

УДК 535.621.37; 621.378.325
DOI: 10.12737/24211

А.Г. Григорьянц, д.т.н., **И.Н. Шиганов**, д.т.н.,
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5),
М.А. Казарян, д.ф-м.н.,
(ФИ РАН им. П.Н. Лебедева, 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53)
Н.А. Лябин, д.т.н.
(АО «Научно-производственное предприятие «Исток» имени А.И. Шокина»,
141190, Московская область, г. Фрязино, Вокзальная ул., д. 2а)
E-mail: mt12@bmstu.ru, lilt@istokmw.ru

Сравнительный анализ параметров импульсного лазера на парах меди с известными типами технологических лазеров

Представлены результаты сравнительного анализа импульсных лазеров на парах меди с длинами волн излучения в видимой области спектра 510,6 и 578,2 нм и длительностью 10...30 нс с известными типами короткоимпульсных технологических лазеров и разработок промышленных лазеров на парах меди с дифракционным качеством излучения и мощностью до 100 Вт, предназначенных для комплектования технологического оборудования по прецизионной микрообработке.

Ключевые слова: лазеры на парах меди; технологические лазеры; оптический резонатор; качество пучка излучения; плотность пиковой мощности; прецизионная микрообработка.

A.G. Grigoriyants, D. Eng., **I.N. Shiganov**, D. Eng.,
(Bauman STU of Moscow, 5, 2-d Baumanskaya Str., 105005, Moscow)
M.A. Kazaryan, D. P-M.,
(Lebedev FI RAS, 53, Leninsky Avenue, 119991 GSP-1 Moscow)
N.A. Lyabin, D. Eng.
(J-S Co. "Shokin Scientific-Production Enterprise "Source", 2a, Vokzalnaya Str., Fryazino, Moscow Region 141190)

Comparative analysis of pulse copper vapour laser parameters fume with known types of technological lasers

The shown in the work investigations on a comparative analysis of emission parameters of lasers and laser systems on copper vapour (LPM and LSPM) with known technological gas and solid-state lasers have shown that LPM and LSPM with wave lengths of emission in a yellow-green spectrum range – 510.6 and 578.2 nm; pulse nano-second duration – 10...30ns; high frequencies of pulse repetition – 10...20kHz and low pulse energy – 0.1...10mJ stay power pulse sources of coherent radiation and according to parameter totality are unique tools for micro-processing.

On the basis of the complex of scientific-technical, technological and circuit solutions there is created a new generation with high efficiency, reliability and quality of emission, industrial welded-off active elements on copper vapour of small (1...20W) and average (30...100W) levels of power and on their basis industrial LPM and LSPM for the collection of technological equipment.

High coherent emission of this class of lasers with the aid of objective lens is focused in a spot of small dimensions – 10...20μm with the peak power density 109...1012W/cm² sufficient for the efficient micro-processing of materials.

Keywords: copper vapour lasers; technological lasers; optical resonator; radiation beam quality; peak power density; precision micro-processing.

Одним из прогрессивных технологических направлений за последние 20 – 25 лет стало использование лазеров для обработки материалов в электронной, автомобильной, авиа-

ционной, судостроительной, атомной промышленности, точном приборостроении и других сферах человеческой деятельности и заметно расширяются области их использова-

ния в оборонно-промышленном комплексе. К этим технологиям относятся размерная резка, сварка, раскрой, прошивка отверстий, термообработка, легирование, поверхностная обработка, селективное спекание, микрообработка, с высоким разрешением маркировка и гравировка материалов [1 – 6].

Внедрение лазерных технологий практически всегда повышает качество и производительность обработки, обеспечивает экологическую чистоту производства, и 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.

Развитие электронной техники, с дальнейшей миниатюризацией компонентов и применением новых материалов, выдвигает все более жесткие требования к качеству и надежности и соответственно конкурентоспособности выпускаемых изделий. Что, в свою очередь, предъявляет повышенные требования к параметрам составных элементов, диктуя тем самым создание новых лазерных технологий. При этом функцию обрабатывающего инструмента выполняет высокоинтенсивное сфокусированное световое пятно малых размеров.

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 как твердотельные, так и газовые, в частности, лазеры и лазерные системы на парах меди (см. табл. 1).

Лазеры и лазерные системы на парах меди

Лазеры и лазерные системы на парах меди (ЛПМ и ЛСПМ) с длинами волн излучения $\lambda = 510,6$ и $578,2$ нм; наносекундной длительностью импульсов $\tau_{\text{имп.}} = 20 \dots 40$ нс; большим усилением активной среды (АС) $k = 10 \dots 10^2$ Дб/м; съёмом средней мощности с одного активного элемента (АЭ) до 750 Вт; относительно высокими частотами повторения импульсов $f = 5 \dots 30$ кГц и низкой импульсной энергией $W = 0,1 \dots 10$ мДж остаются на сегодня самыми мощными импульсными источниками когерентного излучения в видимой области спектра [1, 7–10].

С данными параметрами ЛПМ и при условии формирования излучения однопучковой структуры с дифракционным качеством

плотность пиковой мощности в сфокусированном пятне $d = 5 \dots 20$ мкм, даже при относительно малых значениях средней мощности $P_{\text{изл.}} = 1 \dots 20$ Вт, достигает очень высоких значений $\rho = 10^9 \dots 10^{11}$ Вт/см². С такими уровнями плотности видимого излучения обеспечивается эффективная микрообработка в испарительном режиме как высокотемпературных – 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 [1, 9, 11].

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. Эти импульсные лазеры используются и в качестве эффективных источников накачки нелинейных кристаллов (НК) типа ВВО, KDP, 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 [9].

СО₂-лазеры

В технологии обработки материалов традиционно широко применяются СО₂-лазеры с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм. Мощные СО₂-лазеры, как и мощные твердотельные ИК-лазеры (1...30 кВт) преимущественно используются для высокоскоростной резки, раскроя и сварки черных металлов и нержавеющей стали толщиной 1...30 мм [2 – 6]. Однако из-за высокого коэффициента отражения (> 95 %) такие высокотемпературные 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 такие фирмы как Bystronic (Швейцария); Trumpf и Rofin-SinarLaser (Германия); Koike и MitsubishiElectric (Япония); Salvagnini (Италия); Рухсервомотор

(Беларусь); Hankwang (Южная Корея); NanS Laser (Китай); «ТехноЛазер», НТО «ИРЭ-Полус», IPG Photonics Corporation, АО «НПП «Исток» им. Шокина», ООО НПП «Лазеры и лазерные технологии» (Россия).

1. Основные параметры короткоимпульсных высокочастотных газовых и твердотельных технологических лазеров

| Тип и модель лазера | Параметры | | | | | | | Производитель |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| | Длина волны, λ , мкм | Длительность импульса, $\tau_{имп}$ | Частота повторения импульсов, F | Диаметр пучка, $D_{п.}$, мм | $P_{изл.}$, Вт | Энергия импульса, W | Качество пучка M^2 | |
| Твердотельные | 1,064 | <15 пс | 1...1000 кГц | 0,75; 1; 3 | 6...100 | >200 мкДж 20 мкДж | <1,4 | LumeraLaser, Coherent (США) |
| Стержневые Nd:YAG RAPID | 0,532 0,355 | | | | | | | |
| Yb:KGW PHAROS | 1,028 | 190 фс...10 пс | 200 кГц ...1 МГц | | 4...15 | >0,2... 2 мДж | <1,3 | Light Conversion Ltd.(Литва) |
| Дисковые TruMicro | 1,03; 0,515; 0,343 | <10 пс | 200... 800 кГц | | 10...50 | 0,05...0,25 мДж | <1,3 | Trumpf (Германия) |
| StarPico | 1,064 | ≤15 пс | 1 Гц... 20 МГц | | 15; 50 | 0,120 мДж 0,4 мДж | <1,4 | Rofin (Германия) |
| StarFemto | 1,030 0,515 0,343 | 300 фс... 10 пс | 1 Гц... 2 МГц | 3,5 | 1,5...20 | 0,02... 0,2 мДж | <1,7 | |
| Волоконные Yb:YAG | 1,01- 1,07 0,532 | <70 пс 1...10 нс | 10...900 кГц | | 5...50 | 30... 300 мкДж | <1,3 1,5...2,0 | IPG Photonics (США, Россия) |
| Yb:KGW FemtoFAB | 1,028 0,515 0,343 0,258 | | 200 кГц | | 4...10 | 1 мДж | <1,2...2 | Лазерформ (Россия) |
| Эксимерные ArF, KrF, XeF, | 0,193; 0,248; 0,351 | 14...16 нс | до 5000 Гц | 50×25 | 200...300 | 40...60 мДж | 1×0,5 мрад ² | ТРИНИТИ (Россия) |
| ArF | 0,193 | 13 нс | 200 Гц | 25×11 | 45 | 650 мДж | 3×1 мрад ² | Lambda Physic (Германия) |
| ArF, KrF, XeCl, XeF | 0,193; 0,248; 0,308; 0,351 | 9 нс | 1000 Гц | 6×3 | 1-5 | 2...8 мДж | 0,7×1,4 мрад ² | Gam lasers (США) |
| Азотные N₂ | 0,337 | 3...60 нс | 1...1000 Гц | 3, 4×14 | 0,0015 ...0,1 | 1... 240 мкДж | 3 мрад | Россия |
| Лазеры на парах меди ЛСПМ | | 20 нс | | | до 60 Вт | до 6 мДж | 0,075 мрад | Oxford Lasers (Англия) |
| ЛПМ и ЛСПМ «Кулон» и «Кристалл» (отпаянные) | 0,5106 0,5782 | 15...30 нс | 10...20 кГц | 7, 12, 14, 20, 32 | 1...100 | 0,1... 10 мДж | <1,1 | АО «НПП «Исток» (Россия) |

Твердотельные стержневые лазеры

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

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 [2, 6, 12].

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 повторения от кило- до мегогерц (см. табл. 1).

С высокочастотными пико- и фемтосекундными лазерами, из-за малого времени воздействия излучения на вещество, достигается наиболее высокое качество микрообра-

ботки – минимальная (субмикронная) зона термического влияния (ЗТВ) практически без образования расплава [6, 13].

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 то же время наш опыт показывает, что в несколько раз дешёвый ЛПМ с наносекундной длительностью импульсов во многих случаях обеспечивает микрообработку материалов с высокой производительностью, приемлемым качеством и рентабельностью [1, 11].

Эксимерные лазеры

Эксимерные 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. 1).

Они широко 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 (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.

Диодные лазеры

Диодные лазеры имеют небольшие размеры и могут выпускаться большими партиями при относительно низких затратах. Большинство диодных лазеров генерируют в ближней ИК области – $\lambda = 800...1000$ нм. В настоящее время выпускаются лазеры и в видимом диа-

пазоне. Они надежны и долговечны, но выходная мощность единичного элемента ограничена, и имеют большую расходимость излучения.

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 показывает, что по совокупности выходных параметров излучения эти лазеры являются перспективными для прецизионной микрообработки материалов. Следует также подчеркнуть, что кроме микрообработки важные области применения – селективная технология по разделению изотопов, спектральные исследования состава твердотельных, жидких и газовых веществ, усилители яркости изображения микрообъектов, нанотехнология и др. [1, 7–11].

В современном технологическом оборудовании широко используются CO₂-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 из-за отсутствия на рынке коммерческих моделей с высокими надежностью и качеством излучения.

Такая ситуация сложилась по ряду причин. Во-первых, во многих НИИ России (СССР) проводились в основном широкомасштабные 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 с высокой мощностью ЛСПМ типа ЗГ – УМ в обеспечении программ лазерного разделения изотопов для нужд ядерной энергетики. В то же время, разработки наиболее популярных коммерческих ЛПМ 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» (г. Фрязино МО), ООО «НПП «ВЭЛИТ» (г. Истра МО), ЗАО «Чистые технологии» (г. Ижевск), Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Oxford Lasers (Англия), университет Маккуари (Австралия) и «PulseLight» (Болгария). По мощным ЛСПМ, предназначенным для технологии разделения изотопов, лидируют Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса (США), где средняя мощность доведена до 72 кВт и РИЦ «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 лазера на парах меди в технологии по микрообработке материалов и других современных технологий необходимо было создание нового поколения высокоэффективных промышленных ЛПМ и ЛСПМ. Поставленная цель была достигнута за счет выполнения следующих задач:

- разработки эффективных, долговечных и со стабильными параметрами промышленных отпаянных лазерных АЭ на парах меди со средней мощностью излучения 1...100 Вт;
- разработки и исследования высокоэффек-

тивных и надежных схем исполнения высоковольтного модулятора ИП с наносекундной длительностью импульсов накачки;

– исследования высокоселективных оптических резонаторов и систем по формированию в ЛПМ и ЛСПМ однолучевого излучения дифракционного качества и со стабильными параметрами для достижения высоких пиковых плотностей мощности ($10^9 \dots 10^{12}$ 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 оперативных методов управления параметрами излучения промышленных технологических ЛПМ и ЛСПМ мощностью излучения до 100 Вт с высокими надежностью, эффективностью, качеством и стабильностью параметров излучения.

Промышленные отпаянные АЭ импульсного ЛПМ

В процессе создания промышленных отпаянных АЭ импульсного ЛПМ с рабочей температурой разрядного канала 1600...1700 °С реализована конструкция саморазогревного АЭ с внутривакуумным расположением теп-

лоизолятора, предложенная сотрудниками Физического института им. П.Н. Лебедева РАН и АО «НПП «Исток» им. Шокина» (г. Фрязино). В результате были разработаны и внедрены в серийное производство отпаянные АЭ модели «Кулон» малого (1,0...20 Вт) и «Кристалл» среднего (30...100 Вт) уровней мощности с КПД 0,5...3 % и длительностью импульсов 15...30 нс при ЧПИ 10...20 кГц.

Конструкция, технология обезгаживания и восстановления после обезгаживания чистоты поверхности элементов и узлов разработанных АЭ «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 самого малогабаритного АЭ «Кулон», имеющего среднюю мощность излучения 1 Вт, составляют 7 и 140 мм; АЭ 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 (рис. 1). Мощность излучения между отдельными длинами волн – 510,6 и 578,2 нм распределяется примерно поровну. Гарантированная наработка отпаянных АЭ составляет 1500 ч при сроке службы до 3000 ч, что в несколько раз превосходит зарубежные аналоги.

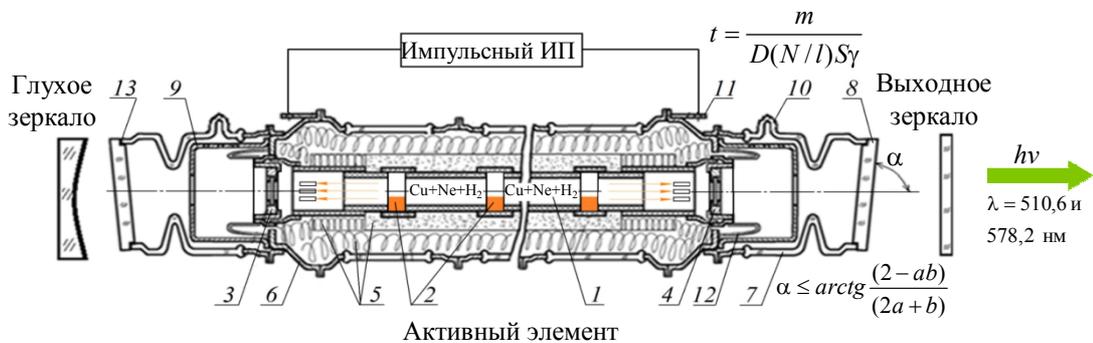


Рис. 1. Конструкция промышленных отпаянных саморазогревных лазерных АЭ на парах меди:

1 – секционированный керамический разрядный канал с глухими пазами ($T_{\text{раб}} = 1600 \dots 1700$ °С); 2 – генераторы паров меди в глухих пазах; 3 и 4 – кольцевые безнакальный автотермоэмиссионный металлопористый W–Ва катод и молибденовый анод; 5 – трехслойный высокотемпературный теплоизолятор; 6 – металлостеклянная вакуумноплотная оболочка; 7 – концевые стеклянные секции; 8 – окна для выхода излучения; 9 – экраны-ловушки; 10 – штенгели; 11 – металлические лепестки; 12 – токовводы в виде петли; 13 – клей термостойкий

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:

– выполнения секционированного керамического разрядного канала с глухими пазами,

в каждом из которых устанавливается генератор паров меди в виде молибденовой подложки с отверстиями, смачиваемой активным веществом – расплавленной медью, и перфорированными концевыми трубками (материал керамики – 99,8 % Al_2O_3 + 0,2 % MgO);

– разработанной технологии обезгаживания АЭ и восстановления чистоты поверхности

генераторов паров меди, электродных узлов и других элементов в атмосфере водорода с неоном при $T_{\text{раб}} = 1600$ °С после полного обезгаживания АЭ при $T = 1700$ °С длительностью 30...60 ч (зависит от модели АЭ);

– создания безнакального автотермоэмиссионного металлопористого вольфрам-бариевого (W–Ba) катода кольцевой конструкции с кольцевой проточкой на внутренней поверхности, обеспечивающего устойчивое локальное горение импульсного дугового разряда (активное вещество – алюмосиликат бария состава $3\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0,5\text{CaO} \cdot 0,5\text{SiO}_2$);

– трехслойного высокотемпературного теплоизолятора с низкой теплопроводностью ($\lambda = 0,27 \dots 0,31$ Вт/(м·К)) и малым удельным весом ($\rho = 0,32 \dots 0,5$ г/см³) на основе мелкодисперсных окислов Al_2O_3 и SiO_2 , размещенного в пространстве между разрядным каналом с $T_{\text{раб}} \cong 1600$ °С, электродными узлами и внешней вакуумноплотной оболочкой с $T_{\text{раб}} \cong 300$ °С;

– применения выходных просветленных окон с углом наклона к оптической оси АЭ, не превышающем следующих значений:

$$\alpha = \arctg \frac{(2-ab)}{(2a+b)}, \quad (1)$$

где $a = D_{\text{к}}/l_{\text{к}}$ ($D_{\text{к}}$ – диаметр и $l_{\text{к}}$ – длина разрядного канала); $b = D_{\text{к}}/l_{\text{ок}}$ ($l_{\text{ок}}$ – расстояние от торца разрядного канала до окна вдоль оптической оси. Последнее устраняет обратную паразитную связь с АС и не приводит к искажению структуры выходного излучения.

Экспериментальные исследования по оптимизации параметров излучения промышленных АЭ проводились по потребляемой мощности, давлению буферного газа неона и водорода, частоте повторения и параметрам 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.

По сравнению с классической схемой исполнения модулятора ИП [14], 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 до 2000 ч даже при высокой коммутируемой мощности – до 5...10 кВт из-за снижения в нем потерь.

Высокоселективные оптические резонаторы и системы по формированию в ЛПМ однопучкового излучения дифракционного качества

В работе особое внимание было уделено исследованию оптических резонаторов, т.к. они определяют характеристики и качество наносекундного излучения ЛПМ [1, 11]. В процессе этих исследований была раскрыта динамика формирования и структура излучения. Установлено, что в режиме отдельного генератора с оптическим резонатором структура выходного излучения ЛПМ многопучковая, причем каждый пучок обладает своими пространственными, временными и энергетическими характеристиками. При этом распределение интенсивности излучения 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 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. На основе законов геометрической оптики, с учетом дифракционного предела расходимости, выведены формулы для расчета расходимости выходного пучка излучения 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:

$$\theta = \frac{R \cdot D_{\text{к}}}{2l \cdot (R+l)} + \frac{2,44\lambda}{D_{\text{к}}}. \quad (2)$$

Чем меньше радиус кривизны зеркала R и диаметр апертуры разрядного канала $D_{\text{к}}$, 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 ($\theta = 2 \dots 4 \theta_{\text{дифр}}$), 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» мощностью 30 и 40 Вт в качестве УМ мощность излучения возрастает более чем на порядок (40...60 Вт).

Установлено, что в ЛПМ в режиме генератора с НР с двумя выпуклыми зеркалами возможно формирование однопучкового излучения дифракционного качества при выполнении трех взаимосвязанных условий:

– расстояние (l'_1) от глухого зеркала НР до ближнего к нему конца АС (практически до разрядного канала АЭ) должно быть не менее суммы половины длины АС ($l_{\text{АС}}/2$) и расстояния (l'_2) от выходного зеркала до ближнего к нему конца АС и не более разности половины расстояния, проходимого излучением за время существования инверсии ($\tau_{\text{инв}} \cdot c/2$), и суммы длины АС и расстояния от выходного зеркала до ближнего к нему конца АС ($l_{\text{АС}} + l'_2$), т.е.

$$\frac{l_{\text{АС}}}{2} + l'_2 < l'_1 < \frac{\tau_{\text{инв}} \cdot c}{2} - (l_{\text{АС}} + l'_2); \quad (3)$$

– радиус кривизны поверхности глухого зеркала НР должен быть на 1–2 порядка меньше расстояния (l_1) до выходной апертуры разрядного канала АЭ, т.е.

$$R_{1(\text{гл})} < l_1/10 \dots 100 = 1 \dots 3 \text{ см}; \quad (4)$$

– выходное зеркало НР должно быть максимально приближено к выходному окну АЭ и иметь радиус кривизны поверхности больше, чем у глухого зеркала ($R_{2(\text{вых})} > R_{1(\text{гл})}$). В этом случае обратная связь с АС начинается раньше от выходного зеркала резонатора, что является дополнением к первому и второму условиям по подавлению формируемого от глухого зеркала паразитного (фонового) пучка сверхсветимости с расходимостью больше дифракционной, но близкой к ней. Разработана и исследована для ЛПМ новая конструкция НР с двумя выпуклыми зеркалами, в которой в

качестве выходного зеркала применен просветленный выпукло-вогнутый мениск (положительная линза) с отражающим лазерное излучение зеркальным пятном размером 1...1,5 мм в центре его выпуклой поверхности, обращенной к АЭ. Фокус мениска совмещен с фокусом глухого выпуклого зеркала, что является условием коллимирования сформированного НР расходящегося пучка излучения в цилиндрический (плоский) пучок с минимальной расходимостью. Расходимость пучка излучения при этом определяется по формуле

$$\theta = \frac{D_k \cdot R_1 \cdot R_2}{4 \cdot (R_1 + 2f_2 + 2L)(R_2 + 2l_{32})(l + f_1)} + \frac{2,44\lambda}{D_k},$$

R_1 и R_2 – радиусы кривизны глухого и выходного зеркал НР; D_k – диаметр апертуры разрядного канала АЭ; L – длина НР; l – расстояние от зеркала с R_1 до выходной апертуры разрядного канала; l_{32} – расстояние от зеркала с R_2 до выходной апертуры; f_1 и f_2 – расстояния от зеркала до изображений в них апертуры.

В ЛПМ с данным НР, из-за больших потерь в нем, мощность дифракционного пучка составляет не более 10 % от суммарной мощности излучения, что ограничивает его возможности по толщине микрообработки материалов. Например, в ЛПМ с 15 Вт АЭ «Кулон» мощность дифракционного пучка излучения составляет около 1 Вт, с 20 Вт АЭ – 1,5 Вт и производительно обрабатываются лишь тонкопленочные покрытия и фольговые материалы (5...50 мкм). Самым весомым применением ЛПМ в режиме с НР с двумя выпуклыми зеркалами является использование его в качестве ЗГ в ЛСПМ типа ЗГ – ПФК – УМ. Средняя мощность излучения и соответственно плотность пиковой мощности дифракционного пучка в ЛСПМ с применением в качестве УМ промышленных отпаянных АЭ увеличивается на 1–2 порядка: с АЭ серии «Кулон» до 15...25 Вт и $10^{11} \dots 10^{12} \text{ Вт/см}^2$, с АЭ «Кристалл» – до 30...100 Вт и $10^{12} \dots 10^{13} \text{ Вт/см}^2$, что существенно повышает производительность микрообработки и толщину обрабатываемых материалов до 1...2 мм.

Также на основе законов геометрической оптики, с учетом дифракционного предела расходимости, выведена формула для расчета расходимости пучков излучения при работе ЛПМ в режиме генератора с телескопическим НР, которая имеет следующий вид:

$$\theta = \frac{D_k}{(ML+1)M^{n-1}} + \frac{2,44\lambda}{D_k}, \quad (6)$$

где M – увеличение резонатора и n – число двойных проходов излучением резонатора. С увеличением M и n расходимость излучения уменьшается и при $M = 100 \dots 300$ становится близкой к дифракционной, и мощность в дифракционном пучке достигает максимального значения (до 50 % от суммарной мощности выходного излучения). Плотность пиковой мощности в пятне сфокусированного излучения при этом может составлять значений до 10^{11} Вт/см², достаточных для производительной микрообработки металлических материалов толщиной до 0,3 мм и большого круга неметаллических толщиной до 0,7 мм. Качественная микрообработка при этом обеспечивается применением на выходе ЛПМ ПФК, выделяющего дифракционную составляющую из многопучковой структуры излучения.

Применение ЛПМ в режиме генератора с телескопическим НР в качестве ЗГ в ЛСПМ типа ЗГ – ПФК – УМ явилось основой для создания современной промышленной автоматизированной технологической установки 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 неметаллических до 1,5...2 мм ИЭТ; 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.

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

- введения между ЗГ и УМ ПФК, обеспечивающего выделение дифракционной составляющей из многопучкового излучения ЗГ и последующего его пространственного согласования с апертурой активной среды УМ;
- синхронизации (совмещения) во времени

световых сигналов ЗГ и УМ с точностью не хуже ± 2 нс;

- обеспечения уровня плотности мощности излучения на входе УМ не менее $0,5 \dots 1$ Вт/см²;

- обеспечения стабильности положения оси диаграммы направленности пучка излучения $\Delta\theta \leq \theta_{\text{дифр}}/10^2 \dots 10^3$.

При максимальных плотностях пиковой мощности ($10^{12} \dots 10^{13}$ Вт/см²) обеспечивается максимальная производительность микрообработки материалов толщиной до 2...3 мм.

Мощность излучения ЛСПМ ($P_{\text{ЛСПМ}}$), состоящей из n одинаковых АЭ в качестве УМ, в зависимости от коэффициента пропускания выходных окон, определяется по формуле

$$P_{\text{ЛСПМ}} = P_{\text{ЗГ}}\tau_{\text{ок}}^{2n+1} + P_{\text{УМ}}\frac{\tau_{\text{ок}}(1-\tau_{\text{ок}}^{2n})}{1-\tau_{\text{ок}}^2}, \quad (7)$$

где $P_{\text{ЗГ}}$ – средняя мощность пучка излучения ЗГ на входе первого АЭ УМ; $P_{\text{УМ}}$ – средняя мощность излучения одного АЭ УМ; $\tau_{\text{ок}}$ – коэффициент пропускания одного окна АЭ. $P_{\text{ЛСПМ}}$ с непросветленными окнами АЭ не может превышать мощности шести АЭ в УМ ($P_{\text{ЛСПМ}} \leq 6 P_{\text{УМ}}$).

Свойства АС импульсного ЛПМ

На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость мощности излучения ЛСПМ от временной расстройки импульсов излучения ЗГ относительно импульсов УМ в пределах ± 1000 нс.

Из этой зависимости отчетливо следует, что АС импульсного ЛПМ в отношении к собственному излучению имеет четыре, последовательно идущие друг за другом и повторяющиеся от импульса к импульсу, характерные временные зоны: слабого поглощения длительностью 20...30 нс (возникает на начальной стадии развития импульса тока накачки), усиления длительностью 30...40 нс (возникает на крутом переднем фронте импульса тока), полного поглощения длительностью более 1000 нс (возникает на срезе импульса тока) и зона максимальной прозрачности длительностью более 1000 нс (перед новым импульсом тока) [15].

Наличие таких зон в АС импульсного ЛПМ стало основой для разработки методов и электронных устройств оперативного управления мощностью и ЧПИ по заданному алгоритму в созданных промышленных ЛПМ «Кулон-06» и ЛСПМ «Кулон-10», «Кулон-20» и на их основе современных АЛТУ «Каравелла» для прецизионной микрообработки материалов.

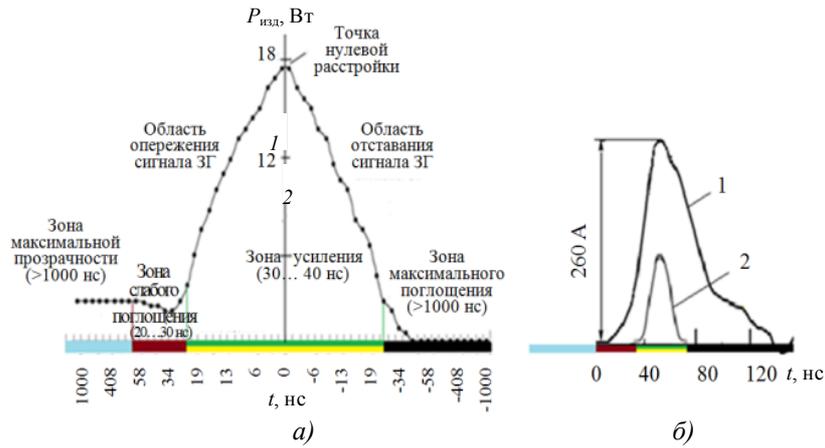


Рис. 2. Зависимость мощности излучения ЛСПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д от временной расстройки импульсов излучения ЗГ относительно импульсов УМ в пределах ± 1000 нс при ЧПИ 13,6 кГц (а), осциллограммы импульса тока накачки (1) и излучения (2) при нулевой расстройке (б)

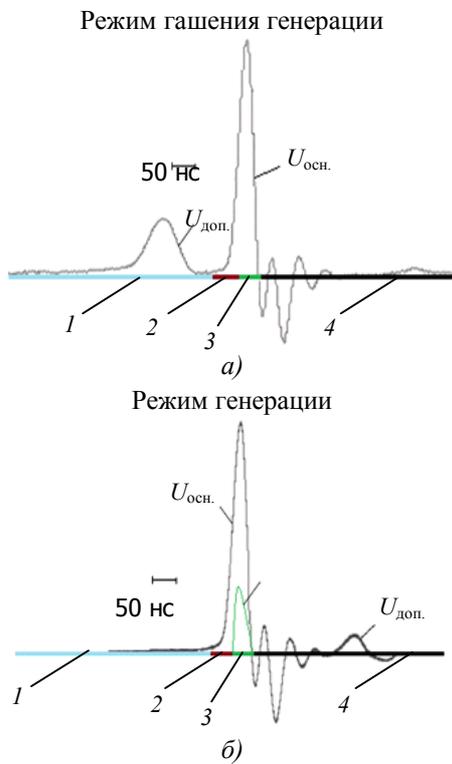


Рис. 3. Методы оперативного управления мощностью и ЧПИ излучения в ЛСПМ, работающего в режиме отдельного генератора. Осциллограммы основного ($U_{осн.}$) и дополнительного ($U_{доп.}$) импульсов напряжения накачки ЛСПМ «Кулон-06» и генерации ($G_{ген}$). Зоны АС:

1 – прозрачности (> 1000 нс); 2 – слабого поглощения (20...30 нс); 3 – усиления (30...40 нс); 4 – полного поглощения (> 1000 нс)

Эти физические свойства АС стали основой при совместном создании с ООО «НПП «ВЭЛИТ» промышленных ЛСПМ с высокоскоростным управлением мощностью и ЧПИ излучения по любому заранее заданному алгоритму, включая пакетную и моноимпульсную моду-

ляцию, от внешнего ПК. Для этого были разработаны генератор формирования дополнительного маломощного импульса тока накачки и устройство быстрого перемещения этого импульса относительно основного импульса тока возбуждения.

При размещении маломощного импульса тока в зоне прозрачности АС, т.е. перед основным импульсом тока, происходит заселение метастабильных уровней атомов меди и устанавливается в ЛСПМ режим гашения генерации (рис. 3, а). Если дополнительный импульс установлен в зоне поглощения АС, т.е. за основным импульсом, то возникает режим генерации (рис. 3, б).

С таким управлением одноканальный ЛСПМ «Кулон-06» со средней мощностью излучения 6,0...8,0 Вт входит в состав современных АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» для производительной и качественной прецизионной микрообработки материалов ИЭТ толщиной 0,01...0,3 мм [15].

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 (рис. 4).

С данным управлением ЛСПМ «Кулон-10» с мощностью излучения 10...15 Вт применяется в составе современной АЛТУ «Каравелла-1» для производительной и качественной прецизионной микрообработки материалов ИЭТ толщиной 0,3...0,5 мм; ЛСПМ «Кулон-20» мощностью 20...25 Вт – в АЛТУ «Каравелла-1М» для обработки материалов толщиной 0,5...1 мм.

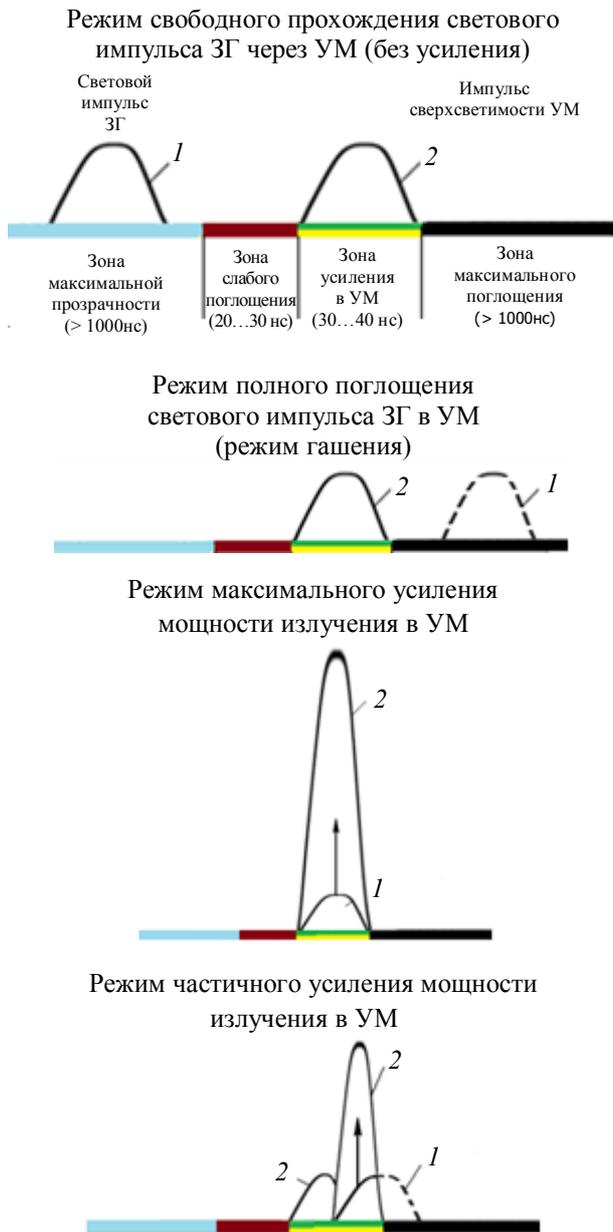


Рис. 4. Методы оперативного управления мощностью и ЧПИ излучения в ЛСПМ, работающей по эффективной схеме ЗГ – УМ

Основные выводы и результаты

1. Сравнительный анализ свойств излучения ЛПМ, работающего в режиме единичного генератора, и ЛСПМ, работающей по схеме ЗГ – УМ, с известными технологическими лазерами показал, что ЛПМ и ЛСПМ с длинами волн излучения 510,6 и 578,2 нм, наносекундной длительностью импульсов – 10...30 нс, высокими частотами повторения импульсов – 10...20 кГц и низкой импульсной энергией – 0,1...10 мДж остаются мощными импульсными источниками когерентного излучения в видимой области спектра и являются идеальными световыми инструментами диаметром 10...20 мкм для эффективной микрообработки

металлов и большого круга полупроводников и диэлектриков.

2. Разработано и исследовано на основе комплекса научно-технических, технологических и схемных решений новое поколение с высокими эффективностью, надежностью и качеством излучения отпаянных лазерных АЭ на парах меди, и на их основе промышленных импульсных ЛПМ и ЛСПМ со средней мощностью излучения 1...20 Вт и 30...100 Вт, превосходящих по основным параметрам зарубежные аналоги.

3. Исследованы закономерности динамики формирования излучения импульсного ЛПМ при работе в режиме генератора с оптическим резонатором. Впервые показано, что выходное излучение ЛПМ имеет многопучковую структуру: 2 пучка сверхсветимости и 2...4 пучка, сформированных непосредственно резонатором, количество которых определяется временем существования инверсии населенностей в активной среде (20...40 нс). Причем каждый пучок обладает своими пространственными, временными и энергетическими характеристиками, что неприемлемо для микрообработки.

4. Установлено, что для эффективной микрообработки материалов импульсным наносекундным излучением ЛПМ необходимо формирование однопучкового излучения с дифракционной расходимостью, когда плотность пиковой мощности в сфокусированном световом пятне диаметром 5...20 мкм достигает значений $10^9 \dots 10^{12}$ Вт/см².

Такое качество излучения достигается при использовании в ЛПМ и ЛСПМ высокоселективных неустойчивых оптических резонаторов: с двумя выпуклыми зеркалами и телескопического типа в сочетании с пространственным фильтром-коллиматором.

5. Исследованы физические свойства активной среды импульсного ЛПМ и впервые установлено, что в отношении к собственному излучению активная среда имеет четыре, последовательно идущие друг за другом и повторяющиеся от импульса к импульсу, характерные временные зоны: слабого поглощения ($\tau = 20 \dots 30$ нс), усиления ($\tau = 30 \dots 40$ нс), полного поглощения ($\tau > 1000$ нс) и максимальной прозрачности ($\tau > 1000$ нс). На основании этих свойств созданы методы и устройства для автоматизированного управления выходными параметрами промышленных ЛПМ и ЛСПМ и соответственно режимами лазерной микрообработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григорьянц, А.Г., Казарян, М.А., Лябин, Н.А. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 312 с.
2. Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Мисуров, А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
3. Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Третяков, Р.С. Сила инноваций: старые традиции в новых условиях // Фотоника, – 2015. – №3. – С. 28–35.
4. Сапрыкин, Л.Г., Кудрявцева, А.Л. Лазерное оборудование для обработки материалов. Компоненты, технологии, системы // Металлообработка и станкостроение. – 2008. – № 10. – С. 39.
5. Сапрыкин, Д.Л. Российский рынок и производство лазерного технологического оборудования в контексте развития станкостроения // Лазер-Информ. – 2014. – № 1. – С. 2–8.
6. Вакс, Е.Д., Миленский, М.Н., Сапрыкин, Л.Г. Практика прецизионной лазерной обработки. – М.: Техносфера, 2013. – 708 с.
7. Батенин, В.М., Бойченко, А.М., Бучанов, В.В., Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов – 2. В 2 т. Т1. – М.: Научная книга, 2009. – 544 с.
8. Батенин, В.М., Бохан, П.А., Бучанов, В.В. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов – 2. В 2 т. Т2. – М.: ФИЗМАТЛИТ. 2011. – 616 с.
9. Little, С.Е. Metal Vapour Lasers: Physics, Engineering and Applications (Chichester (UK): J.Wiley and Sons Ltd. 1999. 620 p.
10. Бохан, П.А., Бучанов, В.В., Закревский, Д.Э. Оптическое и лазерно-химическое разделение изотопов в атомарных парах. – М.: ФИЗМАТЛИТ. 2010. – 224 с.
11. Лябин, Н.А., Чурсин, А.Д., Клименко, В.И. Лазер на парах меди с однопучковым излучением дифракционного качества и его возможности для микрообработки материалов изделий электронной техники // Наука и образование. – 2014. – №8. – С. 30–62.
12. Григорьянц, А.Г., Васильцов, В.В. Пространственная структура излучения мощных волноводных и волоконных лазеров для технологий // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана, сер. «Машиностроение». – 2012. – № 5. – С. 3–33.
13. Бахманн, Ф., Мюллер, Д., Клинт, Б. Микрообработка материалов пикосекундными лазерами // Фотоника. – 2013. – №1. – С. 34.
14. Колоколов, И.С., Клименко, В.И., Лябин, Н.А. Промышленный лазер на базе отпаянных активных элементов серии KULON на парах меди (LT-10Cu), золота (LT-1,5Au), смеси паров золота и меди // Прикладная физика. – 2003. – № 3. – С. 84–89.
15. Лябин, Н.А., Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н. Исследование свойств активной среды импульсного лазера на парах меди во времени и разработка на их основе методов оперативного управления параметрами выходного излучения // Наука и образование. – 2014. – № 7. – С. 20–35.

REFERENCES

1. Grigoriyants, A.G., Kazaryan, M.A., Lyabin, N.A. *Copper Vapour Lasers: Structure, Characteristics and Applications*. – M.: PHYSMATHLIT, 2005. – pp. 312.
2. Grigoriyants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. *Technological Processes of Laser Processing: textbook for colleges / under the editorship of A.G. Grigoriyants*. – M.: Publishing House of Bauman STU of Moscow, 2006. – pp. 664.
3. Grigoriyants A.G., Shiganov I.N., Tretiyakov R.S. Innovation power: old traditions under new conditions // *Photonics*, – 2015. – №3. – pp. 28–35.
4. Saprykin L.G., Kudryavtseva A.L. Laser equipment for material processing. Components, technologies, systems // *Metal Working and Machine-tool Manufacture*. – 2008. – № 10. – pp. 39.
5. Saprykin D.L. Russian market and production of laser technological equipment in context of machine-tool manufacture development // *Laser-Inform*. – 2014. – № 1. – pp. 2–8.
6. Vax E.D., Milenky M.N., Saprykin L.G. Practice of precision laser processing. – M.: *Technosphere*, 2013. – pp. 708.
7. Batenin V.M., Boichenko A.M., Buchanov V.V., *Lasers on Self-Limited Transitions of Metal Atoms – 2*. In 2 Vol. Vol.1. – M.: Scientific Book, 2009. – pp. 544.
8. Batenin V.M., Bokhan P.A., Buchanov V.V. Lasers on Self-Limited Transitions of Metal Atoms – 2. in 2 Vol. Vol.2. – M.: PHYSMATHLIT. 2011. – pp. 616.
9. Little C.E. Metal Vapour Lasers: Physics, Engineering and Applications (Chichester (UK): J.Wiley and Sons Ltd. 1999. 620 p.
10. Bokhan P.A., Buchanov V.V., Zakrevsky D.E. *Optic and Laser-Chemical Division of Isotopes in Atomic Vapours*. – M.: PHYSMATHLIT. 2010. – pp. 224.
11. Lyabin N.A., Chursin A.D., Klimenko V.I. Copper vapour laser with one-beam emission of diffraction quality and its potentialities for material micro-processing of electronic engineering products // *Science and Education*. – 2014. – №8. – pp. 30–62.
12. Grigoriyants A.G., Vasiltsov V.V. Spatial structure of power waveguide and fiber lasers emission for technologies // *Bulletin of Bauman STU of Moscow, ser. "Mechanical Engineering"*. – 2012. – № 5. – pp. 3–33.
13. Bakhman F., Mueller D., Klimt B. Material micro-processing by picosecond lasers // *Photonics*. – 2013. – №1. – pp. 34.
14. Kolokolov I.S., Klimenko V.I., Lyabin N.A. Industrial laser based on welded-off active elements of set KULON on copper vapours (LT-10Cu), gold (LT-1,5Au), mix of gold and copper vapours // *Applied Physics*. – 2003. – № 3. – pp. 84–89.
15. Lyabin N.A., Grigoriyants A.G., Shiganov I.N. Investigation of active environment properties of copper vapour pulse laser in time period and development on their basis methods for operative control of output parameter parameters // *Science and Education*. – 2014. – № 7. – pp. 20–35.

Рецензент д.т.н. И.И. Артемов

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбкова.

Сдано в набор 16.12.2016. Выход в свет 31.01.2017.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

"Брянский государственный технический университет"

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

