



Отделение физических наук

**Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Парамонов В.С.,
Клименко В.И., Парамонова Г.М., Колоколов И.С.,
Бетина Л.Л., Асратян А.А., Феофанов И.Н.**

**Высокоселективные отражатели
для отпаянных лазеров
с короткоживущей инверсией**

Москва 2017

УДК 66.088
ББК 34.5
В93

ISBN 978–5–906906–17–5

© Российская академия наук, 2017
© Н.А. Лябин, А.Д. Чурсин, В.С. Парамонов,
В.И. Клименко, Г.М. Парамонова,
И.С. Колоколов, Л.Л. Бетина, А.А. Асратян,
И.Н. Феофанов, 2017

Высокоселективные отражатели для отпаянных лазеров с короткоживущей инверсией

Н.А. Лябин¹, А.Д. Чурсин¹, В.С. Парамонов¹,
В.И. Клименко¹, Г.М. Парамонова¹, И.С. Колоколов¹,
Л.Л. Бегина¹, А.А. Асратян², И.Н. Феофанов³

¹АО «НПП «Исток» им. Шокина» 141190, Московская область,
г. Фрязино, Вокзальная ул., 2а

²ФНИЦ ЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, Минздрава России,
ул. Гамалеи, 18, 123098, г. Москва, Россия

³Физический институт РАН, Ленинский просп. 53, 119991,
г. Москва, Россия, ivan@feofanov.ru

Аннотация. *Исследована структура и определены условия формирования однопучкового излучения с дифракционной расходимостью и высокой стабильностью положения оси диаграммы направленности. В лазерах на парах меди (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/см², достаточной для многочисленных и разнообразных применений в науке, технике и медицине. При этом обеспечивается на порядок и более высокая производительность по сравнению с традиционными способами.*

Ключевые слова: лазер на парах меди, лазерная система на парах меди, неустойчивый резонатор, лазерная установка.

Введение

Лазерное технологическое оборудование широко применяется для размерной обработки, раскроя материалов, сварки, поверхностной обработки, легирования и наплавки, маркировки и гравировки, в медицине и биологии. 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 ($k = 10-10^2$ Дб/м) при короткой длительности импульсов ($\tau_{\text{имп.}} = 20-40$ нс) и малой импульсной энергией ($W = 0,1-10$ мДж) при высоких частотах повторения импульсов ($f = 5-30$ 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 его возможности по формированию пучков излучения с высоким (необходимым) качеством и со стабильными параметрами.

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/см², представляет большой научно практический интерес.

Для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи:

- проведен анализ особенностей формирования многопучковой структуры выходного излучения ЛППМ с наносекундной длительностью импульсов с известными типами оптических резонаторов;
- разработаны экспериментальные установки и методики для исследования характеристик и измерения параметров выходного излучения ЛППМ;
- проведены экспериментальные и теоретические исследования структуры, пространственных, временных и энергетических характеристик излучения ЛППМ с оптическими резонаторами, обладающими высокой пространственной селективностью: с неустойчивым резонатором (НР) с двумя выпуклыми зеркалами и телескопическим НР;
- определены условия формирования в ЛППМ с высоко-селективными оптическими резонаторами однопучкового излучения с дифракционной расходимостью и высокой стабильностью положения оси диаграммы направленности.

1. Особенности формирования излучения в импульсном ЛППМ

Одним из главных отличий импульсного ЛППМ 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 ЛППМ может работать в режиме сверхсветимости: без зеркал или с одним зеркалом, но при этом излучение некогерентное. В режиме работы ЛППМ с оптическим резонатором за время существования инверсии населенностей (τ) 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 ЛППМ 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/см²), необходимой для эффективной микрообработки материалов.

Поэтому в данной работе, применительно к импульсному ЛПМ, проведены исследования структуры, пространственных, временных и энергетическими 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 ими 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 характеристиками. При этом дифракционному пучку всегда предшествуют несколько пучков с большей расходимостью, причем нестабильности оси диаграммы направленности дифракционного пучка соизмеримы с его расходимостью. В таком виде выходное излучение оказалось просто не пригодным для качественной микрообработки материалов и что препятствовало созданию на базе ЛПМ технологического оборудования. 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].

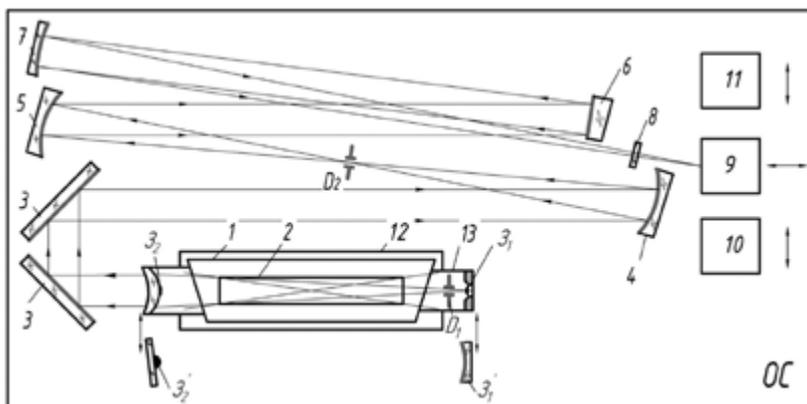


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования характеристик выходного излучения импульсного ЛПМ с оптическими системами с высокой пространственной селективностью:

ОС – оптический сотовый стол типа ИНТ10-20-20 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; 3₁ – выпуклое зеркало; 3₁–3₂ – НР с двумя выпуклыми зеркалами; 3₁'–3₂' – телескопический НР; 3 – плоские поворотные зеркала; D₁ – диафрагма с отверстием d = 0,1 мм; D₂ – 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 ρ = 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 их внешний вид.

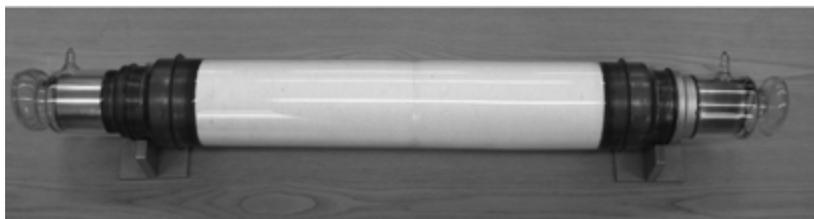


Рис. 2. Промышленные отпаянные АЭ «Кулон» модели ГЛ-206Д (15 Вт) и ГЛ-206И (20Вт).

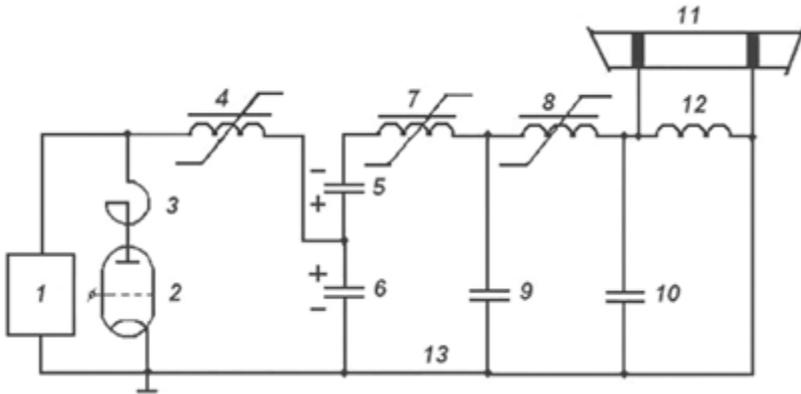


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема высоковольтного импульсного модулятора ИП:

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.

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.

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 конденсаторами паров меди (поз.4)). АВ – выходная апертура АЭ, равная внутреннему диаметру D_k разрядного канала, α_1 – угол

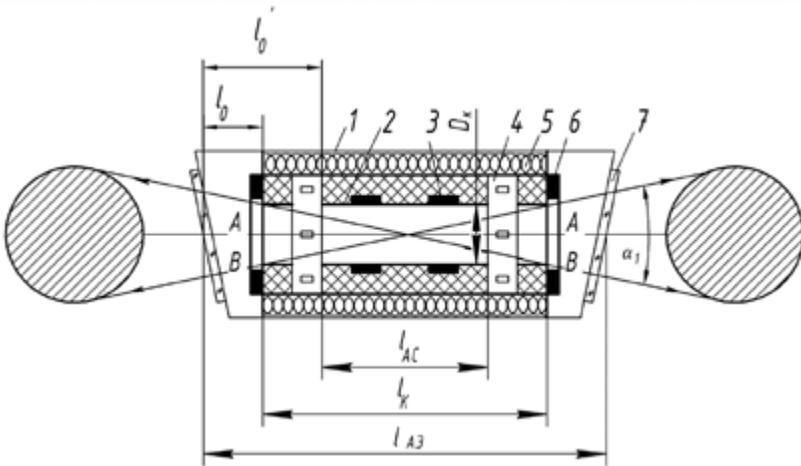


Рис. 4. Схематическое изображение АЭ «Кулон» ЛПМ без зеркал: 1 – вакуумноплотная оболочка; 2 – разрядный канал; 3 – генераторы паров меди; 4 – конденсоры паров меди; 5 – теплоизолятор; 6 – электроды; 7 – выходные окна; $l_{AЭ}$ – длина АЭ; D_k и l_k – диаметр и длина разрядного канала; l_{AC} – длина активной среды (АС); l_0 и l_0^* – расстояния от выходного окна до разрядного канала и активной среды соответственно; α_1 – угол распространения пучка сверхсветимости.

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.

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

Табл. 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 выпукло-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° , 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, λ – длина волны излучения), то для практического определения расходимости(θ) пучков излучения ЛППМ 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 апертуры разрядного 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), τ – длительность импульсов излучения по полувысоте, r – радиус сфокусированного пятна излучения. В наших экспериментах рабочая ЧПИ ЛПМ составляла $f = 14-15$ кГц, длительность импульсов излучения (по полувысоте) $\tau = 10 \dots 13$ 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.

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]

Высокоселективные отражатели для отпаянных лазеров с короткоживущей инверсией

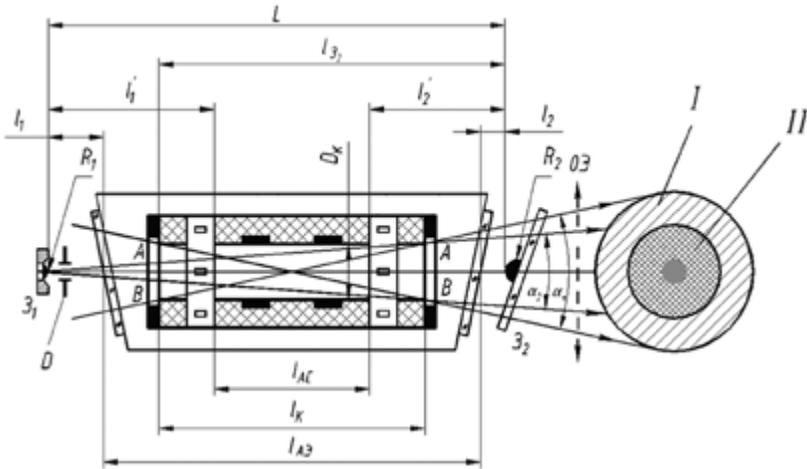


Рис. 5. Оптическая схема ЛПП с АЭ «Кулон» в режиме с НР с двумя выпуклыми зеркалами:

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, $l_{AЭ}$ – 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 – расстояние от зеркала Z_2 до выходной апертуры АВ разрядного канала; α_1 – угол распространения некогерентного пучка сверхсветимости, сформированного суммарной геометрической апертурой разрядного канала; α_2 – угол распространения резонаторного (качественного) пучка излучения; I и II – распределение интенсивности пучка сверхсветимости и резонаторного пучка излучения в ближней зоне; $OЭ$ – коллимирующий или фокусирующий оптический элемент или система.

и проведенных нами исследований и расчетов с НР, позволили установить, что в НР с двумя выпуклыми зеркалами возможно формирование строго однопучкового излучения (дифракционного качества) непосредственно на фоне некогерентного апертурного пучка сверхсветимости), 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.

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

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 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 загухает. 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 ($R_1 = 0,6 \dots 3$ см) (как и в однозеркальном режиме)– на 1-2 порядка меньше расстояния от зеркала Z_1 до выходной апертуры разрядного канала АВ ($R_1 < 1/10 \dots 100$). При этих условиях обратная связь от зеркала Z_2 с АС начинается раньше и с большей рабочей поверхностью, 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 3-его условия необходимо было установить зависимость расходимости резонаторного пучка (θ), 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

Высокоселективные отражатели для отпаянных лазеров с короткоживущей инверсией

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. 1-ое условие) с указанием геометрических размеров, необходимых для проведения расчетов. Для определения месторасположения изображения и его размеров использовались формулы 5) для выпуклого сферического зеркала

$$\frac{1}{l} - \frac{1}{f} = -\frac{R}{2} \quad \text{и} \quad \frac{H}{h} = \frac{f}{l} \quad (4) \text{ и } (5)$$

где l – расстояние от предмета до зеркала (на рис. 6 – l_3 и l_3); 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.

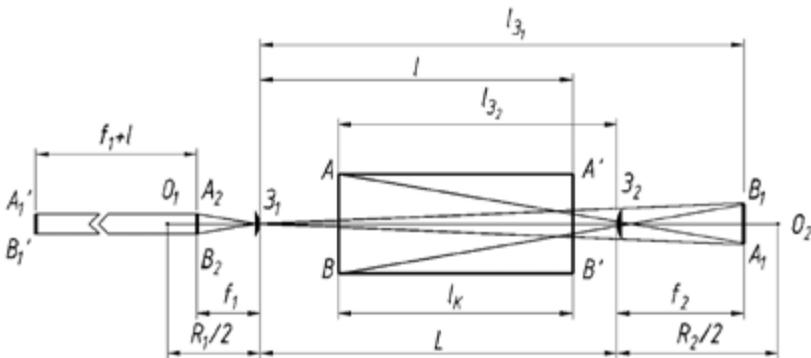


Рис. 6. Оптическая схема последовательного перемещения изображения апертуры АЭ в выпуклых зеркалах НР:

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

Выведенная формула для расчета расходимости пучка излучения (с учетом дифракционного предела) имеет следующий 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 $f_2 = \frac{R_2 \cdot l_{3_2}}{R_2 + 2l_{3_2}}$, $l_{3_2} = \frac{l_{AЭ} + l}{2} + l_2$, $f_1 = \frac{R_1 \cdot l_3}{R_1 + 2l_3} = \frac{R_1(L + f_2)}{R_1 + 2(L + f_2)}$

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 3_2 резонатора – $R_2=15; 30; 50; 120$ и 250 мм, радиусе кривизны глухого зеркала $3_1, R_1 = 30$ мм и расстояний от глухого 3_1 и выходного 3_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.

Табл. 2. Расходимость излучения для ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д: $l_1 = 50$ мм, $l_2=100$ мм, $l_{3_2}=740$ мм, $l = 692$ мм, $L = 920$ мм.

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

Табл. 3. Расходимость излучения для ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д: $l_1 = 250$ мм, $l_2 = 100$ мм, $l_{3_2} = 740$ мм, $l = 892$ мм, $L = 1120$ мм.

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

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

Табл. 4. Расходимость излучения для ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206И: $l_1=50$ мм, $l_2=100$ мм, $l_{3_2} = 830$ мм, $l = 816$ мм, $L = 1050$ мм.

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

Высокоселективные отражатели для тепловых лазеров с короткоживущей инверсией

Табл. 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 (30мм) и выходного R_2 (15; 30 и 50мм) 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 Z_2 , качественный пучок не является строго дифракционным, т.к. его расходимость в 4...5 раз больше дифракционного предела.

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.

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

Табл. 6. Суммарная средняя мощность излучения и мощность в дифракционном пучке ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д: расстояние от глухого зеркала Z_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

Табл. 7. Суммарная средняя мощность излучения и мощность в дифракционном пучке ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д: расстояние от глухого зеркала Z_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

На рис. 7 представлены примеры осциллограмм фонового некогерентного 1 и дифракционного 2 пучков излучения.

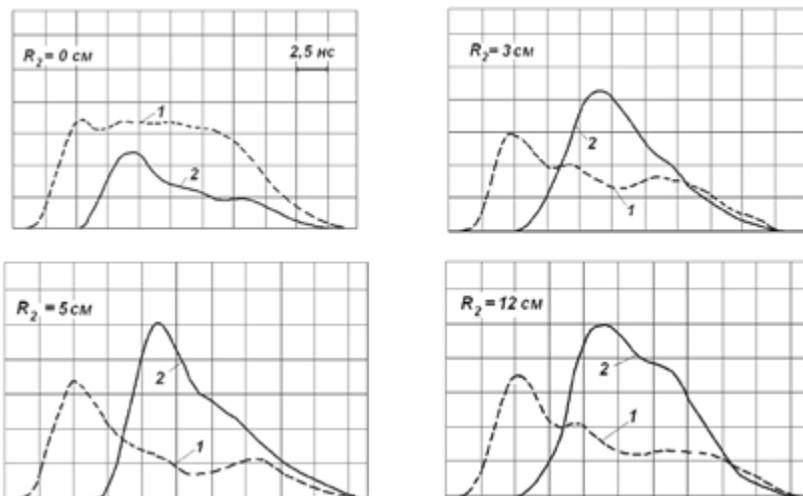


Рис. 7. Осциллограммы импульсов фонового (1) и дифракционного (2) пучков излучения ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206Д в режиме НР с двумя выпуклыми зеркалами.

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.

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 качественную 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 ИНТ10-20-20 фирмы Standa (рис. 1). Кроме того между столом и его четырьмя опорами ИТС065-12-06 были установлены пневмоизоляторы АР-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°C).

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.

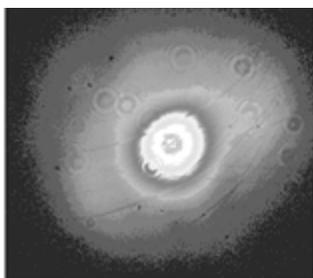
На рис. 8 представлен пример распределения интенсивности излучения ЛПМ в режиме с НР с двумя выпуклыми зеркалами в перетяжке сфокусированного пучка.

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/см².

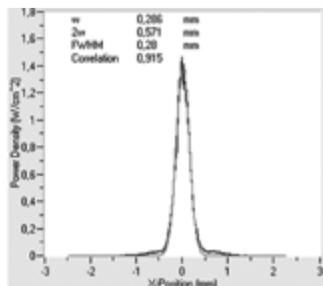
При этом распределение интенсивности излучения имеет очень высокую степень корреляции с гауссовым пучком – 0,915. Диаметр перетяжки пучка излучения составляет $2W = 0,571$ мм, что соответствует дифракционной расходимости пучка – $\theta_{\text{дифр.}} = 0,1$ мрад. Средняя мощность излучения в дифракционном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

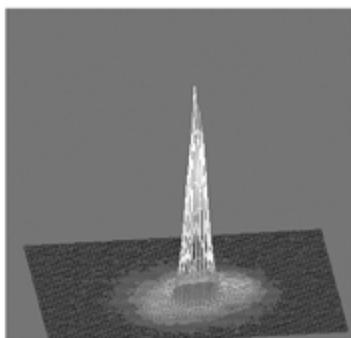
Высокоселективные отражатели для отпаянных лазеров с короткоживущей инверсией



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.

даемый теплосъемник, герметизация поля НР и поддержание в конструкции экспериментальной установки постоянной температуры позволили избавиться от нестабильностей ося 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...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/см², с АЭ «Кристалл» моделей ГЛ-205А, ГЛ-205Б и ГЛ-205В – до 30-100 Вт и 10^{12} Вт/см², что существенно повышает производительность микрообработки и толщину обрабатываемого материала до 1...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...1,2 мм, на «Каравелла-1М» – до 1 мм и до 1,5...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 ($З'_1$ - $З_2$) 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 $З_1$ 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 сданным 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 $З_1$ и выходной апертурой разрядного АЭ, и два резонаторных пучка 3 и 4.

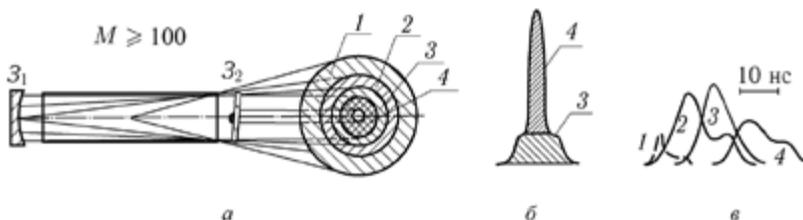


Рис. 9. Структура, распределение интенсивности в ближней (а) и дальней (б) зонах и осциллограммы импульсов (в) выходного излучения ЛПМ в режиме с телескопическим НР при увеличении $M \geq 100$:

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 ~ 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).

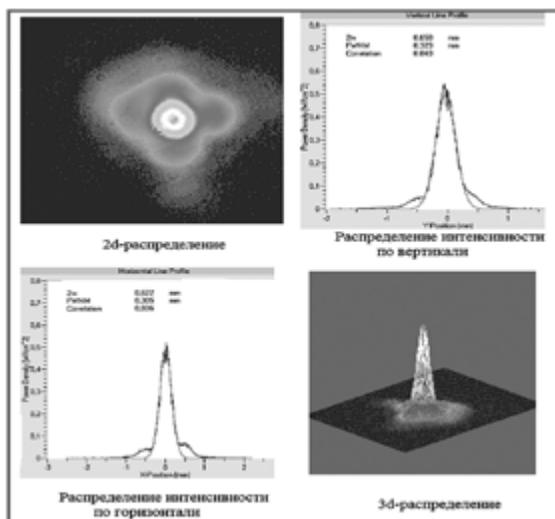
Как видно из рис. 9, распределение интенсивности в дальней зоне (б) с НР имеет ступенчатый характер, обусловленный наличием пучка 3 с расходимостью большей дифракционного предела. Излучение с таким распределением для качественной микрообработки материалов непригодно.

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 $R = 1,25$ 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 $R=15$ м.

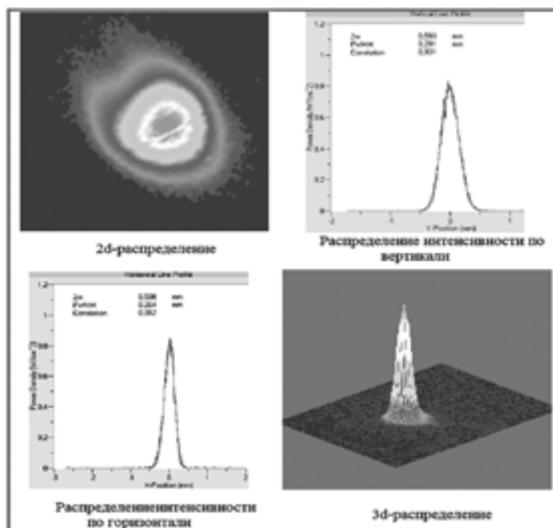
Исследования проводились при разных диаметрах диафрагмы ПФК: $D_2 = 1, 0,25, 0,1$ и $0,06$ мм. На рис.10 представлены распределения интенсивности для диафрагм с $D_2 = 0,25$ и $0,06$ мм. При $D_2 = 0,25$ мм (рис.10, а) в основании распределения интенсивности имеются крылья, соответствующие по размаху 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 (θ) 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 – $2w_y \cdot d$. То, что d_0 несколько разный по горизонтали и по вертикали обусловлено смещением

Высокоселективные отражатели для отпаянных лазеров с короткоживущей инверсией



$a (D_2 = 0,25 \text{ мрад})$



$b (D_2 = 0,06 \text{ мрад})$

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

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 $d_0 = (0,593 \text{ мм} + 0,538 \text{ мм})/2 = 0,566$ мм, что соответствует расходимости пучка $\theta = 0,566 \text{ мм}/7500 \text{ мм} = 0,074$ 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).

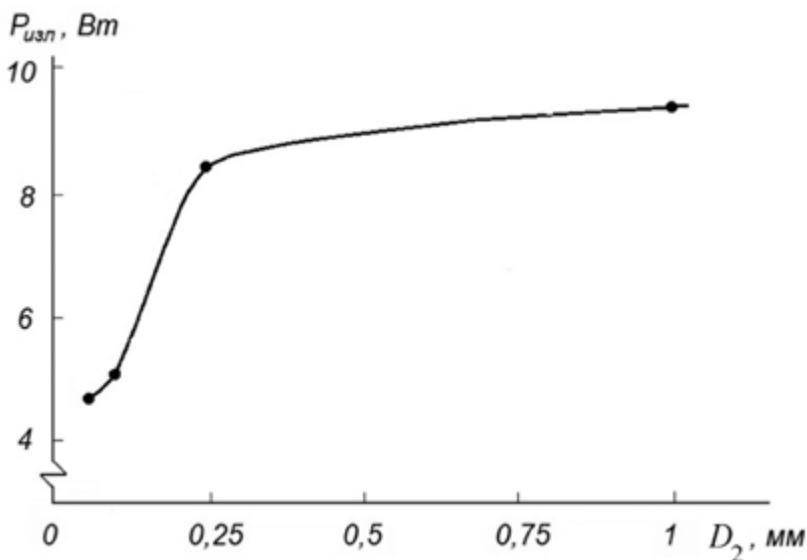


Рис. 11. Зависимость средней мощности излучения ($P_{\text{изл}}$) ЛПМ с АЭ «Кулон» ГЛ-206И в режиме с телескопическим НР с увеличением $M = 220$ от диаметра диафрагмы (D_2) ПФК.

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. При этом, как видно из распределения интен-

сивности на рис. 10, б, 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 производительного и качественного воздействия излучения на объекты различного характера

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 многопучковая, причем каждый пучок обладает своими пространственными, временными и энергетическими характеристиками. Излучение ЛПМ с такой структурой не пригодно для качественной 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 качественных 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 теплосъемнике 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.

3. 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.

4. 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/см², АЭ «Кристалл» моделей ГЛ-205А, ГЛ-205Б и ГЛ-205В – до 30-100 Вт и 10^{12} Вт/см², что существенно повышает производительность микрообработки и толщину обрабатываемых материалов до 1...2 мм.

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. Pulsed laser action in atomic copper vapor / M. Piltch, W.T. Walter, N. Solimene [et al.] // Bull.Amer.Phys.Soc. 1966. Vol.11, №1. P. 113.
2. Эффективный импульсный лазер на парах меди с высокой средней мощностью / А.А. Исаев, М.А. Казарян, Г.Г. Петраш // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 16. 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. Т1 / 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. Т2 / В.М. Батенин, П.А. Бохан, А.М. Бойченко [и др.]; Под ред. В.М. Батенина. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 616 с.
9. Little С.Е. 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. and Walter W.T. Coherence properties of the pulsed copper vapor laser // Bull. Am. Phys. Soc. 1971. Vol.16. P. 41-42.
12. Применение неустойчивых резонаторов для получения дифракционной расходимости излучения импульсных газовых лазеров с большим усилением / К.И. Земсков, А.А. Исаев, М.А. Казарян [и др.] // Квант.электроника. 1974. Т. 1. 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-ой симп. по физике газовых лазеров: Тез. докл. Новосибирск. 1974. С. 141.
14. Сжимающиеся пучки в телескопических резонаторах / А.А. Исаев, М.А. Казарян, Г.Г. Петраш. [и др.] // Квант. 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 [и др.] // Квант.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 // Квант.электроника. 1985. Т. 12, № 1. С. 74-79.

17. Лябин Н.А. Характеристика излучения лазера на парах меди // Импульсные газовые лазеры: Тез.докл. конференции. ЦНИИЭ. М., 1986. С. 15-16. (Сер. 11. Лазерная техника и оптоэлектроника; Вып.3(237)).
18. Эффективная система генератор-усилитель на основе лазерных активных элементов на парах меди / В.В. Зубов, Н.А.Лябин, А.Д. Чурсин // Квант.электроника. 1986. Т. 13, №12. С. 2431-2436.
19. Лазер на парах меди с высокостабильным однопучковым излучением и управляемой расходимостью / В.В. Зубов, Н.А.Лябин, А.Д. Чурсин // Квант.электроника. 1988. Т. 15, №10. С. 1947-1954.
20. Безрезонаторный лазер на парах меди с высоким качеством излучения / Н.А. Лябин // Квант.электроника. 1989. Т. 16, №4. С. 652-657.
21. Пат. 2226022 Российская Федерация. МПК⁷ H 01 S 3/0975. Генератор наносекундных импульсов для возбуждения лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов./ Н.М. Лепехин, Ю.С. Присеко, В.Г. Филиппов, Н.А. Лябин, А.Д. Чурсин, И.С. Колоколов; заявители и патентообладатели авторы. № 2002118259; заявл. 10.07.2002; опубл. 20.03.2004, 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 // Прикл. Физика. 2005. №1. С. 110-115.
23. Патент 2432652 Российская Федерация, МПК H 01 S 3/03, /05. Импульсный лазер / Н.А. Лябин, З.К. Иполлитова, А.Д. Чурсин, И.С. Колоколов; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПП «Исток». №2010133034; заявл. 05.08.2010; опубл. 27.10.2011, 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. СВЧ-техника. 2003. Вып. 2(482). С. 17-35.
25. Лазеры на парах меди :от промышленных до медицинских приложений / Н.А. Лябин // 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// Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения и информатики: Сборник научных трудов по материалам XIVМеждународнойнаучно-практической конф. М.: МГУПИ. 2011. С. 221-227.

Отделение физических наук

Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Парамонов В.С., Клименко В.И.,
Парамонова Г.М., Колоколов И.С., Бетина Л.Л., Асратян А.А.,
Феофанов И.Н.

**Высокоселективные отражатели для отпаянных лазеров с
короткоживущей инверсией**

Формат 60 x 84/16
Гарнитура Таймс
Усл. печ. л. 1,74. Усл. изд. л. 1,2
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.