, M. Chini, L. Shah, M. Richardson // Optics Letters, 2016, vol. 41, no. 13, pp. 3106–3109. DOI: 10.1364/OL.41.003106

7. Sprangle P. Incoherent Combining and Atmospheric Propagation of High-Power Fiber Lasers for Directed-Energy Applications / P. Sprangle, A. Ting, J. Penano, R. Fischer, B. Hafizi // IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, vol. 45, no. 2, pp. 138–148. DOI: 10.1109/JQE.2008.2002501

8. Трикшев А.И. Фазировка двух усилительных каналов при когерентном сложении лазерных пучков суммарной мощностью 60 Вт / А.И. Трикшев, Ю.Н. Пырков, В.Б. Цветков // Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – № 11. – С. 1045–1048. DOI: 10.1070/QEL16433

9. Brignon A. Coherent laser beam combining. Weinheim: Wiley-VCH, 2013, 509 p.

10. Алексеев В.А. Повышение пиковой мощности источника импульсного лазерного излучения с применением оптических линий задержки / В.А. Алексеев, А.С. Перминов, С.И. Юран // Оптический журнал. – 2018. – Т. 85. – № 12. – С. 8–14. DOI: 10.17586/1023-5086-2018-85-12-08-14

11. Алексеев В.А. Повышение пиковой мощности импульсного источника лазерного излучения с применением кольцевой волоконной линии задержки / В.А. Алексеев, М.Р. Зарипов, А.С. Перминов [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10. – № 2. – С. 151–159. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-151-159

References

1. Ageev B.G., Gritsuta A.N., Klimkin A.V., Kuryak A.N., Osipov K.Yu., Ponomarev Yu.N., Simonova G.V. Laser two-channel gas analyser. *Quantum Electronics*, 2017, vol. 47, no. 10, pp. 956–959.

DOI: 10.1070/QEL16438

2. Kulchin Y.N., Voznesensky S.S., Gamayunov E.L., Golik S.S., Ilyin A.A., Kamenev O.T., Nikitin A.I., Pavlov A.N., Popik A.Yu., Romashko R.V., Subbotin E.P. Photonic methods and technologies for monitoring the ocean and atmosphere. *Quantum Electronics*, 2020, vol. 50, no. 5, pp. 475–488. DOI: 10.1070/QEL17222

3. Khazanov E.A., Mironov S.Y., Mourou G.A. Nonlinear compression of high-power laser pulses: compression after compressor approach. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physics-Uspekhi], 2019, vol. 62, no. 11, pp. 1096–1124 (in Russian). DOI: 10.3367/ufne.2019.05.038564

4. Khazanov E.A. Enhancing the time contrast and power of femtosecond laser pulses by an optical wedge with cubic nonlinearity. *Kvantovaya elektronika* [Quantum Electronics], 2021, vol. 51, no. 5, pp. 433–436 (in Russian). DOI: 10.1070/QEL17551

5. Goldberg L., Mehuys D., Surette M.R., Hall D.C. High-power, near-diffraction-limited large-area traveling-wave semiconductor amplifiers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, vol. 29, no. 6, pp. 2028–2043. DOI: 10.1109/3.234466

6. Webb B., Azim A., Bodnar N., Chini M., Shah L., Richardson M. Divided-pulse amplification to the joule level. *Optics Letters*, 2016, vol. 41, no. 13, pp. 3106–3109. DOI: 10.1364/OL.41.003106

7. Sprangle P., Ting A., Penano J., Fischer R., Hafizi B. Incoherent Combining and Atmospheric Propagation of High-Power Fiber Lasers for Directed-Energy Applications. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, vol. 45, no. 2, pp. 138–148. DOI: 10.1109/JQE.2008.2002501

8. Trikshev A.I., Pyrkov Y.N., Tsvetkov V.B. Phasing of two amplifier channels for the coherent combining of laser beams with a total power of 60 W. *Kvantovaya elektronika* [Quantum Electronics], 2017, vol. 47, no. 11, pp. 1045–1048. DOI: 10.1070/QEL16433

9. Brignon A. Coherent laser beam combining. Weinheim: Wiley-VCH, 2013, 509 p.

10. Alekseev V.A., Perminov A.S., Yuran S.I. Increasing the peak power of a pulsed laser source using optical delay lines. *J. Opt. Technol.*, 2018, vol. 85, no. 12, pp. 746–751. DOI: 10.1364/JOT.85.000746

11. Alekseev V.A., Zaripov M.R., Perminov A.S., Sitnikova E.A., Usol'tsev V.P., Yuran S.I. Increasing of Pulsed Laser Source Peak Power by Use of Ring Fiber-Optic Delay Line. *Devices and Methods of Measurements*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 151–159 (In Russian). DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-151-159