



Отделение физических наук

**А.Г. Григорьянц, М.А. Казарян,
Н.А. Лябин, И.Н. Шиганов**

**Возможности прецизионной
микрообработки материалов
излучением лазера на парах меди**

Москва 2017

УДК 66.088
ББК 34
В64

ISBN 978–5–906906–15–1

© Российская академия наук, 2017
© А.Г. Григорьянц, М.А. Казарян,
Н.А. Лябин, И.Н. Шиганов, 2017

Возможности прецизионной микрообработки материалов излучением лазера на парах меди

А.Г. Григорьянц, М.А. Казарян, Н.А. Лябин, И.Н. Шиганов

Аннотация. В обзоре 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 10...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. Разработанный промышленный ЛПМ «Кулон-06» со средней мощностью излучения 6-8 Вт и частотой повторения импульсов (ЧПИ) 15 кГц стал основой для создания современных автоматизированных лазерных технологических установок (АЛТУ) «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» с рабочим полем 100x100 и 200x200 мм для производительной прецизионной микрообработки фольговых материалов (0,01-0,2 мм). На основе ЛСПМ моделей «Кулон-10» и «Кулон-20», работающих по эффективной схеме ЗГ – УМ, мощностью излучения 10-15 и 20-25 Вт и ЧПИ 14 кГц созданы современные АЛТУ «Каравелла-1» и «Каравелла-1М» с рабочим полем 150x150 мм для микрообработки тонколистовых материалов (0,3-0,5 мм и 0,6-1 мм). Лазерный способ микрообработки импульсным излучением с наносекундной длительностью обеспечивает на порядок большую производительность по сравнению с традиционными способами, включая и ЭЗО, малые шероховатость поверхности реза ($\leq 1...2$ мкм) и зону термического влияния ($\leq 3...5$ мкм) и нет расслоения и микротрещин в таких металлах как молибден и вольфрам.

Ключевые слова: газовые лазеры, твердотельные лазеры, лазер на парах меди, лазерная система на парах меди, неустойчивый резонатор, прецизионная микрообработка, лазерная технологическая установка.

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 и 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, с высоким разрешением маркировка и гравировка материалов. 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: твердотельные и газовые, в частности, лазеры и лазерные системы на парах меди (см. табл. 1).

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), съёмом 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 спек-

тра [1-14]. С данными параметрами ЛПМ и при условии формирования излучения однопучковой структуры с дифракционным качеством плотность пиковой мощности в сфокусированного 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 минимальными зоной термического влияния (≤ 3 мкм) и шероховатостью (≤ 1 мкм), нестабильность оси диаграммы направленности пучка излучения 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, рас-

Возможности прецизионной микрообработки материалов излучением лазера на парах меди

Табл. 1. Основные параметры короткоимпульсных высокочастотных газовых и твердотельных технологических лазеров.

Тип лазера	Параметры						Производитель	Области применения
	Длина волны, λ , мкм	Длительность импульса, тип	Частота повторения импульсов, Гц	Диаметр пучка, Дп., мм	Ризд, Вт	Энергия импульса, мДж		
Твердотельные Nd:YAG RAPID	1,064 (0,532, 0,355)	<10 пс	1-1000 кГц	1	6			Высокачественная и точная микрообработка материалов в микроэлектронике, полупроводниковой и фотоэлектрической индустрии, микроструктурирование поверхностей материала
				0,75	10	>200 мкДж 20 мкДж		
SUPER RAPID-HE	1,064		до 10 кГц 500 кГц		25		Lumera Laser, Coherent (США)	
HUPER RAPID 25	1,064 (0,532, 0,355)	<15 пс	200-1000 кГц	3	50	<1,4		
HUPER RAPID 50			400-1000 кГц		100	<1,4		
HUPER RAPID 100			400-1000 кГц					
Уб.КГВ PHAROS		290 фс-10 пс	200 кГц-1 МГц		4-15	>0,2 мДж	Light Conversion Ltd. (Литва)	Микрообработка, микро- и наноструктурирование, нелинейная оптика, спектроскопия высокого временного разрешения
PHAROS-SP		190 фс-10 пс	1 МГц		6	>1,5 мДж		
PHAROS 2mJ	1,028	300 фс-10 пс	200 кГц-1 МГц			>2,0 мДж		

Продолжение таблицы

Дисквые TrueMicro 5050	1,03	200-800 кГц	50	0,25 мДж	<1,3	Типрф (Германия)	Микрообработка с оптимальным сочетанием качества и производительности: прецизионная микрорезка и микроверление металлических материалов, керамики и хрупких материалов, микро- и наноструктурирование, селективное удаление тонких слоев без повреждения подложки
	0,515			0,15 мДж			
	0,343			0,05 мДж			
	1,030			0,125 мДж			
StarPico	1,064	1 Гц-20 МГц	15; 50	0,120 мДж 0,4 мДж	<1,4	Rofin (Германия)	Микрообработка и структурирование материалов, спектроскопия высокого временного разрешения, метрология, многофотонная микроскопия
StarFemto-E -M -L	1,030	1 Гц-2 МГц	20	0,02 мДж 0,1 мДж 0,16 мДж	<1,3		
StarFemto FX	1,030	1-1000 Гц	6-15	0,2 мДж	<1,2		
	0,515		3-7,5	0,1 мДж	<1,4		
	0,343		1,5-3,75	0,05 мДж	<1,7		
<u>Волоконные</u> ANTAUS	1,03-1,06	до 2,5 МГц	> 5 Вт	> 4 мДж	ТЕМ00	АвестаПроек (Россия)	

Возможности прецизионной микрообработки материалов излучением лазера на парах меди

Продолжение таблицы

Yb:YAG GLPM	0,532	1,3 нс	10-900 кГц		5-50	>30 мкДж	<1,2	IPG Photonics (США)	Микрообработка, маркировка и гра- вировка и др.
						>30 мкДж	1,5-2,0		
						60 мкДж 200 мкДж 300 мкДж	<1,3		
Yb:YAG YLPS-20	1,01- 1,07	<70 пс	10-700 кГц		20				
Yb:YAG YLPM- 0.3-A1-60-18	1,06	1 нс 5нс 10 нс	10-600 кГц		18				
Yb:YAG MicroDM	1,07	200-20000 нс			150		<2		Микрообработка, резка, прошив- ка отверстий, скрайбирование подложек микро- схем и др.
Yb:KGW FemtoFAB	1,028 0,515 0,343 0,258		200 кГц		4, 6, 8, 10		<1,2 <2	Лазерформ (Россия)	
Экспериментальные									
ArF	0,193;	14 нс			200			ТРИНИТИ (Россия)	Фотолитография в полупро- водниковом производстве, лазерный отжиг;
KrF	0,248;	16 нс	до 5000 Гц	50x25	300		1x0,5 мрад ²		маркировка, обработка пла- стиков, керамики,
XeF	0,351	16 нс			200			Lambda Physic (Гер- мания)	обработка пла- стиков, керамики,
ArF	0,193	13 нс	200 Гц	25x11	45		3x1 мрад ²		обработка пла- стиков, керамики,
ArF	0,193;								кристаллов, биологических тканей
KrF	0,248;	9 нс	1000 Гц	6x3	3 5 3 1		5 мДж 8 мДж 4 мДж 2 мДж	Gamma lasers (США)	
XeCl	0,308;								
XeF	0,351								

Окончание таблицы

Дюзовые (N ₂) АИЛ-0,5 АИЛ-3 АИЛ-511	5 нс 5 нс 6-8 нс	1-200 Гц 1-100 Гц 1-1000 Гц	0,0015 0,0025 0,005	2,5 мкДж 30 мкДж 240 мкДж	Плазма (Россия)	Подгонка номинаторов пленочных резисторов и конденсаторов в микроэлектронике
NL-1-100	3-60 нс	100 Гц	0,003	30 мкДж	НПП «Исток» (Россия)	3 мрад
ЛПИ-21	10 нс					
<u>Лазеры на парах меди (ЛПМ)</u> ЛПМ прокатной в составе технологической установки МР200Х	20 нс		до 60 Вт	до 6 мДж	Oxford Lasers (Англия)	Микрообработка материалов толщиной до 2 мм
ЛПМ «Кулон» в составе технологической установки «Каравелла»	0,5106 0,5782	10-20 кГц	5-20	0,1-2 мДж		Микрообработка фольговых (0,01-0,2 мм) и тонколистовых (0,3-1 мм) материалов
ЛСПМ «Карелия»	15 нс	20,32,45	40-100	2-10 мДж		Микрообработка материалов толщиной 1-2 мм. В сочетании с лазерами на красителях – разделение изотопов

кроя 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 CO_2 - 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» (г. Шагара), НТО «ИРЭ-Полус» (г. Фрязино), IPG Photonics Corporation, АО «НПП «Исток» им. Шокина» (г. Фрязино), ООО НПЦ «Лазеры и лазерные технологии» (г. Зеленоград) [20, 22-32].

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 расходимость 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 [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 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 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 дешёвый ЛПМ с наносекундной длительностью импульсов во многих случаях обеспечивает микрообработку материалов с высокой производительностью, приемлемым качеством и рентабельностью [6, 15-20].

Экимерные лазеры

Экимерные газовые лазеры на галоидных соединениях на инертном газе (ArF, KrF, XeCl, XeF) и димерах инертного газа

(Ag, 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) [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 высоко-частотный 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 ИК области – $\lambda = 800-1000$ нм. 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, 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 твер-

дотельных, 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 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 высокомошных ЛСПМ типа ЗГ – УМ в обеспечении программ лазерного разделения изотопов по AVLIS технологии для нужд ядерной энергетики. В тоже 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. Не смотря 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 «Pulse Light» (Болгария). По мощным ЛСПМ, предназначенных для технологии разделения изотопов, лидируют Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса (США), где средняя мощность доведена до 72 кВт и РИЦ «Курчатовский институт». Исследования продолжают 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 промышленных 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 для производительной и качественной прецизионной лазерной микрообработки материалов;

- определения оптимальных плотностей пиковых и средней мощности излучения ЛПМ для эффективной микрообработки фольговых (0,01–0,2 мм) и тонколистовых (0,3–1 мм) материалов;
- исследования качества поверхности лазерного реза и структуры зоны термического влияния для тугоплавких и высокотеплопроводных материалов от параметров обработки.
- исследования зависимости скорости микрообработки от толщины материала;
- практической реализации лазерной технологии микрообработки в производстве ИЭТ.

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» (г. Фрязино). 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 (рис. 1).

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);

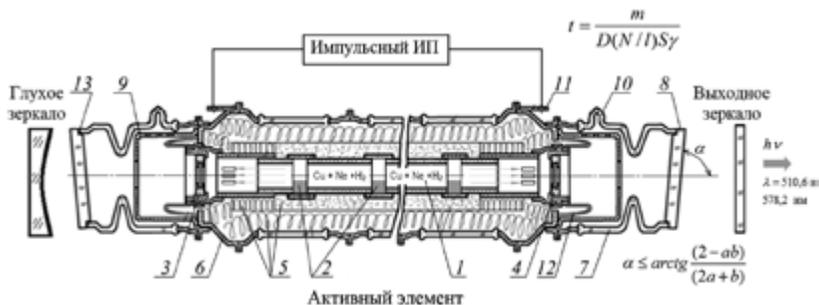


Рис. 1. Конструкция промышленных отпаянных саморазогревных лазерных АЭ на парах меди: 1 – секционированный керамический разрядный канал с глухими пазами ($T_{\text{раб}} = 1600\text{--}1700\text{ }^{\circ}\text{C}$); 2 – генераторы паров меди в глухих пазах; 3 и 4 – кольцевые безнакальный автотермоэмиссионный металлопористый W-Va 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.

– разработанной технологии обезгаживания АЭ и восстановления чистоты поверхности генераторов паров меди, электродных узлов и других элементов в атмосфере водорода с неоном при $T_{\text{раб}} = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ после полного обезгаживания АЭ при $T = 1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ длительностью 30...60 ч (зависит от модели АЭ);

– создания безнакального автотермоэмиссионного металлопористого вольфрам-бариевого (W-Va) 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 ($\lambda = 0,27\text{--}0,31\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) и малым удельным весом ($\rho = 0,32\text{--}0,5\text{ г}/\text{см}^2$) на основе мелкодисперсных окислов Al_2O_3 и SiO_2 , размещенного в пространстве между разрядным каналом с $T_{\text{раб}} \cong 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$, электродными узлами и внешней вакуумноплотной оболочкой с $T_{\text{раб}} \cong 300\text{ }^{\circ}\text{C}$;

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

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

где $a = D_k/l_k$ (D_k – диаметр и l_k – длина разрядного канала), $b = D_k/l_{ок}$ ($l_{ок}$ – 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.

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 (рис. 2, а) до 120–150 нс (рис. 2, б), 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 нём потерь мощности.

Основные параметры промышленных отпаянных АЭ серии «Кулон», с обозначением по ТУ ГЛ-206, приведены в табл. 2, АЭ «Кристалл» (ГЛ-205) – в табл. 3. Уровни средней мощности излучения соответствуют максимальным значениям, получаемым при оптимизации ЛПМ по потребляемой мощности в диапазоне рабочих ЧПИ и в установившихся (стационарных) тепловых режимах. Например, для АЭ ГЛ-206Д при ЧПИ 15 кГц максимальная мощность ($P_{изл} = 15$ Вт), являющейся и рабочей, устанавливается при потребляемой мощности отвыпрямителя ИП $P_{выпр} = 1,9...2,0$ кВт и температуре разрядного канала $T_k = 1600$ °С.

Табл. 2. Основные параметры нового поколения промышленных отпаянных саморазогревных АЭ серии «Кулон».

Параметр	Модель									
	ГЛ-206А	ГЛ-206Б	ГЛ-206В	ГЛ-206Г	УЛ-102	ГЛ-206Д	ГЛ-206И	ГЛ-206Е	ГЛ-206Ж	ГЛ-206З
Лазерная среда	Пары меди									
Длина волны излучения, нм	510,6; 578,2									
Давление буферного газа Ne, мм. рт. ст.	600		450	300	300	300	220	300	300	300
Диаметр разрядного канала, мм	7	7	12	14	20	14	14	14	14	14
Длина разрядного канала, мм	140	175	340	340	470	490	625	340	340	470
Объем активной среды, см ³	4,2	5,7	28	38	116	65	85	38	38	65
Частота повторения импульсов (ЧПИ): оптимальная рабочий диапазон, кГц	15-18 8-25	15-18 8-25	14-17 8-17	14-17 8-17	10-12 8-14	14-17 8-17	14-17 8-17	14-17 10-17	14-17 10-17	14-17 10-17
Средняя мощность излучения в режиме генератора (при оптимальной ЧПИ), Вт:	1,0-1,4	1,5-2,0	3-4	5-6	7-8	15	20	1,2-1,4	1,2-1,4	1,8-2,0
Соотношение мощностей излучения*	3:2	3:2	3,5:2	3,5:2	5:3	3:2	3:2	-	-	-

Окончание таблицы

Длительность импульсов излучения (по высоте), нс	10-15	10-15	17-20	17-20	20-25	17-20	17-20	15-18	15-18
Расходимость излучения с плоским резонатором, мрад	6	5,5	6	6,5	7	4,5	4,3	6	4
Расходимость излучения с телескопическим устойчивым резонатором, мрад	0,1...0,2 мрад								
Мощность, потребляемая от выпрямителя ИП, кВт	0,65	0,75	1,15	1,2-1,5	1,7-2,1	1,5-1,8	2,1	1,4	1,9
Время готовности (при оптимальной потребляемой мощности), мин	25	25	45	50	60	60	60	60	60
Минимальная наработка, ч	≥1000	≥1000	≥1500	≥1500	≥1500	≥1500	≥1500	≥500	≥500
Срок службы не менее, ч	2000			3000			1000		
*)Ризл(λ = 510,6 нм) / Ризл(λ= 578,2 нм).									

Табл. 3. Основные параметры нового поколения промышленных отпаянных саморазогреваемых АЭ серии «Кристалл».

Параметр	Модель						
	ГЛ-205А	ГЛ-205Б	ГЛ-205В	ЛТ-50Cu-D	ЛТ-75Cu	ЛТ-100Cu	ГЛ-205Г
Лазерная среда	Пары меди						
Длина волны излучения, нм	510,6; 578,2						
Давление буферного газа Ne, мм рт. ст.	250	180	150	120	100	90	200
Диаметр разрядного канала, мм	20	20	32	32	45	45	20
Длина разрядного канала, мм	930	1230	1230	1520	1230	1520	930
Объем активной среды, см ³	250	350	900	1200	1800	2200	250
Частота повторения импульсов (ЧПИ): оптимальная рабочий диапазон, кГц	10-12 8-20	10-12 8-20	9-12 8-20	9-12	9-11	9-11	14-17 10-20
Средняя мощность излучения (при оптимальной ЧПИ), Вт: режим генератора режим усилителя	30-35 40-45	40-45 55-60	50-55 70-75	60 80	74 97	90 117	4-6 -
Соотношение мощностей излучения*	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	-
Длительность импульсов излучения, нс	25-30	25-30	30-35	30-35	35	35	15-20
Расходимость излучения с плоским резонатором, мрад	4	3	5	4	6	5	4

Окончание таблицы

Расходимость излучения с телескопическим неу-стойчивым резонатором, мрад	0,07-0,1			-			0,1
	2,9-3,1	3,6-3,8	4,5-4,7	5,7	6,6	9,0	3,3-3,5
Мощность, потребляемая от выпрямителя ИП, кВт	60	60	80	80	100	100	60
Время готовности (при оптимальной потребляемой мощности), мин	>1500			>1000			>500
Минимальная (гарантируемая) наработка, ч	3000			2000			1000
Срок службы не менее, ч	3000			2000			1000

*) Ризд($\lambda = 510,6$ нм) / Ризд($\lambda = 578,2$ нм).

АЭ «Кристалл» 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 ($T_k \sim 1700^\circ\text{C}$) и соответственно длиной волны излучения ($\lambda = 578,2$ нм) (см. табл. 3), 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

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

Чем меньше радиус кривизны зеркала (R) и диаметр апертуры разрядного канала (D_{κ}) и больше расстояние от зеркала до выходной апертуры разрядного канала (l), тем ближе расходимость (θ) к дифракционному пределу – $\theta_{\text{дифр}} = 2,44\lambda/D_{\kappa}$. 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/см², 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].

Установлено, что в ЛПМ в режиме генератора с НР с двумя выпуклыми зеркалами возможно формирование однолучкового излучения дифракционного качества при выполнении трех взаимосвязанных условий [15]:

– 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.

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

– 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 котором 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

$$\theta = \frac{D_{\kappa} \cdot R_1 \cdot R_2}{4 \cdot (R_1 + 2f_2 + 2L)(R_2 + 2l_{3_2})(l + f_1)} + \frac{2,44\lambda}{D_{\kappa}}, \quad (5)$$

R_1 и R_2 – радиусы кривизны глухого и выходного зеркал НР, D_{κ} – диаметр апертуры разрядного канала АЭ, L – длина НР, l – расстояние от зеркала с R_1 до выходной апертуры разрядного канала, l_{3_2} – 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» модели ГЛ-206Д мощность дифракционного пучка излучения составляет около 1 Вт, с 20 Вт АЭ модели ГЛ-206И – 1,5 Вт и производительно обрабатываются лишь тонкопленочные покрытия и фольговые материалы (5...50 мкм) [15]. 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» моделей ГЛ206Д и ГЛ206И до 15–25 Вт и 10^{11} – 10^{12} Вт/см², с АЭ «Кристалл» моделей ГЛ-205А, ГЛ-205Б и ГЛ-205В – до 30–100 Вт и 10^{12} – 10^{13} Вт/см², 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 $M=100$ – 300 становится близкой к дифракционной и дифракционной [15] 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 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 [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, 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) обеспечиваются максимальная производительность микрообработки материалов толщиной до $2 \dots 3$ 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

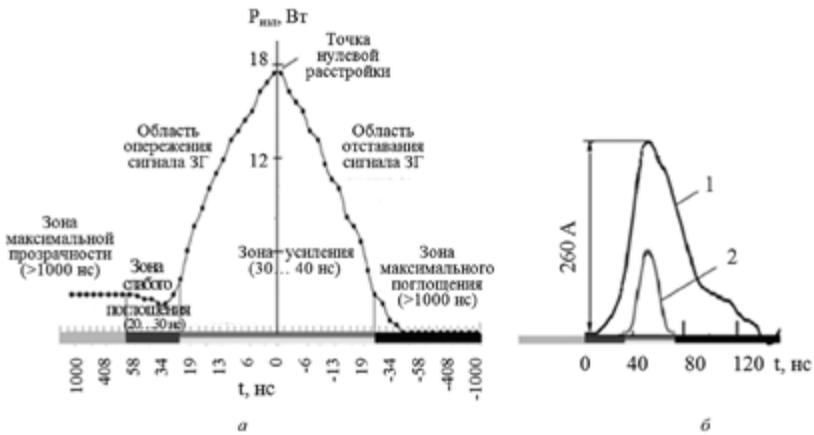


Рис. 2. Зависимость мощности излучения ЛСПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д от временной расстройки импульсов излучения ЗГ относительно импульсов УМ в пределах ± 1000 нс при ЧПИ 13,6 кГц (*а*), осциллограммы импульса тока накачки (1) и излучения (2) при нулевой расстройке (*б*).

более 1000 нс (возникает на срезе импульса тока) и зона максимальной прозрачности длительностью более 1000 нс (перед новым импульсом тока) [14]. 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 и ЛСПМ и на их основе современных АЛТУ «Каравелла» для прецизионной микрообработки материалов.

Эти физические свойства АС стали основой при совместном создании с ООО «НПП «ВЭЛИТ» промышленных ЛПМ с высокоскоростным управлением мощностью и ЧПИ излучения по любому заранее заданному алгоритму, включая пакетную и моноимпульсную модуляцию, от внешнего ПК. Для этого были разработан 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 ЛПМ 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*).

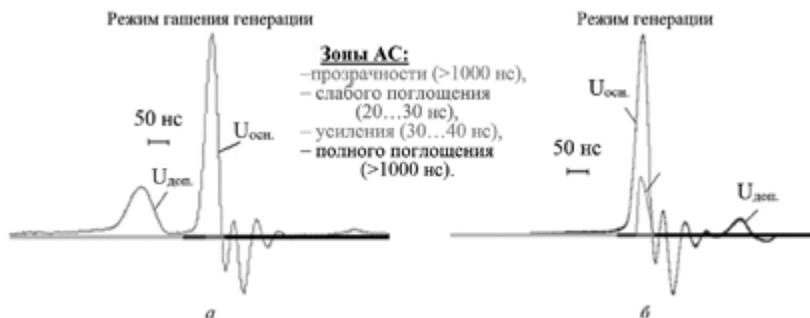


Рис. 3. Методы оперативного управления мощностью и ЧПИ излучения в ЛПМ, работающего в режиме отдельного генератора. Осциллограммы основного ($U_{осн.}$) и дополнительного ($U_{доп.}$) импульсов напряжения накачки ЛПМ «Кулон 06» и генерации (Гген).

С таким управлением одноканальный ЛПМ «Кулон-06» со средней мощностью излучения 6–8 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 [18].

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 [17].

Исследования по микрообработке наносекундным излучением ЛПМ

На первом этапе исследований по микрообработке был проведен расчет пороговой плотности пиковой мощности испарения для большой группы металлических и неметаллических материалов, широко применяемых в современном производстве ИЭТ.

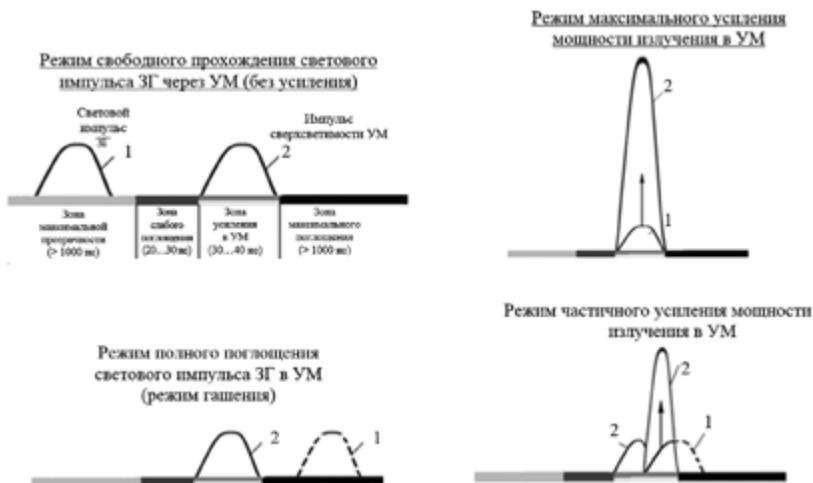


Рис. 4. Методы оперативного управления мощностью и ЧПИ излучения в ЛСПМ, работающей по эффективной схеме ЗГ – УМ.

К ним относятся высокотеплопроводные металлы: медь, алюминий, золото и серебро и тугоплавкие: молибден, вольфрам и тантал, никель, нержавеющей сталь, кремний, поликристаллический алмаз, сапфир, керамика и другие. Расчеты проводились по формуле (8), используемой во многих технологических работах, учитывающей основные теплофизические и оптические свойства материалов [36, 37].

$$\rho_u = \frac{kT_u}{2A} \sqrt{\frac{\pi}{\delta\tau}} \quad (8)$$

где k – коэффициент теплопроводности, T_u – температура испарения (кипения), $A = 1-R$ – коэффициент поглощения (R – коэффициент отражения), δ – коэффициент температуропроводности, τ – длительность импульса лазерного излучения. Для импульсных ЛППМ, применяемых в АЛТУ «Каравелла», значение длительности импульсов для расчета по формуле (1) берется по полувысоте, т. к. импульс имеет форму, близкую к треугольной, и равно 10^{-8} с. Все данные для расчета и расчетные данные по пороговой плотности испарения приведены в табл. 4.

Возможности прецизионной микрообработки материалов излучением лазера на парах меди

Табл. 4. Основные теплофизические и оптические параметры, пороговые плотности пиковой мощности испарения и соответствующие им средние мощности излучения ЛПМ для теплопроводных и тугоплавких металлов и др.

Материал	Темпер. испарения (T_v), К	Коэфф. поглощения (А)	Коэфф. теплопроводности (k), Вт/(м·К)	Коэфф. температуропроводности (δ), см ² /с	Пороговая плотность мощности (ρ_u), 10 ⁹ Вт/см ²	Пороговая средняя мощность ЛПМ (P_{cp}), мВт при d=10 и 20 мкм	
Теплопроводные материалы							
Cu	2840	0,368	401	1,17	0,25	30	120
Au	3080	0,15	317	1,28	0,5	60	240
Al	2792	0,086	236	0,938	0,7	80	320
Ag	2485	0,045	429,5	1,74	1,6	190	750
Тугоплавкие материалы							
Ta	5731	0,59	55,2	0,237	0,1	12	36
Mo	4885	0,41	140	0,54	0,21	24	96
W	5828	0,484	162,8	0,64	0,22	26	104
Нержавеющая сталь							
Сталь	3000	0,5	32	0,035	0,09	11	43
Никель							
Ni	3005	0,384	90,4	0,229	0,13	15	60
Кремний и искусственный поликристаллический алмаз							
Si	3543	0,5	150	1,48	0,08	9	36
Алмаз	4273	0,15	1600	7	1,5	180	720

С другой стороны, для реализации практических работ, необходимо знать реальные значения мощности излучения ЛПМ. Для этого дополнительно воспользовались уже формулой расчета плотности мощности импульсного излучения (9) для реальных режимов работы

$$\rho_u = \frac{P_{cp}}{f \cdot \tau \cdot S} \quad (9)$$

где P_{cp} – средняя мощность лазерного излучения; f – частота повторения импульсов; τ – длительность импульсов излучения по высоте; $S = \pi \cdot d^2/4$ – площадь светового пятна сфокусированного ла-

зерного пучка (d – диаметр светового пятна). Из формулы (9), зная $p_{и}$, определяется пороговая (минимальная) $P_{ср}$ ЛПМ, необходимая для микрообработки материала в испарительном режиме,

$$P_{ср} = p_{и} \cdot f \cdot \tau \cdot \pi \cdot d^2 / 4. \quad (10)$$

В технологических установках АЛТУ «Каравелла» частота повторения импульсов составляет $f = 14$ - 15 кГц, используются ахроматические объективы с фокусным расстоянием $F = 100, 150$ и 200 мм, когда диаметр обрабатываемого светового пятна составляет $d = 10, 15$ и 20 мкм. В табл. 4 приведены пороговые средние мощности излучения ЛПМ для диаметров светового пятна 10 и 20 мкм (последний столбец). Из данной таблицы следует, что пороговые плотности пиковой мощности испарения и соответствующие им средние мощности излучения ЛПМ для теплопроводных и тугоплавких металлов имеют примерно одинаковый уровень и составляют $(0,1-0,5) \cdot 10^9$ Вт/см² и 10 - 60 мВт ($d = 10$ мкм). У меди, молибдена и вольфрама эти параметры совпадают, что подтверждается экспериментально одинаковой скоростью обработки при равных значениях мощности излучения ЛПМ. Повышенным уровнем мощности испарения из этой группы материалов выделяются алюминий ($0,7 \cdot 10^9$ Вт/см²), серебро ($1,6 \cdot 10^9$ Вт/см²) и искусственный поликристаллический алмаз ($1,5 \cdot 10^9$ Вт/см²), а пониженным – кремний ($0,8 \cdot 10^8$ Вт/см²). Эти соотношения мощностей подтвердились при практической реализации микрообработки материалов.

Далее было показано, что при пороговых (минимальных) уровнях мощности испарения со стороны выхода лазерного луча на материале образуется застывший расплав металла. Последний свидетельствует об образовании в процессе лазерного воздействия большого количества жидкой фазы, что не допустимо при изготовлении качественных прецизионных деталей. Это наглядно показано на примере сверления отверстий в нержавеющей стали методом прямой прошивки при пороговой плотности мощности испарения $\sim 10^8$ Вт/см² (рис. 5). Но при увеличении плотности пиковой мощности излучения более чем на порядок, что соответствует средней мощности излучения ЛПМ ≥ 1 Вт, отверстия становятся практически идеально чистыми и имеют субмикронную шероховатость (рис. 6).

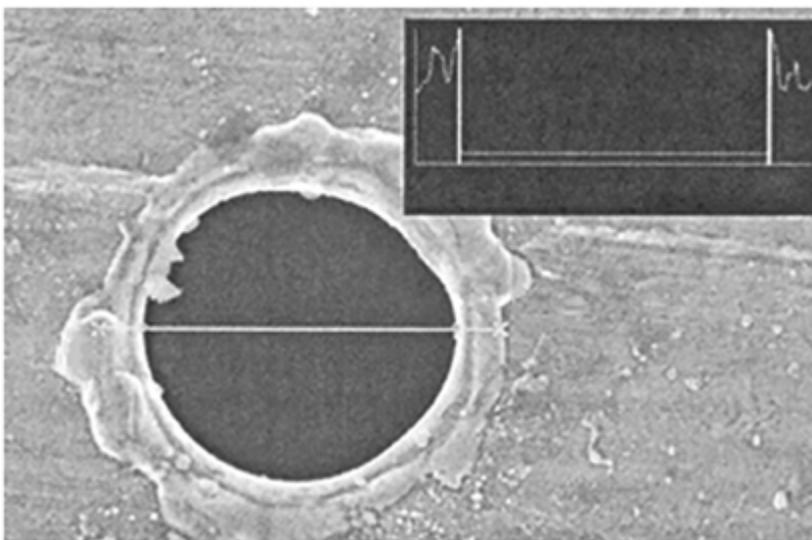
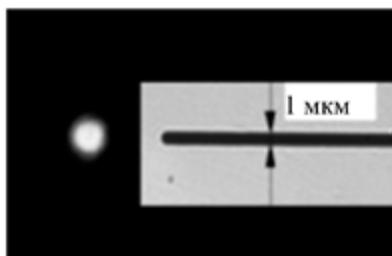


Рис. 5. Изображение отверстия в образце из нержавеющей стали толщиной 50 мкм, сформированного при воздействии излучения ЛПМ с $\rho_{и} \sim 10^8$ Вт/см². Увеличение $\times 10^4$, $F = 50$ мм.



$F = 50$ мм, $d_{отв} = 3,18$ мкм
Увеличение $\times 3000$



$F = 150$ мм, $d_{отв} = 15,5$ мкм
Увеличение $\times 1000$

Рис. 6. Изображения отверстий в образцах из нержавеющей стали толщиной 50 мкм. Плотность пиковой мощности $\rho = (1-5) \cdot 10^9$ Вт/см².

В результате большого количества экспериментальных исследований установлено, что для обеспечения микрообработки металлических материалов в испарительном режиме с минимумом жидкой фазы и соответственно с высоким качеством необходимо иметь в обрабатываемом световом пятне диаметром 5-20 мкм

плотность пиковой мощности на 1-2 порядка больше порогового уровня, т. е. $\rho = 10^{10} - 10^{11}$ Вт/см². При обработке с таким уровнем плотности мощности фольговых материалов с толщиной, сопоставимой с шириной реза (10-50 мкм), разлетающиеся в результате микровзрывов из зоны воздействия излучения пары и капли металла практически не встречают преград и полностью удаляются из этой зоны. При резке материалов с большей толщиной разлет паров металла происходит в основном между стенками уже образовавшегося разреза и возможно увеличение жидкой фазы и ухудшения качества микрообработки. Дополнительные исследования показали, что как для теплопроводных, так и тугоплавких металлов при толщинах больше 1 мм время микрообработки резко возрастает, а качество снижается. Поэтому излучением ЛПМ с диаметром светового пятна 10-20 мкм, выгодно обрабатывать материалы толщиной не более 1 мм и еще более эффективно применять ЛПМ при толщинах меньше 0,6 мм, когда производительность и качество микрообработки по сравнению с традиционными способами обработки, включая и ЭО, на порядок выше (рис. 7).

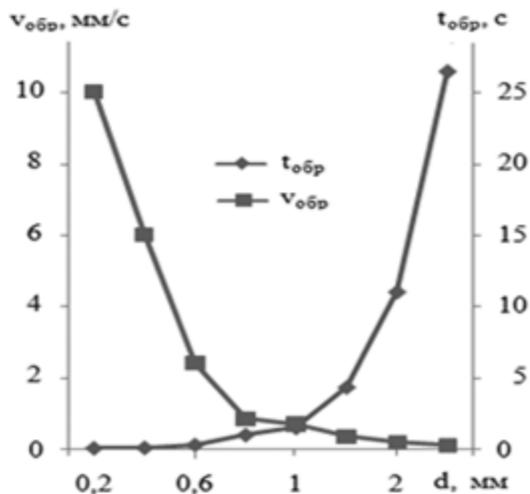


Рис. 7. Зависимости времени ($t_{обр}$) и скорости ($v_{обр}$) прошивки для меди (молибдена) от толщины материала импульсным излучением ЛПМ с диаметром сфокусированного пятна 15 мкм. $P_{cp} = 20$ Вт, $f = 8$ кГц, $\tau = 15$ нс и $\rho = 10^{11}$ Вт/см².

С увеличением толщины обрабатываемого материала (>50...100 мкм) в зоне лазерного реза имеет место образование

Возможности прецизионной микрообработки материалов излучением лазера на парах меди

шлака и грата, наличие которых недопустимо в прецизионных деталях для ИЭТ. Для их удаления были разработаны способы химической обработки с наложением ультразвукового поля, которые позволили производить полную и эффективную очистку зоны лазерного реза как для теплопроводных (Cu, Al, Au, Ag), так и тугоплавких (Mo, W, Ta, Re) металлов, их сплавов и ряда других материалов, широко применяемых в ИЭТ. На рис. 8, на фрагментах молибденовой и медной деталей, показана последовательность и качество финишной химической очистки.

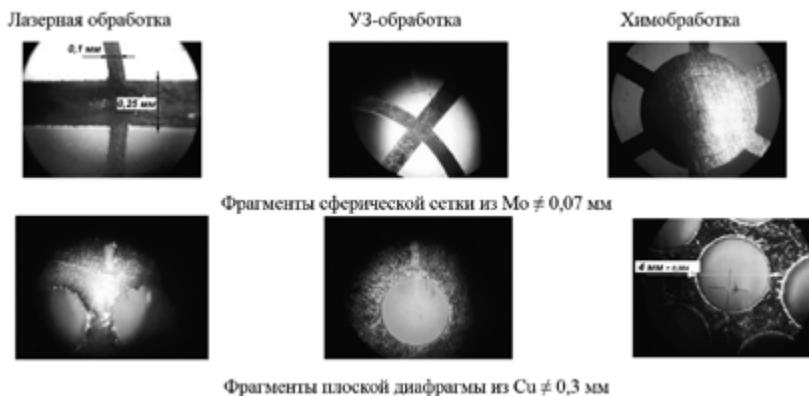


Рис. 8. Этапы технологии изготовления прецизионных деталей при лазерной микрообработке.

Экспериментально исследовано, с использованием растровой электронной микроскопии, влияние скорости, числа проходов и мощности излучения при обработке сфокусированным излучением с диаметром 10-20 мкм и плотностью пиковой мощности 10^{10} - 10^{11} Вт/см² на качество поверхности реза: структуру и микротвердость ЗТВ материала [38]. Все исследуемые объекты после лазерной обработки подвергались химической очистке от шлаков. Лазерная резка материалов проводилась с фокусным расстоянием ахроматического объектива 100 и 150 мм при средней мощности излучения 1-10 Вт, скорости обработки $V = 1-8$ мм/с и числу проходов 1-120. Примеры исследований представлены на рис. 9-11.

Для молибдена толщиной 0,1, 0,15 и 0,2 мм наблюдается небольшое повышение твердости в зоне, прилегающей к поверхности реза, свидетельствующее о незначительном упрочнении зоны реза.

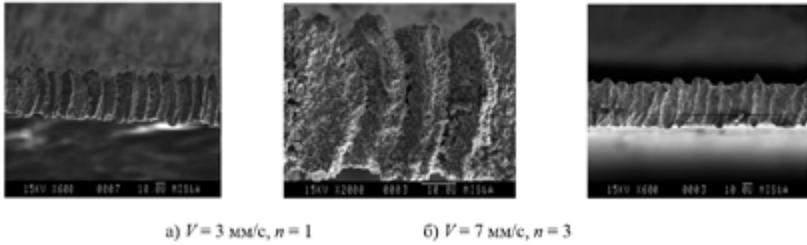


Рис. 9. Изображение поверхности реза тантала толщиной 0,03 мм при увеличениях а) $\times 600$ и $\times 2000$ и б) $\times 600$. $P_{\text{изл}} = 1,5$ Вт; V – скорость обработки, n – число проходов.

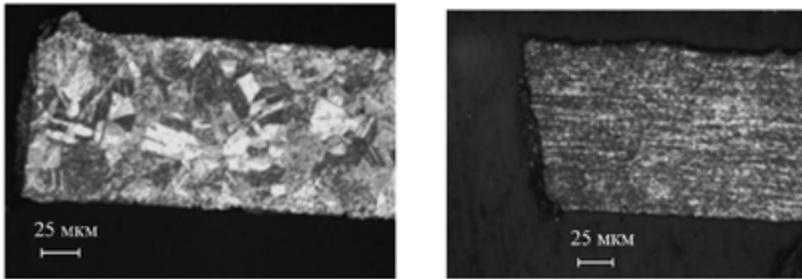


Рис. 10. Микроструктура сплава БрБ2 (0,1мм); $V = 2$ мм/с; $P_{\text{изл}} = 2,4$ Вт; $n = 6$ и молибдена (0,1мм); $V = 3$ мм/с; $P_{\text{изл}} = 2,4$; $n = 8$.

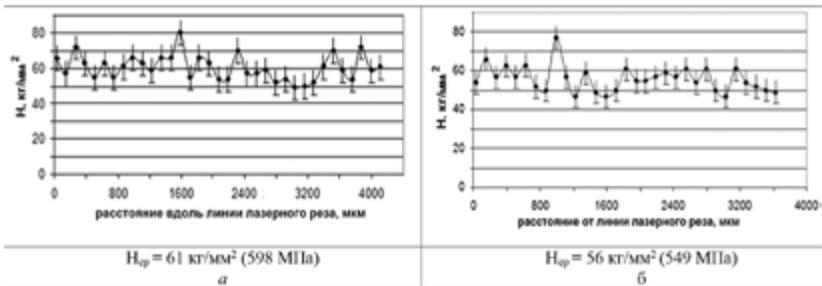


Рис. 11. Изменение микротвёрдости образца меди МВ толщиной 0,1 мм вдоль (а) и в перпендикулярном направлении (б) от линии лазерного реза. $P_{\text{изл.}} = 2,4$ Вт, $V_{\text{реза}} = 6$ мм/с, $n = 3$.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено:

- поверхность лазерного реза имеет многоканальную структуру с периодом повторения каналов 10-15 мкм и глубиной (шероховатостью) до 3-4 мкм;
- повышение скорости и числа проходов обработки приводит к уменьшению шероховатости поверхности реза до значений менее 1 мкм;
- структурных изменений в прилегающей к лазерному резу зоне (10-20 мкм) не обнаружено и она аналогична центральной зоне материала;
- в высокотеплопроводных металлах упрочнения или разупрочнения материала в прилегающей к лазерному резу зоне (10-20 мкм) не происходит;
- в тугоплавких металлах со значительно более низкой теплопроводностью в прилегающей к лазерному резу зоне (10-20 мкм) происходит незначительное упрочнение.

Автоматизированные лазерные технологические установки типа «Каравелла» для прецизионной микрообработки материалов

Все основные результаты исследований и разработок по созданию промышленных отпаянных лазерных АЭ, высокоселективных оптических систем по формированию однопучкового излучения дифракционного качества со стабильными параметрами, методов оперативного управления мощностью и ЧПИ излучения на основе свойств АС ЛПМ, импульсных ЛПМ и ЛСПМ и микрообработке наносекундным импульсным излучением стали основой для создания серии современных АЛТУ типа «Каравелла» для прецизионной микрообработки материалов: «Каравелла-1», «Каравелла-1М», «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» [14–19].

АЛТУ «Каравелла-1» и «Каравелла-1М» с диаметром обрабатываемого светового пятна 10-20 мкм и плотностью пиковой мощности 10^9 – 10^{12} Вт/см² при ЧПИ 13,5 и 14 кГц предназначены для производительной и качественной прецизионной микрообработки тонколистовых материалов ИЭТ толщиной 0,2–0,5 мм и 0,6–1 мм, соответственно [14, 17]. В АЛТУ «Каравелла-1» применена промышленная ЛСПМ модели «Кулон-10», работающая по схеме ЗГ – УМ с телескопическим НР в ЗГ, со средней мощностью дифракционного пучка излучения 10–15 Вт, в «Каравелла-1М» – ЛСПМ «Кулон-20»

с НР с двумя выпуклыми зеркалами мощностью 20–25 Вт и используются прецизионные трехкоординатные столы XYZ с точностью позиционирования по осям ± 2 мкм и рабочим полем горизонтального XY-стола 150x150 мм. АЛТУ модели «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» с диаметром светового пятна 10-20 мкм и плотностью пиковой мощности 10^9 – 10^{11} Вт/см² при ЧПИ 15 кГц предназначены для прецизионной микрообработки фольговых материалов толщиной 0,01–0,2 мм [14, 18]. В этих установках применены промышленные ЛПИМ «Кулон-06» с телескопическим НР средней мощностью излучения 5-10 Вт, трехкоординатные столы XYZ с точностью позиционирования по осям ± 2 мкм и рабочим полем горизонтального XY-стола 100 x 100 мм и 200 x 200 мм, соответственно. Основные технические параметры АЛТУ «Каравелла» представлены в табл. 5.

Табл. 5. Основные параметры АЛТУ «Каравелла».

Наименование параметра	Каравелла-1	Каравелла-1М	Каравелла-2 Каравелла-2М
Длины волн излучения, нм	510,6 и 578,2		
Диаметр пучка излучения, мм	14		
Средняя мощность излучения, Вт	10-15	20...25	6...8
Частота повторения импульсов, кГц	13,5	14	14...16
Длительность импульса излучения (по уровню 0,5), нс	11 \pm 1		10 \pm 1
Нестабильность средней мощности излучения в течение 8 часов, %	≤ 5		≤ 3
Импульсная энергия, мДж	0,1-1	0,5-1,5	0,2...0,5
Нестабильность импульсной энергии, %	≤ 5		≤ 3
Расходимость пучка излучения, мрад	0,1		
Нестабильность положения оси диаграммы направленности пучка излучения, мрад	10-3-10-4		
Фокусное расстояние объектива, мм	70-200	100-250	50...150
Диаметр рабочего пятна излучения, мкм	7...20	10...25	5...15
Плотность пиковой мощности, Вт/см ²	4·10 ¹⁰ -6·10 ¹¹	3·10 ⁹ -10 ¹²	3·(10 ¹⁰ -10 ¹¹)

Возможности прецизионной микрообработки материалов излучением лазера на парах меди

Окончание таблицы

Толщина обрабатываемых материалов, мм – металлические – полупроводники и диэлектрики	0,3-0,5 до 1	0,6-1,0 до 2	0,01-0,2 до 0,5
Рабочее поле горизонтально- двухкоординатного стола XY, мм	150x150		100x100 200x200
Длина перемещения вертикального координатного стола Z, мм	60		
Максимальная скорость перемещения координатного стола XY, мм/с	20		15
Погрешность позиционирования по каждой оси при (20±1) °С, мкм	±2		
Время готовности, мин	80		60
Время непрерывной работы, ч	Неограниченно		
Потребляемая мощность от трехфазной сети, кВт	≤ 5	≤ 6,5	≤ 3
Расход воды (система вода- вода), л/мин	≤ 10		4-6
Габаритные размеры, мм	2600x1700x1350	2600x2100x1650	2200x1700x183
Масса, кг	≤ 1150	≤ 1200	≤ 800
Гарантированная наработка, ч	> 1500		
Технический ресурс, лет	> 5		

Внешний вид установок показан на рис. 12 и 13, структурная схема – рис. 14.



Рис. 12. Промышленные АЛТУ «Каравелла-1» и «Каравелла-1М» на базе двухканальных ЛСПМ «Кулон-10» и «Кулон-20» для прецизионной микрообработки тонколистовых материалов ИЭТ толщиной 0,2-0,5 мм и 0,6-1 мм.



Рис. 13. Промышленные АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» на базе одноканального ЛПМ «Кулон-06» для прецизионной микрообработки фольговых материалов ИЭТ толщиной 0,01-0,2 мм.

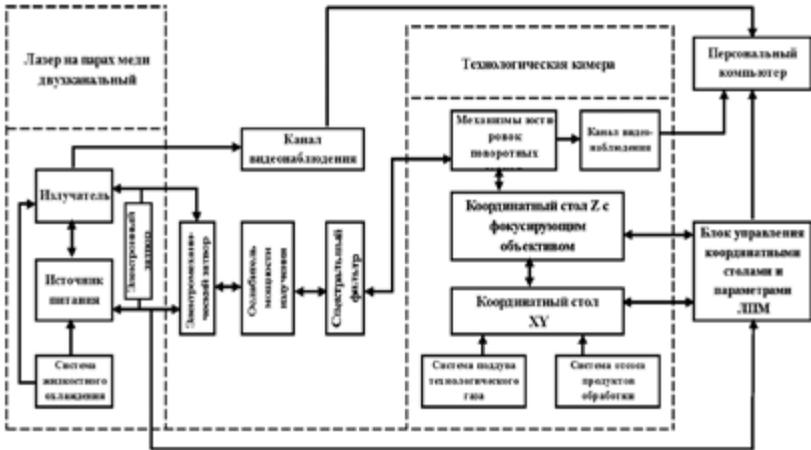


Рис. 14. Структурная схема промышленных АЛТУ «Каравелла».

Оптические схемы АЛТУ «Каравелл-1» и АЛТУ «Каравелла-1М» одинаковы, оптические схемы АЛТУ «Каравелл-2» и АЛТУ «Каравелла-2М» отличаются от первых лишь отсутствием второго активного элемента (АЭ УМ) и показаны на рис. 15.

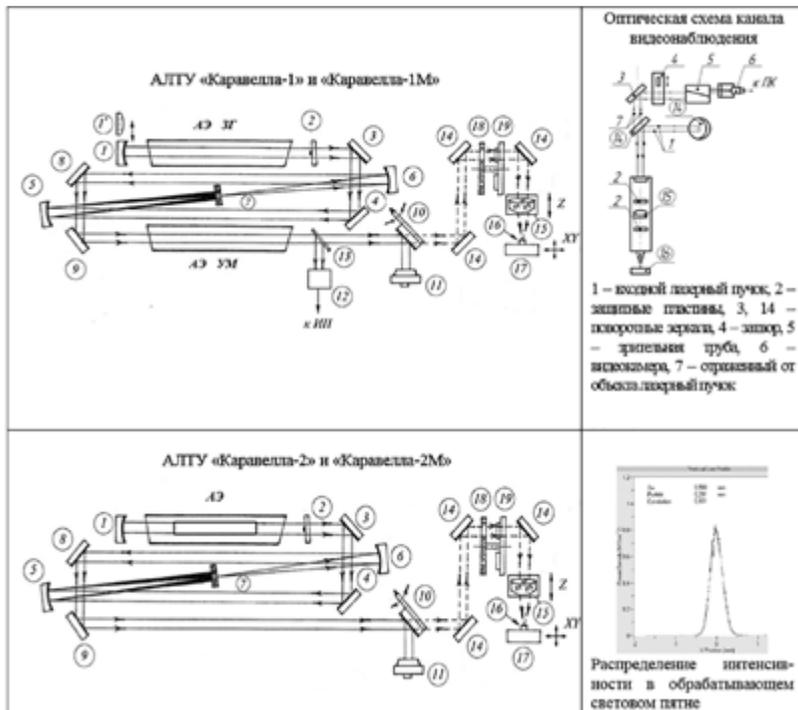


Рис. 15. Оптические схемы промышленных АЛТУ «Каравелла». АЭ ЗГ и АЭ УМ – активный элемент задающего генератора и усилителя мощности; 1 и 2 – зеркала телескопического НР с увеличением $M = 200$; 1' и 2' – НР с двумя выпуклыми зеркалами; 3, 4, 8, 9 и 14 – плоские поворотные зеркала; 5 и 6 – вогнутые сферические зеркала пространственного фильтра-коллиматора (ПФК); 7 – селекционирующая диафрагма ПФК; 10 – электромеханический затвор с плоским зеркалом; 11 – датчик мощности излучения; 12 – оптоэлектронный приемник; 13 – светоделительная пластина; 15 – вертикальный стол Z с фокусирующим ахроматическим объективом; 16 – обрабатываемый объект; 17 – горизонтальный двухкоординатный стол XY; 18 – ослабитель мощности излучения; 19 – спектральный фильтр.

Относительно сложная оптическая система АЛТУ предназначена для формирования однопучкового излучения дифракционного качества, усиления и ослабления, транспортировки, видеонаблюдения и фокусировки на обрабатываемый объект в пятно диаметром 10-20 мкм и плотностью пиковой мощности 10^9 - 10^{12} Вт/см², обеспечивающей эффективную микрообработку в испарительном режиме.

Изготовление прецизионных деталей ИЭТ на АЛТУ «Каравелла»

Технологические возможности созданных и эксплуатируемых в производственных условиях промышленных АЛТУ «Каравелла» продемонстрированы на конкретных примерах изготовления прецизионных деталей для приборов СВЧ-техники и других ИЭТ (рис. 16-24) [15-19]. Детали изготавливаются в соответствии с программами на рабочие чертежи, заданными в конструкторском пакете AutoCAD, при оптимизированных технологических параметрах обработки, к которым относятся фокусное расстояние объектива, средняя мощность излучения, длина волны, плотность пиковой мощности, скорость и число проходов обработки.

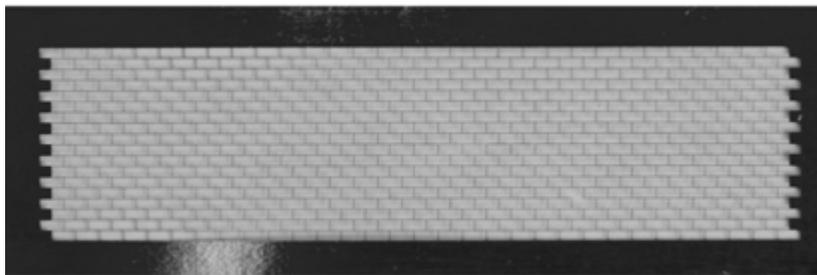


Рис. 16. Сетка из 50 мкм молибденовой фольги с 50 мкм перемычками и прозрачностью 96,3% (650 ячеек размером 2x1 мм), изготовленная на АЛТУ «Каравелла-2». Режим обработки: $F_{\text{объект.}} = 100$ мм, $P_{\text{ср}} = 1,5$ Вт ($\lambda = 0,51$ мкм), $V_{\text{обр.}} = 2$ мм/с, $n = 2$. Время изготовления: $t_{\text{изг.}} = 1,5$ ч.

На рис. 17 представлены примеры и оптимизированные параметры режимов микрообработки объемных молибденовых деталей для СВЧ-приборов: пластины соосностью 10 мкм, цилиндрического стакана с 600 пазами и сферической сетки с радиально-кольцевыми пазами со 100 мкм перемычками, плоской диафрагмы с 21 отверстием и 200 мкм перемычками. Качественное и производительное изготовление этих деталей стало возможным лишь методом лазерной микрообработки.

На АЛТУ «Каравелле-2М» изготавливаются прецизионные детали максимальных размеров, например, пластины прямоугольной и круглой конфигураций с габаритными размерами 122,5x98,1 мм и 163,5 мм из константана МН-45 и стали

Возможности прецизионной микрообработки материалов излучением лазера на парах меди

8ЮПВ-В-1 для антенных систем (рис. 18, 19) и трафареты размером 105x94 мм из бериллиевой бронзы (БрБ2) для заполнения отверстий межслойных соединений проводниковой пастой в производстве многослойных керамических плат (рис. 20).

Кроме высокого качества обработки, минимального радиуса изгиба и выигрыша во времени по сравнению с ЭЭО, лазерная технология обеспечивает и высокую взаимную соосность отверстий и щелей (3...5 мкм).

Параметры режима обработки	Каравелла-1	Каравелла-1М	Каравелла-2	Каравелла-2М
	Толщина, мм	0,2	0,16	0,07
Мощность излучения, Вт	4,8	6	2,4	8,2
Фокусное расстояние, мм	150	100	100	150
Скорость обработки, мм/с	1,5	5	1,3	3,5
Число проходов	11	8	7	22
Время изготовления, мин	7,5	150	15	45

Рис. 17. Объемные детали сложной конфигурации из молибдена: прямоугольной, цилиндрической и сферической форм и плоской 21-лучевой диафрагмы.

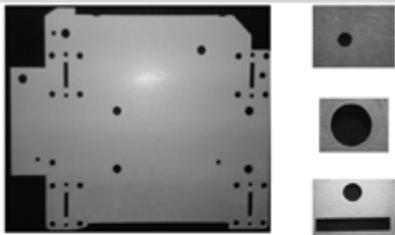
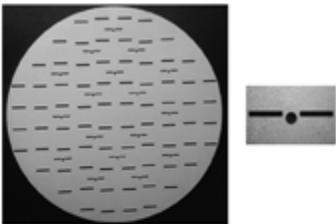
	
Режим обработки: пластины – $P_{\text{лаз}} = 4 \text{ Вт}$, $F_{\text{обл.}} = 150 \text{ мм}$, $v_{\text{обр.}} = 4,5 \text{ мм/с}$, $n=22$, $d_{\text{отв.}} = 15 \text{ мкм}$, $\rho = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ Вт/см}^2$	
Габаритные размеры: 122,5x98,1 мм. Отверстия: $\varnothing 0,5; 2,0; 2,1; 2,8; 4,0 \text{ мм}$ и щели 2,0x11,2 мм. $t_{\text{ит.}} = 1 \text{ час}$	Габаритный диаметр 163,5 мм. Отверстия: $\varnothing 1,52$ и щели 4,6x0,7; (8,58-9,16)x1 мм. $t_{\text{ит.}} = 2 \text{ часа}$

Рис. 18. Пластины для антенных систем из константана МН-45 и стали 8Ю ПНВ-1 толщиной 0,2 мм с соосностью отверстий и пазов $\pm 5 \text{ мкм}$, изготовленные на АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М».

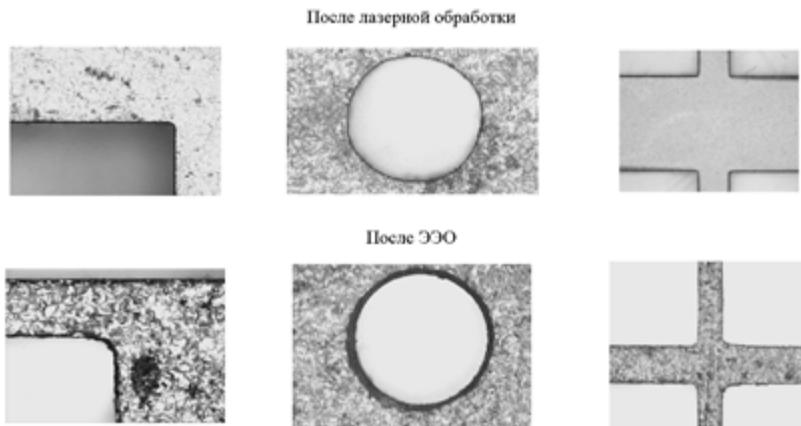
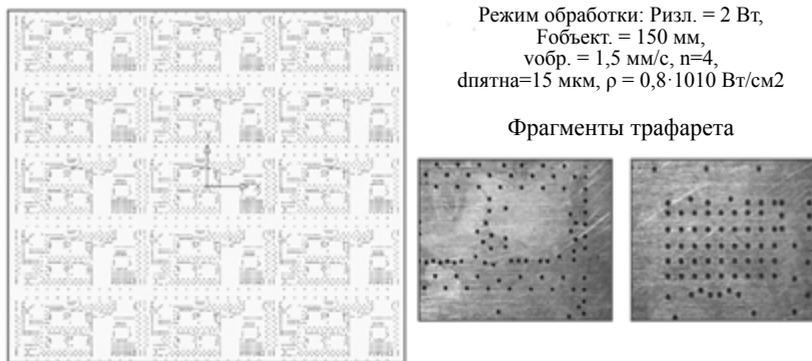


Рис. 19. Фрагменты пластин из стали толщиной 0,2 мм.



Режим обработки: Р_{изл.} = 2 Вт,
F_{объект.} = 150 мм,
v_{обр.} = 1,5 мм/с, n=4,
d_{пятна}=15 мкм, ρ = 0,8·10¹⁰ Вт/см²

Фрагменты трафарета

Рис. 20. Трафареты из фольговой бериллиевой бронзы БрБ2 (50 мкм) для заполнения проводниковой пастой отверстий межслойных соединений в производстве многослойных керамических плат LTCC.

При малых уровнях мощности весьма эффективной оказалась лазерная микрообработка по формированию топологий проводник-зазор с размерами 20-100 мкм на отечественном стеклокерамическом материале СКМ с толстопленочным (10 мкм) серебряным или золотым покрытием для многослойных плат LTCC (рис. 21 и 22). Режим обработки с серебряным покрытием: Р_{изл.} = 0,3 Вт, λ = 0,51 мкм, F_{объект.} = 100 мм, v_{обр.} = 1 мм/с, n=3, d_{пятна} = 10 мкм, ρ = 2,5·10⁹ Вт/см².

Возможности прецизионной микрообработки материалов излучением лазера на парах меди

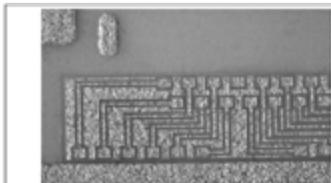


Рис. 21. Изображение фрагмента топологии проводник/зазор с размерами в пределах 20-100 мкм.

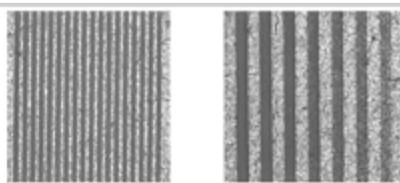
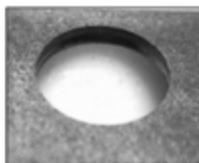


Рис. 22. Изображение фрагментов топологии проводник/зазор с размерами 40/40 и 100/100 мкм.

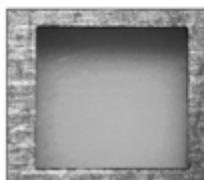
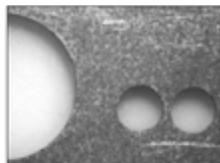
На самой мощной технологической установке «Каравелла-1М» (20-25 Вт) производительно изготавливаются прецизионные детали с толщиной материала 0,6-1 мм, как из тугоплавких, так и теплопроводных материалов (рис. 23).



Mo \neq 0,6 мм; \varnothing 3,0 мм с
перемычкой 0,2 мм



W \neq 1 мм, \varnothing 7 и \varnothing 2,2 мм
с перемычкой 0,3 мм



Cu \neq 1 мм, 4x4 мм



Cu \neq 1 мм, \varnothing 250 мкм

Рис. 23. Фрагменты плоских деталей. Режим обработки: $F_{\text{объект.}} = 200$ и 250 мм, $d_{\text{пятна}} = 20$ и 25 мкм, $\rho = 5 \cdot 10^{10}$ Вт/см².

Весьма эффективно изготавливать мелкие прецизионные детали в режиме массива, когда из одной заготовки получают десятки и сотни деталей (рис. 24).

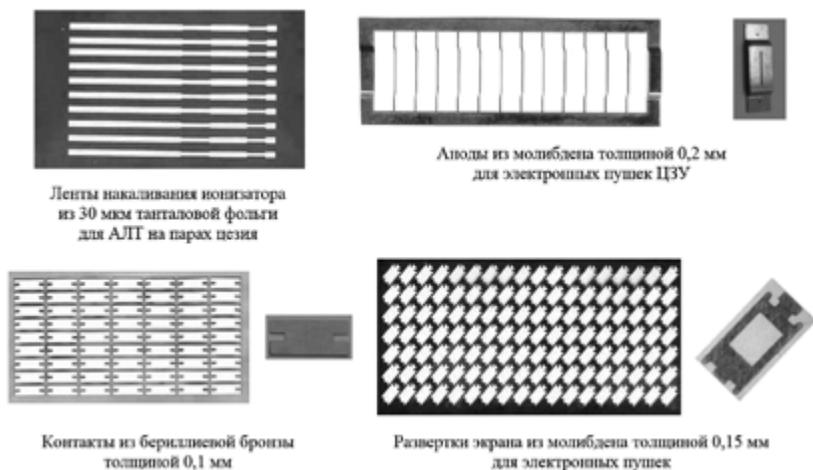


Рис. 24. Примеры изготовления массива деталей.

На рис. 25 показаны дополнительные технологические возможности АЛТУ «Каравелла» в производстве ИЭТ.

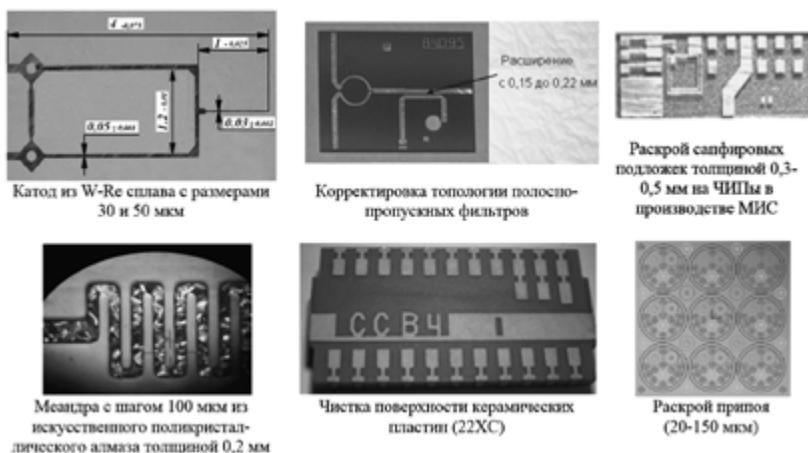


Рис. 25. Дополнительные технологические возможности АЛТУ «Каравелла».

Заключение

В настоящее время на АЛТУ «Каравелла» в обеспечении НИОКР, единичного, мелкосерийного и серийного производств ИЭТ изготавливаются десятки и сотни типов плоских и объемных прецизионных металлических деталей простой и сложной конфигураций со скоростью обработки 0,5-5 мм/с толщиной 0,01-1 мм и производится оптимальный раскрой припоев (20-50 мкм) со скоростью до 15 мм/с. С максимальной производительностью (5-15 мм/с) вырезаются диски, окна и ЧИПы из искусственного поликристаллического алмаза и кремния толщиной до 1,5...2 мм и производится чистка поверхностей. Анализ изготавливаемых прецизионных деталей показал, что лазерный способ микрообработки излучением ЛПМ с наносекундной длительностью импульсов имеет ряд существенных преимуществ перед известными традиционными способами изготовления прецизионных деталей, включая и ЭЭО, особенно деталей сложных конфигураций:

- широкая номенклатура обрабатываемых конструкционных материалов, обработка без механического давления, эффективная обработка в атмосфере воздуха и без поддува технологического газа, экономия материалов при изготовлении и раскрое заготовки из листа, невысокая трудоемкость изготовления и универсальность технологической оснастки;

- на порядок и более высокая производительность, уменьшение количества операций и переходов в несколько раз, высокая оперативность в обеспечении НИОКР, в единичном, мелком и серийном производствах;

- малые шероховатость поверхности реза ($\leq 1...2$ мкм) и зона термического влияния ($\leq 5...10$ мкм), отсутствие расслоения и микротрещин металла (молибдена, вольфрама);

- наличие компьютерной базы данных на режимы лазерной микрообработки материалов, управление технологическими процессами от ПК, существенное снижение влияния человеческого фактора на воспроизводимость технологического процесса, высокий процент выхода годных деталей (до 100%).

В процессе большого объема выполненных экспериментальных работ определились восемь наиболее эффективных и перспективных технологических направлений по микрообработке материалов наносекундным излучением ЛПМ в производстве ИЭТ: контурная прецизионная резка, сверление микроотверстий

методом прямой прошивки, скрайбирование, раскрой припоев, обработка пленочных покрытий, поверхностная чистка деталей, формирование изображений в объеме прозрачных сред, маркировка и гравировка с высоким разрешением [39].

Список литературы

1. Петраш Г.Г. Лазеры на парах металлов: Справочник по лазерам: В 2т. (М.: Сов.радио, 1978, с.183).
2. Бужинский О.И. Эволюция исследований медного лазера и возможности его практического применения: Обзор (М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1983, с.47).
3. Бохан П.А. В сб. Эффективные газоразрядные лазеры на парах металлов (Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 1978, с.209).
4. Солдатов А.И., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов (Новосибирск: Наука, 1985, с.152).
5. Little С.Е. 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, p.479).
6. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения (М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005, с.312).
7. Батенин В.М., Бучанов В.В. , Казарян М.А. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов (М.: Научная книга, 1998, с.544).
8. Батенин В.М., Бойченко А.М., Бучанов В.В. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов – 2. В 2 т. Т1 (М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009, с.544).
9. Батенин В.М., Бойченко А.М., Бойченко А.М. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов – 2. В 2 т. Т2 (М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009, с.616)
10. Little С.Е. Metal Vapour Lasers: Physics, Engineering and Applications (Chichester (UK): J.Wiley and Sons Ltd., 1999, p.620).
11. Бохан П.А., Бучанов В.В., Закревский Д.Э. Лазерное разделение изотопов в атомарных парах (М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004, с.208).
12. Бохан П.А., Бучанов В.В., Закревский Д.Э. Оптическое и лазерно-химическое разделение изотопов в атомарных парах (М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010).
13. Пасманик Г.А., Земсков К.И., Казарян М.А. Оптические системы с усилителями яркости (Горький: ИПФ АН СССР, 1988, с.173).
14. Лябин Н.А., Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн., 7, 20 (2014).
15. Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Клименко В.И. Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 8, 30 (2014).
16. Лябин Н.А. Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 6, 1 (2014).
17. Лябин Н.А., Григорьянц А.Г., Казарян М.А. Научоемкие технологии в машиностроении, 9, 19 (2014).

18. Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Клименко В.И. Научно-технические журналы, 10, 41 (2014).
19. Лябин Н.А., Ляпин Л.В., Семенюк С.С. Электронная техника. Сер. 1 СВЧ-техника, 3 (522), 15 (2014).
20. Айхлер Ю., Айхлер Г.И. Лазеры. Исполнение, управление, применение (М.: Техносфера, 2008, с.440).
21. Казарян М.А., Кружалов С.В., Лябин Н.А., Макрушин Ю.М., Прохоров А.М., Шакин О.В. Квантовая электроника, 25, 773 (1998).
22. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов. (М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, с.664).
23. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Третьяков Р. С. Фотоника, 3, 26 (2015).
24. Сапрыкин Л.Г., Кудрявцева А.Л. Металлообработка и станкостроение, 10, 39 (2008).
25. Сапрыкин Д.Л. Лазер Информ, 1, 2 (2014).
26. Вакс Е.Д., Миленький М.Н., Сапрыкин Л.Г. Практика прецизионной лазерной обработки (М.: Техносфера, 2013, с.708).
27. Горный С.Г. Фотоника, 5, 12 (2015).
28. Кулешов Н.В. Лазер Информ, 6, 1 (2014).
29. Каталог-справочник. Лазерные источники излучения, ч. 1, 2, 3 (М: ЛАС, 2015, 44., 74, 66).
30. Каталог-справочник. Лазерные технологические установки, выпускаемые в странах СНГ (М: ЛАС, 2015, 233).
31. Гольшев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Квантовая электроника 44, 233 (2014).
32. Гольшев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Квантовая электроника 45, 873 (2015).
33. Бахманн Ф., Мюллер Д., Клинт Б. Фотоника 1, 34, (2013).
24. Колоколов И.С., Клименко В.И., Лябин Н.А. Прикладная физика, 3, 84 (2003).
35. Лепехин Н.М., Присеко Ю.С., Филиппов В.Г., Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Казарян М.А. Прикладная физика, 1, 110 (2005).
36. Вейко В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий». Раздел: Лазерная микрообработка (СПб: СПб ГУ ИТМО, 2005, с.110)
37. Вейко В.П. Опорный конспект лекций «Лазерные микро- и нанотехнологии в микроэлектронике» (СПб: СПб ГУ ИТМО, 2012, с.141).
38. Фигуровский Д.К., Тронза Е.И., Лябин Н.А. Научно-технические журналы, 8, 26, (2013).
39. Лазерная прецизионная микрообработка материалов. А.Г. Григорьянц, М.А.Казарян, Н.А.Лябин. Физматлит, Москва, 2017, 414с.

Отделение физических наук

А.Г. Григорьянц, М.А. Казарян, Н.А. Лябин, И.Н. Шиганов

**Возможности прецизионной микрообработки материалов
излучением лазера на парах меди**

Формат 60 x 84/16

Гарнитура Таймс

Усл. печ. л. 2,7. Усл. изд. л. 2,5

Тираж 20 экз.

Издатель – Российская академия наук

Подготовлено к печати

Управлением научно-издательской деятельности РАН

Отпечатано на оборудовании Управления делами РАН

Издано в авторской редакции

Издается в соответствии с распоряжением
президиума Российской академии наук
от 24 октября 2017 г. №10106-765,
распространяется бесплатно.