

## Лазер на парах меди с однопучковым излучением дифракционного качества и его возможности для микрообработки материалов изделий электронной техники

# 08, август 2014

DOI: 10.7463/0814.0720903

Лябин Н. А.<sup>1,а</sup>, Чурсин А. Д.<sup>1</sup>, Парамонов В. С.<sup>1</sup>, Клименко В. И.<sup>1</sup>, Парамонова Г. М.<sup>1</sup>, Колоколов И. С.<sup>1</sup>, Бетина Л. Л.<sup>1</sup>, Григорьянц А. Г.<sup>2</sup>, Шиганов И. Н.<sup>2</sup>, Казарян М. А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Россия, ОАО «НПП «Исток» им. Шокина»

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени

П.Н.Лебедева РАН

<sup>а</sup>[lyabin-npk3@mail.ru](mailto:lyabin-npk3@mail.ru)

Исследована структура, пространственные, временные и энергетические характеристики излучения импульсного лазера на парах меди (ЛПМ) с оптическими резонаторами, обладающими высокой пространственной селективностью: с неустойчивым резонатором (НР) с двумя выпуклыми зеркалами и телескопическим НР и определены условия формирования однопучкового излучения с дифракционной расходимостью и высокой стабильностью положения оси диаграммы направленности. В ЛПМ и лазерной системе на парах меди (ЛСПМ) с таким качеством излучения с применением промышленных отпаянных активных элементов (АЭ) серий «Кулон» мощностью излучения 10-20 Вт и «Кристалл» мощностью 30-50 Вт плотность пиковой мощности в сфокусированном пятне диаметром 10-20 мкм достигает значений  $10^{11}$  -  $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>, достаточной для эффективной микрообработки любых металлических материалов и большого круга полупроводников и диэлектриков толщиной до 1...2 мм. При этом обеспечивается на порядок и более высокая производительность по сравнению с традиционными способами обработки, малые шероховатость поверхности реза ( $\leq 1...2$  мкм) и зона термического влияния ( $\leq 3...5$  мкм), нет расслоения и микротрещин металла (молибдена, вольфрама).

ЛПМ с телескопическим НР стал основой для создания современных промышленных автоматизированных лазерных технологических установок (АЛТУ) «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» для изготовления прецизионных металлических деталей толщиной до 0,3 мм и неметаллических до 0,5...0,7 мм, ЛПМ с НР с двумя выпуклыми зеркалами – промышленных АЛТУ «Каравелла-1» и «Каравелла-1М» для изготовления металлических деталей толщиной до 1 мм и неметаллических до 1,5...1,8 мм для ИЭТ.

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

### Введение

Объем выпуска лазерных источников излучения для создания и комплектования современного технологического оборудования непрерывно возрастает. Лазерное технологическое оборудование широко применяется для размерной обработки, раскроя материалов,

сварки, поверхностной обработки, легирования и наплавки, маркировки и гравировки. Особое место занимают лазерные технологии для прецизионной микрообработки, микро-сверления, микросварки, маркировки и гравировки с высоким разрешением изделий электронной техники (ИЭТ). В качестве источников излучения для этих целей могут эффективно использоваться и уже используются короткоимпульсные, высокочастотные, с малой энергией в импульсе и малым коэффициентом отражения от материала лазеры ближнего инфракрасного, видимого и ультрафиолетового спектра излучения: твердотельные лазеры на основе иттрий-алюминиевого граната с неодимом (Nd:YAG) с  $\lambda = 1064$  нм и дискового иттрий-алюминиевого граната с иттербием (Yb:YAG) с  $\lambda = 1030$  нм с вариантами удвоения частоты; газовые эксимерные и азотные и, в частности, лазеры на парах меди (ЛПМ). ЛПМ и создаваемые на его основе лазерные системы на парах меди (ЛСПМ) относятся к классу газовых лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов и генерируют на переходах с резонансных (r) на метастабильные уровни (m). По сравнению с другими лазерами, они остаются на сегодня самыми мощными импульсными источниками когерентного излучения в видимой области спектра ( $\lambda = 510,6$  и  $578,2$  нм). Кроме того они обладают большим усилением активной среды ( $k = 10\text{-}10^2$  Дб/м) при короткой длительности импульсов ( $\tau_{\text{имп.}} = 20\text{-}40$  нс) и малой импульсной энергией ( $W = 0,1\text{-}10$  мДж) при высоких частотах повторения импульсов ( $f = 5\text{-}30$  кГц) [1-10].

Применение импульсного ЛПМ в технологическом оборудовании для прецизионной микрообработки материалов ИЭТ и в других современных областях (разделение изотопов и получение особо чистых веществ для нужд ядерной энергетики, медицинские технологии, накачка перестраиваемых по длинам волн лазеров на красителях, спектральный анализ состава веществ, локация и навигация, нанотехнология и др.) требует не только точного знания пространственно-временных и энергетических характеристик излучения, но и возможности ЛПМ по формированию пучков излучения с высоким (необходимым) качеством и со стабильными параметрами.

Цель данной работы – создание и исследование импульсного ЛПМ с однопучковым (одномодовым) излучением с дифракционной расходимостью и высокой стабильностью положения оси диаграммы направленности, когда возможно фокусировка пучка излучения в пятно с четкими границами диаметром 5-20 мкм и плотностью пиковой мощности не менее  $10^9 \dots 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>, достаточными для эффективной микрообработки металлических и неметаллических материалов ИЭТ. Поскольку обработка идет преимущественно в испарительном режиме с малого участка (5-20 мкм), малых значениях импульсной энергии (0,1-1 мДж) и высоких частотах повторения импульсов (5-30 кГц), то достигается и высокое качество реза (минимальная зона термического воздействия (ЗТВ) и шероховатость) и высокая производительность.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- проведен анализ особенностей формирования многопучковой структуры выходного излучения ЛПМ с наносекундной длительностью импульсов с известными типами оптических резонаторов;
- разработаны экспериментальные установки и методики для исследования характеристик и измерения параметров выходного излучения ЛПМ;

- проведены экспериментальные и теоретические исследования структуры, пространственных, временных и энергетических характеристик излучения ЛПМ с оптическими резонаторами, обладающими высокой пространственной селективностью: с неустойчивым резонатором (НР) с двумя выпуклыми зеркалами и телескопическим НР;
- определены условия формирования в ЛПМ с высокоселективными оптическими резонаторами однопучкового излучения с дифракционной расходимостью и высокой стабильностью положения оси диаграммы направленности;
- применены ЛПМ и ЛСПМ с однопучковым излучением дифракционного качества в составе технологического оборудования типа «Каравелла» для изготовления прецизионных деталей ИЭТ. При лазерной микрообработке достигается высокое качество реза: ЗТВ  $\leq 5 \dots 10$  мкм, шероховатость  $\leq 1 \dots 3$  мкм и на порядок повышается производительность по сравнению с известными традиционными способами обработки, включая и электроэрозионную обработку (ЭЭО).

## 1. Особенности формирования излучения в импульсном ЛПМ

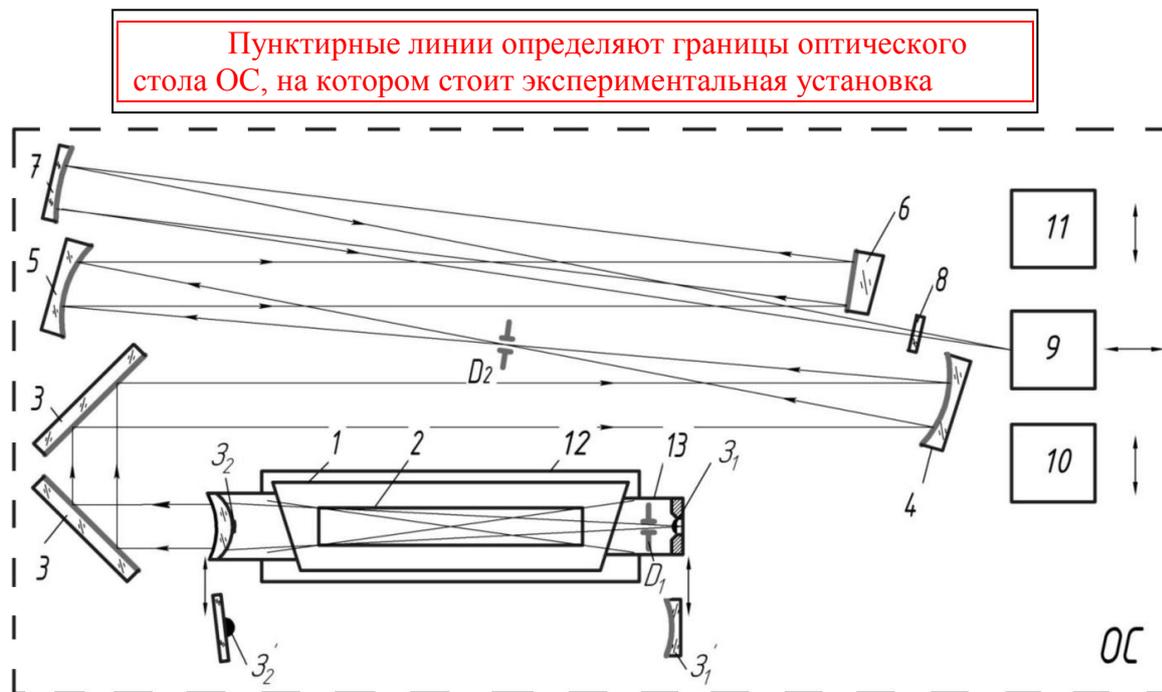
Одним из главных отличий импульсного ЛПМ от лазеров других типов является сочетание короткого времени существования инверсии населенностей ( $\tau = 20-40$  нс), соизмеримое со временем пробега излучения в резонаторе ( $L = 0,5-2,0$  м), с большим усилением активной среды ( $k = 10-10^2$  Дб/м). Благодаря высоким усилениям ЛПМ может работать в режиме сверхсветимости: без зеркал или с одним зеркалом, но при этом излучение некогерентное. В режиме работы ЛПМ с оптическим резонатором за время существования инверсии населенностей ( $\tau$ ) лазерное излучение успевает пройти в резонаторе лишь несколько раз ( $N = \tau / (L/c)$ , где  $L$  – длина резонатора,  $c$  – скорость света) и моды в обычном их понимании, образующиеся в результате сотни проходов, формироваться не успевают. С традиционными плоскопараллельным, плоскосферическим и другими резонаторами расходимость пучка излучения ЛПМ остается на два порядка больше дифракционного (минимального) предела и потому пучок невозможно сфокусировать в малое пятно с высокой плотностью пиковой мощности ( $\geq 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>), необходимой для эффективной микрообработки материалов.

Поэтому в данной работе применительно к импульсному ЛПМ проведены исследования структуры, пространственных, временных и энергетических характеристик излучения с оптическими системами, обладающими высокой пространственной селективностью: НР с двумя выпуклыми зеркалами и телескопическими НР. Телескопический резонатор был впервые применен и исследован в ЛПМ в работах [11-15], в которых было показано, что при больших увеличениях резонатора (сотни крат) формируются пучки с дифракционной расходимостью. Но авторами этих работ не была раскрыта полностью динамика формирования и структура выходного пучка излучения, что оказалось самым важным для практических применений. Несколько позже, но уже другой известной группой исследователей и разработчиков [5, 16-20] было установлено, что выходное излучение ЛПМ телескопический НР имеет многопучковую структуру, каждый пучок в которой в процессе формирования приобретает свои пространственные, временные и энергетические характеристики. При этом дифракционному пучку всегда предшествуют несколько

пучков с большей расходимостью, причём нестабильности оси диаграммы направленности дифракционного пучка соизмеримы с его расходимостью. В таком виде выходное излучение оказалось просто не пригодным для качественной микрообработки, что не позволяло использовать ЛПМ в технологическом оборудовании. Наша задача состояла в том, чтобы найти условия, при которых в ЛПМ с высокоселективными резонаторами возможно формирование однопучкового излучения дифракционного качества со стабильными параметрами, пригодного для качественной микрообработки материалов.

## 2. Экспериментальная установка и методики исследований

Экспериментальная установка для исследования характеристик выходного пучка излучения импульсного ЛПМ представлена на рис.1. Исследования ЛПМ проводились с оптическими системами, обладающими высокой пространственной селективностью: с НР с двумя выпуклыми зеркалами ( $Z_1-Z_2$ ) и телескопическим НР ( $Z'_1-Z'_2$ ). В качестве активных элементов (АЭ) в ЛПМ применялись самые «мощные» промышленные отпаянные АЭ из серии «Кулон»: модели ГЛ-206Д со средней мощностью излучения 15 Вт и ГЛ-206И мощностью 20 Вт [5].



**Рис.1.** Экспериментальная установка для исследования характеристик выходного излучения импульсного ЛПМ с оптическими системами с высокой пространственной селективностью:

ОС – оптический сотовый стол типа 1НТ10-20-20 с пневмоизоляторами АР-500 и АР-1000, расположенными между столом и четырьмя опорами модели 1ТS065-12-06 (фирмы Standa); 1 – АЭ; 2 – разрядный канал АЭ;  $Z_1$  – выпуклое зеркало;  $Z_1-Z_2$  – НР с двумя выпуклыми зеркалами;  $Z'_1-Z'_2$  – телескопический НР; 3 – плоские поворотные зеркала;  $D_1$  – диафрагма с отверстием  $d = 0,1$  мм;  $D_2$  – диафрагма пространственного фильтра-коллиматора (ПФК); 4 и 5 – входное и выходное вогнутые зеркала коллиматора ПФК с радиусом кривизны  $R = 1,25$  м; 6 – светоделительная пластина с коэффициентом отражения  $\rho = 4\%$ ; 7 – фокусирующее зеркало с радиусом кривизны  $R = 15$  м; 8 – нейтральный светофильтр; 9 – измеритель мощности излучения (милливольтметр М136 с преобразователем мощности лазерного излучения ТИ-3); 10 – осциллограф цифровой GDS-840S с фотоэлементом ФЭК-14К; 11 – анализатор пучка излучения BeamStar-FX, 12 – водоохлаждаемый теплосъемник; 13 – фторопластовые (герметизирующие) трубки.

На рис.2 представлен внешний вид промышленных отпаянных АЭ «Кулон» модели ГЛ-206Д (15 Вт) и ГЛ-206И (20Вт).



Рис.2. Внешний вид промышленных отпаянных АЭ «Кулон»

Накачка (разогрев и возбуждение) АЭ ЛПМ производилась высоковольтным импульсным ИП с тиратронным модулятором, выполненным по схеме емкостного удвоения напряжения с двумя звеньями магнитного сжатия наносекундных импульсов тока и анодным реактором (рис.3) [5, 21-22]. ИП с данной электрической схемой исполнения модулятора остается на сегодня для ЛПМ самым надежным и эффективным генератором накачки.

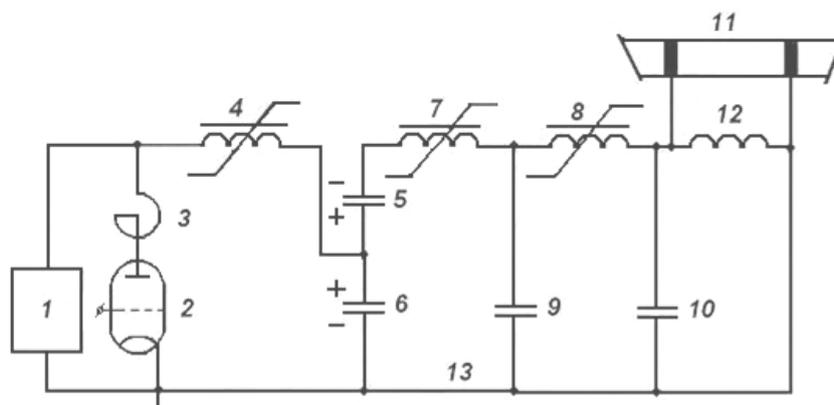


Рис.3. Принципиальная электрическая схема высоковольтного импульсного модулятора ИП:

1 – высоковольтный выпрямитель–зарядное устройство, 2 – тиратронный коммутатор ТГИ1-1000/25 или ТГИ2-1000/25, 3 – анодный реактор, 4, 7 и 8 – первая, вторая и третья нелинейные индуктивности, 5 и 6 – последовательно соединенные накопительные конденсаторы емкостью (1000+1000) пФ; 9 – накопительный конденсатор емкостью 500 пФ; 10 – обострительный конденсатор емкостью 110 пФ; 11 – АЭ с параллельно подключенной индуктивностью 12; 13 – общая «земляная» шина

На рис.4 представлено схематическое изображение АЭ «Кулон» ГЛ-206Д и ГЛ-206И без зеркал. Показаны основные функциональные узлы, габаритные размеры АЭ и его разрядного канала, необходимые для анализа и расчета пространственно-временных характеристик излучения:  $l_0$  – расстояние от выходного окна (поз.7) до торца разрядного канала (поз.2);  $l_0'$  – расстояния от выходного окна (поз.7) до активной среды разрядного канал (поз.2);  $l_k$  – длина разрядного канала (расстояние между электродами (поз.6));  $l_{AC}$  – длина

активной среды (расстояние между конденсорами паров меди (поз.4)). АВ – выходная апертура АЭ, равная внутреннему диаметру  $D_k$  разрядного канала,  $\alpha_1$  – угол распространения пучка сверхсветимости, сформированного суммарной геометрической апертурой разрядного канала ( $D_k/l_k$ ) из усиливающихся спонтанных затравок. В пределах этого угла сосредоточено примерно 95% энергии выходного излучения.

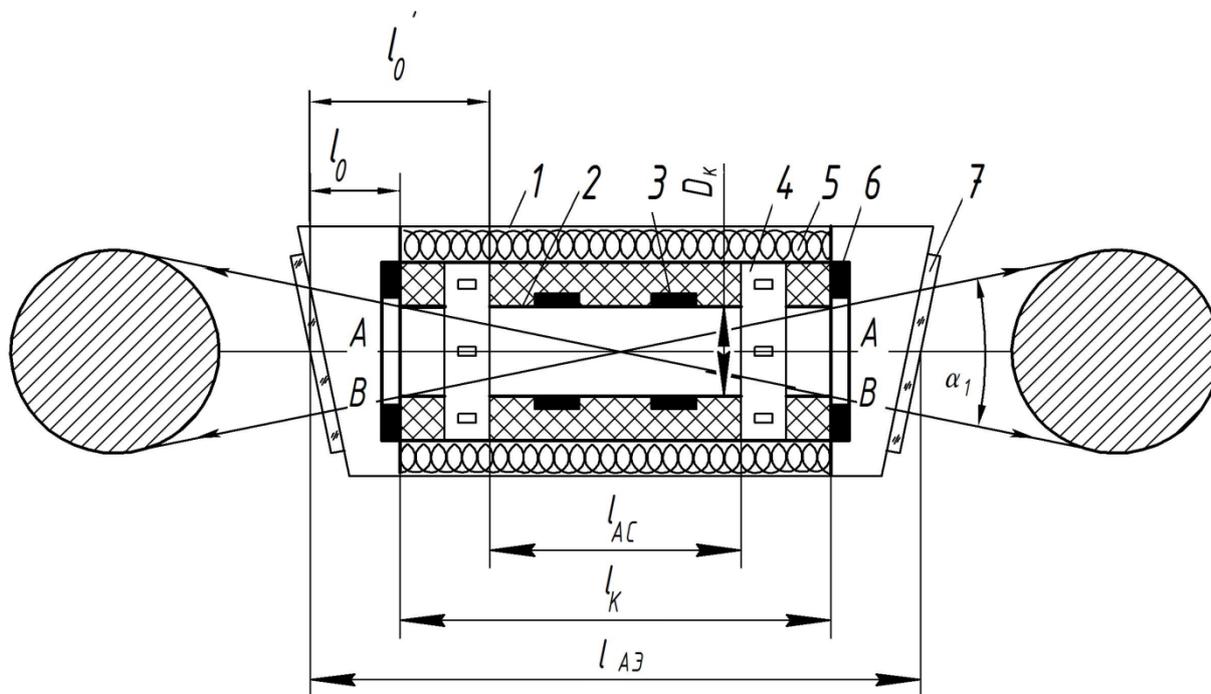


Рис.4.Схематическое изображение АЭ «Кулон» ЛПМ без зеркал:

1 – вакуумноплотная оболочка; 2 – разрядный канал; 3 – генераторы паров меди; 4 – конденсоры паров меди; 5 – теплоизолятор; 6 – электроды; 7 – выходные окна;  $l_{AЭ}$  – длина АЭ;  $D_k$  и  $l_k$  – диаметр и длина разрядного канала;  $l_{AC}$  – длина активной среды (АС);  $l_0$  и  $l_0'$  – расстояния от выходного окна до разрядного канала и активной среды соответственно;  $\alpha_1$  – угол распространения пучка сверхсветимости

Геометрические размеры АЭ моделей ГЛ-206Д и ГЛ-206И, необходимые для проведения расчетов расходимости излучения и временных параметров, приведены в табл.1.

Таблица 1. Основные геометрические размеры АЭ моделей ГЛ-206Д и ГЛ-206И

Модель АЭ	Геометрические размеры, мм			
	$l_{AЭ}$	$l_k$	$l_{AC}$	$l$
ГЛ-206Д	770	515	440	692
				892
ГЛ-206И	900	640	565	816
				1016

Глухое выпуклое зеркало  $Z_1$  НР с двумя выпуклыми зеркалами (рис.1) установлено в зачерненную металлическую оправу с конической поверхностью. Выходное зеркало  $Z_2$  этого резонатора представляет собой просветленную положительную линзу в виде выпук-

ло-вогнутого мениска, на выпуклой поверхности которого нанесено зеркальное пятно диаметром 1...1,5 мм [23]. Фокус линзы зеркала  $Z_2$  совмещен с фокусом глухого зеркала  $Z_1$ , так что расходящийся пучок НР преобразуется в параллельный (цилиндрический) с минимальной расходимостью и что удобно для практических применений. В первых экспериментах применялось выходное выпуклое зеркало диаметром 1,5 мм, приклеенное на плоскопараллельную просветленную стеклянную пластину ( $Z'_2$ ). Угол между оптической осью этого зеркала и пластиной составлял  $86^\circ$ , что устраняло обратную «паразитную» связь от пластины с активной средой АЭ. В этом случае пучок из резонатора выходит расходящимся и для его коллимирования в параллельный пучок требовался дополнительный оптический элемент. В телескопическом НР фокус глухого вогнутого зеркала  $Z'_1$  совмещен с фокусом выходного выпуклого зеркала  $Z'_2$ , что является основным условием для формирования непосредственно в резонаторе параллельного пучка с плоской волной.

В экспериментальной установке измерение средней мощности излучения производилось с помощью милливольтметра М136 с подключенным к нему преобразователем мощности лазерного излучения ТИ-3 (поз.9), регистрация импульсов излучения – осциллографом типа GDS-840S с фотоэлементом ФЭК-14К (поз.10), исследование распределения интенсивности и измерение диаметра в фокальной плоскости (практически в перетяжке по уровню  $1/e^2$ ) сфокусированного пучка излучения – анализатором пучка излучения BeamStar-FX (поз.11). Так как считается, что распределение интенсивности в фокальной плоскости (перетяжке) соответствует распределению в дальней зоне ( $>D^2/\lambda$ , где  $D$  – диаметр пучка,  $\lambda$  – длина волны излучения), то для практического определения расходимости ( $\theta$ ) пучков излучения ЛПМ использовался самый простой метод – метод фокального пятна:

$$\theta = d_0/F \quad (1)$$

где  $d_0$  - диаметр сфокусированного пучка излучения в фокальной плоскости (в перетяжке),  $F$ - фокусное расстояние фокусирующего оптического элемента. Во всех ниже рассматриваемых случаях расходимость излучения ЛПМ приводилась к диаметру апертурного канала АЭ ( $D_k=14$  мм). Дифракционная расходимость ЛПМ с  $D_k=14$  мм составляет 0,1 мрад ( $\theta_{\text{дифр.}}=2,44 \lambda/D_k$ ).

Важным технологическим параметром при микрообработке импульсным лазерным излучением является плотность пиковой мощности, определяющей качество реза материала и производительность обработки. Плотность пиковой мощности определяется по формуле

$$\rho = \frac{P_{\text{изл}}}{f\tau\pi r^2} \quad (2)$$

где  $P_{\text{изл}}$  – средняя мощность излучения,  $f$  – частота повторения импульсов (ЧПИ),  $\tau$  – длительность импульсов излучения по полувысоте,  $r$  – радиус сфокусированного пятна излучения. В наших экспериментах рабочая ЧПИ ЛПМ составляла  $f= 14\text{-}15$  кГц, длительность импульсов излучения (по полувысоте)  $\tau=10\text{...}13$  нс.

### 3. Структура и характеристики излучения ЛПМ в режиме с НР с двумя выпуклыми зеркалами. Условия формирования однопучкового излучения с дифракционной расходимостью и стабильными параметрами

Исследования ЛПМ в режиме с НР с двумя выпуклыми зеркалами проводились с целью получения однопучкового излучения с дифракционной расходимостью и высокой стабильностью положения оси диаграммы направленности и импульсной энергии. На рис.5 представлена его оптическая схема с указанием геометрических размеров, необходимых для проведения расчетов расходимости и временных параметров импульсов излучения.

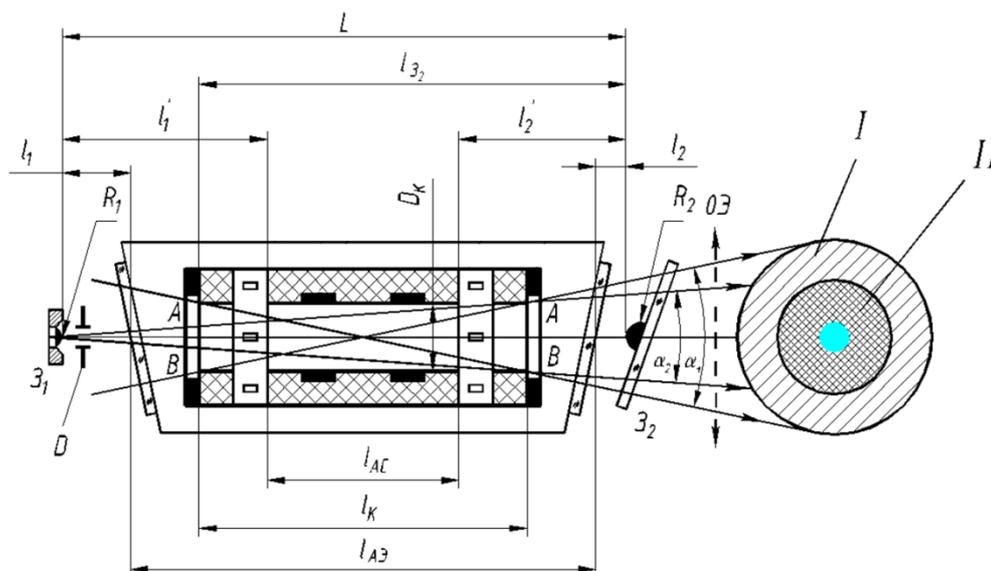


Рис.5. Оптическая схема ЛПМ с АЭ «Кулон» в режиме с НР с двумя выпуклыми зеркалами:

$Z_1$  и  $Z_2$  – глухое и выходное зеркала НР с радиусами кривизны  $R_1$  и  $R_2$ ;  $D$  – диафрагма 0,1 мм;  $L$  – длина резонатора,  $l_{АЭ}$  – длина АЭ;  $l_K$  и  $D_K$  – длина и диаметр разрядного канала;  $l_{AC}$  – длина АС;  $l_1$  и  $l_1'$  – расстояние от зеркала  $Z_1$  до АЭ и до АС;  $l_2$  и  $l_2'$  – расстояние от зеркала  $Z_2$  до АЭ и до АС;  $l_{3_2}$  – расстояние от зеркала  $Z_2$  до выходной апертуры АВ разрядного канала;  $\alpha_1$  – угол распространения некогерентного пучка сверхсветимости, сформированного суммарной геометрической апертурой разрядного канала;  $\alpha_2$  – угол распространения резонаторного (качественного) пучка излучения; I и II – распределение интенсивности пучка сверхсветимости и резонаторного пучка излучения в ближней зоне; ОЭ – коллимирующий или фокусирующий оптический элемент или система

НР с двумя выпуклыми зеркалами по сравнению с известным телескопическим НР [16-18] и режимом с одним выпуклым зеркалом [19-20] потенциально обладает максимальной пространственной селективностью и, соответственно, возможностью формирования однопучкового излучения с минимальной расходимостью уже за первый проход излучения в резонаторе.

Тщательный анализ ранее опубликованных работ по динамике формирования в импульсном ЛПМ с оптическими резонаторами многопучковой структуры выходного излучения [5, 11-15, 16-20] и проведенных нами исследований и расчетов с НР, позволили установить, что в НР с двумя выпуклыми зеркалами возможно формирование строго одно-

пучкового излучения дифракционного качества ( $\alpha_2 = D_k/l$ ) непосредственно на фоне некогерентного апертурного пучка сверхсветимости ( $\alpha_2 = 2D_k/l_k$ ), но при обязательном выполнении трех взаимосвязанных условий.

1) Глухое зеркало  $Z_1$  НР должно быть установлено от АС на расстоянии, равном не менее суммы половины длины АС и расстояния от выходного зеркала  $Z_2$  до АС и не более разности половины расстояния проходимого излучением за время существования инверсии и суммы длины АС и расстояния от выходного зеркала  $Z_2$  до АС, т.е.

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

Это очень важное положение, т.к. оно позволяет начать процесс формирования резонаторного пучка от выходного зеркала  $Z_2$ . И тогда формирование пучка в резонаторе идет в следующей последовательности: АС→выходное зеркало  $Z_2$ →АС→глухое зеркало  $Z_1$ →АС→выход (со стороны  $Z_2$ ). На начальной стадии часть излучения от апертурного пучка сверхсветимости с  $\alpha_1 = 2D_k/l_k$  зеркалом  $Z_2$  отражается обратно в АС разрядного канала. Затем, усилившись в АС, успевает раньше выйти из ближнего к «глухому» зеркалу  $Z_1$  конца АС, чем успеет дойти до АС отраженная зеркалом  $Z_1$  часть излучения от того же апертурного пучка сверхсветимости. При этом отраженная от зеркала  $Z_1$  часть излучения от пучка сверхсветимости с  $\alpha_1 = 2D_k/l_k$  не получит преимущественного усиления в АС и затухает. Т.е. практически создаются условия, препятствующие возникновению второго, «паразитного» для нашего случая, пучка с расходимостью близкой к дифракционной.

2) Выходное зеркало  $Z_2$  НР должно быть максимально приближено к АЭ и иметь радиус кривизны больше, чем у глухого зеркала  $Z_1$ . При этом, чтобы селективность излучения в резонаторе была максимальной, глухое зеркало должно иметь малый радиус кривизны ( $R_1 = 0,6...3$  см) (как и в однозеркальном режиме) – на 1-2 порядка меньше расстояния от зеркала  $Z_1$  до выходной апертуры разрядного канала  $AB$  ( $R_1 < l/10...100$ ). При этих условиях обратная связь от зеркала  $Z_2$  с АС начинается раньше и с большей рабочей поверхности, что является дополнением к первому условию, препятствующему возникновению от зеркала  $Z_1$  второго нежелательного пучка с расходимостью близкой к дифракционной.

3) При выполнении условий 1 и 2 параметры НР должны удовлетворять требованиям, обеспечивающим формирование дифракционного пучка излучения уже за первый двойной проход излучения в резонаторе, иначе теряется смысл практического применения НР с двумя выпуклыми зеркалами.

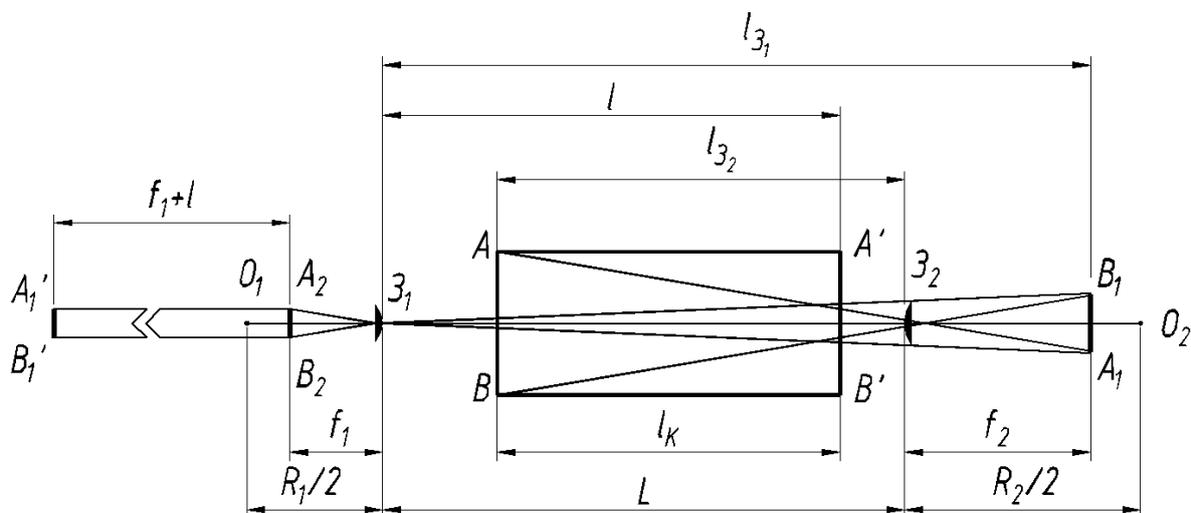
Для выполнения третьего условия необходимо было установить зависимость расходимости резонаторного пучка ( $\theta$ ), формируемого в нем за первый двойной проход излучения, от параметров НР, геометрических размеров апертуры разрядного канала и АЭ. С этой целью необходимо было вывести формулу для расчета расходимости, провести расчеты и экспериментальные исследования при малых радиусах кривизны зеркал. Для этого, на основе законов геометрической оптики, была построена оптическая схема (рис. 6) для определения последовательного перемещения изображения апертуры АЭ в выпуклых зеркалах НР в принятом направлении формирования пучка излучения (см. первое условие) с

указанием геометрических размеров, необходимых для проведения расчетов. Для определения месторасположения изображения и его размеров использовались формулы для выпуклого сферического зеркала

$$\frac{1}{l} - \frac{1}{f} = -\frac{R}{2} \quad (4)$$

$$\frac{H}{h} = \frac{f}{l} \quad (5)$$

где  $l$  – расстояние от предмета до зеркала (на рис. 6 –  $l_{3_1}$  и  $l_{3_2}$ );  $f$  – расстояние от изображения предмета в зеркале до зеркала (на рис. 6 –  $f_1$  и  $f_2$ );  $h$  и  $H$  – размер предмета и изображения предмета в зеркале (на рис. 6 –  $AB$ ,  $A'B'$  и  $A_1B_1$ ,  $A_2B_2$ ).  $AB=A'B'=D_k$  – диаметр апертуры разрядного канала АЭ.



**Рис.6.** Оптическая схема последовательного перемещения изображения апертуры АЭ в выпуклых зеркалах НР:

$AB=A'B'$  – выходные апертуры разрядного канала АЭ;  $l_k$  – длина разрядного канала АЭ;  $L$  – длина резонатора;  $Z_1$  и  $Z_2$  – глухое и выходное выпуклые зеркала резонатора с радиусом кривизны  $R_1$  и  $R_2$ ;  $l$  – расстояние от зеркала  $Z_1$  до выходной апертуры  $A'B'$ ;  $l_{3_2}$  – расстояние от зеркала  $Z_2$  до выходной апертуры  $AB$ ;  $A_1B_1$  – изображение в зеркале  $Z_2$  выходной апертуры  $AB$ ;  $f_2$  – расстояние от зеркала  $Z_2$  до изображения  $A_1B_1$ ;  $l_{3_1}$  – расстояние от зеркала  $Z_1$  до изображения  $A_1B_1$ ;  $A_2B_2$  – изображение изображения  $A_1B_1$  в зеркале  $Z_1$ ;  $f_1$  – расстояние от зеркала  $Z_1$  до изображения  $A_2B_2$ ;  $A_1'B_1'$  – изображение выходной апертуры  $A'B'$  в изображении  $A_2B_2$

Полученная формула для расчета расходимости пучка излучения (с учетом дифракционного предела) имеет вид

$$\theta = \frac{D_k \cdot R_1 \cdot R_2}{4 \cdot (R_1 + 2f_2 + 2L)(R_2 + 2l_{3_2})(l + f_1)} + \frac{2,44\lambda}{D_k}, \quad (6)$$

где  $f_2 = \frac{R_2 \cdot l_{3_2}}{R_2 + 2l_{3_2}}$ ,  $l_{3_2} = \frac{l_{AЭ} + l}{2} + l_2$ ,  $f_1 = \frac{R_1 \cdot l_{3_1}}{R_1 + 2l_{3_1}} = \frac{R_1(L + f_2)}{R_1 + 2(L + f_2)}$ .

В табл.2 и 3 представлены результаты расчета расходимости выходного пучка излучения по формуле (6) для ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д при разных радиусах кривизны выходного зеркала  $Z_2$  резонатора –  $R_2=15; 30; 50; 120$  и  $250$  мм, радиусе кривизны глухого

зеркала  $Z_1$   $R_1 = 30$  мм и расстояний от глухого  $Z_1$  и выходного  $Z_2$  зеркал до АЭ соответственно  $l_1 = 50$  и  $250$  мм и  $l_2 = 100$  мм (рис.5). Диаметр апертуры АЭ  $D_k = 14$  мм. При этих же радиусах зеркал и расстояний до АЭ проводились и экспериментальные исследования.

**Таблица 2.** Расходимость излучения для ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д:  $l_1 = 50$  мм,  $l_2 = 100$  мм,  $l_3 = 740$  мм,  $l = 692$  мм,  $L = 920$  мм

$R_2$ , мм	15	30	50	120	250
$\theta \times 10^{-3}$ , рад	0,1016	0,1031	0,1051	0,1112	0,1206

**Таблица 3.** Расходимость излучения для ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д:  $l_1 = 250$  мм,  $l_2 = 100$  мм,  $l_3 = 740$  мм,  $l = 892$  мм,  $L = 1120$  мм

$R_2$ , мм	15	30	50	120	250
$\theta \times 10^{-3}$ , рад	0,1070	0,1020	0,1033	0,1073	0,1135

В таблицах 4 и 5 представлены результаты расчета расходимости ЛПМ с АЭ ГЛ-206И.

**Таблица 4.** Расходимость излучения для ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206И:  $l_1 = 50$  мм,  $l_2 = 100$  мм,  $l_3 = 830$  мм,  $l = 816$  мм,  $L = 1050$  мм

$R_2$ , мм	15	30	50	120	250
$\theta \times 10^{-3}$ , рад	0,1011	0,1021	0,1034	0,1076	0,1141

**Таблица 5.** Расходимость излучения для ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206И:  $l_1 = 250$  мм,  $l_2 = 100$  мм,  $l_3 = 830$  мм,  $l = 1016$  мм,  $L = 1250$  мм

$R_2$ , мм	15	30	50	120	250
$\theta \times 10^{-3}$ , рад	0,1007	0,1014	0,1023	0,1052	0,1097

Из анализа табл.2-5 следует, что в ЛПМ с НР с двумя выпуклыми зеркалами, когда радиус кривизны глухого  $R_1$  (30 мм) и выходного  $R_2$  (15; 30 и 50 мм) зеркал на 1...2 порядка меньше длины резонатора  $L$  (920, 1120, 1050 и 1250 мм) значение расходимости пучка, формируемого за первый двойной проход излучения в резонаторе, становится равным дифракционному пределу ( $\theta_{\text{дифр}} = 0,1 \times 10^{-3}$  рад). Таким образом, расчеты показывают, что применение в ЛПМ высокоселективного НРс двумя выпуклыми зеркалами, по сравнению с известными типами резонаторов, позволяет сформировать пучок дифракционного качества уже за первый двойной проход излучения в резонаторе и непосредственно от некогерентного апертурного пучка сверхсветимости.

В табл.6 и 7 представлены измеренные значения суммарной средней мощности излучения ( $P$ ) и мощности в дифракционном пучке ( $P_{\text{дифр}}$ ) ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д при разных значениях радиуса кривизны выходного зеркала  $Z_2$ :  $R_2 = 0$ ; 30; 50 и 120 мм и постоянных радиусе кривизны глухого зеркала  $Z_1$   $R_1 = 30$  мм и расстоянии от выходного зеркала  $Z_2$  до АЭ  $l_2 = 100$  мм. При  $R_2 = 0$ , когда режим однозеркальный т.е. отсутствует

выходное зеркало 32, качественный пучок не является строго дифракционным, т.к. его расходимость в 4...5 раз больше дифракционного предела.

**Таблица 6.** Суммарная средняя мощность излучения и мощность в дифракционном пучке ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д: расстояние от глухого зеркала  $3_1$  до АЭ  $l_1 = 50$  мм

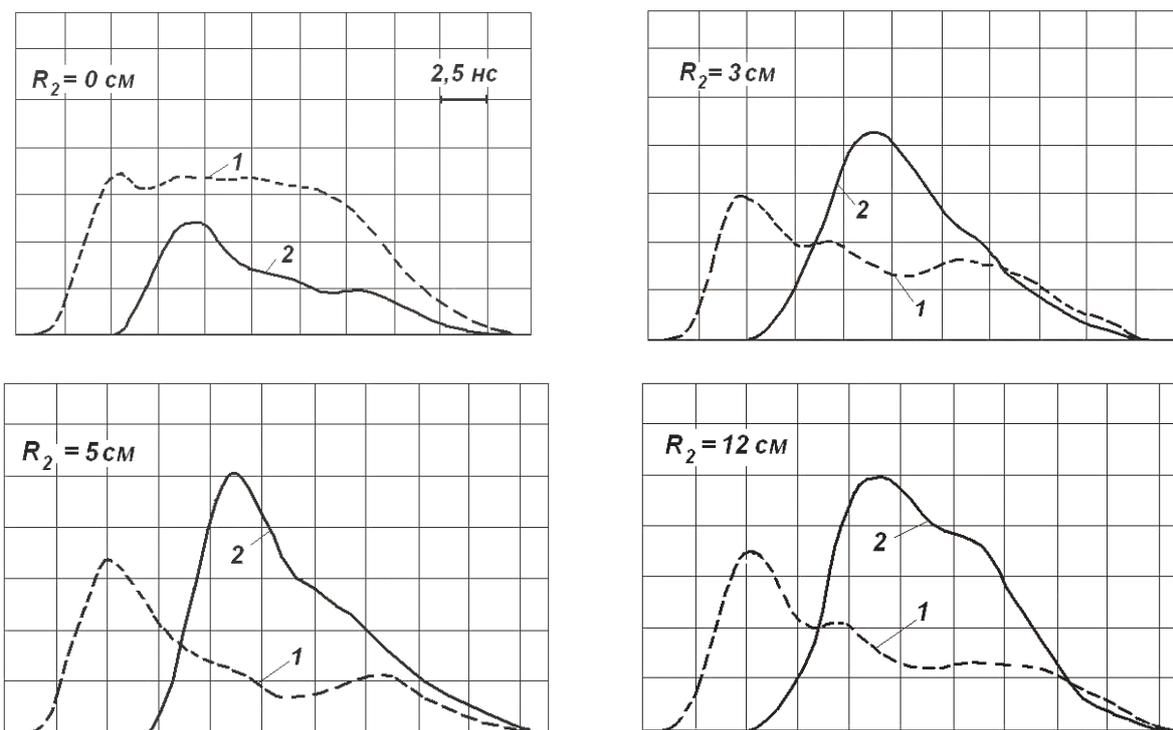
$R_2$ , мм	0	30	50	120
$P$ , Вт	2,6	1,4	2,3	1,8
$P_{\text{дифр.}}$ , Вт	0,72	0,6	1,0	0,93

**Таблица 7.** Суммарная средняя мощность излучения и мощность в дифракционном пучке ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д: расстояние от глухого зеркала  $3_1$  до АЭ  $l_1 = 250$  мм

$R_2$ , мм	0	30	50	120
$P$ , Вт	2,6	1,54	2,4	2,3
$P_{\text{дифр.}}$ , Вт	0,66	0,7	1,05	1,08

Как видно из табл.6 и 7, значение средней мощности излучения в дифракционном пучке находится в пределах  $P_{\text{дифр.}}=0,6-1,1$  Вт. Мощность при  $l_1=250$  мм несколько выше, чем при  $l_1 = 50$  мм, т.к. условия для бесконкурентного формирования в резонаторе дифракционного пучка ближе к выполнению основного первого условия.

На рис.7 представлены примеры осциллограмм фонового некогерентного первого и дифракционного второго пучков излучения.



**Рис.7.** Осциллограммы импульсов фонового (1) и дифракционного (2) пучков излучения ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д в режиме НР с двумя выпуклыми зеркалами.

Радиус кривизны глухого зеркала  $R_1 = 30$  мм, выходного зеркала  $R_2 = 0; 30; 50$  и  $120$  мм, диаметр ограничивающей диафрагмы на глухом зеркале равен  $D = 0,1$  мм. Расстояние от глухого зеркала до АЭ  $l_1 = 250$  мм

Длительность суммарного импульса излучения по основанию составляет  $\tau \cong 25$  нс. Как видно из осциллограмм, начало импульса дифракционного пучка излучения 2 отстает от фонового пучка сверхсветимости 1 примерно на 4...6 нс, что практически соответствует одному двойному проходу излучения в резонаторе ( $\Delta t = 2L/c$ ) и логике процесса формирования дифракционного пучка в направлении  $AC \rightarrow Z_2 \rightarrow AC \rightarrow Z_1 \rightarrow AC \rightarrow$  выход (условие 1).

Для расчета расходимости излучения ЛПМ по формуле (1) были проведены экспериментальные исследования по определению минимального диаметра пятна в перетяжке сфокусированного пучка излучения. При этом в лабораторных условиях наблюдались непрерывные хаотические колебания этого пятна излучения, обусловленные нестабильностью положения оси диаграммы направленности пучка, что не позволяло провести точные измерения диаметра пятна. К тому же с таким пятном излучения практически невозможно было производить высококачественную микрообработку материалов. Было установлено, что нестабильности пространственного положения оси диаграммы направленности дифракционного пучка излучения ЛПМ с НР обусловлены высокой чувствительностью элементов и поля резонатора к внешним воздействиям (механическим, тепловым и акустическим) из-за малого размерарабочего участка его выпуклых зеркал (около 100 мкм). Для устранения влияния механических вибраций пола и акустических колебаний на стабильность выходных параметров излучения все элементы оптической системы устанавливались на сотовом оптическом столе типа 1НТ10-20-20 фирмы Standa (рис.1). Кроме того между столом и его четырьмя опорами 1TS065-12-06 были установлены пневмоизоляторы AP-1000, а между опорами и полом — резиновые изоляторы.

Для устранения влияния воздушно-тепловых потоков на параметры излучения поле резонатора с АЭ должно быть замкнутым. С этой целью теплонагруженный АЭ «Кулон» устанавливался в цилиндрический водоохлаждаемый теплосъемник, а пространство между зеркалами и теплосъемником герметизировалось изоляторными трубками с внутренним диаметром, большим диаметра пучка излучения. При этом температура водоохлаждаемого теплосъемника, за счет обратной связи, поддерживалась равной температуре оптического стола при постоянной температуре окружающего воздуха (20...21 °С).

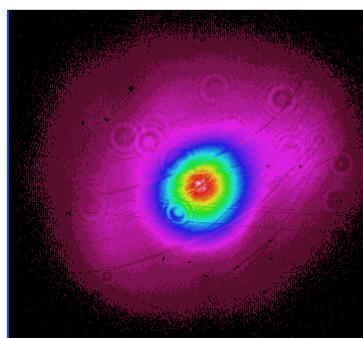
Дополнительного для фиксации пространственного положения оси диаграммы направленности дифракционного пучка излучения непосредственно перед глухим зеркалом  $Z_1$  резонатора устанавливалась ограничительная диафрагма ( $D$  на рис.5). При этом размер отверстия диафрагмы соизмерим с дифракционным пятном на зеркале:

$$D \cong 2.44l/D_k \quad (7)$$

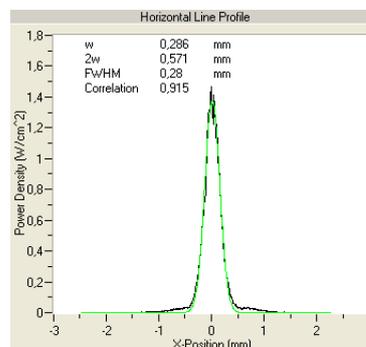
где  $l$  - расстояние от глухого зеркала  $Z_1$  до выходной апертуры АЭ. Например, для АЭ «Кулон» ГЛ-206Д при  $l = 692$  мм (табл.2) диаметр диафрагмы, ограничивающий дифракционное пятно на глухом зеркале  $Z_1$ , в соответствии с (7) составляет около 69 мкм, при  $l = 892$  мм (табл.3) – 89 мкм, для АЭ ГЛ-206И при  $l = 816$  мм (табл.4) и  $l = 1016$  мм (табл.5) – соответственно 82 и 102 мкм.

Эти мероприятия привели практически к полному устранению нестабильностей положения оси диаграммы направленности выходного пучка излучения (более чем на два порядка,  $\Delta\theta < \theta_{\text{дифр}}/100$ ), а также импульсной энергии, т.е. были созданы необходимые условия для качественного проведения экспериментальных исследований.

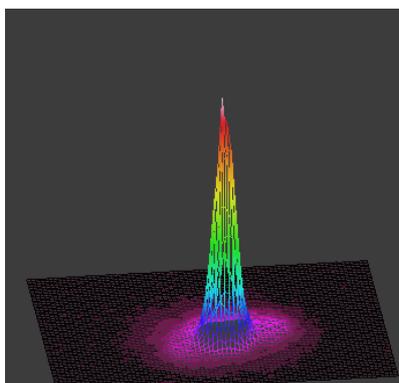
На рис.8 представлен пример распределения интенсивности излучения ЛПМ в режиме с НР с двумя выпуклыми зеркалами в перетяжке сфокусированного пучка.



2d-распределение



Распределение интенсивности по горизонтали



3d-распределение

**Рис.8.** Распределение интенсивности излучения ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д в режиме с НР с двумя выпуклыми зеркалами в перетяжке сфокусированного пучка.

$R_1 = 30$  мм; в качестве выходного зеркала использован положительный мениск с радиусом кривизны выпуклой рабочей поверхности  $R_2 = 70$  мм ( $F = 0,93$  м);  $l_1 = 75$  мм,  $l_2 = 80$  мм,  $L = 920$  мм, диаметр диафрагмы резонатора  $D_1 = 0,1$  мм; диаметр диафрагмы коллиматора  $D_2 = 0,15$  мм;  $P_{\text{изл.}} = 1,3$  Вт

На поле распределения интенсивности в сечении пучка по горизонтали указаны следующие обозначения: W, 2W, FWHM, Correlation, PeakHeight. W – размер перетяжки, определяемой как полуширина профиля по уровню  $1/e^2$  от максимума интенсивности пучка. 2W – полная ширина профиля по уровню  $1/e^2$  от максимума интенсивности пучка. FWHM – полная ширина профиля по половинному максимуму интенсивности пучка. Correlation – наилучшее корреляционное соответствие между профилем пучка и идеальным гауссовым пучком. PeakHeight – высота пика пучка Вт/см<sup>2</sup>.

При этом распределение интенсивности излучения имеет очень высокую степень корреляции с гауссовым пучком – 0,915. Диаметр перетяжки пучка излучения составляет  $2W = 0,571$  мм, что соответствует дифракционной расходимости пучка –  $\theta_{\text{дифр.}} = 0,1$  мрад.

Средняя мощность излучения в дифракционном пучке была равной  $P_{\text{дифр.}} = 1,3$  Вт. Нестабильности положения оси диаграммы направленности дифракционного пучка, а также импульсной энергии практически не наблюдались, о чем свидетельствовало устойчивое положение на экране сфокусированного пятна.

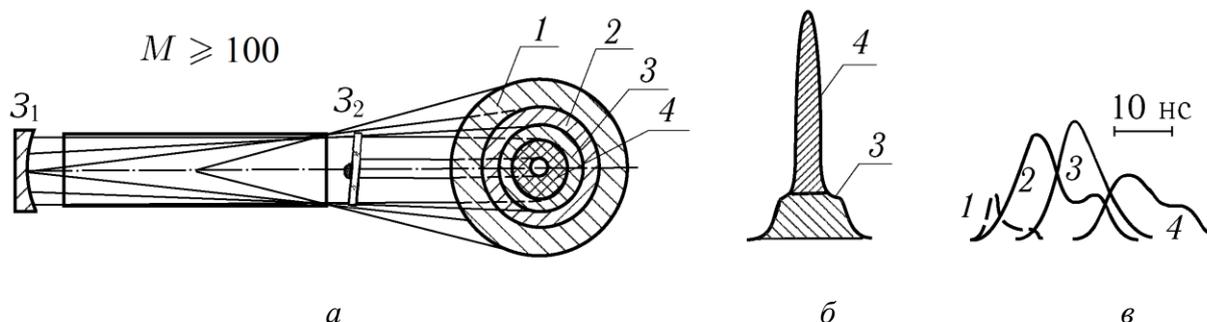
Из анализа рассмотренных выше экспериментальных и теоретических исследований следует следующий основной вывод. В импульсном ЛПМ в режиме с НР с двумя выпуклыми зеркалами формирование однопучкового излучения с дифракционной расходимостью обеспечивается при обязательном выполнении трех взаимосвязанных условий и радиусах кривизны зеркал  $R = 1-10$  см. Применение оптического сотового стола с виброгасящими опорами, размещение теплонагруженного АЭ в охлаждаемый теплосъемник, герметизация поля НР и поддержание в конструкции экспериментальной установки постоянной температуры позволили избавиться от нестабильности оси диаграммы направленности дифракционного пучка и импульсной энергии. Эти мероприятия существенно повысили качество микрообработки материалов.

В виду того, что в ЛПМ при работе в режиме с НР с двумя выпуклыми зеркалами мощность излучения в дифракционном пучке имеет небольшие значения –  $1 \dots 1,5$  Вт, что составляет примерно 10% от суммарной мощности излучения, то самым его перспективным применением является использование в качестве задающего генератора (ЗГ) в лазерной системе на парах меди (ЛСПМ), работающей по эффективной схеме задающий генератор — пространственный фильтр-коллиматор – усилитель мощности (ЗГ – ПФК – УМ). Конструктивно проще и удобно для пространственного согласования дифракционного пучка ЗГ с апертурой активной среды УМ использования НР в качестве выходного зеркала положительного выпукло-вогнутого мениска (рис.1) [23]. Средняя мощность излучения и соответственно плотность пиковой мощности дифракционного пучка в ЛСПМ с применением в качестве УМ промышленных отпаянных АЭ [5] может быть увеличена на 1-2 порядка: с АЭ серии «Кулон» моделей ГЛ-206Д и ГЛ-206И до 15-25 Вт и  $10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>, с АЭ «Кристалл» моделей ГЛ-205А, ГЛ-205Б и ГЛ-205В – до 30-100 Вт и  $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>, что существенно повышает производительность микрообработки и толщину обрабатываемого материала до  $1 \dots 2$  мм.

ЛСПМ типа ЗГ – ПФК – УМ с применением в ней в качестве ЗГ импульсного ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д и НР с двумя выпуклыми зеркалами, в качестве УМ активного элемента ГЛ-206Д или ГЛ-206И явились основой для создания современных автоматизированных лазерных технологических установок (АЛТУ) типа «Каравелла-1» и «Каравелла-1М» для изготовления прецизионных деталей ИЭТ [5, 24-26]. На АЛТУ «Каравелла-1» мощностью излучения 10-15 Вт производительно обрабатываются металлические материалы толщиной до 0,5 мм и неметаллические до  $1 \dots 1,2$  мм, на «Каравелла-1М» – до 1 мм и до  $1,5 \dots 1,8$  мм соответственно.

#### 4. Исследования по повышению качества излучения ЛПМ с телескопическим НР

Исследования по повышению качества выходного излучения ЛПМ в режиме с телескопическим НР ( $3'_1-3'_2$ ) проводились на экспериментальной установке, представленной на рис.1. В качестве АЭ в экспериментах использовался промышленный отпаянный АЭ «Кулон» ГЛ-206И, описанный в разделе 2. Телескопический НР применялся с увеличением  $M=220$ . Глухое вогнутое сферическое зеркало  $3_1$  имело радиус кривизны поверхности  $R_1=2200$  мм, выходное выпуклое сферическое зеркало –  $R_2=10$  мм, так что длина резонатора ( $L$ ) составляла практически 1000 мм. Динамика формирования и структура выходного излучения ЛПМ с данным НР была раскрыта и подробно исследована в работах [5, 17-18] и было установлено, что при увеличениях сотни крат ( $M=100-300$ ) формируются пучки с дифракционной и близкой к ней расходимостью. При  $M=100-300$  структура выходного излучения четырехпучковая (рис.9) – два пучка сверхсветимости: пучок 1, сформированный суммарной геометрической апертурой разрядного канала АЭ, и пучок 2, сформированный глухим зеркалом  $3_1$  и выходной апертурой разрядного АЭ, и два резонаторных пучка 3 и 4.



**Рис.9.** Структура, распределение интенсивности в ближней (*а*) и дальней (*б*) зонах и осциллограммы импульсов (*в*) выходного излучения ЛПМ в режиме с телескопическим НР при увеличении  $M \geq 100$ :

1, 2 – пучки сверхсветимости, 3 и 4 – резонаторные пучки

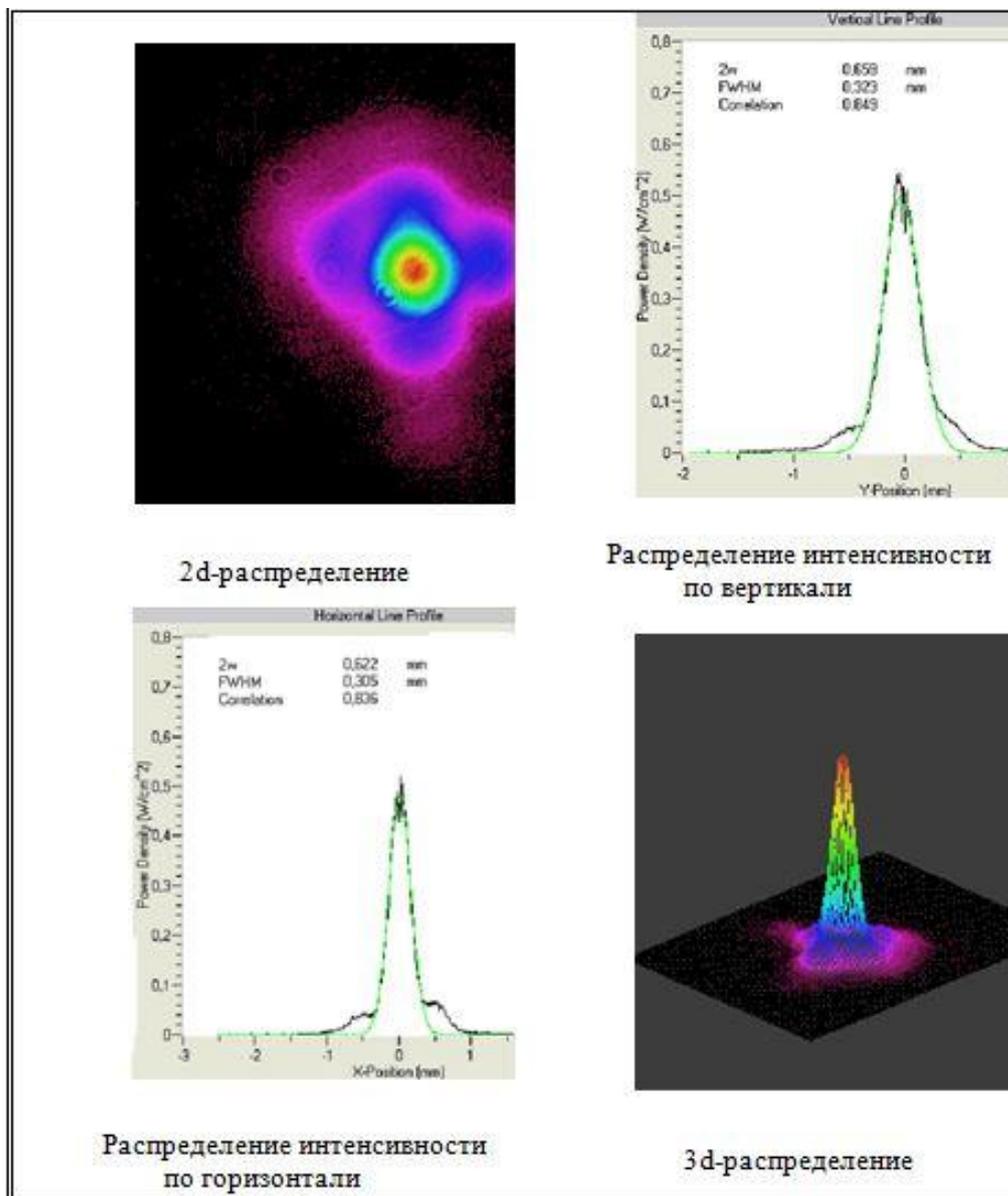
Резонаторный пучок 3 формируется за первый двойной проход излучения в резонаторе ( $2L/c=7$  нс), пучок 4 – за второй двойной проход и имеет дифракционную расходимость. Так как общая длительность импульсов лазерного излучения составляет  $\sim 25$  нс, то излучение в резонаторе успевает сделать и третий двойной проход. Пучок сформированный за третий проход также дифракционный и усиливает мощность пучка 4. Первый резонаторный пучок 3 отстает от пучка сверхсветимости 2 на время  $2L/c$ , на это же время отстают друг от друга и резонаторные пучки.

Расходимость резонаторных пучков с телескопическим НР рассчитывается по формуле

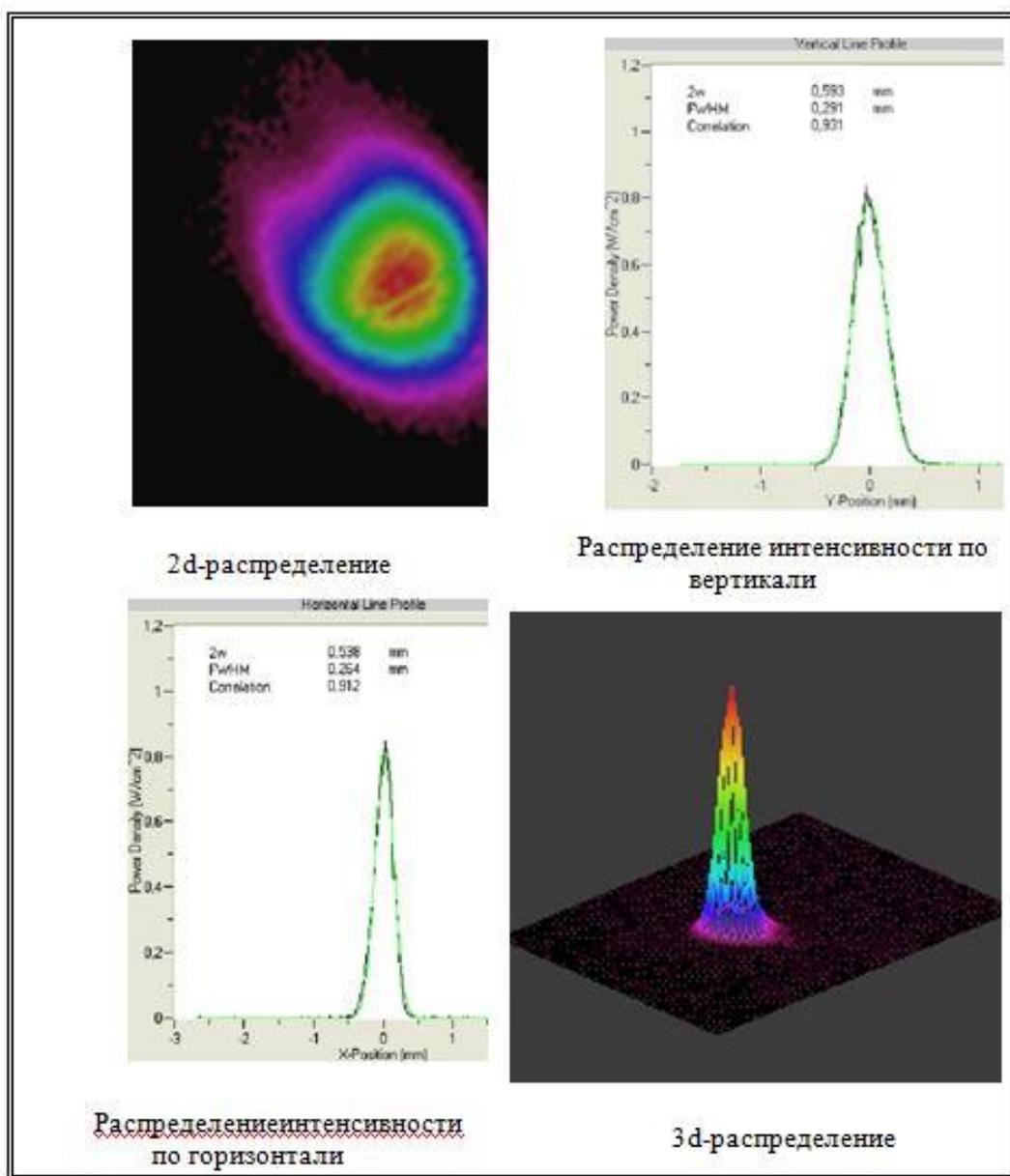
$$\theta = \frac{D_k}{M^n L} + 2,44 \frac{\lambda}{D_k}, \quad (8)$$

хорошо согласующейся с экспериментальными данными [5]. Она выведена на основе законов геометрической оптики, с учетом дифракционного предела расходимости. Расчетное значение расходимости для первого резонаторного пучка ( $n=1$ ) равно  $\theta = 0,16$  мрад, что 1,6 раза больше дифракционного предела –  $\theta_{\text{дифр.}} = 0,1$  мрад. Для второго и третьего пучков ( $n=2$  и  $3$ ) значение расходимости дифракционное. Поэтому при высокой стабильности положения осей диаграммы направленности этих пучков отделить их друг от друга невозможно ни пространственно, ни во времени и как бы формируется единый дифракционный пучок (пучок 4 на рис.9).

Как видно из рис.9, распределение интенсивности в дальней зоне (б) с НР имеет ступенчатый характер, обусловленный наличием пучка 3 с расходимостью большей дифракционного предела. Излучение с таким распределением для качественной микрообработки материалов непригодно.



$a (D_2=0,25 \text{ мм})$



$b (D_2 = 0,06 \text{ мм})$

**Рис.10.** Распределение интенсивности излучения ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206И в режиме с телескопическим НР с увеличением  $M = 220$  ( $R_1 = 2200 \text{ мм}$ ,  $R_2 = 10 \text{ мм}$ ) в перетяжке сфокусированного пучка

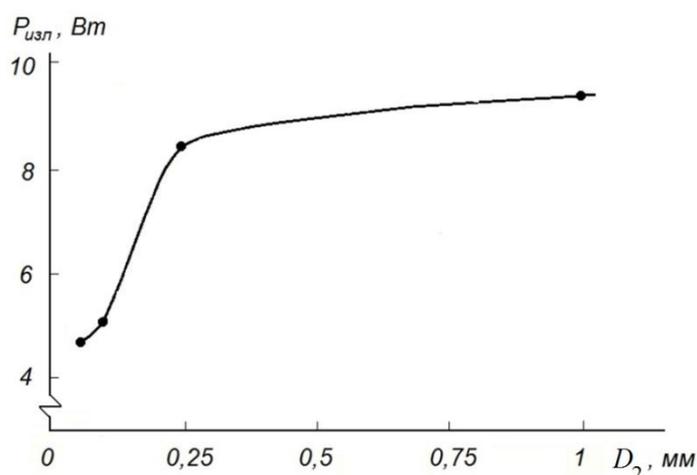
В наших экспериментах для повышения качества выходного излучения был применен пространственный фильтр-коллиматор (ПФК). Применение ПФК стало возможным благодаря достигнутой в установке высокой стабильности положения оси диаграммы направленности пучка с дифракционной расходимостью. ПФК состоит из двух вогнутых зеркал (4 и 5 на рис.1) с радиусом кривизны  $R=1,25 \text{ м}$  и диафрагмы  $D_2$ , расположенной в фокальной плоскости этих зеркал. Для исследования в дальней зоне распределения интенсивности пучка излучения, выделяемого диафрагмой  $D_2$ , пучок фокусировался зеркалом 7 с радиусом кривизны  $R=15 \text{ м}$ .

Исследования проводились при разных диаметрах диафрагмы ПФК:  $D_2 = 1, 0,25, 0,1$  и  $0,06 \text{ мм}$ . На рис.10 представлены распределения интенсивности для диафрагм с  $D_2=0,25$

и 0,06 мм. При  $D_2=0,25$  мм (рис.10,а) в основании распределения интенсивности имеются крылья, соответствующие по размаху расходимости первого резонаторного пучка (пучок 3 с  $\theta = 0,16$  мрад), при  $D_2 = 0,06$  мм (рис.10,б) крылья исчезают и данному распределению соответствует излучение с однопучковой структурой.

Расходимость однопучкового излучения ( $\theta$ ) рассчитывалась по методу фокального пятна, т.е. по формуле (1). При этом диаметр сечения пучка ( $d_0$ ) в перетяжке в нашем случае определяли как среднеарифметическое значение двух размеров: размера перетяжки из распределения интенсивности по горизонтали –  $2w_x$  и размера по вертикали –  $2w_y$ . ( $d_0 = (2w_x + 2w_y)/2$ ). То, что  $d_0$  несколько разный по горизонтали и по вертикали обусловлено смещением под небольшим углом оптических осей зеркал коллиматора (4 и 5) и фокусирующего зеркала (7) относительно падающего на них исследуемого пучка излучения. На рис. 10,б размер по горизонтали  $2w_x = 0,593$  мм, по вертикали  $2w_y = 0,538$  мм, тогда  $d_0 = (0,593 \text{ мм} + 0,538 \text{ мм})/2 = 0,556$  мм, что соответствует расходимости пучка  $\theta = 0,556 \text{ мм}/7500 \text{ мм} = 0,074$  мрад, т.е. дифракционному пределу ( $\theta_{\text{дифр}} = 0,1$  мрад).

При уменьшении диаметра диафрагмы  $D_2$  в ПФК с 1 до 0,06 мм средняя мощность пучка излучения, выделяемого диафрагмой, снизилась с 9,3 до 4,7 Вт (рис.11).



**Рис.11.** Зависимость средней мощности излучения ( $P_{\text{изл}}$ ) ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206И в режиме с телескопическим НР с увеличением  $M = 220$  от диаметра диафрагмы ( $D_2$ ) ПФК

При диаметрах диафрагмы ПФК  $D_2 = 1,0$  и  $0,25$  мм резонаторные пучки 3 и 4 через эти отверстия проходят полностью и имеют суммарную среднюю мощность излучения 9-10 Вт. При  $D_2 = 0,06$  мм выделяется строго дифракционная составляющая, так как этому диаметру соответствует минимальный размер перетяжки дифракционного пучка, сфокусированного входным зеркалом (поз.4) ПФК ( $d_0 = R_4/2\theta_{\text{дифр}} = 1250 \text{ мм}/2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} = 0,062 \text{ мм}$ ). При этом, как видно из распределения интенсивности на рис.10б, корреляция с гауссовым пучком высокая (0,93), что практически свидетельствует о совпадении угловой и энергетической расходимостей.

Средняя мощность излучения дифракционного пучка составляла 5-6 Вт, что достаточно для производительной и качественной микрообработки металлических материалов

толщиной до 0,3 мм и неметаллических до 0,5-0,7 мм. Эта оптическая система внедрена в разработанные АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» на базе импульсного ЛПМ с отпаянным АЭ ГЛ-206И для изготовления прецизионных деталей приборов СВЧ-техники и других ИЭТ [5, 24-26].

## 5. Примеры изготовления прецизионных деталей для ИЭТ на промышленных АЛТУ «Каравелла»

Промышленные АЛТУ «Каравелла» созданы на базе импульсных ЛСПМ (см. раздел 3), работающей по эффективной схеме ЗГ– ПФК – УМ, и ЛПМ (см. раздел 4), работающей по схеме ЗГ – ПФК, с однопучковым излучением дифракционного качества, современных прецизионных координатных столов ХУ и Z с точностью позиционирования по осям  $\pm 2$  мкм и сотовых оптических столов с пневмоизоляторами. Разработаны четыре модели АЛТУ «Каравелла»: «Каравелла-1» и «Каравелла-1М» (рис.12) на базе ЛСПМ мощностью 10-15 Вт и 20-25 Вт и горизонтального стола ХУ с рабочим полем 150\*150 мм, Каравелла-2» и «Каравелла-2М» (рис.13) на базе ЛПМ мощностью 5-8 Вт и горизонтального стола ХУ с рабочим полем 100\*100 и 200\*200 мм.



Рис.12. АЛТУ «Каравелла-1» и «Каравелла-1М»



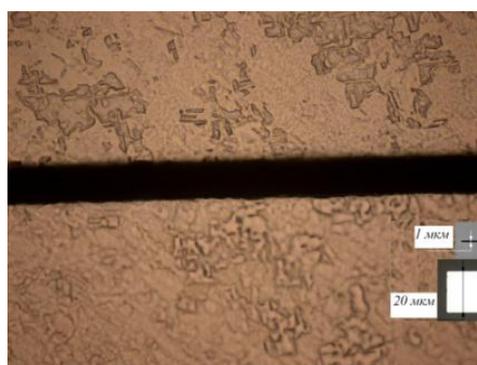
Рис.13. АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М»

В настоящее время на АЛТУ «Каравелла», в обеспечении НИОКР, единичных, мелкосерийных и серийных поставок приборов СВЧ-техники и других ИЭТ, во ФГУП «НПП «Исток» изготавливаются десятки и сотни типов плоских и объемных прецизионных металлических деталей простой и сложной конфигураций со скоростью обработки 0,5-5 мм/с: диафрагмы, сетки, диски, чашки, аноды, электроды, планки, экраны, контакты, лепестки, измерительные зонды и т. д. толщиной 0,1-1 мм, а также производится раскрой различных припоев толщиной 20-50 мкм со скоростью до 15 мм/сек. С максимальной производительностью (5-15 мм/с) вырезаются диски, окна и ЧИПы из искусственного поликристаллического алмаза, сапфира и кремния толщиной до 1,5...1,8 мм и осуществляется формирование объемных изображений в прозрачных средах типа стекло и кварц [24-26]. По сравнению с традиционными способами обработки, включая и электроэрозионную обработку (ЭЭО), изготовление прецизионных деталей на АЛТУ «Каравелла» сокращается на порядок и более. При этом точность изготовления деталей находится в пределах допусков 4-10 мкм. Следует подчеркнуть, что качество лазерной микрообработки по сравнению с ЭЭО значительно выше – меньше шероховатость и зона термического воздействия и не происходит расслоения материала. Это обусловлено более высокой «чувствительностью» ЭЭО к неоднородностям и дефектам материала. Оптимальные параметры обработки и время изготовления прецизионных деталей определяются требованиями рабочего чертежа.

На рис.14 представлены изображения фрагментов лазерного реза образцов из меди марки МВ толщиной 0,1 мм в режиме работы на обеих длинах волн излучения – 510,6 и 578,2 нм и на одной желтой линии – 578,2 нм ( $F_{объект} = 100$  мм); на рис.15 – изображения отверстий, изготовленных методом прямой прошивки на образцах из нержавеющей стали толщиной 50 мкм. Анализ лазерного реза медных и молибденовых пластин толщиной от 0,05 до 0,5 мм при увеличении микроскопа 500...1000 крат показал, что ЗТВ незначительна и структура материала в зоне отстающей от границы реза более чем 3...5 мкм, заметным изменениям не подвержена [27]. Шероховатость поверхности реза –  $\leq 1...2$  мкм, микроотверстий –  $< 1$  мкм.

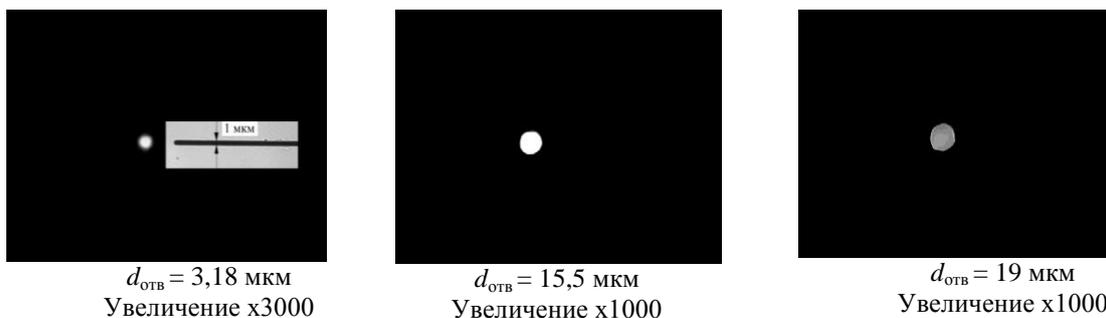


$\lambda = 510,6$  и  $578,2$  нм,  $P_{изл} = 5,4$  Вт,  
 $V = 2$  мм/с,  $n = 6$



$\lambda = 578,2$  нм,  $P_{изл} = 1,6$  Вт,  
 $V = 2$  мм/с,  $n = 12$

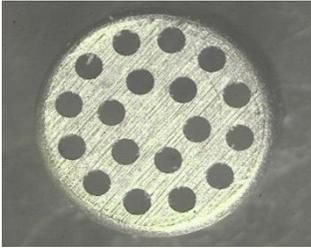
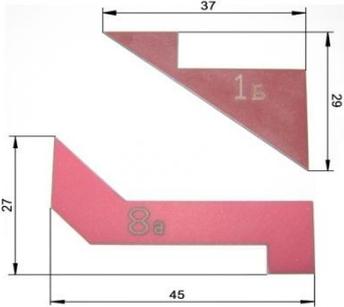
**Рис.14.** Изображения фрагментов лазерного реза образцов из меди на обеих длинах волн (слева) и на одной желтой линии (справа); толщина  $t = 0,1$  мм,  $F = 100$  мм, увеличение  $\times 500$



**Рис.15.**Изображения отверстий в образцах из нержавеющей стали толщиной 50 мкм (на просвет)

На рис.16 представлены примеры прецизионных деталей для приборов СВЧ-техники, изготовленных на промышленных АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М». В этих технологических установках с использованием объективов с  $F_{\text{объект.}} = 100$  и 150 мм диаметр сфокусированного дифракционного пучка излучения составляет 12...14 и 17...20 мкм, плотность пиковой мощности  $\rho = (0,5-3) \cdot 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup> при средней мощности излучения 2-6 Вт. При этом эффективно обрабатываются металлические материалы толщиной до 0,3 мм.

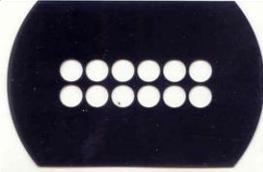
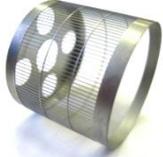
	<p>Рациональный раскрой припоя марок ПСр72В, ПСрМИн63, ПСрМПд65, ПСрМПд68, ПЗлМ35В, МВ На эскизе раскрой 5-ти типов припоев размером от 20x23 до 1,3x3 мм</p> <p><u>Режим обработки:</u>  <math>P_{\text{изл}} = 2,2-2,5</math> Вт  <math>F_{\text{объектива}} = 100</math> мм  <math>V_{\text{обр}} = 4,0</math> мм/с  <math>n = 1</math></p>
	<p>Контактные площадки для приемо-передающих модулей АФАР. Чистка поверхности керамики 22ХС размером 15,1*30,8 мм</p> <p><u>Режим обработки:</u>  <math>P_{\text{изл}} = 2,5</math> Вт  <math>F_{\text{объектива}} = 200</math> мм  <math>V_{\text{обр}} = 6</math> мм/с  <math>n = 1</math></p>
	<p>Резка сапфировой подложки толщиной 0,3 мм на ЧИПы.</p> <p><u>Режим обработки:</u>  <math>P_{\text{изл}} = 2,5</math> Вт  <math>F_{\text{объектива}} = 70</math> мм  <math>V_{\text{обр}} = 5,0</math> мм/с  <math>n = 6</math></p> <p>Размер ЧИПа: 5x1,47 мм.</p>

 <p> <math>D_{\text{нар}} = 3,5_{-0,018}</math>  <math>D_{\text{отв}} = 0,4_{+0,014}</math>  <math>\oplus \pm 0,02</math> </p>	<p>Сетка из молибдена МЧ толщиной 0,16 мм</p> <p><u>Режим обработки:</u>  <math>P_{\text{изл}} = 2,5 \text{ Вт}</math>  <math>F_{\text{объектива}} = 100 \text{ мм}</math>  <math>V_{\text{обр}} = 3 \text{ мм/с}</math>  <math>n = 16</math></p>
	<p>Пластины из керамики 22ХС толщиной 0,9 мм</p> <p><u>Режим обработки:</u>  <math>P_{\text{изл}} = 5-5,5 \text{ Вт}</math>  <math>F_{\text{объектива}} = 150 \text{ мм}</math>  <math>V_{\text{обр}} = 2,0 \text{ мм/с}</math>  <math>n = 135-150</math></p>
<p> <b>CONTRACT N P/736402122829</b>  <b>CONSIGNEE: Ministry of Defence and Armed</b>  <b>Forces Support of the Islamic Republic of Iran,</b>  <b>Iran, Tehran</b>  <b>SHIPPER: Federal State Unitary Enterprise</b>  <b>„ROSOBORONEXPORT“</b>  <b>Москва, Russia</b>  <b>Airport of destination: Tehran</b>  <b>Case No.: /10</b>  <b>Gross/Net weight: 4,6/2,14 kg</b>  <b>Dimensions/Volume: 42 cm 25 cm 15 cm/0,016 cub m</b>    <b>Marking: <u>364-736402122829</u></b>  <b><u>P-736402122829</u></b> </p>	<p>Трафарет для маркировки упаковок. Медь МВ толщиной 0,2 мм</p> <p><u>Режим обработки:</u>  <math>P_{\text{изл}} = 4,5-5 \text{ Вт}</math>  <math>F_{\text{объектива}} = 150 \text{ мм}</math>  <math>V_{\text{обр}} = 3 \text{ мм/с}</math>  <math>n = 8</math></p>

**Рис.16.** Примеры прецизионных деталей, изготовленных на АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М», для изделий СВЧ-техники.  $F_{\text{объектива}}$  – фокусное расстояние ахроматического объектива,  $V_{\text{обр}}$  – скорость обработки материала,  $n$  – число проходов

В табл.8 представлены параметры для плоской диафрагмы с 12 отверстиями и трех объёмных деталей: прямоугольной конфигурации с осевой щелью, сферической сетки с кольцевыми пазами, цилиндрического стакана с 600 пазами. Плоская диафрагма толщиной 0,45 мм изготовлена на АЛТУ «Каравелла-1».

**Таблица 8.** Режимы обработки и время изготовления прецизионной детали из молибдена

<i>Параметры обработки</i>				
<b>Толщина, мм</b>	0,45 мм	0,1 мм	0,1 мм	0,16 мм
<b>Средняя мощность излучения, Вт</b>	8,2	4,8	2,4	6

<b>Фокусное расстояние объектива, мм</b>	150	150	100	100
<b>Скорость обработки, мм/с</b>	3,5	1,5	1,3	5,0
<b>Число проходов</b>	22	11	7	8
<b>Время изготовления, мин</b>	45	7,5	25	150

На АЛТУ «Каравелла-1» производительно обрабатываются металлические материалы толщиной до 0,5 мм. На АЛТУ «Каравелла-1М», являющейся на сегодня самой мощной (20-25 Вт) из всех технологических установок, с высокой эффективностью и качеством обрабатываются более толстые материалы: металлические (как тугоплавкие, так и теплопроводные) толщиной 0,6-1 мм, диэлектрики и полупроводники, как например, кремний и искусственный поликристаллический алмаз толщиной до 1,5...1,8 мм. На рис.17 показаны увеличенные фрагменты плоских деталей из молибдена, вольфрама и меди практически с идеальными цилиндрическими стенками, достигаемыми за счет применения в АЛТУ «Каравелла-1М» более длиннофокусных объективов ( $F = 200$  и  $250$  мм) и высокой стабильности положения оси диаграммы направленности дифракционного пучка излучения.



**Рис.17.** Примеры изображений фрагментов плоских деталей толщиной 0,6-1 мм, изготовленных на самой мощной АЛТУ «Каравелла-1М» ( $P_{\text{изл.}} = 20-25$  Вт)

## Заключение

В заключении приводим основные выводы по результатам проведенных в рамках данной работы экспериментальных и теоретических исследований импульсного ЛПМ.

1) Анализ особенностей процесса формирования излучения ЛПМ с известными оптическими резонаторами показывает, что структура выходного излучения многопучко-

вая, причем каждый пучок обладает своими пространственными, временными и энергетическими характеристиками. Излучение ЛПМ с такой структурой не пригодно для высококачественной микрообработки материалов, что и препятствовало созданию на базе ЛПМ современного технологического оборудования.

2) Разработаны уникальная экспериментальная установка и методики измерений для проведения качественных исследований характеристик выходного излучения ЛПМ с НР, что было обусловлено высокой чувствительностью поля этих резонаторов к внешним механическим и тепловым воздействиям и воздушно-тепловым потокам.

Условия для данных исследований достигнуты за счет применения в установке комплекса конструкторско-технических решений: использования в качестве несущей всех элементов и узлов массивного сотового оптического стола с пневмоизоляторами, размещения теплонагруженного АЭ ЛПМ в водоохлаждаемом теплоемнике с термодатчиком обратной связи, герметизации пространства между зеркалами НР и установления ограничительной диафрагмы перед глухим зеркалом НР. Эти мероприятия обеспечили высокую стабильность положения оси диаграммы направленности излучения и импульсной энергии.

3) Исследована структура, пространственные, временные и энергетические характеристики излучения ЛПМ с оптическими резонаторами, обладающими высокой пространственной селективностью: с НР с двумя выпуклыми зеркалами и телескопическим НР и определены условия формирования однопучкового излучения дифракционного качества с высокой стабильностью положения оси диаграммы направленности.

4) В ЛПМ с НР с двумя выпуклыми зеркалами, из-за больших потерь в резонаторе, мощность дифракционного пучка составляет не более 10% от суммарной мощности излучения, что ограничивает его возможности по микрообработке материалов. Например, с 15 Вт АЭ «Кулон» модели ГЛ-206Д и 20 Вт ГЛ-206И мощность дифракционного пучка составляет 1...1,5 Вт и эффективно обрабатываются лишь фольгированные материалы и тонкие толщиной 0,1...0,2 мм.

5) Самым весомым и перспективным применением ЛПМ 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 ГЛ-206Д и ГЛ-206И до 15-25 Вт и  $10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>, АЭ «Кристалл» моделей ГЛ-205А, ГЛ-205Б и ГЛ-205В – до 30-100 Вт и  $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>, что существенно повышает производительность микрообработки и толщину обрабатываемых материалов до 1...2 мм.

6) Исследованная ЛСПМ типа ЗГ – ПФК – УМ с НР с двумя выпуклыми зеркалами в ЗГ явилась основой для создания современных автоматизированных лазерных технологических установок (АЛТУ) «Каравелла-1» и «Каравелла-1М» для изготовления прецизионных деталей ИЭТ. На АЛТУ «Каравелла-1» мощностью излучения 10-15 Вт производи-

тельно обрабатываются металлические материалы толщиной до 0,5 мм и неметаллические до 1-1,2 мм, на «Каравелла-1М» – до 1 мм и до 1,5-1,8 мм соответственно.

7) В ЛПМ с 20 Вт АЭ «Кулон» модели ГЛ-206И в режиме с телескопическим НР мощность выделяемого с помощью ПФК дифракционного пучка излучения составляет 5-6 Вт, что достаточно для производительной и качественной микрообработки металлических материалов толщиной до 0,3 мм и неметаллических до 0,5-0,7 мм. Этот ЛПМ стал основой для создания современных промышленных АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» для изготовления прецизионных деталей ИЭТ.

8) Большой объем проведенных экспериментальных и практических работ на всех типах АЛТУ «Каравелла» показал ряд существенных преимуществ лазерного способа импульсной микрообработки перед традиционными способами, включая и ЭЭО: широкая номенклатура обрабатываемых конструкционных металлических и неметаллических материалов; уменьшение количества операций и переходов в несколько раз; экономия материалов при изготовлении и раскрое заготовки из листа; высокая производительность изготовления деталей, как простой, так и сложной конфигураций (на порядок и более); эффективная обработка в атмосфере воздуха (без поддува технологического газа); высокая точность изготовления деталей (4-10 мкм); малая шероховатость поверхности реза ( $\leq 1...2$  мкм); малая зона термического влияния ( $\leq 3...5$  мкм); отсутствие расслоения и микротрещин металла (молибдена, вольфрама); высокий процент выхода годных деталей (до 100%); невысокая трудоемкость изготовления и универсальность технологической оснастки.

Основные выводы, сделанные в настоящей работе по результатам исследований ЛПМ, справедливы и для других импульсных лазеров, обладающих короткой длительностью существования инверсии населенностей.

### Список литературы

1. Walter W.T., Piltch M., Solimene N., Gould G. Pulsed laser action in atomic copper vapor // Bull. Amer. Phys. Soc. 1966. Vol. 11, no. 1. P. 113.
2. Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. Эффективный импульсный лазер на парах меди с высокой средней мощностью генерации // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1972. Т. 16, № 1. С. 40-42.
3. Эффективные газоразрядные лазеры на парах металлов: сб. статей / под ред. П.А. Бохана. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 1978. 209 с.
4. Солдатов А.И., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 152 с.
5. Григорьянц А. Г., Казарян М. А., Лябин Н. А. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 312 с.
6. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов / В.М. Батенин, В.В. Бучанов, М.А. Казарян [и др.]. М.: Научная книга, 1998. 544 с.

7. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов - 2. В 2 т. Т.1 / В.М. Батенин, А.М. Бойченко, В.В. Бучанов [и др.]; Под ред. В.М. Батенина. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 544 с.
8. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов - 2. В 2 т. Т. 2 / В.М. Батенин, П.А. Бохан, А.М. Бойченко [и др.]; Под ред. В.М. Батенина. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 616 с.
9. Little C.E. Metal Vapour Lasers: Physics, Engineering and Applications. Chichester (UK): J. Wiley and Sons Ltd., 1999. 620 p.
10. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров 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.
11. Chimenti R., Walter W.T. Coherence properties of the pulsed copper vapor laser // Bull. Am. Phys. Soc. 1971. Vol.16. P. 41-42.
12. Земсков Л.И., Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г., Раутиан С.Г. Применение неустойчивых резонаторов для получения дифракционной расходимости излучения импульсных газовых лазеров с большим усилением // Квантовая электроника. 1974. Т. 1, № 4. С. 863-869.
13. Получение дифракционной расходимости с импульсными лазерами, обладающими малым временем существования инверсии / К.И. Земсков, А.А. Исаев, М.А. Казарян [и др.] // 2-й Всесоюзный симпозиум по физике газовых лазеров (Новосибирск, 16–18 июня 1975 г.): тез. докл. Новосибирск, 1974. С. 141.
14. Сжимающиеся пучки в телескопических резонаторах / А.А. Исаев, М.А. Казарян, Г.Г. Петраш. С.Г. Раутиан // Квантовая электроника. 1974. Т. 1, № 6. С. 1379-1388.
15. Эволюция гауссовых пучков и импульсная генерация в лазерах с неустойчивыми резонаторами / А.А. Исаев, М.А. Казарян, Г.Г. Петраш, С.Г.Раутиан, А.М.Шалагин // Квантовая электроника. 1975. Т. 2, № 6. С. 1125-1137.
16. Пространственные, временные и энергетические характеристики излучения лазера на парах меди / В.П. Беляев, В.В. Зубов, А.А. Исаев, Н.А. Лябин, Ю.Ф. Соболев, А.Д. Чурсин // Квантовая электроника. 1985. Т. 12, № 1. С. 74-79.
17. Лябин Н.А. Характеристика излучения лазера на парах меди // II отраслевая научно-техническая конференция «Газовые лазеры - перспективы разработки, производства и применения» (г. Рязань, 28-29 октября 1986 г.): тез. докл. Сер. 11. Лазерная техника и оптоэлектроника. Вып. 3 (237). Импульсные газовые лазеры. М.: ЦНИИ «Электроника», 1986. С. 15-16.
18. Зубов В.В., Лябин Н.А., Чурсин А.Д. Эффективная система генератор-усилитель на основе лазерных активных элементов на парах меди // Квантовая электроника. 1986. Т. 13, № 12. С. 2431-2436.

19. Зубов В.В., Лябин Н.А., Чурсин А.Д. Лазер на парах меди с высокостабильным однопучковым излучением и управляемой расходимостью // Квантовая электроника. 1988. Т. 15, № 10. С. 1947-1954.
20. Лябин Н.А. Безрезонаторный лазер на парах меди с высоким качеством излучения // Квантовая электроника. 1989. Т. 16, № 4. С. 652-657.
21. Лепехин Н.М., Присеко Ю.С., Филиппов В.Г., Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Колоколов И.С. Генератор наносекундных импульсов для возбуждения лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов: пат. 2226022 РФ. 2004. Бюл. № 8.
22. Промышленные лазеры на парах металлов серии KULON / Н.М. Лепехин, Ю.С. Присеко, В.Г. Филиппов, Н.А. Лябин, А.Д. Чурсин, М.А. Казарян // Прикладная физика. 2005. № 1. С. 110-115.
23. Лябин Н.А., Иполлитова З.К., Чурсин А.Д., Колоколов И.С. Импульсный лазер: пат. 2432652 РФ. 2010. Бюл. № 30.
24. Лазеры на парах меди и их применение в технологии прецизионной обработки / Н.А. Лябин, В.М. Жариков, В.И. Клименко, И.С. Колоколов, М.Е. Королева, В.И. Кондрашов, В.С. Парамонов, Г.М. Парамонова, Ю.Ф. Соболев, С.А. Угольников, В.Д. Чибирев, А.Д. Чурсин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2003. Вып. 2 (482). С. 17-35.
25. Лябин Н.А. Лазеры на парах меди: от промышленных до медицинских приложений // Фотоника. 2012. Т. 32, № 2. С. 66-69.
26. Импульсные лазеры на парах меди, технологическое и медицинское оборудование на их основе / Н.А. Лябин, А.Н. Королев, Е.Н. Покровский, В.Н. Батыгин, П.С. Мелешкевич, А.Д. Чурсин, В.И. Клименко, В.С. Парамонов, Е.А. Котюргин, И.С. Колоколов, Г.М. Парамонова, Л.Л. Бетина, М.Е. Королева, И.В. Каморин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2013. Вып. 3 (518). С. 211-220.
27. Исследование структуры и свойств зоны термического воздействия (ЗВТ) после лазерной обработки тонколистовых тугоплавких и теплопроводных материалов / Д.К. Фигуровский, Г.Я. Дальская, Е.И. Тронза, Г.А. Юдин, Н.А. Лябин // XIV Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения и информатики» (Сочи, 3-7 октября 2011 г.): сб. науч. тр. М.: МГУПИ, 2011. С. 221-227.

**Copper Vapor Laser with One-Beam Radiation of Diffraction Quality and Its Capabilities for Microprocessing of Materials for Electronic Engineering Products**

# 08, August 2014

DOI: 10.7463/0814.0720903

N.A. Lyabin<sup>1</sup>, A.D. Chursin<sup>1</sup>, V.S. Paramonov<sup>1</sup>, V.I. Klimenko<sup>1</sup>, G.M.<sup>1</sup> Paramonova<sup>1</sup>, I.S. Kolokolov<sup>1</sup>, L.L. Betina<sup>1</sup>, A.G. Grigor'yanc<sup>2</sup>, I.N. Shiganov<sup>2</sup>, M.A. Kazaryan<sup>3</sup><sup>1</sup>JSC “RPC “Istok” named after Shokin», Fryazino, Moscow Region, 141190, Russia<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia<sup>3</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, 119991, Moscow, Russia<sup>a</sup>[lyabin-npk3@mail.ru](mailto:lyabin-npk3@mail.ru)

---

**Keywords:** [copper vapor laser system](#), [copper vapor laser](#), [unstable resonator](#), [precision microprocessing](#), [laser technological installation](#)

---

The structure, spatial, time and energy characteristics of copper vapor laser radiation (CVL) with optical resonators possessing high spatial selectivity have been investigated: with an unstable resonator (UR) with two convex mirrors and telescopic UR, and the conditions to form one-beam radiation with diffraction divergence and high stability of directivity pattern axis have been defined.

The most weighty and prospective application of CVL with UR with two convex mirrors is to use it as a driving oscillator (DO) in a copper vapor laser system (CVLS) of the type: driving oscillator – power amplifier (DO – PA) when diffraction beam radiating power and power density in a focused spot of 10-20  $\mu\text{m}$  in diameter increases by 1-2 orders. Using industrial sealed-off active elements (AE) of “Kulon” series with an average radiation power of 15-25 W as PAs the peak power density increases up to  $10^{11}$  W/cm<sup>2</sup> while an application of AE “Crystal” with 30-50 W power gives up to  $10^{12}$  W/cm<sup>2</sup>, which is sufficient for efficient and qualitative microprocessing of materials up to 1...2 mm thick. Such a CVLS has become the basis for creating up-to-date automated laser technological installations (ALTI) of “Karavella-1” and “Karavella-1M” types to manufacture precision parts of electronic engineering products (EEP) of metal up to 0.5 mm thick and of non-metal up to 1.5...1.8 mm thick.

CVL with a telescopic UR with an average power of 5-6 W diffraction radiation beam has become the basis for creating industrial ALTI “Karavella-2” and “Karavella-2M” to manufacture

precision parts of electronic engineering products (EEP) of metal up to 0.3 mm thick and of non-metal up to 0.5 – 0.7 mm thick.

Practical work on all types of ALTI “Karavella” has shown a set of significant advantages of a laser way of pulsed microprocessing over the traditional ones, including electro-erosion machining: a wide range of structural metal and non-metal materials to be processed; the decrease of a number of operations and transitions by several times; the material saving when manufacturing and cutting the work piece from a sheet; high productivity of manufacturing parts of both simple and complicated configuration (by one order and higher); effective processing in air atmosphere (without blowing up technological gas); high precision of manufacturing parts with tolerances within 4-10  $\mu\text{m}$ ; small roughness of the cut surface ( $\leq 1...2 \mu\text{m}$ ); small area of thermal influence ( $\leq 3...5 \mu\text{m}$ ); the lack of lamination and metal micro-cracks (molybdenum, tungsten); high yield ratio (up to 100%); low labour-intensity of manufacturing and versatility of production tools.

The main conclusions drawn in the given paper regarding the results of CVL investigations are also true for other pulsed lasers having a short period of population inversion existence.

### References

1. Walter W.T., Piltch M., Solimene N., Gould G. Pulsed laser action in atomic copper vapor. *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 1966, vol. 11, no. 1, p. 113.
2. Isaev A.A., Kazaryan M.A., Petrash G.G. Effective Pulsed Copper-vapor Laser with High Average Generation Power. *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki*, 1972, vol. 16, no. 1, pp. 40-42. (English translation: *JETP Letters*, 1972, vol. 16, iss. 1, pp. 27-29.).
3. Bokhan P.A., ed. *Effektivnye gazorazriadnye lazery na parakh metallov: sb. statei* [Effective gas discharge metal vapor lasers: collection of papers]. Tomsk, Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the USSR Academy of Science Publ., 1978. 209 p. (in Russian).
4. Soldatov A.I., Solomonov V.I. *Gazorazriadnye lazery na samoogranichennykh perekhodakh v parakh metallov* [Gas discharge lasers on self-terminating transitions in metal vapor]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 152 p. (in Russian).
5. Grigor'iants A.G., Kazarian M.A., Liabin N.A. *Lazery na parakh medi: konstruktsiia, kharakteristiki i primeneniia* [Copper vapor laser: design, characteristics and applications]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2005. 312 p. (in Russian).
6. Batenin V.M., Buchanov V.V., Kazarian M.A., et al. *Lazery na samoogranichennykh perekhodakh atomov metallov* [Self-contained metal atom transition lasers]. Moscow, Nauchnaia kniga Publ., 1998. 544 p. (in Russian).

7. Batenin V.M., Boichenko A.M., Buchanov V.V., et al. *Lazery na samoogranichennykh perekhodakh atomov metallov - 2. V 2 t. T.1* [Self-contained metal atom transition lasers – 2. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009. 544 p. (in Russian).
8. Batenin V.M., Bokhan P.A., Boichenko A.M., et al. *Lazery na samoogranichennykh perekhodakh atomov metallov - 2. V 2 t. T. 2* [Self-contained metal atom transition lasers – 2. In 2 vols. Vol. 2]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009. 616 p. (in Russian).
9. Little C.E. *Metal Vapour Lasers: Physics, Engineering and Applications*. Chichester (UK), J. Wiley and Sons Ltd., 1999. 620 p.
10. Grigor'iants A.G., Shiganov I.N., Misiurov A.I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoï obrabotki* [Technological processes of laser machining]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 664 p. (in Russian).
11. Chimenti R., Walter W.T. Coherence properties of the pulsed copper vapor laser. *Bull. Am. Phys. Soc.*, 1971, vol.16, pp. 41-42.
12. Zemskov L.I., Isaev A.A., Kazarian M.A., Petrash G.G., Rautian S.G. [Use of unstable resonators in achieving the diffraction divergence of the radiation emitted from high-gain pulsed gas lasers]. *Kvantovaiia elektronika*, 1974, vol. 1, no. 4, pp. 863-869. (English translation: *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1974, vol. 4, no. 4, pp. 474-477. DOI: [10.1070/QE1974v004n04ABEH006787](https://doi.org/10.1070/QE1974v004n04ABEH006787) ).
13. Zemskov K.I., Isaev A.A., Kazarian M.A., et al. [Obtaining diffraction divergence with pulsed lasers which have short lifetime of inversion]. *2-i Vsesoiuznyi simpozium po fizike gazovykh lazerov: tez. dokl.* [2nd All-Union Symposium on Physics of Gas Lasers: abstracts]. Novosibirsk, 16–18 July, 1975. Novosibirsk, 1974, p. 141. (in Russian).
14. Isaev A.A., Kazarian M.A., Petrash G.G., Rautian S.G. Converging beams in unstable telescopic resonators. *Kvantovaiia elektronika*, 1974, vol. 1, no. 6, pp. 1379-1388. (English translation: *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1974, vol. 4, iss. 6, pp. 761-766. DOI: [10.1070/QE1974v004n06ABEH009320](https://doi.org/10.1070/QE1974v004n06ABEH009320) )
15. Isaev A.A., Kazarian M.A., Petrash G.G., Rautian S.G., Shalagin A.M. Evolution of Gaussian beams and pulse stimulated emission from lasers with unstable resonators. *Kvantovaiia elektronika*, 1975, vol. 2, no. 6, pp. 1125-1137. (English translation: *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1975, vol. 5, no. 6, pp. 607-614. DOI: [10.1070/QE1975v005n06ABEH011290](https://doi.org/10.1070/QE1975v005n06ABEH011290) ).
16. Beliaev V.P., Zubov V.V., Isaev A.A., Liabin N.A., Sobolev Iu.F., Chursin A.D. Spatial, temporal, and energy characteristics of copper vapor laser radiation. *Kvantovaiia elektronika*,

- 1985, vol. 12, no. 1, pp. 74-79. (English translation: *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1985, vol. 15, no. 1, pp. 40-44. DOI: [10.1070/QE1985v015n01ABEH005842](https://doi.org/10.1070/QE1985v015n01ABEH005842) ).
17. Liabin N.A. Characteristic radiation of copper vapor laser. 2 *otraslevaia nauchno-tekhniicheskaia konferentsiia "Gazovye lazery - perspektivy razrabotki, proizvodstva i primeneniia"*: tez. dokl. [2<sup>nd</sup> Industrial Scientific and Technical Conference "Gas Lasers – Prospects of development, production and application": abstracts]. Riazan', 28-29 October 1986. Ser. 11. *Lazernaia tekhnika i optoelektronika. Vyp. 3 (237). Impul'snye gazovye lazery* [Ser. 11. Laser Technology and Optoelectronics. Iss. 3 (237). Pulsed gas lasers]. Moscow, CRI "Electronics", 1986, pp. 15-16. (in Russian).
18. Zubov V.V., Liabin N.A., Chursin A.D. [Efficient master-oscillator-amplifier system utilizing copper vapor laser active elements]. *Kvantovaia elektronika*, 1986, vol. 13, no. 12, pp. 2431-2436. (English translation: *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1986, vol. 16, no. 12, pp. 1606-1610. DOI: [10.1070/QE1986v016n12ABEH008501](https://doi.org/10.1070/QE1986v016n12ABEH008501) ).
19. Zubov V.V., Liabin N.A., Chursin A.D. [Copper vapor lasers with a highly stable single output beam of controlled divergence]. *Kvantovaia elektronika*, 1988, vol. 15, no. 10, pp. 1947-1954. (English translation: *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1988, vol. 18, no. 10, pp. 1216-1221. DOI: [10.1070/QE1988v018n10ABEH012460](https://doi.org/10.1070/QE1988v018n10ABEH012460) ).
20. Liabin N.A. [Noncavity copper vapor laser generating high-quality radiation]. *Kvantovaia elektronika*, 1989, vol. 16, no. 4, pp. 652-657. (English translation: *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1989, vol. 19, no. 4, pp. 426-429. DOI: [10.1070/QE1989v019n04ABEH007879](https://doi.org/10.1070/QE1989v019n04ABEH007879) ).
21. Lepekhin N.M., Priseko Iu.S., Filippov V.G., Liabin N.A., Chursin A.D., Kolokolov I.S. *Generator nanosekundnykh impul'sov dlia vozbuzhdeniia lazerov na samoogranichennykh perekhodakh atomov metallov* [Nanosecond pulse generator for excitation of lasers on self-terminating transitions of metal atoms]. Patent RF, no. 2226022, 2004. (in Russian).
22. Lepekhin N.M., Priseko Iu.S., Filippov V.G., Liabin N.A., Chursin A.D., Kazarian M.A. The metal vapour industrial lasers of the KULON series. *Prikladnaia fizika = Applied Physics*, 2005, no. 1, pp. 110-115. (in Russian).
23. Liabin N.A., Ipolitova Z.K., Chursin A.D., Kolokolov I.S. *Impul'snyi lazer* [Pulse laser]. Pat. RF, no. 2432652, 2010. (in Russian).
24. Liabin N.A., Zharikov V.M., Klimenko V.I., Kolokolov I.S., Koroleva M.E., Kondrashov V.I., Paramonov V.S., Paramonova G.M., Sobolev Iu.F., Ugol'nikov S.A., Chibirev V.D., Chursin A.D. Copper vapor lasers and their applications in precision machining technology.

- Elektronnaia tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika = Electronic engineering. Ser. 1. Microwave engineering*, 2003, iss. 2 (482), pp. 17-35. (in Russian).
25. Liabin N.A. [Copper Vapor Lasers. From Industrial to Medical Applications]. *Fotonika*, 2012, vol. 32, no. 2, pp. 66-69. (in Russian).
26. Liabin N.A., Korolev A.N., Pokrovskii E.N., Batygin V.N., Meleshkevich P.S., Chursin A.D., Klimenko V.I., Paramonov V.S., Kotiurgin E.A., Kolokolov I.S., Paramonova G.M., Betina L.L., Koroleva M.E., Kamorin I.V. [Pulsed copper vapor lasers, technological and medical equipment on their basis]. *Elektronnaia tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika = Electronic engineering. Ser. 1. Microwave engineering*, 2013, iss. 3 (518), pp. 211-220. (in Russian).
27. Figurovskii D.K., Dal'skaia G.Ia., Tronza E.I., Iudin G.A., Liabin N.A. Research of the structure and properties of the heat affected zone (HAZ) after laser treatment of thin sheet refractory and heat-conductive materials. *Fundamental'nye i prikladnye problemy priborostroeniia i informatiki: sb. nauch. tr. po materialam 14 Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konf.* [Proc. of the 14<sup>th</sup> international scientific and practical conference "Fundamental and applied problems of instrument engineering and informatics"]. Sochi, 3-7 October, 2011. Moscow, MGUPI Publ., 2011, pp. 221-227. (in Russian).