

МЕТОДЫ УСИЛЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Б.Ю. Паршиков¹, Н.В. Прудников², Е.А. Леонова², Н.А. Соловьев²

¹ЗАО «Московский научно-исследовательский телевизионный институт», ул. Гольяновская, д. 7А, стр. 1., Москва, Российская Федерация, 105094

²ФГБУН Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме РАН, Москва, Российская Федерация, 117997

E-mail: mzairan@mzairan.ru, leono-alena@rambler.ru, snaniknik@mail.ru

В статье приведены методы усиления фемтосекундных лазерных импульсов. Представлена схема установки усиления chirпированных импульсов и устройство на основе решеток, использование которого позволяет усиливать chirпированный импульс с полным коэффициентом усиления, достигающим 10^{11} . Описана типичная блок-схема усилителя chirпированных импульсов для получения мощных фемтосекундных импульсов. Использование усилительной системы, состоящей из многопроходового усилителя и каскадов усиления с прогрессивным увеличением диаметра лазерного пучка, позволяет увеличить энергию импульса в 10^8 - 10^9 раз, избегая повреждения усилительных элементов. Метод усиления chirпированных импульсов требует использования дифракционных решеток с размерами, близкими к 1 м, для усиления импульсов до энергий в десятки Дж. В частности, отмечается использование гигантских лазерных установок, основой которых были усилительные каскады, содержащие пластины неодимового стекла. Рассмотрен параметрический метод усиления фемтосекундных импульсов. Обсуждены преимущества и недостатки параметрического усиления. Представлена общая блок-схема установки для получения фемтосекундных импульсов петаваттного уровня путем параметрического усиления. Принцип параметрического усиления используется не только для получения сверхвысоких мощностей и интенсивностей, но и для достижения высоких значений других параметров.

Ключевые слова: фемтосекундные лазерные импульсы, chirпированные импульсы, дисперсия групповых скоростей, параметрическое усиление, гибридный принцип

METHODS OF AMPLIFICATION OF FEMTOSECOND LASER PULSES

B.Y. Parshikov¹, N.V. Prudnikov², E.A. Leonova², N.A. Soloviyov²

¹Moscow Research Television Institute, Golyanovskaya str, 7A, Moscow, Russian Federation, 105094

²Interdepartmental Center for Analytic Research in Physics, Chemistry and Biology, Presidium RAS, Profsoyuznaya str., Moscow, Russian Federation, 117342

E-mail: mzairan@mzairan.ru, leono-alena@rambler.ru, snaniknik@mail.ru

The article presents methods for amplifying femtosecond laser pulses. A chirped-pulse amplification setup and a grating-based device are presented that can be used to amplify a chirped pulse with a total gain of up to 10^{11} . A typical block diagram of a chirped-pulse amplifier for producing high-power femtosecond pulses is described. The use of an amplifying system consisting of a multipass amplifier and amplification stages with a progressive increase in the diameter of the laser beam makes it possible to increase the pulse energy by a factor of 10^8 - 10^9 , avoiding damage to the amplifying elements. The method of amplifying chirped pulses requires the use of diffraction gratings with sizes close to 1 m to amplify pulses up to energies of tens of J. In particular, the use of giant laser systems based on amplifying cascades containing neodymium glass plates is noted. A parametric method for amplifying femtosecond pulses is considered. The advantages and disadvantages of parametric amplification are discussed. A general block diagram of an installation for obtaining petawatt-level femtosecond pulses by parametric amplification is presented. The principle

of parametric amplification is used not only to obtain ultra-high powers and intensities, but also to achieve high values of other parameters.

Key words: femtosecond laser pulses, chirped pulses, group velocity dispersion, parametric amplification, hybrid principle

Для цитирования:

Паршиков Б.Ю., Прудников Н.В., Леонова Е.А., Соловьев Н.А. Методы усиления фемтосекундных лазерных импульсов. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2024. Т. LXVIII. № 1. С. 18–24. DOI: 10.6060/R CJ.2024681.4.

For citation:

Parshikov B.Y., Prudnikov N.V., Leonova E.A., Solovyov N.A. Methods of amplification of femtosecond laser pulses. *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N 1. P. 18–24. DOI: 10.6060/R CJ.2024681.4.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время лазерные технологии стали одними из приоритетных технологий в обработке различных материалов, в обработке информации, в связи, биологии, медицине, в фотонике и оптоэлектронике, в экологическом мониторинге, в различных измерениях и научных исследованиях [2], а ежегодные темпы роста мирового рынка лазерных технологий устойчиво держатся на уровне 10–15% и прогнозируется сохранение этих темпов и в дальнейшем [3].

Высокоинтенсивные фемтосекундные технологии, как технологии двойного применения, активно развиваются практически во всех высокоразвитых зарубежных странах, но наиболее значительные усилия в этом направлении предпринимаются в США (Ливерморская национальная лаборатория, Военно-морская лаборатория, Мичиганский университет), Англии (Резерфордская лаборатория), Франции (Центр высокоинтенсивных лазеров), Германии (Институт Макса Борна) и Японии (Лазерный инженерный институт).

Фемтосекундные лазерные системы, развитие которых в последнее время привело к созданию мультитераваттных комплексов с длительностью импульсов 30–50 фс и интенсивностью до 10^{19} – 10^{21} Вт/см², открывают принципиально новые возможности создания новых лазерных систем. Прежде всего, это связано с созданием новых элементов ЛО (лазерное оружие) и систем управления процессами инициирования ядерных реакций [4].

МЕТОД УСИЛЕНИЯ ЧИРПИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСОВ

Источник излучения с пиковой мощностью 100 ТВт, длительностью импульсов 20 фс, частотой повторения 10 Гц и центральной длиной волны 800 нм позволяет при фокусировке реализовывать

интенсивность $\sim 10^{20}$ Вт/см², напряженность электрического поля $\sim 10^{11}$ В/см, температуру $\sim 10^{10}$ К и давление $\sim 10^9$ атм.

Увеличение энергии в импульсе удалось получить благодаря открытию замечательной методики – усиление чирпированных импульсов. Она позволяет достигать энергии усиленных импульсов, близкие к энергиям насыщения, т.е. эффективно использовать энергию, запасенную в активной среде, и преодолевать ограничения из-за нелинейных эффектов. Практическое применение эффект изменения длительности импульса с линейной частотной модуляцией нашел в радиолокационной технике. В свое время разработчики радиолокационных станций столкнулись с дилеммой, аналогичной той, что возникает при усилении мощных лазерных импульсов. Для решения этой дилеммы был с успехом использован метод растяжения и сжатия импульса. Перед усилением длительность импульса растягивается в N раз. Соответственно, его пиковая мощность уменьшается в N раз, и он может быть усилен до энергии в N раз больше той, при которой возникают ограничения для первоначального короткого импульса. Импульсы, отраженные от цели сжимаются до первоначальной длительности путем пропускания частотно модулированного (чирпированного) импульса через линию задержки с дисперсией групповых скоростей. В лазерной технике используется тот же принцип манипулирования величиной пиковой мощности импульса без изменения его энергии. Известно, что дисперсия групповых скоростей (ДГС) приводит к удлинению импульса, превращая его в чирпированный, а система призм может компенсировать величину дисперсии групповых скоростей и снова превратить чирпированный импульс в предельно короткий (фурье-ограниченный с длительностью соответствующей ширине спектра) [8]. Однако для эффективного усиления необ-

ходимы коэффициенты растяжения и последующего сжатия порядка 10^4 – 10^5 и поэтому требуется система двух дифракционных решеток, позволяющая изменять ДГС в очень широких пределах. Изменяя расстояние между решетками, можно получить очень большое значение ДГС. Важно отметить, что ДГС пары дифракционных решеток отрицательна. Это означает, что с помощью пары решеток можно сжимать импульсы, лишь обладающие определенным знаком чирпа. Поэтому необходимо уметь «приготавливать» такие импульсы.

Впервые принцип усиления чирпированных импульсов для получения мощных ультракоротких импульсов (УКИ) лазерного излучения был продемонстрирован в 1985 году. Принципиальная схема установки показана на рис. 1.

Для формирования входного чирпированного импульса (с чирпом нужного знака) использовался эффект изменения формы импульса при его распространении в одномодовом оптическом волокноном световоде. При распространении интенсивного импульса в материале сердцевинны одномодового оптического волокна, обладающего дисперсией и нелинейным показателем преломления, возникают и ДГС, и фазовая самомодуляция (ФСМ), приводящие к чирпу в удлиненном импульсе. Этот удлиненный (растянутый импульс) и подвергался усилению, а затем сжимался решетками (компрессором) как показано на рис. 2. Конкретно использовался лазер ультракоротких импульсов на Nd:YAG ($\lambda = 1064$ нм, $t_{\text{имп}} = 150$ пс, $\Delta\lambda \sim 0,1$ нм, $E_{\text{имп}} \sim 50$ нДж). Импульс пропусклся через волокно длиной 1,4 км. При этом длительность увеличивалась до 300 пс, а ширина спектра – до ~ 5 нм. Затем этот импульс усиливался в регенеративном усилителе до 7 мДж и сжимался парой решеток до длительности 1,5 пс. Потери при отражении от решеток составляли около 50%. Таким образом, пиковая мощность лазерного излучения увеличивалась с 0,5 кВт до 10^4 кВт.

В дальнейшем эта техника получила значительное развитие. Важнейшим усовершенствованием стало изобретение оптической схемы пары дифракционных решеток, обладающих положительной ДГС. Она отличается тем, что между решетками вводится телескопическая система с увеличением 1:1 для перевертывания лучей. Устройство на основе решеток, получившее название эспандер, позволяет растягивать длительность в 10^4 – 10^5 раз (в зависимости от первоначальной длительности) при соответствующем снижении пиковой мощности. Это позволяет использовать каскады

усиления чирпированного импульса с полным коэффициентом усиления, достигающим 1011. Таким образом, импульсы, генерируемые фемтосекундными лазерами, с характерной энергией 5–10 нДж могут быть усилены до единиц и даже десятков Дж.

Типичная блок-схема установки усилителя чирпированных импульсов показана на рис. 2.

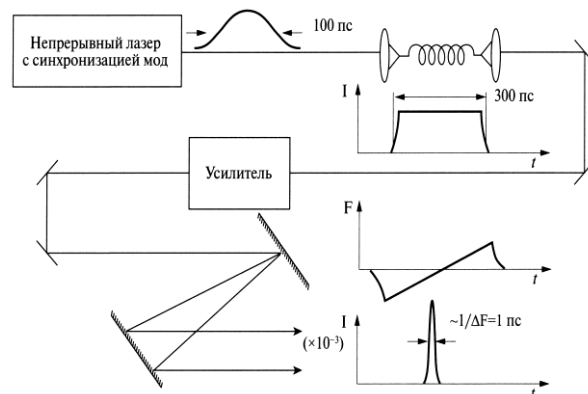


Рис. 1. Схема установки усиления чирпированных импульсов [8]

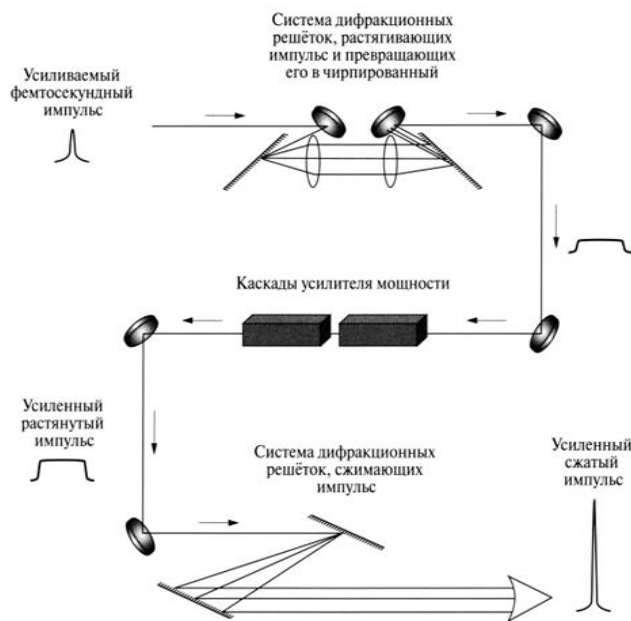


Рис. 2. Типичная блок-схема усилителя чирпированных импульсов для получения мощных фемтосекундных импульсов [8]

Лазер с керровской линзой генерирует непрерывную последовательность фемтосекундных импульсов с частотой следования около 80 МГц. Длительность импульса типично составляет 10–30 фс, а энергия не превышает 10 нДж. Далее излучение проходит через электрооптический затвор Поккельса, с помощью которого частота следования импульсов существенно снижается (обычно до 1–10 кГц) [8].

Несмотря на существенное снижение пиковой мощности в результате растяжения импульса, при высоких коэффициентах усиления интенсивность может достигать высоких значений, при которых возникают проблемы ограничения роста мощности в усиливающей среде из-за нелинейных эффектов. Поэтому требуется увеличение поперечного сечения усиливаемого пучка и, соответственно, увеличение площади усиливающей активной среды (элемента каскада усилителя). При этом возникает проблема отвода тепла от активной среды большого размера. Необходима пауза между циклами усиления, в течение которой усилительная среда охлаждается до нужной температуры. Поэтому приходится увеличивать интервал между циклами накачки. Кроме того, средняя мощность источников накачки (обычно лазеров с модуляцией добротности, генерирующих импульсы наносекундной длительности) также ограничена. Обычно при выходной энергии около 1 мкДж частота повторения усиленных импульсов составляет не более 1 МГц. При энергии около 1 мДж она должна быть снижена до 1–10 кГц, а при энергии в несколько Дж интервал между усиливаемыми импульсами составляет не менее десятков минут. Это означает важное обстоятельство – средняя мощность не только не увеличивается, но и существенно уменьшается при усилении тем сильнее, чем больше усиление пиковой мощности. Выделенный электрооптическим затвором импульс растягивается с соответствующим снижением пиковой мощности, что позволяет, используя усилительную систему, состоящую из многопроходowego усилителя и каскадов усиления с прогрессивным увеличением диаметра лазерного пучка, увеличить энергию импульса в 10^8 – 10^9 раз, избегая повреждения усилительных элементов. Наконец, растянутые и усиленные импульсы пропускаются через другую пару дифракционных решеток (компрессор), настроенную так, что их ДГС компенсирует chirp усиленного импульса. В результате он сжимается до почти первоначального значения длительности. Площадь дифракционных решеток компрессора должна быть достаточно большой, чтобы интенсивность излучения, падающего на них (даже длинных, растянутых импульсов) не превышала порог разрушения отражательного покрытия решеток (обычно тонкий слой золота, наносимый напылением в вакууме). При длительностях импульса в десятки пс, порог разрушения составляет около 1 мДж/см². Это означает, что для усиления импульсов до энергий в десятки Дж, требуются дифракционные решетки с размерами, близкими к

1 м. Современная техника позволяет изготавливать такие гигантские решетки, и они были использованы для создания уникальных лазерных систем с выходной пиковой мощностью на уровне 1 ПВт (10^{15} Вт).

Первая такая установка была создана в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса (США). Она предназначалась для проведения исследований по управляемому термоядерному синтезу. В ней использовался лазер – задающий генератор на сапфире, а в усилительных каскадах использовалось неодимовое стекло (ширина линии усиления сапфира позволяет получить генерацию на длине волны 1054 нм, которая попадает в максимум усиления фосфатного неодимового стекла) [8].

УКИ задающего генератора растягивался до 3 нс и усиливался в системе, использующей стержни и пластины неодимового стекла. Из-за проблемы отвода тепла установка могла работать не чаще одного импульса в час. На выходе энергия импульса достигала 1120 Дж. Выходное излучение преобразовывалось в пучок диаметром ~ 50 см и направлялось в вакуумную камеру, содержащую решетки компрессора. Вакуум был необходим, чтобы избежать пробоя воздуха при столь больших интенсивностях лазерного пучка. Размеры решеток достигали ~ 1 м.

После сжатия энергия в импульсе достигала 660 Дж. Минимальная длительность после сжатия составляла ~ 450 фс. Такая сравнительно большая длительность (по сравнению с той, что обеспечивается задающим генератором – лазером на сапфире) объясняется тем, что в усилительных каскадах с ламповой накачкой возникают искажения волнового фронта, практически не поддающиеся контролю, и компрессор не может восстановить первоначальную длительность.

Тем не менее, даже при такой длительности импульса получалась пиковая мощность ~ 1,5 ПВт. Для получения высокой интенсивности при фокусировании пучка использовалась зеркальная параболическая система со светосилой 1:1, которая позволяла получить интенсивность $0,7 \cdot 10^{21}$ Вт/см². Для достижения еще больших, рекордных значений интенсивности в Исследовательском институте атомной энергии в Японии была создана система усилителя chirпированных импульсов с использованием сапфира, как для задающего генератора, так и для усилителя, элементы которого накачивались не лампами, а лазерным излучением. Это позволяет значительно уменьшить искажения усиливаемого пучка за счет более точного контроля

энергии, вкладываемой в активную среду усиленных каскадов и получить как более короткую длительность импульса, так и лучшее качество пучка выходного излучения.

Входной импульс имел длительность 10 фс. Он растягивался до 1,5 пс. В оконечном каскаде усилительной цепи использовался кристалл сапфира диаметром 80 мм и толщиной 33 мм. Получение кристалла таких размеров с высоким оптическим качеством является выдающимся технологическим достижением. Для накачки использовалась мощная лазерная установка на неодимовом стекле с ламповой накачкой (каскады усиления на стержнях диаметром 16, 25, 45 и 64 мм). На выходе получался импульс с энергией до 150 Дж. Излучение преобразовывалось во вторую гармонику (532 нм для накачки сапфира) с эффективностью – 50%. Ламповая накачка требует значительного интервала между вспышками, поэтому установка работала в режиме нескольких вспышек в час.

Большие размеры кристалла сапфира создают значительные трудности получения достаточно высокого коэффициента усиления. Дело в том, что при френелевском отражении от граней усилительного элемента может возникнуть генерация на внутренних паразитных модах, что, естественно, ограничивает уровень инверсной населенности и, следовательно, коэффициент усиления. Для устранения этого на рабочие поверхности кристалла наносились антиотражающие покрытия. На боковые поверхности наносился слой специального термостойкого полимера, который поглощал излучение на лазерной длине волны. Эти меры привели к тому, что удалось получить коэффициент усиления в оконечном каскаде ~ 2100 при трехкратном проходе пучка через кристалл. После сжатия усиленного импульса его длительность сокращалась до 33 фс при энергии 28 Дж. Таким образом, пиковая мощность достигала 0,85 ПВт, что меньше того, что получалось в установке с использованием неодимового стекла. Однако существенно меньшая длительность импульса и более высокое качество пучка позволило получить при фокусировании пучка интенсивность $3,8 \cdot 10^{21}$ Вт/см². С целью существенного увеличения частоты повторения усиленных импульсов в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса создана установка на неодимовом стекле (Mercury laser facility) с накачкой лазерными диодами, а не лампами. Это позволило генерировать импульсы наносекундной длительности с энергией 61 Дж при частоте следования 10 Гц. Излучение удваивается по частоте с

эффективностью преобразования 50% и используется для накачки усилителя чирпированных импульсов на сапфире.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД УСИЛЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

При параметрическом эффекте в нелинейном кристалле осуществляется трехволновое взаимодействие. Две волны с определенными частотами и направлениями распространения в нелинейном кристалле, одна из которых называется сигнальной (с меньшей частотой), а другая - волной накачки (с большей частотой), взаимодействуют с нелинейной средой кристалла с испусканием третьей (низкочастотной) волны, называемой холостой. Для эффективности преобразования требуется выполнение условий синхронизма, что достигается выбором кристалла, а также выбором частот волн и направлений их распространения в кристалле. Важно отметить, что процесс усиления связан с преобразованием частоты и с перекачкой энергии лазера накачки в усиливаемое излучение. Поэтому выходное излучение получается на длине волны, отличной от длины волны задающего генератора.

Почти сразу же после создания первых лазеров в 1962 г. С.А. Ахманов и Р.В. Хохлов предложили использовать нелинейный эффект параметрического преобразования для создания лазера с плавной перестройкой длины волны. Сам эффект получается в нелинейном кристалле, причем для реализации максимальной эффективности используется условие синхронизма для волн, задействованных в процессе. Как известно, для этого используются кристаллы, обладающие двойным лучепреломлением, и их ориентация позволяет изменять длины волн нелинейного процесса. Длины волн при этом могут плавно изменяться путем ориентации направлений пучков и наклона кристалла.

На основе эффекта параметрического преобразования были созданы источники лазерного излучения с плавной перестройкой длины волны в широких пределах. Эти оптические параметрические генераторы (ОПГ) сыграли важную роль в развитии лазерной физики. Также были созданы параметрические генераторы УКИ с плавной перестройкой по длинам волн. Принципиальной особенностью параметрических лазеров является использование лазерного источника накачки с соответствующей мощностью в пучке высокого качества и подходящего нелинейного кристалла. В Институте прикладной физики РАН проведены обстоя-

ной 80 мм и апертурой 120 мм. В качестве компрессора использовались две дифракционные решетки (1200 шт./мм) с размерами 24×35 см. Максимальная энергия импульса после сжатия достигала 24 Дж, а измерения автокорреляционной функции показали, что длительность сжатого импульса составляет 43 фс. Таким образом, на выходе получается пучок лазерного излучения с пиковой мощностью 0,56 ПВт, который можно сфокусировать в пятно с размерами до 3 мкм, что означает возможность достижения интенсивности на уровне 10^{22} Вт/см². В импульсных системах сверхвысокой мощности усиленное спонтанное излучение создает серьезную проблему. При взаимодействии интенсивного излучения с веществом усиленное спонтанное излучение, предшествующее главному импульсу, может существенно изменить свойства вещества (испарение, создание плазмы и др.), искажая результаты исследования. Поэтому важно иметь максимальное отношение энергии в импульсе к энергии усиленного спонтанного излучения (контраст). Японские исследователи создали установку петаваттного уровня с контрастом 10^{10} – 10^{11} .

Принцип параметрического усиления УКИ можно использовать не только для получения сверхвысоких мощностей и интенсивностей, но и для достижения высоких значений других параметров. Так на основании успехов в области волоконных лазеров УКИ была создана компактная установка, генерирующая импульсы длительностью 8 фс и пиковой мощностью 6 ГВт с частотой повторения 96 кГц [8].

ВЫВОДЫ

В данной статье представлены методы усиления фемтосекундных лазерных импульсов: метод усиления чирпированных импульсов, параметрический метод. Приведены схемы установок и

устройств для получения мощных фемтосекундных импульсов. Рассмотрены преимущества и недостатки каждого из методов. Отмечены возможности методов для усиления импульсов и приведена оценка их эффективности.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. Nano- and microsystems engineering. From Research to Development. Edited by P.P. Maltsev, M. Technosphere, 2005 g 590 p.
2. Basic Research Plan of the Russian Academy of Sciences for the period up to 2025. Section of Physical Sciences M. Nauka, 2006. P. 125-129.
3. The Effects of Powerful Energy Flows on Matter. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Under the editorship of V.E. Fortov M. IVTAN, 1992.
4. Burenok V.M., Ivlev A.A., Korchak V.Yu. Program-targeted Planning and Management of Scientific and Technical Stockpile Creation for Perspective and Non-Traditional Armament. - M. Granitsa, 2007. 407 p.
5. Prudnikov N.V. Defense Engineering. 2001. N 10. P. 37–39.
6. Prudnikov N.V., Saveliev M.A. Laser technologies, materials and element base for microsystem technology. M. MCAI RAS. 2020. 147 p.
7. Femtosecond Atmospheric Optics. Edited by S.N. Bagaev, G.G. Mavienko, Publishing House of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2010. 220 p.
8. Kryukov P.G. Lasers of ultra-short pulses and their applications. Intellect, 2012.
9. 3D laser information technologies. Edited by Tverdokhle, P.E. Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2003, 550 p.
10. Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. Technological processes of laser processing. - Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 2006. 663 p.
11. Abil'sitov G.A., Golubev B.S., Gontar' V.G. Technological lasers: Handbook. T. 1. -Moscow: Machine engineering, 1991. 432 p.

*Поступила в редакцию 05.06.2023
Принята к опубликованию 11.12.2023*

*Received 05.06.2023
Accepted 11.12.2023*