

УДК 535.417

# Исследование эффективности лазерного источника излучения с когерентным суммированием импульсов

© 2019 г. **В. А. АЛЕКСЕЕВ, ДОКТОР ТЕХН. НАУК; М. Р. ЗАРИПОВ, СОИСКАТЕЛЬ;**  
**Е. А. СИТНИКОВА, МАГИСТРАНТ**

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Ижевск

E-mail: zaripov.istu@gmail.com

Поступила в редакцию 10.02.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-04-11-16

Приведены структурные схемы и описан принцип действия систем, позволяющих построить лазерные источники импульсного излучения, в которых достигается многократное повышение выходной пиковой мощности излучения без увеличения энергии источников питания. Проведён анализ эффективности устройств с когерентным синхронным суммированием при применении в их составе одночастотных гелий-неонового лазера, излучающего на длине волны 632,8 нм, и эрбиевого лазера, излучающего на длине волны 1550 нм. Получены графики зависимости эффективности систем с гелий-неоновым и с эрбиевым лазерами от числа волоконных линий оптической задержки. Показано, что наибольшей эффективности в рассматриваемых устройствах можно добиться при использовании излучения на длине волны 1550 нм.

**Ключевые слова:** пиковая мощность излучения, волоконная линия оптической задержки, оптические потери, коэффициент эффективности.

**Коды OCIS:** 140.3538, 030.1670.

## ВВЕДЕНИЕ

При разработке лазерных систем, содержащих автономные устройства электропитания, возникает проблема повышения интенсивности, а вместе с ней и мощности излучения на выходной апертуре лазерного источника без увеличения энергии внешнего устройства электропитания или применения дополнительных источников лазерного излучения.

С такой задачей можно столкнуться при разработке космических лазерных систем связи, лазерных комплексов дистанционного экологического мониторинга, лазерных систем глубоководного погружения, ряда автономных медицинских устройств, лазерных технологических установок.

Эта задача наиболее актуальна для лазерных импульсных систем, в которых амплитуда импульса излучения определяет основные характеристики системы:

- дальность распространения лазерного излучения в различных средах;
- степень воздействия лазерного излучения на исследуемый объект.

Для значительного повышения амплитуды импульсов лазерного излучения могут применяться различные методы компрессии лазерных импульсов [1, 2], ряд способов некогерентного [3, 4] и когерентного [3, 5] суммирования лазерных пучков, включая синхронное суммирование с применением линий оптической задержки [6–8].

## КОГЕРЕНТНОЕ СИНХРОННОЕ СУММИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Метод некогерентного синхронного суммирования лазерных импульсов [6, 7], заключающийся в синхронном суммировании мощности  $N_{nc}$  импульсов лазерного излучения с помощью  $N_{nc}$  элементов волоконно-оптической задержки разной длины, обеспечивает формирование импульса, пиковая мощность которого равна сумме пиковых мощностей импульсов лазерного излучения за исключением потерь в компонентах системы суммирования. В то же время когерентное суммирование лазерных импульсов, предварительно разделённых

по волоконным линиям задержки [8], позволяет увеличить выходную мощность и интенсивность лазерного излучения значительно, чем способ некогерентного суммирования излучения.

Действие приведённой ниже схемы (рис. 1) заключается в синхронном суммировании лазерных импульсов при согласовании по фазе электромагнитных колебаний лазерных пучков. При этом обеспечиваются наложение друг на друга импульсов одинаковой длительности и синхронизация по фазе электромагнитных колебаний лазерного излучения, в результате чего амплитуда электромагнитного поля  $\Psi_{0N}$  выходного импульса будет соответствовать сумме амплитуд электромагнитных полей  $\Psi_0$  импульсов, прошедших волоконные линии задержки. В итоге интенсивность выходного импульса  $I_N$  будет соответствовать квадрату суммы амплитуд электромагнитных полей  $\Psi_0$  импульсов, разделённых по волоконным линиям задержки, за исключением потерь в компонентах системы.

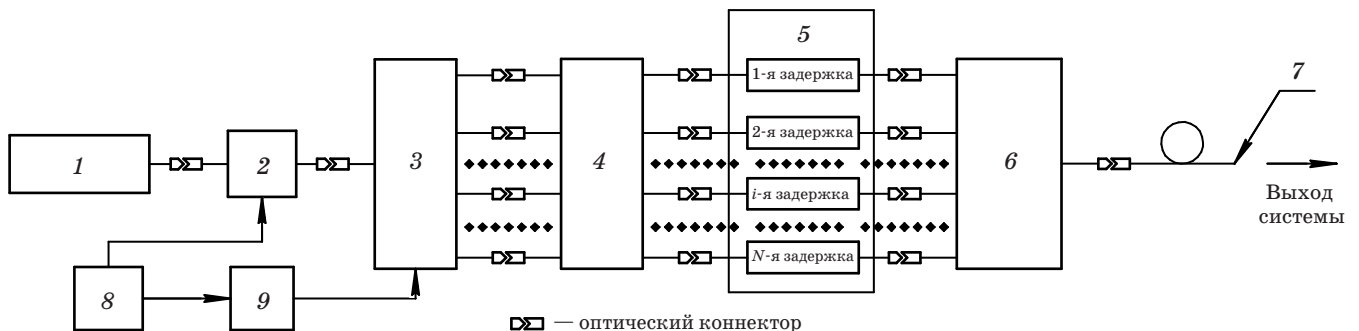
На схеме (рис. 1) непрерывное излучение лазера 1 с мощностью  $P_0$  поступает через оптический волокно со сформированной интенсивностью  $I_0$  в оптический ключ 2, с помощью которого преобразуется в прямоугольные лазерные импульсы с пиковой мощностью  $P_0$  и частотой следования  $f_{0c}$ . При этом частота следования устанавливается через задающий генератор 8 исходя из числа импульсов  $N_c$ , укладываемых в интервале времени когерентности  $t_c$  лазера 1. Сигналы генератора 8 также поступают на вход счётчика импульсов 9. Сформированные прямоугольные импульсы поступают на вход оптического коммутатора 3, который через управляющие сигналы от счётчика 9 последовательно распределяет лазерные импульсы по  $N_c$  волокнам оптической задержки 5 через систему согласования 4. Система согласования 4 обеспечивает синхронизацию по фазе электромагнитных колебаний лазерных импульсов, проходящих через средство оптической задержки 5. При этом длина каждого последующего оптоволокон-

ного элемента увеличивается на длину шага задержки, соответствующую геометрической длине распространения излучения в волокне за период следования импульсов. Это обеспечивает синхронное поступление всех  $N_c$  импульсов на входы оптического сумматора 6. В результате синхронизации импульсов по их длительности и по фазе электромагнитных колебаний на выходе 7 из рассматриваемой системы формируется импульс с интенсивностью  $I_N$ , соответствующей квадрату суммы амплитуд электромагнитных полей  $\Psi_0$  импульсов, прошедших волоконные линии задержки, с учётом потерь в системе  $\sigma$

$$I_N = \left( \sum_{i=1}^{N_c} \Psi_{0i} \right)^2 - \sigma = N_c^2 I_0 - \sigma. \quad (1)$$

Таким образом, метод синхронного когерентного суммирования лазерных импульсов даёт возможность существенного увеличения выходной пиковой мощности излучения по сравнению с известными источниками лазерного излучения при условии одинаковой энергии источников питания, в том числе и по сравнению с устройством некогерентного суммирования лазерных импульсов [6, 7]. Причём для достижения на выходе импульсов высокой пиковой мощности требуются малогабаритный лазер и компактный источник питания, что имеет высокое значение при разработке автономных лазерных систем.

Практическая реализация рассматриваемой системы и её отдельных элементов возможна при использовании следующих разработанных устройств. В качестве оптического ключа в предлагаемом устройстве можно применить высокоскоростные электрооптические переключатели NanoSpeed NPSW-1x1, обеспечивающие формирование импульсов с частотой следования до 1 МГц [9]. Роль оптического коммутатора в зависимости от предполагаемого числа линий задержек и времени между импульсами могут выполнять



**Рис. 1.** Схема синхронного когерентного суммирования лазерных импульсов на  $N_c$  волоконных линиях задержки. 1 — непрерывный лазер, 2 — оптический ключ, 3 — оптический коммутатор, 4 — система согласования, 5 — волоконные линии оптической задержки, 6 — волоконно-оптический сумматор, 7 — волоконный выход системы, 8 — задающий генератор, 9 — счётчик импульсов.

скоростные электрооптические переключатели NanoSpeed NSSW-1×4 [10] или магнитооптические переключатели CrystaLatch CLSW-1×16 [11]. Данные переключатели обеспечивают перенаправление входного оптического сигнала в выбранный выход оптического волокна. Имеющаяся в составе система согласования может представлять собой совокупность  $N_c$  фазовых вращателей типа FPS-001, обеспечивающих сдвиг фазы электромагнитных колебаний за счёт внесения дополнительной задержки по времени [12]. Каждый фазовый вращатель при этом подключается к каждому из  $N_c$  выходов оптического коммутатора и связывается с отдельной волоконно-оптической линией задержки через оптические коннекторы. В качестве оптического сумматора можно использовать волоконно-оптические сумматоры типа PSC, обеспечивающие объединение излучения от нескольких волоконных световодов в один общий на выходе [13].

Стоит учесть, что нарастание длины оптических волокон при увеличении числа элементов средства оптической задержки приведёт в итоге к возрастанию потерь излучения в системе в целом. Поэтому эффективность предлагаемого лазерного источника и максимальное число линий задержки будут ограничены величиной допустимых потерь.

Кроме того, при построении рассматриваемого источника лазерного излучения важно принять во внимание величину времени когерентности  $t_c$  как длительности цуга электромагнитных колебаний, в пределах которой будет сохраняться их постоянство фазы.

Настоящая работа посвящена оценке эффективности предлагаемой системы с синхронным когерентным суммированием лазерных импульсов.

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В схеме на рис. 1 важно определить максимальное количество линий задержки  $N_c$ , которые соответствуют числу импульсов, сформированных оптическим ключом на интервале времени когерентности  $t_c$ , а также эффективность системы в целом.

Также необходимо учесть, что для обеспечения когерентного сложения суммируемые  $N_c$  лазерные импульсы должны формироваться с частотой  $f_{0c}$  в пределах цуга длительностью  $t_c$

$$N_c = f_{0c} t_c. \quad (2)$$

Ослабление лазерного излучения в системе на рис. 1 происходит в результате следующих процессов.

Каждый исходный импульс лазерного излучения, распространяясь через  $i$ -ю линию задержки в данной системе, претерпевает последовательно потери в оптическом волокне и в первом коннекторе от выхода непрерывного лазера до входа в оп-

тический ключ, потери в оптическом волокне и во втором коннекторе от выхода из оптического ключа до входа в оптический коммутатор, потери в оптическом волокне и в третьем коннекторе от выхода из оптического коммутатора до входа в систему согласования, потери в оптическом волокне  $i$ -й линии задержки и в четвёртом и пятом коннекторах от системы согласования до оптического сумматора, потери в выходном волокне доставки излучения и в шестом коннекторе от сумматора до выхода системы.

Длина отрезка оптического волокна, соответствующая элементарному шагу задержки, с учётом принципа действия рассматриваемой системы будет зависеть от частоты следования импульсов и определяется по формуле

$$\Delta = \frac{c}{f_{0c} n}, \quad (3)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме, м/с;  $f_{0c}$  — частота следования лазерных импульсов, сформированных оптическим ключом, Гц;  $n$  — показатель преломления материала оптического волокна.

С учётом приведённых выше соотношений пиковая мощность суммарного импульса на выходе из системы оценивается по формуле

$$P_N = 10^{-0,6A_c} 10^{-0,1(L_{LOK} + L_{OKC} + L_{CSS} + L_{EF})A_F} \times \left( \sum_{i=1}^{N_c} 10^{-0,05i\Delta A_F} \right)^2 P_0, \quad (4)$$

где  $A_c$  — потери на коннекторе, дБ;  $A_F$  — удельные потери выбранного волоконного световода, дБ/м;  $L_{LOK}$  — длина отрезка волокна на пути от выхода непрерывного лазера до оптического ключа, м;  $L_{OKC}$  — длина отрезка волокна на пути от оптического ключа до оптического коммутатора, м;  $L_{CSS}$  — длина отрезка волокна на пути от оптического коммутатора до системы согласования, м;  $L_{EF}$  — длина отрезка волокна на пути от оптического сумматора до выхода из системы, м.

При этом следует иметь в виду, что наращивание пиковой мощности на выходной апертуре источника излучения происходит за счёт синхронного суммирования энергии  $N_c$  исходных лазерных импульсов в пределах длительности одного импульса и перераспределения энергии суммарного импульса в результате конструктивной интерференции электромагнитных волн, объединяемых оптическим сумматором. Таким образом, если на вход сумматора поступали лазерные импульсы прямоугольной формы, то на выходе системы результирующий импульс будет искажён, а его форма будет близка к треугольной.

Основной интерес в данной работе представляет коэффициент эффективности системы, показывающий, во сколько раз возрастёт выходная

пиковая мощность результирующего импульса  $P_N$  по сравнению с пиковой мощностью исходного импульса  $P_0$

$$\eta = \frac{P_N}{P_0}. \quad (5)$$

При проведении вычислительного эксперимента был принят ряд допущений:

- не учитывалась дисперсия волоконных элементов системы, которая, несомненно, приводит к дополнительному искажению формы импульсов;
- не рассматривались потери на микро- и макроизгибах волоконных световодов;
- пропускание элементарной ячейки оптического коммутатора при каждом акте коммутации принималось равным единице;
- не учитывались потери излучения в системе согласования.

Для оценки предельного числа линий задержки в работе были выполнены расчёты коэффициента эффективности  $\eta$ .

Значения потерь в коннекторах в соответствии с [14] были приняты  $A_C = 0,15$  дБ (оптические коннекторы семейства F-3000<sup>TM</sup> или типа APC и UPC).

В вычислительном эксперименте применялись одночастотный стабилизированный гелий-неоновый лазер (He-Ne-лазер) со спектральной шириной линии излучения  $\Delta\nu = 10$  кГц [8] и одночастотный стабилизированный эрбиевый волоконный лазер (Er-лазер) ELR-1-SF со спектральной шириной  $\Delta\nu = 50$  кГц.

В системе предлагалось использовать кварцевые волоконные световоды, в которых величина удельных потерь на длине волны излучения He-Ne-лазера  $\lambda = 632,8$  нм составила  $A_F = 5$  дБ/км [15, 16], а на длине волны излучения Er-лазера  $\lambda = 1550$  нм —  $A_F = 0,2$  дБ/км [14–16]. При этом значения показателей преломления кварцевой сердцевины были приняты равными 1,457 и 1,444 для длин волн 632,8 нм и 1550 нм соответственно [17].

Расчёты проводились для частоты следования импульсов, формируемой оптическим ключом,  $f_{0c} = 16,7$  МГц и длинах  $L_{ЛОК} = L_{ОК} = L_{СС} = L_{ЕФ} = 1$  м.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С учётом заданных выше параметров была получена зависимость  $\eta(N_c)$  коэффициента эффективности от числа линий задержки в системе с He-Ne-лазером (рис. 2).

Очевидно, что энергетическая эффективность системы  $\eta$  от зависимости с быстрым нарастанием переходит с увеличением числа линий задержки  $N_c$  к «насыщению», при котором значение эффективности  $\eta$  остаётся неизменным при возрастании числа  $N_c$ . Таким образом, можно определить

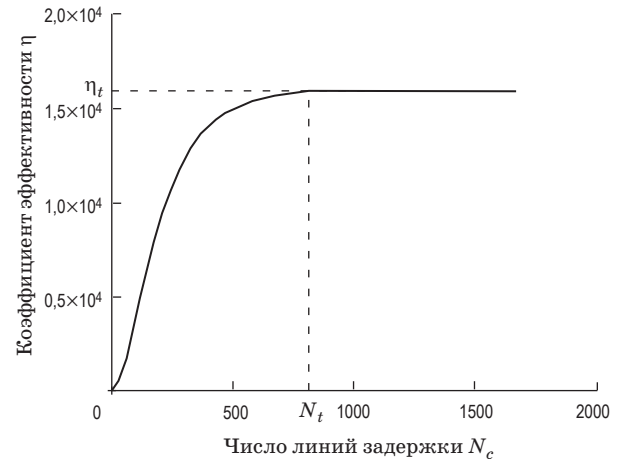


Рис. 2. График зависимости  $\eta(N_c)$  для системы с He-Ne-лазером.

с предельным числом линий задержки  $N_t$ , при превышении которого не происходит дальнейшего возрастания эффективности  $\eta_t$ .

Предельное значение коэффициента эффективности составило  $\eta_t = 15777$ . Этому значению соответствует число линий задержек  $N_t = 800$ , при превышении которого не происходит дальнейшего возрастания эффективности рассматриваемой системы.

Таким образом, предельно возможное увеличение пиковой мощности  $P_0$  исходного пучка He-Ne-лазера произойдет в 15777 раз. При этом частота следования импульсов, установленных оптическим ключом, уменьшится в  $N_t = 800$  раз по сравнению с исходной и составит  $f_c \approx 20,8$  кГц.

Следует также иметь в виду, что использование He-Ne-лазера обусловлено его достаточно высоким временем когерентности, однако переход к коротковолновой видимой области излучения приводит к увеличению удельных потерь в применяемых в системе кварцевых волоконных световодах.

Поэтому далее в качестве исходного лазера предлагается использовать одночастотный Er-лазер с выбранной длиной волны излучения  $\lambda = 1550$  нм. С учётом заданных ранее параметров была получена зависимость  $\eta(N_c)$  коэффициента эффективности от числа линий задержки в системе с Er-лазером (рис. 3).

В данном случае можно заметить, что в системе с Er-лазером уже при увеличении спектральной ширины до 50 кГц предельно возможного значения  $\eta_t$  достичь, как в системе с He-Ne-лазером (рис. 2), не удаётся из-за отсекающего дальнейшего возрастания коэффициента  $\eta$  числом линий  $N_{off}$ , связанным с малым по сравнению с He-Ne-лазером временем когерентности излучения Er-лазера. При этом эффективность системы  $\eta$  будет возрастать с увеличением числа линий задержки  $N_c$  по квадратичному закону.

## Значения пиковой мощности на выходе системы для лазерных источников ЛГН-303 и ELR-1-SF

Число коммутирующих каскадов, $k$	Число линий задержки, $N_c$	Выходная пиковая мощность, Вт/ коэффициент эффективности, отн.ед.	
		ЛГН-303	ELR-1-SF
1	2	0,0032/3,2	3,25/3,25
2	4	0,0125/12,5	13/13
3	8	0,0486/48,6	51,9/51,9
5	32	0,658/658	824,3/824,3
8	256	11,157/11157	49495/49495
10	1024	15,863/15863	—

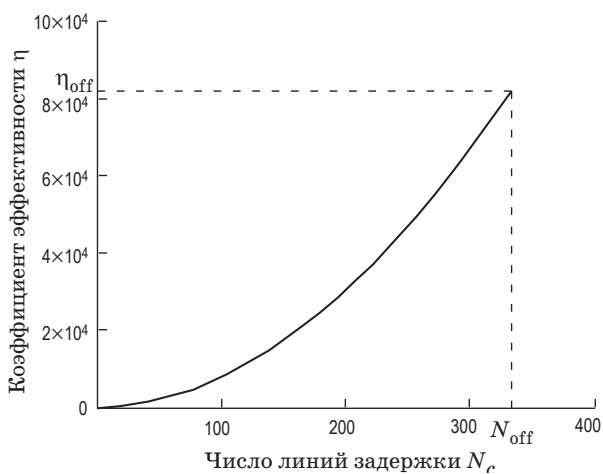


Рис. 3. График зависимости  $\eta(N_c)$  для системы с Er-лазером.

Увеличение  $\eta$  отсекается при числе линий задержки  $N_{\text{off}} = 333$ , которому соответствует максимально возможное для системы с Er-лазером значение коэффициента эффективности  $\eta_{\text{off}} = 81942$ . При этом частота следования импульсов, установленных оптическим ключом, уменьшится в  $N_{\text{off}} = 333$  раза по сравнению с исходной и составит  $f_c \approx 50$  кГц.

Для наглядного сравнения в таблице приведены значения пиковой мощности на выходе из системы с синхронным когерентным суммированием для непрерывного одночастотного He-Ne-лазера ЛГН-303 с мощностью излучения  $P_0 = 1$  мВт и для непрерывного одночастотного Er-лазера ELR-1-SF с мощностью излучения  $P_0 = 1$  Вт при соответствующих значениях коэффициента эффективности, приведённых ранее на рис. 2 и рис. 3.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев А.А. Сверхсильный свет (достижения и перспективы) // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 11. С. 19–28.
2. Семиков С.А. Методы компрессии лазерных импульсов // Электронно-методическое пособие. Нижний Новгород: НИУ НГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. 48 с.
3. Motes A. Laser beam combining. Rio-Rancho: AM Photonics, 2015. 132 p.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрировано основное достоинство систем с синхронным когерентным суммированием лазерных импульсов, которое заключается в существенном повышении выходной пиковой мощности одиночного лазерного источника без применения дополнительных источников лазерного излучения, увеличения энергии питания или изменения режима работы исходного лазера. Вместе с тем, главным недостатком является необходимость использования высококогерентных одночастотных источников излучения для построения подобных устройств, что значительно сужает диапазон лазерных источников, для которых есть возможность эффективного повышения выходной мощности с помощью системы, предложенной в настоящей работе.

Кроме того, было показано, что применение одночастотных He-Ne- и Er-лазеров равносильно по эффективности при малом числе линий задержки ( $N_c < 8$ ), однако возрастание количества линий задержки в рассматриваемой системе ( $N_c > 32$ ), несомненно, указывает на преимущество использования Er-лазеров для обеспечения эффективной работы подобных устройств (см. табл.). Таким образом, при выборе источника излучения следует также искать компромисс между повышением времени когерентности излучения и снижением в линиях задержки удельных потерь, величина которых зависит от длины волны излучения.

Построенные по схеме на рис. 1 импульсные источники излучения отличаются высокой эффективностью и выходной мощностью и, следовательно, способны найти применение в устройствах лазерной связи, лидарах, дальномерах, технологических лазерных установках и других специальных лазерных системах.

4. Бушмелев Н.И., Кривошеин В.Н., Погорельский С.Л., Сбродов А.В., Лазукин В.Ф., Шипунов А.Г. Сумматор оптического излучения // Патент России № 2182346. 2002.
5. *Brignon A.* Coherent laser beam combining. Weinheim: Wiley-VCH, 2013. 509 p.
6. 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.
7. Алексеев В.А., Юран С.И., Перминов А.С., Стерхова М.А. Источник импульсного лазерного излучения // Патент России № 2477553. 2013.
8. Алексеев В.А., Юран С.И., Перминов А.С., Стерхова М.А. Источник импульсного лазерного излучения // Патент России № 2535529. 2014.
9. <http://sphotonics.ru/catalog/skorostnye-elektroopticheskie-pereklyuchateli-nanospeed/npsw1kh1/>
10. <http://sphotonics.ru/catalog/skorostnye-elektroopticheskie-pereklyuchateli-nanospeed/nssw1kh4/>
11. <http://sphotonics.ru/catalog/magnetoopticheskie-pereklyuchateli-crystalatch/clsw1x16/>
12. <http://www.generalphotonics.com/index.php/product/fps-001-phase-shifter/>
13. <http://sphotonics.ru/catalog/obediteli-summatory-nakachki/psc181/>
14. Никонов Н.В., Сидоров А.И. Материалы и технологии волоконной оптики: специальные оптические волокна // Учебное пособие. Курс лекций. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. 130 с.
15. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. 323 с.
16. 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.
17. Malitson I.H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused Silica // J. Opt. Soc. Am. 1965. V. 55. № 10. P. 1205–1209.