



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МИКРООБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

А. Г. Григорьянц¹, М. А. Казарян², Н. А. Лябин³,
И. Н. Шиганов¹

¹ МГТУ им. К. Э. Баумана, Москва,

² Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,
Москва

³ НПП «ИСТОК», Фрязино, Моск. обл.

В работе представлен сравнительный анализ параметров импульсных лазеров и лазерных систем на парах меди (ЛПМ и ЛСПМ) с другими типами газовых и твердотельных лазеров и их возможности промышленного использования в области обработки материалов. Показано, что ЛПМ с длинами волн излучения 510,6 и 578,2 нм, наносекундной длительностью импульсов и световым пятном диаметром до 20 мкм с плотностью пиковой мощности 10^9 – 10^{11} Вт/см² являются уникальными инструментами для эффективной и качественной микрообработки практически любых металлических и большого круга неметаллических материалов.

Статья поступила в редакцию 19.03.2019

Статья принята к публикации 10.04.2019

ВВЕДЕНИЕ

Одним из прогрессивных технологических направлений за последние 20–25 лет стало использование лазерных технологий в электронной, автомобильной, авиационной, судостроительной, атомной промышленности, точном приборостроении и других сферах человеческой деятельности. Заметно расширяются области их использования в оборонно-промышленном комплексе. К этим технологиям относятся размерная резка, сварка, раскрой, прошивка отверстий, термообработка, легирование, поверхностная обработка, селективное спекание, микрообработка, маркировка и гравировка с высоким разрешением самых разнообразных материалов. Внедрение лазерных технологий практически всегда повышает качество и производительность

COMPARATIVE ANALYSIS OF LASER SYSTEMS FOR THE MICRO-PROCESSING OF MATERIALS

A. G. Grigoryants¹, M. A. Kazaryan², N. A. Lyabin³,
I. N. Shiganov¹

¹ Bauman Institute, Moscow

² LPI RAS, Moscow

³ NPP "Istok", Fryazino, Moscow region

A comparative analysis of the parameters of pulsed lasers and copper vapor laser systems (CVL and CVLS) with other types of gas and solid-state lasers and their industrial applicability in the field of material processing. It is shown that CVL with radiation wavelengths of 510.6 and 578.2 nm, nanosecond pulse duration and a light spot with a diameter of up to 20 μ m with a peak power density of 10^9 – 10^{11} W/cm² are unique tools for efficient and high-quality micromachining of almost any metal and a wide range of nonmetallic materials.

Article was received on 19.03.2019

Article was accepted for publication on 10.04.2019

INTRODUCTION

The use of laser technologies in the electronics, automotive, aeronautical, shipbuilding, nuclear industries, precision instrument-making and other areas of anthropologic activity has become one of the progressive technological trends in the last 20–25 years, and their use in the defense industry has significantly expanded. These technologies include dimensional cutting, welding, tailoring, hole piercing, heat treatment, alloying, surface treatment, selective sintering, micro processing, high-resolution marking and engraving of materials. The introduction of laser technology almost always improves the quality and productivity of processing, ensures ecological cleanliness of production, and in many cases technical and economic results are achieved that cannot be obtained by other processing methods. A special place in the manufacture of electronic products and precision instrument-making is precision micro-machining.



обработки, обеспечивает экологическую чистоту производства, во многих случаях достигаются технические и экономические результаты, которые нельзя получить другими методами обработки. Особое место в производстве изделий электронной техники и точном приборостроении занимает прецизионная микрообработка.

ГАЗОВЫЕ И ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

В качестве источников излучения могут эффективно использоваться и уже используются короткоимпульсные, высокочастотные, с малой энергией в импульсе и малым коэффициентом отражения лазеры видимого и ультрафиолетового диапазонов: твердотельные и газовые, в частности, лазеры и лазерные системы на парах меди (см. табл.).

ЛАЗЕРЫ И ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ НА ПАРАХ МЕДИ (ЛПМ И ЛСПМ)

ЛПМ и ЛСПМ с длинами волн излучения $\lambda = 510,6$ и $578,2$ нм, наносекундной длительностью импульсов ($\tau_{\text{имп.}} = 20-40$ нс), большим усилением активной среды (АС) ($k = 10-10^2$ ДБ/м), съемом средней мощности с одного активного элемента (АЭ) до 750 Вт, относительно высокими частотами повторения импульсов ($f = 5-30$ кГц) и низкой импульсной энергией ($W = 0,1-10$ мДж) остаются на сегодня самыми мощными импульсными источниками когерентного излучения в видимой области спектра [1-14]. С данными параметрами ЛПМ и при условии формирования излучения однопучковой структуры с дифракционным качеством плотность пиковой мощности в сфокусированном пятне ($d = 5-20$ мкм) даже при относительно малых значениях средней мощности ($P_{\text{изл}} = 1-20$ Вт) достигает очень высоких значений: $\rho = 10^9-10^{11}$ Вт/см². С такими уровнями плотности видимого излучения обеспечивается эффективная микрообработка в испарительном режиме как высокотеплопроводных – Cu, Al, Ag, Au, так и тугоплавких – W, Mo, Ta, Re и других металлов – Ni, Ti, Zr, Fe и их сплавов, сталей, многих полупроводников и диэлектриков – кремния, поликристаллического алмаза, сапфира, графита, карбидов и нитридов, прозрачных материалов [15-19]. Кроме того, для обеспечения высокого качества реза, характеризуемого минимальной зоной термического влияния (≤ 3 мкм) и шероховатостью (≤ 1 мкм), нестабильность оси диаграммы направленности пучка излучения

GAS AND SOLID-STATE TECHNOLOGICAL LASER SYSTEMS

Short-pulse, high-frequency, low-pulse energy and low reflectance lasers of the visible and ultraviolet ranges: solid-state and gas, in particular, lasers and copper vapor laser systems (Table) can be effectively used and are already used as radiation sources.

COPPER VAPOR LASERS AND LASER SYSTEMS (CVL AND CVLS)

Currently, the CVL and CVLS with radiation wavelengths $\lambda = 510.6$ and 578.2 nm, nanosecond pulse duration ($\tau_{\text{pulse}} = 20-40$ ns), large gain of the active medium (AC) ($k = 10-10^2$ Db/m), removal average power from one active element (AE) to 750 W, relatively high pulse repetition rates ($f = 5-30$ kHz) and low pulse energy ($W = 0.1-10$ mJ) remain the most powerful pulsed sources of coherent radiation in visible spectrum [1-14]. With the given parameters of the CVL and under the condition of the formation of radiation of a single-beam structure with diffraction quality, the peak power density in the focused spot ($d = 5-20$ μm), even at relatively small values of the average power ($R_{\text{rad}} = 1-20$ W), reaches very high values: $\rho = 10^9-10^{11}$ W/cm². With such levels of visible radiation density, effective micromachining in the evaporative mode is ensured both by high-heat conducting Cu, Al, Ag, Au, and high-melting W, Mo, Ta, Re and other metals Ni, Ti, Zr, Fe and their alloys, steels, many semiconductors and dielectrics: silicon, polycrystalline diamond, sapphire, graphite, carbides and nitrides, and transparent materials [15-19]. Furthermore, to ensure high quality of the cut, characterized by minimal heat-affected zone (≤ 3 μm) and roughness (≤ 1 μm), the instability of the axis of the radiation beam pattern should be three to four orders of magnitude less than the diffraction divergence [$\theta_{\text{diff}} / (10^3-10^4)$].

At low radiation power levels (1-10 W), CVL is usually constructively performed as a separate generator with one AE and an optical resonator. To obtain medium (20-100 W) and especially high (units – tens of kW) radiation power levels, CVLS are used, operating according to the master oscillator – power amplifier (MO – PA) scheme with one or several AE as PA. In CVLS, in comparison with CVL operating in the mode of a single generator, higher powers and efficiency and, therefore, micromachining productivity are achieved [6, 10]. These pulsed lasers are also used as efficient pumping sources of nonlinear crystals (NC) of the BBO, KDP, DKDR type, which convert the visible CVL radiation into the second harmonic – 255.3, 289.1 and 272.2 nm, i. e., into the ultraviolet region



должна быть на три-четыре порядка меньше дифракционной расходимости $[\theta_{\text{дифр}} / (10^3 - 10^4)]$.

При малых уровнях мощности излучения (1-10 Вт) ЛПМ обычно конструктивно выполняется в виде отдельного генератора с одним АЭ и оптическим резонатором. Для получения средних (20-100 Вт) и особенно высоких (единицы-десятки кВт) уровней мощности излучения применяются ЛСПМ, работающие по схеме задающий генератор – усилитель мощности (ЗГ – УМ) с одним или несколькими АЭ в качестве УМ. В ЛСПМ по сравнению с ЛПМ, работающем в режиме единичного генератора, достигаются более высокие мощности и КПД и соответственно производительность микрообработки [6, 10]. Эти импульсные лазеры используются и в качестве эффективных источников накачки нелинейных кристаллов (НК) типа ВВО, КДР, DKDP, преобразующих видимое излучение ЛПМ во вторую гармонику – 255,3, 289,1 и 272,2 нм, т. е. в ультрафиолетовую область спектра с КПД 10-25%. Такие перестраиваемые лазерные системы предпочтительны для микрообработки органических материалов и полимеров [5, 6, 10, 20, 21].

СО₂-ЛАЗЕРЫ

В технологии обработки материалов традиционно широко применяются СО₂-лазеры с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм. Мощные СО₂-лазеры и твердотельные ИК-лазеры (1-30 кВт) преимущественно используются для высокоскоростной резки, раскройки и сварки черных металлов и нержавеющей стали толщиной 1-30 мм. Однако из-за высокого коэффициента отражения (>95%) такие высокотеплопроводные металлы как Cu, Al, Au и Ag обрабатывать излучением СО₂- и другими ИК-лазерами не эффективно. К наиболее известным производителям коммерческих лазерных технологических комплексов (ЛТК), создаваемых на их основе, относятся следующие фирмы: Bystronic (Швейцария), Trumpf и Rofin-Sinar Laser (Германия), Koike и Mitsubishi Electric (Япония), Salvagnini (Италия), Рухсервомотор (Белорусь), Hankwang (Южная Корея), Hans Laser (Китай), «ТехноЛазер» (Шатура, Моск. обл.), НТО «ИРЭ-Полус» (Фрязино, Моск. обл.), IPG Photonics Corporation, АО «НПП «Исток» им. Шокина» (Фрязино, Моск. обл.), ООО НПЦ «Лазеры и лазерные технологии» (Зеленоград) [20, 22-32].

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ СТЕРЖНЕВЫЕ ЛАЗЕРЫ

Близкий к ЛПМ по мощности и КПД широко распространенный твердотельный лазер на основе

spectrum with an efficiency of 10-25%. Such tunable laser systems are preferred for the micro-processing of organic materials and polymers [5, 6, 10, 20, 21].

CO₂ LASERS

In the technology of processing materials, CO₂ lasers with a wavelength of $\lambda = 10.6$ μm are traditionally widely used. High-power CO₂ lasers and solid-state IR lasers (1-30 kW) are mainly used for high-speed cutting, tailoring and welding ferrous metals and stainless steel with a thickness of 1-30 mm. However, due to the high reflection coefficient (>95%), high-conducting metals such as Cu, Al, Au and Ag are not efficiently treated with CO₂ and other IR lasers. The most well-known manufacturers of commercial laser technology complexes (LTC) created on their basis include the following companies: Bystronic (Switzerland), Trumpf and Rofin-Sinar Laser (Germany), Koike and Mitsubishi Electric (Japan), Salvagnini (Italy), Rukhservomotor (Belarus), Hankwang (South Korea), Hans Laser (China), TechnoLaser (Shatura, Moscow Region), NTO IRE-Polus (Fryazino, Moscow Region), IPG Photonics Corporation, Shokin NPP "Istok" (Fryazino, Moscow region), LLC "Research and Production Center "Lasers and Laser Technologies" (Zelenograd) [20, 22-32].

SOLID-STATE ROD LASERS

A widespread solid-state laser based on a rod of yttrium – aluminum garnet with neodymium (Nd: YAG) with $\lambda = 1064$ nm and frequency doubling on nonlinear crystals with $\lambda = 532$ nm, due to the occurrence of thermal deformations in the working rod has radiation divergences greater than the diffraction limit. Low-power Nd: YAG lasers are massively used for marking and engraving of parts, assemblies and finished products during their manufacture, those that are powerful ones – for welding and cutting metals, including aluminum [22-32].

DISK AND FIBER LASERS

In terms of the aggregate parameters for micro-processing of materials, the closest to CVL are high-performance (efficiency up to 20%) pulsed solid-state disk ytterbium lasers (Yb: YAG) with diode pumping and emission wavelength $\lambda = 1030$ nm produced by such famous German companies as Trumpf and Rofin-Sinar Laser. Disk lasers provide the best solution for a wide range of industrial applications. The disk is a simple and easily excited laser AE that allows for generating high-quality radiation in its parameters. With a large radiating surface of a disk



стержневого иттрий-алюминиевого граната с неодимом (Nd:YAG) с $\lambda=1064$ нм и удвоением частоты на нелинейных кристаллах с $\lambda=532$ нм, из-за возникновения тепловых деформаций в рабочем стержне, имеет расходимости излучения больше дифракционного предела. Мало-мощные Nd:YAG-лазеры массово применяются для маркировки и гравировки деталей, узлов и готовых изделий в процессе их производства, мощные – для сварки и раскроя металлов, включая алюминий [22–32].

ДИСКОВЫЕ И ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ

По совокупности параметров для микрообработки материалов самыми близкими к ЛПМ являются высокоэффективные (КПД до 20%) импульсные твердотельные дисковые иттербиевые лазеры (Yb:YAG) с диодной накачкой и длиной волны излучения $\lambda=1030$ нм производства таких известных немецких фирм как Trumpf и Rofin-Sinar Laser. Дисковые лазеры дают наилучшее решение для значительного ряда промышленных применений. Диск – простой и легко возбуждаемый АЭ лазера, который позволяет генерировать по своим параметрам излучение высокого качества. При большой излучающей поверхности дискового лазера плотность мощности для него не критична даже при высоких значениях пиковой мощности. У волоконных иттербиевых лазеров (КПД до 30%), по сравнению с дисковыми, повышение пиковой мощности негативно влияет на качество излучения и эксплуатационную надежность в первую очередь резонатора. Другим заметным недостатком волоконного лазера является его высокая чувствительность к отраженному излучению, которое возникает при взаимодействии с высокоотражающими материалами (медь, бронза, алюминий и т.д.). Волоконные лазеры разрабатывают и производят такие фирмы как IPG Photonics Corporation (США), Lumera Laser (США), Light Conversion Ltd. (Литва), НТО «ИРЭ-Полус», Авеста Проект и Laser-Form (Россия). Мощные, многокиловаттного уровня дисковые и волоконные лазеры применяются в основном для высокоскоростной прецизионной резки и раскроя, сварки и закалки металлических материалов [20, 22–32].

Этого класса лазеры выпускаются и в сочетании с НК, при этом за счет удвоения и утроения частоты основного излучения формируется УФ-излучение с длинами волн $\lambda=0,515$ и $0,343$ мкм. Достигнуты пико- и фемтосекундные значения длительности импульсов при частоте повторе-

лазер, the power density is not critical, even at high peak powers. In fiber ytterbium lasers (efficiency up to 30%), compared to the disk ones, an increase in peak power negatively affects the radiation quality and operational reliability of the resonator primarily. Another noticeable disadvantage of a fiber laser is its high sensitivity to reflected radiation, which occurs when interacting with highly reflective materials (copper, bronze, aluminum, etc.). Fiber lasers are designed and manufactured by such companies as IPG Photonics Corporation (USA), Lumera Laser (USA), Light Conversion Ltd. (Lithuania), NTO “IRE – Polyus”, Avesta Project and Laser-Form (Russia). High-power, multi-kilowatt, disk and fiber lasers are used mainly for high-speed precision cutting and tailoring, welding and hardening of metallic materials [20, 22–32].

Lasers of this class are also produced in combination with NCs, while due to the doubling and tripling of the frequency of the main radiation, UV-radiation is generated with wavelengths $\lambda=0.515$ and 0.343 μm . The pico- and femtosecond values of the pulse duration at a repetition frequency from kilo to megahertz were achieved (see table). With high-frequency pico- and femtosecond lasers, due to the short exposure time of a radiation to a substance, the highest quality of micromachining is achieved – the minimum (submicron) heat-affected zone (HAZ) with almost no melt formation [33]. Disk short-pulse lasers are mainly used in cases where it is impossible to achieve high quality processing with other lasers, e.g., in the automotive industry for drilling microholes in stainless steel for injector nozzles or for manufacturing medical stents for expanding blood vessels. These lasers expensive during production, to ensure stable output radiation parameters, require additional stringent conditions of protection against external influences. At the same time, our experience shows that by several times cheaper CVL with nanosecond pulse durations often provides micro-processing of materials with high productivity, acceptable quality and profitability several times [6, 15–20].

EXCIMER LASERS

Excimer gas lasers on inert gas halide compounds (ArF, KrF, XeCl, XeF) and inert gas dimers (Ar, Kr) operate similar to CVLs in a pulsed mode with nanosecond duration, but have shorter wavelengths of radiation ($\lambda=157; 193; 248; 282; 308; 351$ nm), i.e. generate in the near UV range (see Table.) [20, 29, 30]. They are widely used in semiconductor production for photolithography and labeling, as well as the processing of plastics, ceramics, crystals, and



ния от кило- до мегагерц (см. табл.). С высокочастотными пико- и фемтосекундными лазерами, из-за малого времени воздействия излучения на вещество, достигается наиболее высокое качество микрообработки – минимальная (субмикронная) зона термического влияния (ЗТВ) практически без образования расплава [33]. Дисковые короткоимпульсные лазеры в основном применяются в тех случаях, когда нельзя достигнуть высокого качества обработки другими лазерами, например, в автомобилестроении для сверления микроотверстий в нержавеющей стали для форсунок инжекторных двигателей или для изготовления медицинских стентов для расширения кровеносных сосудов. Эти дорогие лазеры в процессе производственной эксплуатации для обеспечения стабильных выходных параметров излучения требуют дополнительных жестких условий защиты от внешних воздействий. В тоже время наш опыт показывает, что в несколько раз более дешевый ЛПМ с наносекундной длительностью импульсов во многих случаях обеспечивает микрообработку материалов с высокой производительностью, приемлемым качеством и рентабельностью [6, 15–20].

ЭКСИМЕРНЫЕ ЛАЗЕРЫ

Экцимерные газовые лазеры на галоидных соединениях на инертном газе (ArF, KrF, XeCl, XeF) и димерах инертного газа (Ar, Kr) работают, как и ЛПМ, в импульсном режиме с наносекундной длительностью, но имеют более короткие длины волн излучения ($\lambda=157; 193; 248; 282; 308; 351$ нм), т.е. генерируют в ближнем УФ-диапазоне (см. табл.) [20, 29, 30]. Они широкого применяются в полупроводниковом производстве для фотолитографии и маркировки, а также обработки пластиков, керамики, кристаллов, биологических тканей. Но из-за относительно большой расходимости и меньших рабочих частот повторения импульсов (ЧПИ) (до 1–5 кГц) качество и производительность обработки материалов снижаются. В то же время более высокочастотный ЛПМ за счет применения нелинейных кристаллов обеспечивает производительную и качественную микрообработку и в ультрафиолетовой области спектра [5, 10].

ДИОДНЫЕ ЛАЗЕРЫ

Диодные лазеры имеют небольшие размеры и могут выпускаться большими партиями при относительно низких затратах. Большинство диодных лазеров генерируют в ближней

biological tissues. But because of the relatively large divergence and lower pulse repetition operating frequencies (PRFs) (up to 1–5 kHz), the quality and productivity of materials processing decreases. At the same time, higher-frequency CVL, through the use of nonlinear crystals, provides a productive and high-quality micro-processing in the ultraviolet spectrum region [5, 10].

DIODE LASERS

Diode lasers are small and can be produced in large quantities at relatively low costs. Most diode lasers are generated in the near infrared region ($\lambda=800\text{--}1000$ nm). They are reliable and durable, but the output power of a single element is limited and have a large radiation divergence. Diode lasers are used in many areas of human activity, mainly in the telecommunications and optical memory sector, and also commonly used as pump sources for solid-state and fiber lasers. The developed technology of addition of single diodes to diode arrays allows increasing the average laser power to 1–3 kW, which is sufficient for high-performance and high-quality welding, e.g., aluminum parts.

STATE AND DEVELOPMENT OF CVL AND CVLS

A comparative analysis of pulsed CVL and CVLS generating in the visible region of the spectrum with other known types of technological lasers, carried out in the introduction, shows that, from the set of output radiation parameters, these lasers remain promising for precision micromachining of materials [5, 6, 10, 15–19]. It should also be emphasized that besides microtreatment, the important areas of application for these lasers are selective isotope separation technology, spectral studies of the composition of solid, liquid and gaseous substances, image intensifiers of micro-objects, nanotechnology, etc. [5, 6, 10–12, 20].

The CO₂, solid-state disk and fiber, excimer, nitrogen and diode lasers are widely used in modern technological equipment. The use of pulsed CVL in specialized equipment, despite the unique combination of its output parameters, is still extremely limited due to the small number of commercial models on the market with high reliability and radiation quality. This situation seems to have developed for several reasons. Firstly, many Russian (USSR) research institutes carried out mainly large-scale theoretical and experimental studies of physical processes in CVL, rather than industrial developments. Secondly, in advanced foreign countries (USA, Eng-



ИК-области ($\lambda = 800\text{--}1000$ нм). Они надежны и долговечны, но имеют большую расходимость излучения, и выходная мощность единичного элемента ограничена. Диодные лазеры находят применение во многих сферах человеческой деятельности, в основном – в секторе телекоммуникаций и оптической памяти, а также в большом количестве используются в качестве источников накачки твердотельных и волоконных лазеров. Разработанная технология сложения единичных диодов в диодные линейки позволяет увеличивать среднюю мощность лазера до 1–3 кВт, что достаточно для высокопроизводительной и качественной сварки, например, алюминиевых деталей.

СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ ЛПМ И ЛСПМ

Сравнительный анализ импульсных ЛПМ и ЛСПМ, генерирующих в видимой области спектра, с другими известными типами технологических лазеров, проведенный во введении, показывает, что по совокупности выходных параметров излучения эти лазеры остаются перспективными для прецизионной микрообработки материалов [5, 6, 10, 15–19]. Следует также подчеркнуть, что, кроме микрообработки, важными областями применения этих лазеров являются селективная технология по разделению изотопов, спектральные исследования состава твердотельных, жидких и газовых веществ, усилители яркости изображения микрообъектов, нанотехнология и др. [5, 6, 10–12, 20].

В современном технологическом оборудовании широко используются CO_2 , твердотельные дисковые и волоконные, эксимерные, азотные и диодные лазеры. Применение же импульсного ЛПМ в специализированном оборудовании, несмотря на уникальную совокупность его выходных параметров, тем не менее крайне ограничено, что обусловлено малым количеством на рынке коммерческих моделей с высокими надежностью и качеством излучения. Такая ситуация, по-видимому, сложилась по ряду причин. Во-первых, во многих НИИ России (СССР) проводились в основном широко-масштабные теоретические и экспериментальные исследования физических процессов в ЛПМ, а не промышленные разработки. Во-вторых, в передовых зарубежных странах (США, Англия, Франция, Япония) основные усилия были направлены на исследования и разработку высоко-мощных ЛСПМ типа ЗГ–УМ в обеспечении программ лазерного разделения изотопов по AVLIS

land, France, Japan), the main efforts were directed to the research and development of high-power CVLS of MO – PA type in providing laser isotope separation programs using AVLIS technology for the needs of nuclear energy. At the same time, the development of the most popular commercial CVLS, which include lasers of small (1–20 W) and medium (30–100 W) power levels, remained aside. Thirdly, over the past 10–15 years, the laser market has been represented by a relatively large number of varieties of CVL with a low level of reliability and quality of radiation, which has reduced user demand for this type of laser. Despite the current situation, a number of domestic and foreign organizations continue to work on the creation of new commercial models of CVL and CVLS and, on their basis, of modern technological equipment for micro-processing of materials and isotope separation, medical and research equipment. These include JSC “Shokin NPP “Istok” (Fryazino Moscow Region), LLC NPP VELIT (Istra, Moscow Region), CJSC Clean Technologies (Izhevsk), Lebedev Physical Institute of RAS, Oxford Lasers (England), Macquarie University (Australia) and Pulse Light (Bulgaria). As for powerful CVLS designed for isotope separation technology, the Lawrence Livermore National Laboratory (USA) with the average power increased to 72 kW and the RRC Kurchatov Institute are the leaders. The research continues at the A. N. Prokhorov Institute of General Physics of RAS (Moscow), TSU and the Institute of Optics and Atmosphere of the Siberian Branch of RAS (Tomsk), the Institute of Semiconductor Physics (Novosibirsk), NPO Mechatron LLC, St. Petersburg State Polytechnical University, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, N.E. Bauman MSTU and the Joint Institute for High Temperatures of RAS (Moscow).

IMPLEMENTING THE ADVANTAGES OF PULSED CVL

In order to implement the advantages of pulsed radiation of CVL in the technology of micro-processing of materials and other modern technologies, it was necessary to create a new generation of highly efficient industrial CVL and CVLS use them as a base for modern precision technological equipment. The goal was achieved by performing the following tasks:

- development of efficient, durable and stable parameters of industrial sealed laser AE on copper vapor with an average radiation power of 1–100 W;



Основные параметры короткоимпульсных высокочастотных газовых и твердотельных технологических лазеров
Main parameters of short-pulse high-frequency gas and solid-state technological lasers

Тип лазера	Параметры / Parameters								
	Длина волны, λ, мкм Wavelength, λ, μm	Длительность импульса, τ _{имп} Pulse length, τ _{pulse}	Частота повторения импульсов, F Pulse repetition frequency, F	Диаметр пучка, D _{п.} , мм Beam diameter, D _{b.} , mm	P _{изл.} , Вт P _{rad.} , W	Энергия импульса, W Pulse energy, W	Качество пучка M ² Beam quality M ²		
Твердотельные / Solid-state									
Nd: YAG RAPID	1,064 (0,532, 0,355)	<10 пс	1–1 000 кГц	1	6	–	<1,3		
RAPID10				0,75	10	–			
SUPER RAPID-HE	1,064	<15 пс	до 10 кГц 500 кГц	–	25	>200 мкДж 20 мкДж	<1,4		
HUPER RAPID25	1,064 (0,532, 0,355)		200–1 000 кГц	3		–			
HUPER RAPID50			400–1 000 кГц			50			–
HUPER RAPID100			400–1 000 кГц			100			–
Yb: KGW PHAROS	1,028	290 фс – 10 пс	200 кГц – 1 МГц	–	4–15	>0,2 мДж	<1,2		
PHAROS-SP		190 фс – 10 пс	1 МГц	–	6	>1,5 мДж	<1,3		
PHAROS2mJ		300 фс – 10 пс	200 кГц – 1 МГц	–		>2,0 мДж			
Дисковые / Disk									
TruMicro 5050	1,03	<10 пс	200–800 кГц	–	50	0,25 мДж	<1,3		
TruMicro 5250	0,515				30	0,15 мДж			
TruMicro 5350	0,343				10	0,05 мДж			
TruMicro 5025	1,030				25	0,125 мДж			
StarPico	1,064	≤15 пс	1 Гц – 20 МГц		15; 50	0,120 мДж 0,4 мДж	<1,4		
StarFemto-E – M – L	1,030	700 фс 700 фс 800 фс	1 Гц – 2 МГц	3,5	20	0,02 мДж 0,1 мДж 0,16 мДж	<1,3		
StarFemto FX	1,030 0,515 0,343	300 фс – 10 пс	1–1 000 Гц	3,5	6–15 3–7,5 1,5– 3,75	0,2 мДж 0,1 мДж 0,05 мДж	<1,2 <1,4 <1,7		
Волоконные / Fiber									
ANTAUS	1,03–1,06	<350 фс	до 2,5 МГц	–	>5 Вт	> 4 мкДж	TEM ₀₀		
Yb: YAG GLPM	0,532	1,3 нс	10–900 кГц	–	5–50	>30 мкДж	<1,2		
Yb: YAG YLPS-20	1,01–1,07	<70 пс	10–700 кГц	–	20	>30 мкДж	1,5–2,0		
Yb: YAG YLPM-0.3-A1-60-18	1,06	1 нс 5 нс 10 нс	10–600 кГц	–	18	60 мкДж 200 мкДж 300 мкДж	<1,3		



Производитель	Области применения
Manufacturer	Application areas
Lumera Laser, Coherent (США)	Высококачественная и точная микро-обработка материалов в микро-электронике, полупроводниковой и фотоэлектрической промышленности, микроструктурирование поверхностей материала High-quality and accurate micro-processing of materials in the microelectronics, semiconductor and photovoltaic industries, micro-structuring of material surfaces
Light Conversion Ltd. (Литва)	Микрообработка, микро- и наноструктурирование, нелинейная оптика, спектроскопия высокого временного разрешения Micro-processing, micro- and nano-structuring, nonlinear optics, high temporal resolution spectroscopy
Trumpf (Германия)	Микрообработка с оптимальным сочетанием качества и производительности: прецизионная микрорезка и микро-сверление металлических материалов, керамики и хрупких материалов, микро- и наноструктурирование, селективное удаление тонких слоев без повреждения подложки Micro-processing with an optimal combination of quality and performance: precision micro-cutting and micro-drilling of metallic materials, ceramics and fragile materials, micro- and nano-structuring, selective removal of thin layers without damaging the substrate
Rofin (Германия)	
Авеста-Проект (Россия)	Микрообработка и структурирование материалов, спектроскопия высокого временного разрешения, метрология, многофотонная микроскопия Micro-processing and structuring of materials, high temporal resolution spectroscopy, metrology, multiphoton microscopy
IPG Photonics (США)	Микрообработка, маркировка и гравировка и др. Micro-processing, marking and engraving, etc.

- development and research of highly efficient and reliable schemes for the execution of a high-voltage IP modulator with a nanosecond duration of pump pulses;
- studies of highly selective optical resonators and systems for the formation of single-beam diffraction quality and stable parameters in CVL and CVLS to achieve high peak power densities (10^9 – 10^{12} W/cm²);
- studies of AC properties of the pulsed CVL and the development of methods and electronic devices for the operational management of power and PRF radiation;
- development on the basis of a new generation of sealed-off AEs, high-voltage modulators for IPs, high-selective optical systems and operational methods for controlling the emission parameters of industrial technological CVL and CVLS with radiation power up to 100 W with high reliability, efficiency, quality and stability of the radiation parameters;
- creation of modern automated laser technological installations (ALTI) of the “Caravella” type based on industrial CVL and CVLS and modern precision XYZ three-coordinate tables for productive and high-quality precision laser micromachining of the materials;
- determination of optimum densities of peak and average radiation power of CVL for effective micromachining of foil (0.01–0.2 mm) and thin-sheet (0.3–1 mm) materials;

INDUSTRIAL SEALED-OFF AES OF THE PULSED CVL

In the development process, the design of self-heating AE with the intravacuum arrangement of the thermal insulator proposed by the staff of the P. N. Lebedev Physics Institute, RAS, and JSC “Shokin NPP “Istok” (Fryazino. Moscow Region) was taken as the basis for the design of both the first AE models of pulsed CVL and the new generation of industrial sealed-off AEs: “Pendant”, small (1–20 W) and “Crystal”, medium (30–100 W) power levels with an operating temperature of the discharge channel 1600–1700 °C. The design, technology of outgassing and cleaning after outgassing of the developed industrial sealed-off AEs “Pendant” and “Crystal” are identical and differ only in the size of functional units and the time of outgassing and cleaning. The power of each individual AE model is ultimately determined by the diameter and length of the discharge channel. The diameter and length of the discharge channel of AE



Таблица. Продолжение
Table.

Тип лазера	Параметры / Parameters							
	Длина волны, λ, мкм Wavelength, λ, μm	Длительность импульса, τ _{имп} Pulse length, τ _{pulse}	Частота повторения импульсов, F Pulse repetition frequency, F	Диаметр пучка, D _{п.} , мм Beam diameter, D _{b.} , mm	P _{изл.} , Вт P _{rad.} , W	Энергия импульса, W Pulse energy, W	Качество пучка M ² Beam quality M ²	
Yb : YAG MicroDM	1,07	200–20 000 нс	–	–	150	–	<2	
Yb : KGW FemtoFAB	1,028 0,515 0,343 0,258	–	200 кГц	–	4, 6, 8, 10	1 мДж	<1,2 <2	
Экимерные / Excimer								
ArF KrF XeF	0,193; 0,248; 0,351	14 нс 16 нс 16 нс	до 5 000 Гц	50×25	200 300 200	40 мДж 60 мДж 40 мДж	1×0,5 мрад ²	
ArF	0,193	13 нс	200 Гц	25×11	45	650 мДж	3×1 мрад ²	
ArF KrF XeCl XeF	0,193; 0,248; 0,308; 0,351	9 нс	1 000 Гц	6×3	3 5 3 1	5 мДж 8 мДж 4 мДж 2 мДж	0,7×1,4 мрад ²	
Азотные (N ₂) / Nitrogen (N ₂)								
АИЛ-0,5 АИЛ-3 АИЛ-511	0,337	5 нс 5 нс 6–8 нс	1–200 Гц 1–100 Гц 1–1 000 Гц	–	0,0015 0,0025 0,005	2,5 мкДж 30 мкДж 240 мкДж	–	
NL-1–100		3–60 нс	100 Гц	4×14	0,1	1 мкДж	–	
ЛГИ-21		10 нс		3	0,003	30 мкДж	3 мрад	
Лазеры на парах меди (ЛПМ) / Copper vapor lasers (CVL)								
ЛПМ прокачной в составе технологической установки МР200Х Pumping CVL as part of the technological installation MR200H	0,5106 0,5782	20 нс	10–20 кГц	–	до 60 Вт	до 6 мДж	0,075 мрад	
ЛПМ «Кулон» в составе технологических установок «Каравелла» CVL «Pendant» as part of the technological installations «Caravella»		15 нс		14	5–20	0,1–2 мДж	<1,1	
ЛСПМ «Карелия» CVLS «Karelia»				20, 32, 45	40–100	2–10 мДж		



Производитель	Области применения
Manufacturer	Application areas
Лазерформ (Россия)	Микрообработка, резка, прошивка отверстий, скрайбирование подложек микросхем и др. Micro-processing, cutting, piercing holes, scribing chip substrates, etc.
ИОФРАН (Россия)	Фотолитография в полупроводниковом производстве, лазерный отжиг, маркировка, обработка пластиков, керамики, кристаллов, биологических тканей Photolithography in semiconductor manufacturing, laser annealing, labeling, processing of plastics, ceramics, crystals, biological tissues
Lambda Physik (Германия)	
Gam lasers (США)	
Плазма (Россия)	Подгонка номиналов пленочных резисторов и конденсаторов в микроэлектронике Adjustment of film resistors and capacitors in microelectronics
ИСЭ СО РАН (Россия)	
НПП «Исток» (Россия)	
Оxford Lasers (Англия)	Микрообработка материалов толщиной до 2 мм Micro-processing of materials up to 2 mm thick
АО «НПП «Исток» (Россия)	Микрообработка фольговых (0,01–0,2 мм) и тонколистовых (0,3–1 мм) материалов Micro-processing of foil (0.01–0.2 mm) and thin-sheet (0.3–1 mm) materials
	Микрообработка материалов толщиной 1–2 мм. В сочетании с лазерами на красителях – разделение изотопов Micro-processing of materials with a thickness of 1–2 mm in combination with dye lasers – isotope separation

“Pendant” with an average radiation power of 1 W is 7 and 140 mm, a power of 5 W – 12 and 340 mm, 20 W – 14 and 625 mm, AE “Crystal” with a power of 30 W – 20 and 930 mm, 55 W – 32 and 1230 mm, 100 W – 45 and 1520 mm. High efficiency, power, durability, quality and stability of radiation parameters of the industrial sealed-off AEs “Pendant” and “Crystal” are achieved through the implementation of a set of scientific, technical and technological solutions:

The parameters of AE radiation for power consumption, pressure of the neon and hydrogen buffer gas, repetition frequency, and pump pulse parameters were optimized. As a pump generator, a thyatron IP was used with the high-voltage modulator made according to the capacitive voltage doubling scheme with magnetic compression units of nanosecond current pulses and an anode reactor, which according to the results of research today is the most reliable and easy-to-use AC laser [6, 34, 35]. Compared with the classical scheme, the duration of the current pulses generated is shortened by 2 times, from 250–300 ns to 120–150 ns, which leads to an increase in radiation power by 2 times. The efficiency is 1.5 times due to an increase in the optimal operating temperature and, as a result, the concentration of copper vapor in the AC is approximately 2–2.5 times, the service life of the thyatron switch (more than 2000 hours) and switching power (up to 5–10 kW) by reducing the power loss in it.

AE “Pendant”, AE “Crystal” (GL-205) are produced with illuminated exit windows. The basis of optimization to achieve maximum operating values of efficiency and radiation power was the results of a complex of unique experimental studies. The design and manufacturing technology of AE GL-205G on gold vapor is identical to the GL-205A model on copper vapor, and differs only in the composition of the active substance, the increased operating temperature of the discharge channel ($T_c \sim 1700^\circ\text{C}$) and, therefore, the radiation wavelength ($\lambda = 578.2\text{ nm}$) (see table), which somewhat reduces the AE’s service life.

HIGH-SELECTIVE OPTICAL RESONATORS AND SYSTEMS FOR THE FORMATION OF SINGLE-BEAM DIFFRACTION-QUALITY RADIATION IN CVL AND CVLS

In this work, special attention was paid to the study of the optical resonators of the CVL, since they determine the characteristics and quality of the output radiation. In the course of these studies, the dynamics of the formation and structure of the radiation of a CVL were revealed. It has been



технологии для нужд ядерной энергетики. В то же время разработки наиболее популярных коммерческих ЛПМ, к которым относятся лазеры малого (1–20 Вт) и среднего (30–100 Вт) уровней мощности, оставались как бы в стороне. В-третьих, за последние 10–15 лет лазерный рынок был представлен относительно большим количеством разновидностей ЛПМ с низким уровнем надежности и качества излучения, что снизило пользовательский спрос на данный тип лазера. Несмотря на сложившуюся ситуацию, ряд отечественных и зарубежных организаций продолжают работы по созданию новых коммерческих моделей ЛПМ и ЛСПМ и на их основе современного технологического оборудования для микрообработки материалов и разделения изотопов, медицинской и исследовательской аппаратуры. К ним относятся АО «НПП «Исток» им. Шокина» (Фрязино Моск. обл.), ООО «НПП «ВЭЛИТ» (Истра, Моск. обл.), ЗАО «Чистые технологии» (Ижевск), Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Oxford Lasers (Англия), университет Маккуари (Австралия) и «Pulse Light» (Болгария). По мощным ЛСПМ, предназначенным для технологии разделения изотопов, лидируют Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса (США), где средняя мощность доведена до 72 кВт и РНЦ «Курчатовский институт». Исследования продолжаются в Институте общей физики РАН им. А.Н. Прохорова (Москва), ТГУ и Институте оптики и атмосферы СО РАН (г. Томск), Институте физики полупроводников (г. Новосибирск), ООО «НПО «Мехатрон», Санкт-Петербургском государственном политехническом университете, Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики, МГТУ им. Н.Э. Баумана и Объединенном институте высоких температур РАН (Москва).

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕИМУЩЕСТВ ИМПУЛЬСНОГО ЛПМ

Для реализации преимуществ импульсного излучения ЛПМ в технологии по микрообработке материалов и других современных технологий необходимо было создание нового поколения высокоэффективных промышленных ЛПМ и ЛСПМ и на их основе современного прецизионного технологического оборудования. Поставленная цель была достигнута за счет выполнения следующих задач:

- разработки эффективных, долговечных и со стабильными параметрами промыш-

established that in CVL in the mode of a separate generator with an optical resonator, the structure of the output radiation is multibeam, and each beam has its own spatial, temporal and energy characteristics. At the same time, the intensity distribution of the CVL radiation in the focusing plane has a stepped, uneven character, which in principle is not suitable for high-quality micro-processing and prevented the creation of modern CVL-based technological equipment. The greatest interest was aroused by studies of CVL with optical systems with high spatial selectivity: with one convex mirror, with a telescopic unstable resonator (UR) and UR with two convex mirrors, as a result of which the conditions for the formation of one diffraction-quality beam radiation with high stability of parameters [6, 15, 16]. Based on the laws of geometric optics, taking into account the diffraction limit of divergence, formulas are derived for calculating the divergence of the output laser beam for these three optical systems and the conditions for the formation of single-beam diffraction quality with stable parameters are determined.

The formula for calculating the radiation divergence during the operation of the CVL in the generator mode with one convex mirror has the following form

$$\theta = \frac{R \cdot D_k}{2l \cdot (R + L)} + \frac{2,44\lambda}{D_k}.$$

The smaller the radius of curvature of the mirror (R) and the diameter of the discharge channel aperture (D_k), and the longer the distance from the mirror to the output aperture of the discharge channel (l), the closer the divergence (θ) to the diffraction limit – $\theta_{\text{diff}} = 2,44\lambda/D_k$. When the radii R are one-two orders of magnitude smaller than the distance l , the beam divergence becomes close to the diffraction one ($\theta = 2-4 \theta_{\text{diff}}$), and the peak power density in the spot of the focused radiation beam reaches 10^9 W/cm^2 , sufficient for productive micromachining of foil materials and cutting solders (0.02–0.1 mm). For processing thicker materials, a CVL with one convex mirror is used as the MO in the CVLSs of the type “MO – spatial collimator filter (SCF) – PA”, when using AE “Crystal” of GL-205A and GL-205B models as the PA, the radiation power increases more than an order of magnitude (30–60 W) [6, 16].

The use of CVL in the generator mode with telescopic UR as MO in CVLS of type “MO – SCF – PA” was the basis for creating modern industrial ALTI



ленных отпаянных лазерных АЭ на парах меди со средней мощностью излучения 1-100 Вт;

- разработки и исследования высокоэффективных и надежных схем исполнения высоковольтного модулятора ИП с наносекундной длительностью импульсов накачки;
- исследования высокоселективных оптических резонаторов и систем по формированию в ЛПМ и ЛСПМ однопучкового излучения дифракционного качества и со стабильными параметрами для достижения высоких пиковых плотностей мощности (10^9 - 10^{12} Вт/см²);
- исследования свойств АС импульсного ЛПМ и разработки на их основе методов и электронных устройств для оперативного управления мощностью и ЧПИ излучения;
- разработки на базе нового поколения отпаянных АЭ, высоковольтных модуляторов для ИП, высокоселективных оптических систем и оперативных методов управления параметрами излучения промышленных технологических ЛПМ и ЛСПМ мощностью излучения до 100 Вт с высокими надежностью, эффективностью, качеством и стабильностью параметров излучения;
- создания современных автоматизированных лазерных технологических установок (АЛТУ) типа «Каравелла» на базе промышленных ЛПМ и ЛСПМ и современных прецизионных трехкоординатных столов XYZ

“Caravella-1” with a radiation power of 10-15 W for precision micromachining of metallic materials up to 0.5 mm thick and non-metallic up to 1-1,2 mm; with UR with two convex mirrors as MO in CVLS – the basis for creating the most powerful industrial ALTI “Caravella-1M” (20-25 W) for precision micro-machining of metallic materials up to 1 mm thick and non-metallic up to 1.5 ... 2 mm electronics article [17]; with a telescopic UR and SCF at its output – the basis for creating compact low-power modern industrial ALTIs “Caravella-2” and “Caravella-2M” (5-8 W) for precision micromachining of metallic materials up to 0.3 mm thick and non-metallic to 0,5-0.7 mm electronics article [18].

In CVLS operating according to the scheme “MO – PA”, maximum efficiencies (2-3%), power (≥ 100 W) and density of peak radiation power (up to 10^{13} W/cm²) are ensured

Operational power control and PRF radiation in the CVLS of the “MO – PA” type according to a given algorithm is carried out due to the high-speed desynchronization of the optical signal (radiation pulse) of the MO from the PA active medium absorption zone to its amplification or transparency zone and vice versa.

CONCLUSION

In the process of a large amount of experimental work carried out, the most promising technological directions for creating special equipment based on laser elements on metal vapors were identified for use in micro-processing of the materials with nanosecond radiation in order to scale them to a wide production level.



Вакуумное оборудование для оптики и микроэлектроники



Проектирование и производство вакуумных напылительных установок «под ключ»



Изготовление технологических устройств



Izovac

Разработка и изготовление тонкопленочных изделий

Разработка технологий формирования тонких пленок

Оптические элементы

Напылительный сервис

Сложные и уникальные покрытия





ООО «Изовак», ул. М. Богдановича, 155-907, 220040, Минск, Беларусь, тел.: +375 17 293 18 42, факс: +375 17 2931845

www.izovac.com
www.izovac-coatings.com



для производительной и качественной прецизионной лазерной микрообработки материалов;

- определения оптимальных плотностей пиковой и средней мощности излучения ЛПМ для эффективной микрообработки фольговых (0,01–0,2 мм) и тонколистовых (0,3–1 мм) материалов.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОТПАЯННЫЕ АЭ ИМПУЛЬСНОГО ЛПМ

В процессе разработки за основу конструкции как первых моделей АЭ импульсного ЛПМ, так и нового поколения промышленных отпаянных АЭ серии «Кулон» малого (1–20 Вт) и «Кристалл» среднего (30–100 Вт) уровней мощности с рабочей температурой разрядного канала 1600–1700 °С взята конструкция саморазогревного АЭ с внутривакуумным расположением теплоизолятора, предложенная сотрудниками Физического института им. П.Н. Лебедева РАН и АО «НПП «Исток» им. Шокина» (Фрязино. Моск. обл.). Конструкция, технология обезгаживания и очистки после обезгаживания разработанных промышленных отпаянных АЭ серии «Кулон» и «Кристалл» идентичны и отличаются лишь размерами функциональных узлов и временем обезгаживания и очистки. Мощность каждой отдельной модели АЭ определяется в конечном итоге диаметром и длиной разрядного канала. Диаметр и длина разрядного канала АЭ «Кулон» со средней мощностью излучения 1 Вт составляют 7 и 140 мм, мощностью 5 Вт – 12 и 340 мм, 20 Вт – 14 и 625 мм, АЭ «Кристалл» мощностью 30 Вт – 20 и 930 мм, 55 Вт – 32 и 1230 мм, 100 Вт – 45 и 1520 мм. Высокие КПД, мощность, долговечность, качество и стабильность параметров излучения в промышленных отпаянных АЭ «Кулон» и «Кристалл» достигнуты за счет реализации комплекса научно-технических и технологических решений:

Проведена оптимизация параметров излучения АЭ по потребляемой мощности, давлению буферного газа неона и водорода, частоте повторения и параметров импульсов накачки. В качестве генератора накачки использовался тиратронный ИП, высоковольтный модулятор которого выполнен по схеме емкостного удвоения напряжения с магнитными звеньями сжатия наносекундных импульсов тока и анодным реактором, являющийся по результатам исследований на сегодня самым надежным и простым в эксплуатации и эффективным по условиям

возбуждения АС лазера [6, 34, 35]. По сравнению с классической схемой длительность формируемых импульсов тока укорачивается в 2 раза, с 250–300 нс до 120–150 нс, что приводит к увеличению мощности излучения также в 2 раза, КПД в 1,5 раза за счет повышения оптимальной рабочей температуры и, как следствие, концентрации паров меди в АС примерно в 2–2,5 раза, увеличивается в несколько раз срок службы коммутатора-тиратрона (более 2000 ч) и коммутируемая мощность (до 5–10 кВт) за счет снижения в нем потерь мощности.

АЭ серии «Кулон», АЭ «Кристалл» (ГЛ-205) выпускаются с просветленными выходными окнами. Основу оптимизации по достижению максимальных рабочих значений КПД и мощности излучения составили результаты комплекса проведенных уникальных экспериментальных исследований. Конструкция и технология изготовления АЭ ГЛ-205Г на парах золота идентичны модели ГЛ-205А на парах меди и отличается только составом активного вещества, повышенной рабочей температурой разрядного канала ($T_k \approx 1700$ °С) и соответственно длиной волны излучения ($\lambda = 578,2$ нм) (см. табл.), что несколько снижает срок службы АЭ.

ВЫСОКОСЕЛЕКТИВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ И СИСТЕМЫ ПО ФОРМИРОВАНИЮ В ЛПМ И ЛСПМ ОДНОПУЧКОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДИФРАКЦИОННОГО КАЧЕСТВА

В работе особое внимание было обращено исследованию оптических резонаторов ЛПМ, т. к. они определяют характеристики и качество выходного излучения. В процессе этих исследований была раскрыта динамика формирования и структура излучения ЛПМ. Установлено, что в ЛПМ в режиме отдельного генератора с оптическим резонатором структура выходного излучения многопучковая, причем каждый пучок обладает своими пространственными, временными и энергетическими характеристиками. При этом распределение интенсивности излучения ЛПМ в плоскости фокусировки имеет ступенчатый, неравномерный характер, что в принципе не пригодно для качественной микрообработки и препятствовало созданию на базе ЛПМ современного технологического оборудования. Наибольший интерес вызвали исследования ЛПМ с оптическими системами, обладающими высокой пространственной селективностью: с одним выпуклым зеркалом, с телескопическим

неустойчивым резонатором (НР) и НР с двумя выпуклыми зеркалами, в результате которых были определены условия формирования однопучкового излучения дифракционного качества с высокой стабильностью параметров [6, 15, 16]. На основе законов геометрической оптики, с учетом дифракционного предела расходимости, выведены формулы для расчета расходимости выходного пучка излучения ЛПМ для этих трех оптических систем и определены условия формирования в них однопучкового излучения дифракционного качества со стабильными параметрами.

Формула для расчета расходимости излучения при работе ЛПМ в режиме генератора с одним выпуклым зеркалом имеет следующий вид

$$\theta = \frac{R \cdot D_k}{2l \cdot (R + L)} + \frac{2,44\lambda}{D_k}.$$

Чем меньше радиус кривизны зеркала (R) и диаметр апертуры разрядного канала (D_k), и больше расстояние от зеркала до выходной апертуры разрядного канала (l), тем ближе расходимость (θ) к дифракционному пределу – $\theta_{\text{дифр}} = 2,44\lambda / D_k$. При радиусах R на один-два порядка меньших расстояния l расходимость пучка становится близкой к дифракционной ($\theta = 2-4\theta_{\text{дифр}}$), а плотность пиковой мощности в пятне сфокусированного пучка излучения достигает значений 10^9 Вт/см^2 , достаточными для производительной микрообработки фольговых материалов и раскроя припоев (0,02–0,1 мм). Для обработки более толстых материалов ЛПМ с одним выпуклым зеркалом применяется в качестве ЗГ в ЛСПМ типа ЗГ – пространственный фильтр коллиматор (ПФК) – УМ, когда при использовании АЭ «Кристалл» моделей ГЛ-205А и ГЛ-205Б в качестве УМ мощность излучения возрастает более чем на порядок (30–60 Вт) [6, 16].

Применение ЛПМ в режиме генератора с телескопическим НР в качестве ЗГ в ЛСПМ типа ЗГ – ПФК – УМ явилось основой для создания современной промышленной АЛТУ «Каравелла-1» мощностью излучения 10–15 Вт для прецизионной микрообработки металлических материалов толщиной до 0,5 мм и неметаллических до 1–1,2 мм; с НР с двумя выпуклыми зеркалами в качестве ЗГ в ЛСПМ – основой для создания самой мощной промышленной АЛТУ «Каравелла-1М» (20–25 Вт) для прецизионной микрообработки металлических материалов толщиной до 1 мм и неметалли-


ABESTA

ЛАЗЕРЫ И ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Фемтосекундные лазерные системы

- Параметрические генераторы 750–4200 нм
- Волоконные лазеры на 780, 1030–1064, 1560 нм
- Лазеры со средней мощностью до 50 Вт
- Оптический синтезатор частоты ("комб-генератор")
- Титан-сапфировые генераторы от 6 до 100 фс
- Системы с пиковой мощностью до 10 ТВт



Диагностика и компоненты

- Фотоприемники с усилителем, лавинные
- Изоляторы Фарадея 400–1250 нм, до 60 дБ
- Селекторы импульсов на 250–2700 нм до 2 МГц
- Измерители длительности импульсов, SPIDER
- PLL электроника для синхронизации
- ТГц-генераторы до 1 мДж в импульсе



Спектрометры

- Компактные универсальные модели (190–1100 нм)
- ИК сканирующие спектрометры (500–3450 нм)
- Подключение по USB, собственное ПО



Оптомеханика

- Полный набор готовых элементов для создания оптических стенов любой сложности


www.avesta.ru
fs@avesta.ru

 тел.: (495) 967-94-73; ООО «Авеста-Проект»,
ул. Физическая, д. 11, г. Троицк, г. Москва.



ческих до 1,5–2 мм ИЭТ [17]; с телескопическим НР и ПФК на его выходе – основой для создания компактных маломощных современных промышленных АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» (5–8 Вт) для прецизионной микрообработки металлических материалов толщиной до 0,3 мм и неметаллических до 0,5–0,7 мм изделий ЭТ [18].

В ЛСПМ, работающей по схеме ЗГ–УМ, обеспечиваются максимальные КПД (2–3%), мощности (≥ 100 Вт) и плотности пиковой мощности излучения (до 10^{13} Вт/см²)

Оперативное управление мощностью и ЧПИ излучения в ЛСПМ типа ЗГ – УМ по заданному алгоритму производится за счет высокоскоростной рассинхронизации оптического сигнала (импульса излучения) ЗГ из зоны поглощения активной среды УМ в зону его усиления или прозрачности и наоборот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе большого объема выполненных экспериментальных работ определились наиболее перспективные технологические направлений по созданию специального оборудования на основе лазерных элементов на парах металлов для использования в процессах микрообработки материалов наносекундным излучением с целью их масштабирования на широкий производственный уровень.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Петраш Г. Г.** Лазеры на парах металлов: Справочник по лазерам: в 2т. М.: Советское радио. 1978.
Petpash G. G. Lazery na parakh metallov: Sppravochnik po lazepam: v 2t. M.: Sovetskoe radio. 1978.
2. **Бужинский О. И.** Эволюция исследований медного лазера и возможности его практического применения. М.: ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1983.
Buzhinskiy O. I. Evolyuciya issledovaniy mednogo lazera i vozmozhnosti ego prakticheskogo primeneniya. M.: IAE im. I. V. Kupchatova, 1983.
3. **Бохан П. А.** Эффективные газоразрядные лазеры на парах металлов. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 1978.
Bokhan P. A. Effektivnye gazorazryadnye lazery na parakh metallov. Tomsk: Izd-vo IOA SO RAN. 1978.
4. **Солдатов А. И., Соломонов В. И.** Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука. 1985.
Soldatov A. I., Solomonov V. I. Gazorazryadnye lazery na samoogranichennykh perekhodakh v parakh metallov. Novosibirsk: Nauka. 1985.
5. **Little C. E. and Sabotinov N. V.** Pulsed Metal Vapour Lasers: Proc. NATO Advanced Research Workshop on Pulsed Metal Vapour Lasers – Physic and Emerging Applications in Industry, Medical and Science. St. Andrews (UK) (Aug. 6–10. 1995 / Ed. – Dordrecht, 1996;479).
6. **Григорьянц А. Г., Казарян М. А., Лябин Н. А.** Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения. М.: Физматлит. 2005.
Grigoryancz A. G., Kazaryan M. A., Lyabin N. A. Lazery na parakh medi: konstrukciya, kharakteristiki i primeneniya. M.: Fizmatlit. 2005.
7. **Батенин В. М., Бучанов В. В., Казарян М. А.** Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. М.: Научная книга, 1998.
Batenin V. M., Buchanov V. V., Kazaryan M. A. Lazery na samogranichennykh perekhodakh atomov metallov. M.: Nauchnaya kniga, 1998.
8. **Батенин В. М., Бойченко А. М., Бучанов В. В.** Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов – 2. В 2 т. Т1. М.: Физматлит. 2009.
Batenin V. M., Boychenko A. M., Buchanov V. V. Lazery na samoogranichennykh perekhodakh atomov metallov – 2. V 2 t. T1. M.: Fizmatlit. 2009.
9. **Батенин В. М., Бойченко А. М., Бойченко А. М.** Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов – 2. В 2 т. Т2. М.: Физматлит. 2009.
Batenin V. M., Boychenko A. M., Boychenko A. M. Lazery na samoogranichennykh perekhodakh atomov metallov – 2. V 2 t. T2. M.: Fizmatlit. 2009.
10. **Little C. E.** Metal Vapour Lasers: Physics, Engineering and Applications (Chichester (UK): J. Wiley and Sons Ltd. 1999; 620.
11. **Бохан П. А., Бучанов В. В., Закревский Д. Э.** Лазерное разделение изотопов в атомарных парах. М.: Физматлит. 2004.
Bokhan P. A., Buchanov V. V., Zakrevskiy D. E. Lazernoe razdelenie izotopov v atomarnykh parakh. M.: Fizmatlit. 2004.
12. **Бохан П. А., Бучанов В. В., Закревский Д. Э.** Оптическое и лазерно-химическое разделение изотопов в атомарных парах. М.: Физматлит. 2010.
Bokhan P. A., Buchanov V. V., Zakrevskiy D. E. Opticheskoe i lazerno-khimicheskoe razdelenie izotopov v atomarnykh parakh. M.: Fizmatlit. 2010.
13. **Пасманик Г. А., Земсков К. И., Казарян М. А.** Оптические системы с усилителями яркости. Горький: ИПФ АН СССР. 1988.
Pasmanik G. A., Zemskov K. I., Kazaryan M. A. Opticheskie sistemy s usilitelyami yarkosti. Gorkiy: IPF AN SSSP. 1988.
14. **Лябин Н. А., Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н.** Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2014;7: 20.
Lyabin N. A., Grigoryancz A. G., Shiganov I. N. Nauka i obrazovanie. MG TU im. N. E. Bauman. Elektron. zhurn. 2014;7: 20.
15. **Лябин Н. А., Чурсин А. Д., Клименко В. И.** Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2014; 8: 30.
Lyabin N. A., Chursin A. D., Klimenko V. I. Nauka i obrazovanie. MG TU im. N. E. Bauman. Elektron. zhurn. 2014; 8: 30.
16. **Лябин Н. А.** Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2014; 6: 1.
Lyabin N. A. Nauka i obrazovanie. MG TU im. N. E. Bauman. Elektron. zhurn. 2014; 6: 1.
17. **Лябин Н. А., Григорьянц А. Г., Казарян М. А.** Наукоемкие технологии в машиностроении. 2014; 9: 19.
Lyabin N. A., Grigoryancz A. G., Kazaryan M. A. Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii. 2014; 9: 19.
18. **Лябин Н. А., Чурсин А. Д., Клименко В. И.** Наукоемкие технологии в машиностроении. 2014;10: 41.
Lyabin N. A., Chursin A. D., Klimenko V. I. Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii. 2014;10: 41.
19. **Лябин Н. А., Ляпин Л. В., Семенюк С. С.** Электронная техника. Сер. I СВЧ-техника. 2014; 3 (522): 15.

Lyabin N. A., Lyapin L. V., Semenyuk S. S. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1 SVCh-tekhnika*. 2014; 3 (522): 15.

20. Айхлер Ю., Айхлер Г. И. *Лазеры. Исполнение, управление, применение*. М.: Техносфера. 2008.
Aykhler Yu., Aykhler G. I. *Lazery. Ispolnenie, upravlenie, primeneniye*. M.: Tekhnosfera. 2008.
21. Казарян М. А., Крузалов С. В., Лябин Н. А., Макрушин Ю. М., Прохоров А. М., Шакин О. В. *Квантовая электроника*. 1998; 25: 773.
Kazaryan M. A., Kruzhalov S. V., Lyabin N. A., Makrushin Yu. M., Prokhorov A. M., Shakin O. V. *Kvantovaya elektronika*. 1998; 25: 773.
22. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. *Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов*. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2006.
Grigoryancz A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I. *Tekhnologicheskiye processy lazer-noy obrabotki: Ucheb. posobie dlya vuzov*. M.: Izd-vo MGТУ im. N. E. Bauman. 2006.
23. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Третьяков Р. С. *Фотоника*. 2015; 3: 26.
Grigoryancz A. G., Shiganov I. N., Tretyakov R. S. *Fotonika*. 2015; 3: 26.
24. Сапрыкин Л. Г., Кудрявцева А. Л. *Металлообработка и станкостроение*. 2008; 10: 39.
Saprykin L. G., Kudryavceva A. L. *Metalloobrabotka i stankostroyeniye*. 2008; 10: 39.
25. Сапрыкин Д. Л. *Лазер-Информ*. 2014; 1: 2.
Saprykin D. L. *Lazer-Inform*. 2014; 1: 2.
26. Вакс Е. Д., Миленький М. Н., Сапрыкин Л. Г. *Практика прецизионной лазерной обработки*. М.: Техносфера, 2013.
Vaks E. D., Milenkiy M. N., Saprykin L. G. *Praktika precizionnoy lazernoy obrabotki*. M.: Tekhnosfera, 2013.
27. Горный С. Г. *Фотоника*. 2015; 5: 12.
Gornyy S. G. *Fotonika*. 2015; 5: 12.
28. Күлешов Н. В. *Лазер-Информ*. 2014; 6: 1.
Kuleshov N. V. *Lazer-Inform*. 2014; 6: 1.
29. *Каталог-справочник. Лазерные источники излучения, ч. 1–3*. М.: ЛАС. 2015.
Katalog-spravochnik. Lazernye istochniki izlucheniya, ch. 1–3. M.: LAS. 2015.
30. *Каталог-справочник. Лазерные технологические установки, выпускаемые в странах СНГ*. М.: ЛАС. 2015.
Katalog-spravochnik. Lazernye tekhnologicheskiye ustanovki, vypuskayemye v stranakh SNG. M.: LAS. 2015.
31. Голышев А. А., Маликов А. Г., Оришич А. М., Шулятьев В. Б. *Квантовая электроника*. 2014; 44: 233.
Golyshev A. A., Malikov A. G., Orishich A. M., Shulyatev V. B. *Kvantovaya elektronika*. 2014; 44: 233.
32. Голышев А. А., Маликов А. Г., Оришич А. М., Шулятьев В. Б. *Квантовая электроника*. 2015; 45: 873.
Golyshev A. A., Malikov A. G., Orishich A. M., Shulyatev V. B. *Kvantovaya elektronika*. 2015; 45: 873.
33. Бахманн Ф., Мюллер Д., Клинт Б. *Фотоника*. 2013; 1: 34.
Bakhtmann F., Myuller D., Klimt B. *Fotonika*. 2013; 1: 34.
34. Колоколов И. С., Клименко В. И., Лябин Н. А. *Прикладная физика*. 2003; 3: 84.
Kolokolov I. S., Klimentko V. I., Lyabin N. A. *Prikladnaya fizika*. 2003; 3: 84.
35. Лепехин Н. М., Присеко Ю. С., Филиппов В. Г., Лябин Н. А., Чурсин А. Д., Казарян М. А. *Прикладная физика*. 2005; 1: 110.
Lepikhin N. M., Priseko Yu. S., Filippov V. G., Lyabin N. A., Chursin A. D., Kazaryan M. A. *Prikladnaya fizika*. 2005; 1: 110.

ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

НН ОПТИКА

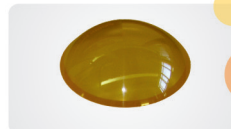
RAIN OPTICS

Продукция

ИК окна диаметром до 350 мм и толщиной до 25 мм



Колпаки диаметром до 300 мм



Линзы, призмы и прямоугольные пластины любой конфигурации, в том числе с просветляющими покрытиями



РОСТ
CVD ZnSe лазерного качества с габаритами до 1320x680x30

ОБРАБОТКА
оптических элементов разной геометрической формы из ZnSe, ZnS, Ge, IG4, IG6 и различных марок оптических стекол

НАНЕСЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ
на диапазон 0,4-16 микрон

ЛЮБАЯ ОПТИКА ИЗ СЕЛЕНИДА ЦИНКА
для решения ваших задач

606020,
Нижегородская область,
г. Дзержинск,
ул. Либкнехта, д. 41, корп. 1
sales@r-ainoptics.com
Тел.: +7-831-280-84-47
www.r-ainoptics.com

Пришлите заказ на линзы для CO₂-лазеров по адресу электронной почты sales@r-ainoptics.com до 1 августа 2019 года. Укажите в теме письма #Фотоника3. Получите скидку на первый заказ 10%. Подробности уточняйте у сотрудников компании.