

А.Г. Григорьянц, В.В. Васильцов

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ И ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ

*Рассмотрены вопросы применения мощных технологических лазеров различного типа. Приведены теоретические оценки качества излучения и экспериментальные данные пространственной структуры излучения мощных волноводных CO<sub>2</sub>- и волоконных лазеров, а также исследована зависимость скорости резания от толщины металла.*

**E-mail:** v.vasiltsov@mail.ru

**Ключевые слова:** технологический лазер, структура излучения, расходимость, скорость резания.

**Введение.** Продолжающееся развитие лазерных технологий обработки материалов предъявляет повышенные требования к источникам лазерного излучения (надежность, высокое качество излучения, низкие эксплуатационные расходы, высокий ресурс работы и малая стоимость).

Современные индустриальные CO<sub>2</sub>-лазеры имеют энергетический КПД  $\eta$  до 10 %; выпускаются модели различной мощности (до 30 кВт) при средней цене 90 долл. за 1 Вт и почасовой цене эксплуатации 4 долл. за 1 Вт [1]. Энергетический КПД твердотельных технологических лазеров на Nd:YAG составляет 3 %, мощность — 6 кВт при средней цене 145 долл. за 1 Вт и почасовой цене эксплуатации 5 долл. за 1 Вт; КПД волоконных технологических лазеров — 20 %, мощность — 10 кВт при средней цене 360 долл. за 1 Вт и почасовой цене эксплуатации 1 долл. за 1 Вт.

Наибольший рост рынка продаж ожидается для твердотельных лазеров с диодной накачкой (включая волоконные) (ТТЛДН) и для диодных лазеров прямого действия (ДЛ).

Весьма перспективны компактные целевые (слэб) CO<sub>2</sub>-лазеры с высокочастотной накачкой (ВЧ), обладающие высоким качеством излучения, близким к дифракционному пределу, а также волноводные CO<sub>2</sub>-лазеры киловаттного уровня мощности с дифракционным качеством излучения при высокой компактности, экономичности и надежности [2—4].

К волноводным лазерам относятся газовые лазеры (например, СО, СО<sub>2</sub>-лазеры, эксимерные Хе- и KrF-лазеры, в которых распространение лазерного излучения через активную среду происходит в волноводе), а также волоконные лазеры.

Отличие волноводных газоразрядных лазеров от обычных газовых лазеров состоит в наличии полого, например диэлектрического, волновода между зеркалами, который выполняет несколько функций. С одной стороны, внутренняя поверхность волновода ограничивает объем, заполненный активной средой, с другой, он служит каналом,

по которому распространяется лазерное излучение, является составной частью волноводного резонатора и определяет модовый состав излучения. Для волноводных  $\text{CO}_2$ -лазеров легко реализуется основное их преимущество как технической системы — компактность конструктивного исполнения и снижения на этой основе массогабаритных показателей [5].

Волновод в  $\text{CO}_2$ -лазерах, как правило, представляет собой газоразрядную трубку с длиной, значительно большей внутреннего диаметра, который в свою очередь может превышать длину волны излучения в сотни раз.

Волоконными лазерами называют твердотельные волноводные лазеры с накачкой излучением полупроводниковых лазеров. Их создание стало возможным на базе многолетнего развития физики активных сред твердотельных лазеров, оптических волноводов и технологии их изготовления, а также достижений в области полупроводниковых лазеров [6]. Мощность излучения современных волоконных лазеров может достигать нескольких десятков киловатт. В диапазоне средней мощности до нескольких сотен ватт эти лазеры генерируют одномодовое излучение с предельной дифракционной расходимостью. В то же время мощные волоконные лазеры (более 1 кВт) не являются одномодовыми и имеют расходимость выходного излучения, существенно превышающую дифракционный предел.

Зарубежный опыт использования волоконных лазеров для газолазерной резки показывает, что они обладают существенными преимуществами по скорости резания металлических (особенно цветных металлов) листов малой толщины. В отношении волоконных лазеров с мощностью несколько киловатт и более до сих пор не сложилось единого мнения среди специалистов в области лазерных технологий относительно их эффективности по сравнению с дисковыми твердотельными и  $\text{CO}_2$ -лазерами. Однако волоконные лазеры обладают рядом неоспоримых преимуществ, среди которых — компактность, а также внутреннее и стабильное положение элементов резонатора. Поэтому актуальным является определение области применения этих лазеров среди большого числа лазерных технологических процессов.

От пространственных характеристик сфокусированного пучка лазерного излучения технологических лазеров во многом зависит эффективность технологических операций и различных режимов их реализации. Поэтому на практике важно детально изучить пространственные характеристики сфокусированного излучения мощных волноводных  $\text{CO}_2$ -лазеров и волоконных лазеров.

**Параметры качества лазерного излучения.** Кратко рассмотрим основные сведения о качестве излучения, которое во многом определяет технологические возможности каждого типа лазеров. Качество излучения — одна из основных характеристик лазеров, от которой во многом зависит производительность и точность лазерных технологических операций. Современные достижения базируются на результатах развития

лазерной оптики и оптических технологий. Большую роль также играют конструктивные решения, касающиеся стабилизации с высокой точностью пространственного положения оптических элементов и их формы, прежде всего линз, при нагреве в мощных лазерах.

С увеличением мощности лазеров условия для получения высокого качества излучения усложняются, так как возрастают тепловые и лучевые нагрузки на оптические элементы и активные среды, а также предъявляются все большие требования к системам термостабилизации. Поэтому качество излучения рассматривается с учетом мощности лазерного излучения. Например, для лазеров малой мощности (до нескольких сотен ватт) получить предельно высокое качество излучения значительно легче, чем для лазеров высокой мощности (более 1 кВт).

От качества излучения непосредственно зависят параметры сфокусированного пучка излучения: диаметр пучка в фокальной плоскости; глубина фокусировки и распределения интенсивности в плоскостях поперечного сечения в самом фокусе и вблизи его в пределах глубины фокусировки.

Количественную характеристику качества излучения дает угловое распределение интенсивности излучения в дальней зоне, которое обычно измеряется в фокальной плоскости фокусирующей линзы. По такому распределению определяется мощность или энергия излучения, распространяющегося в заданном угле. Самую полную информацию о технологических возможностях сфокусированного пучка лазерного излучения можно получить с использованием набора распределений интенсивности в его поперечных сечениях в пределах глубины фокусировки. Однако пространственные характеристики излучения часто описываются одним параметром — углом расходимости, в котором интенсивность излучения в дальней зоне уменьшается в  $1/e^2$  раз ( $e = 2,77$ ). Применяют более общий параметр — произведение апертуры лазерного излучения и его расходимости, либо наиболее распространенные в последнее время и являющиеся уже общепринятым стандартом качества пучка лазерного излучения параметры  $M^2$  и  $K$ . Последние два параметра связаны между собой равенством

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{\lambda}{\pi W_0 \theta_0}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения;  $\theta_0$  — угол расходимости пучка лазерного излучения после плоскости перетяжки (его минимального диаметра за фокусирующей линзой или зеркалом);  $W_0$  — радиус пучка излучения в плоскости перетяжки, при котором амплитуда поля снижается в  $e = 2,77$  раз. Поскольку угол  $\theta_1 = \lambda/(\pi W_0)$  равен углу расходимости гауссова пучка с полушириной  $W_0$ , то параметр  $M^2$  —

это отношение угла расходимости лазерного пучка к углу расходимости гауссова пучка с тем же размером плоскости перетяжки за фокусирующей линзой:

$$M^2 = \frac{\theta_0}{\theta_r}. \quad (2)$$

В отличие от других одиночных параметров более полно качество излучения характеризует параметр  $M^2$ , так как он показывает, насколько конкретный пучок лазерного излучения и гауссов пучок различаются, а расходимость излучения отличается от дифракционного предела. При этом гауссов пучок играет роль эталонного пучка.

В зарубежной научной литературе параметр  $W_0\theta_0$  называют beam parameter product (BPP):

$$BPP = W_0\theta_0 = \frac{\lambda}{\pi} M^2. \quad (3)$$

Следует отметить, что параметр (3) только частично отражает качество излучения. Параметры  $K$  и  $M^2$  в большей мере определяют пространственные характеристики пучка лазерного излучения, особенно когда они не на много отличаются от единицы. Этими параметрами описываются качество излучения технологических CO<sub>2</sub>-лазеров, поскольку их пучок излучения очень близок к гауссову пучку и практически достигается дифракционный предел расходимости излучения. В то же время параметр  $BPP$  часто используют вместо параметров  $M^2$  и  $K$ , чтобы характеризовать лазеры, качество излучения которых относительно далеко от идеального, т. е. для  $K \leq 10$  и  $M^2 \geq 10$  или близкие к этим значениям параметры качества. Параметром  $BPP$  обычно описывают пространственные характеристики излучения твердотельных лазеров, в том числе и с накачкой полупроводниковыми лазерами.

В лазерных технологиях используются сфокусированные пучки лазерного излучения для создания высокой концентрации их мощности или энергии. Поэтому важно получать достаточно малые поперечные размеры пучка лазерного излучения в фокальной плоскости. Радиус сфокусированного пучка излучения вычисляют по формуле

$$r_0 = \frac{2F\lambda}{\pi DK} = \frac{2F\lambda M^2}{\pi D}, \quad (4)$$

где  $F$  — фокусное расстояние линзы или зеркала;  $D$  — диаметр лазерного пучка на линзе. Из (4) следует, что от параметров  $M$  и  $K$  зависит диаметр  $d_0 = 2r_0$  пучка лазерного излучения в фокальной плоскости. В случае высокого качества излучения ( $M^2 \cong 1$ ) диаметр  $d_0$  принимает

наименьшее значение. От параметров  $M^2$  и  $K$  также зависит продольная длина области сконцентрированного излучения — глубина фокусировки  $l_0$ . Глубина оценивается как удвоенное расстояние от плоскости перетяжки, на которой площадь сечения пучка лазерного излучения увеличивается в 2 раза и, соответственно, во столько же раз падает интенсивность

$$l_0 \cong \frac{4(\sqrt{2}-1)F^2\lambda M^2}{\pi D^2}. \quad (5)$$

Для пучков лазерного излучения относительно низкого качества ( $M^2 \geq 10$ ) в приближении геометрической оптики вместо формул (4) и (5) запишем

$$r_0 \cong \frac{2F}{D}(W_0\theta_0) = \frac{2F}{D}BPP, \quad (6)$$

$$l_0 \cong 8(\sqrt{2}-1)\frac{F^2}{D^2}(W_0\theta_0) = 8(\sqrt{2}-1)\frac{F^2}{D^2}BPP. \quad (7)$$

Параметр  $BPP = W_0\theta_0$  постоянен в любой плоскости, поэтому

$$W_0\theta_0 = \frac{D}{2}\theta,$$

где  $\theta$  — угол расходимости пучка лазерного излучения, падающего на линзу.

Следует отметить, что формулы (4) и (5) частично учитывают дифракцию излучения в зоне фокусировки, а (6) и (7) получены в приближении геометрической оптики. В связи с этим рассмотрим случай гауссова пучка ( $M^2 = 1$ ), для которого имеют место более точные формулы

$$r_0 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{\lambda F}{D}, \quad (8)$$

$$l_0 = \frac{8}{\pi} \frac{\lambda F^2}{D^2}, \quad (9)$$

где радиус  $r_0$  относится к распределению интенсивности гауссова пучка в плоскости перетяжки  $J = J_0 \exp(-r^2/r_0^2)$ , а диаметр  $D$  — к гауссову пучку в плоскости линзы  $J = J_{0л} \exp(-4r^2/D^2)$ . Таким образом, каждый из параметров качества излучения  $M^2$ ,  $K$  и  $BPP$  определяет важные для процессов воздействия на материалы характеристики сфокусированного пучка излучения. Указанные параметры, кроме параметра  $M^2$  при  $M^2 \approx 1$ , не дают информации о форме рас-

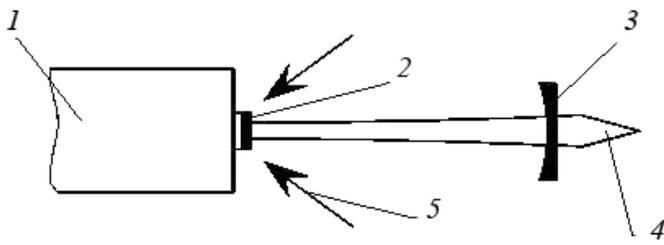
пределения интенсивности по сечению пучка излучения в фокальной плоскости и близких к ней плоскостях в пределах глубины фокусировки. В этом проявляется ограниченность способа описания качества излучения одним параметром.

**Основные свойства твердотельных дисковых лазеров.** В настоящее время мощные дисковые лазеры составляют основную конкуренцию мощным волоконным лазерам в области лазерных технологий. Они обладают той же длиной волны излучения, одинаковым КПД, но отличаются существенно более качественным излучением по параметру  $M^2$ . В связи с этим целесообразно перечислить основные свойства дисковых лазеров.

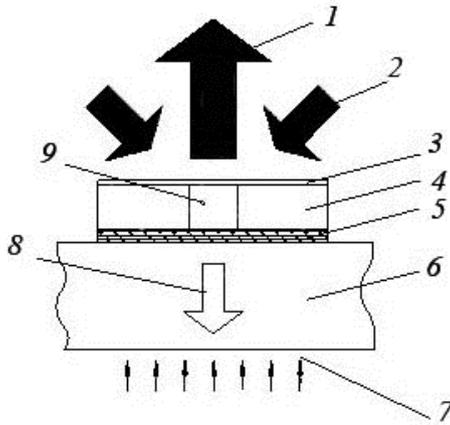
Дисковые лазеры относятся к типу слэб-лазеров, в которых активный твердотельный элемент выполнен в виде тонкой пластины. Достаточно малая толщина такого элемента позволяет эффективно охлаждать его. Особенностью дискового лазера является то, что активный элемент в форме тонкого диска расположен перпендикулярно оптической оси резонатора. Подобный выбор пространственного положения диска позволяет избежать радиальных неоднородностей температуры в активном элементе и соответствующих оптических неоднородностей в нем [7]. При этом проявляются продольные неоднородности температуры, вызывающие термическую деформацию дисков, в основном, в виде изгиба [8, 9].

Малый объем активной среды по сравнению с объемом в обычных стержневых лазерах позволяет создавать эффективные оптические системы накачки дисковых лазеров с использованием излучения полупроводниковых лазеров. Активный элемент с толщиной 150...350 мкм при диаметре до нескольких десятков миллиметров активирован иттербием. Усиление генерируемого излучения происходит на малой длине  $l_a = h$ , но оно достаточно вследствие очень высокой концентрации иттербия в кристалле граната, которая в несколько десятков раз превышает предельную концентрацию неодима в тех же кристаллах. Это обусловлено тем, что атомы иттербия лучше согласуются с решеткой кристалла граната, чем атомы неодима.

Конструкция дисковых лазеров позволяет в зависимости от мощности излучения и технических требований их применения использовать для лазеров разные традиционные оптические формирующие системы, создаваемые на базе известных и хорошо разработанных резонаторов и оптических элементов. На рис. 1 приведены принципиальная оптическая и пояснительная схемы дискового лазера [8, 9]. Оптическая схема обеспечивает многократное прохождение излучения накачки через активный элемент и отражение излучения от задней поверхности диска и зеркал системы накачки. Тем самым создается высокая однородность инверсии в объеме активного элемента.



*a*



*б*

**Рис. 1. Схемы дискового лазера:**

*a* — принципиальная оптическая (*1* — охладитель диска; *2* — тонкий диск лазерной активной среды; *3* — полупрозрачное выходное зеркало резонатора; *4* — лазерный пучок; *5* — излучение накачки); *б* — пояснительная (*1* — лазерный пучок; *2* — излучение накачки; *3* — просветляющее покрытие; *4* — активная среда, больше области накачки для возможности дальнейшего увеличения мощности генерации; *5* — отражающее покрытие; *6* — подложка; *7* — поверхностное охлаждение; *8* — тепловой поток; *9* — область накачки)

Энергосъем с одного диска ограничен его объемом, поэтому увеличение мощности излучения обеспечивается возрастанием числа используемых дисков, последовательно устанавливаемых в устойчивом резонаторе с пространственным селектором. Как и в  $\text{CO}_2$ -лазерах, в дисковых лазерах обеспечивается согласование параметров резонатора и активной среды. По сравнению с мощными волоконными лазерами, дисковые лазеры имеют больше возможностей формирования излучения и управления его параметрами, включая поляризацию. Однако основное достоинство дисковых лазеров — отсутствие лучевых перегрузок по интенсивности в активной среде и в оптических элементах. Дисковые лазеры работают как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме, в том числе с модуляцией добротности резонатора. Это значительно расширяет область их технологического применения, прежде всего в диапазоне больших мощностей (более 1 кВт).

Выходная мощность дискового лазера может быть увеличена путем последовательного использования определенного числа дисков. Диаметр диска ограничивается усилением спонтанного излучения в плоскости диска, перпендикулярной лучу. КПД лазера зависит от режима работы. В многомодовом режиме работы ( $M^2 \geq 10$ ) оптический КПД (отношение выходной мощности к мощности накачки) достигает 70 %. По данным фирмы TRUMPF, с учетом остальных потребителей энергии (лазерных диодов 50 % и теплообменника) КПД дискового лазера превышает 25 %. Эти лазеры могут достигать высокой мощности и в одномодовом (TEM<sub>00</sub>) режиме работы.

Для получения мощного излучения высокого качества в дисковых лазерах используют уже разработанные методы формирования пучков излучения, включая усилительную схему с задающим генератором.

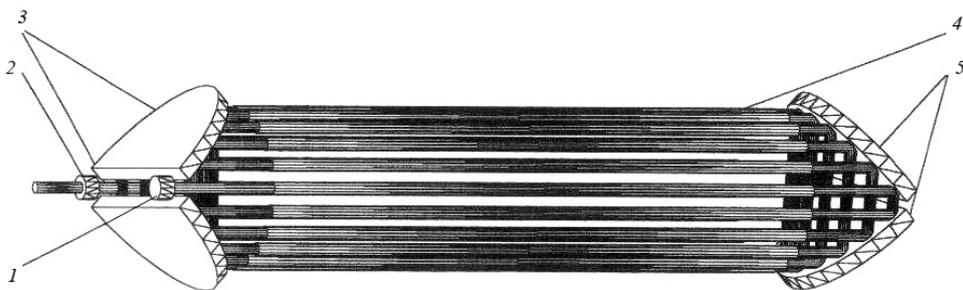
Как показывает зарубежный опыт, дисковые лазеры с выходной мощностью в несколько киловатт становятся конкурентоспособными, например в технологии лазерной сварки. В диапазоне мощности несколько сотен ватт и менее они не имеют преимуществ перед волоконными лазерами вследствие относительной сложности конструкции, кроме случаев, когда требуется поляризуемость излучения, узкий спектр или режим модулированной добротности. Сравнительно большая площадь активной области диска позволяет получать важные для приложений высокие импульсные мощности и энергию. За счет хорошего качества излучения дисковые лазеры займут свое место в различных лазерных технологиях, особенно в тех, для которых требуются средние мощности излучения в несколько киловатт и более. Конструкция дисковых лазеров позволяет применять их в качестве многофункциональных излучателей, например, для накачки преобразователей частоты на кристаллах, для генерации пикосекундных и фемтосекундных импульсов и других важных приложений.

**Волноводные СО<sub>2</sub>-лазеры.** Для средних мощностей излучения (до 1...2 кВт) несомненными преимуществами по всем основным требованиям к промышленным лазерам обладают диффузионные СО<sub>2</sub>-лазеры, особенно по стоимости, массогабаритным характеристикам и эксплуатационным расходам [10, 11].

В отличие от щелевых лазеров, в трубчатых СО<sub>2</sub>-лазерах используют более дешевые источники питания, а для получения излучения высокого качества не требуется применять внешние формирующие оптические системы для создания осесимметричного выходного пучка излучения. Кроме того, ширина разрядной области щелевых СО<sub>2</sub>-лазеров больше ее высоты, что вынуждает применять устойчиво-неустойчивые резонаторы. Это в свою очередь не обеспечивает генерацию осесимметричного пучка излучения.

Особое место занимают волноводные СО<sub>2</sub>-лазеры диффузионного охлаждения, возбуждаемые разрядом переменного тока звуковой частоты.

На рис. 2 приведена оптическая схема излучателей многоканальных, однолучевых, волноводных  $\text{CO}_2$ -лазеров диффузионного охлаждения. Излучение из параллельно расположенных трубок (9...27 шт.) с помощью уголковых отражателей последовательно обходит все трубки, тем самым образуя один длинный резонатор. Излучение осуществляется через полупрозрачное плоское зеркало из селенида цинка ( $\text{ZnSe}$ ). Вследствие высокого качества излучения и хороших эксплуатационных характеристик однолучевые, волноводные  $\text{CO}_2$ -лазеры средней мощностью 300...1500 Вт применяют в технологии и медицине. Они эффективны в составе лазерных технологических комплексов для прецизионной резки металлических (толщиной до 10 мм) и неметаллических (толщиной до 40 мм) материалов; сварки; наплавки и изготовления деталей из композитных и металлических порошковых, а также нанопорошковых материалов.



**Рис. 2. Оптическая схема излучателей многоканальных, однолучевых, волноводных  $\text{CO}_2$ -лазеров диффузионного охлаждения:**

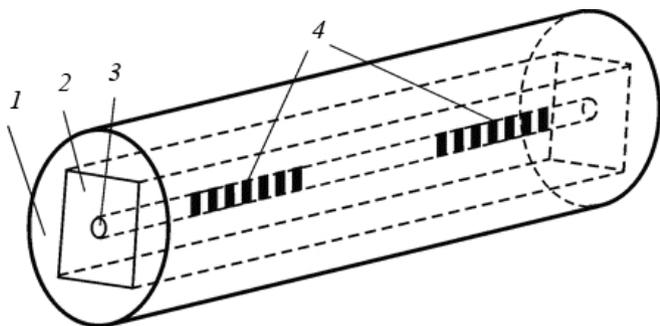
1 — заднее зеркало резонатора; 2 — выходное зеркало резонатора; 3, 5 — поворотные зеркала; 4 — газоразрядная трубка

В отличие от однолучевых, многолучевые волноводные  $\text{CO}_2$ -лазеры с более высокой мощностью излучения (до 6 кВт) и с достаточно высокой расходимостью излучения (до 4 мкрад) используются в промышленности, в основном, для лазерной закалки, легирования, наплавки и других технологических операций, для которых не требуется относительно высокой концентрации лазерного излучения.

**Волоконные лазеры малой и средней мощности.** Такие лазеры относятся к волноводным лазерам, в которых генерируемое излучение формируется в волноводе, являющемся составным элементом резонатора. Волноводные лазеры известны сравнительно давно, и как и другие типы лазеров, получили интенсивное развитие с газовыми и с твердотельными активными средами [12—16]. Общее свойство этих лазеров — эффективное охлаждение за счет малого радиуса цилиндрической области активной среды. Сами волноводы могут иметь различные конструкции. Например, в газовых лазерах используются полые трубки, внутри которых многократно отражается лазерное излучение, распространяющееся под малыми углами. Для твердотельных лазеров волноводы созданы на основе стеклянных волокон с

профильным по радиусу показателем преломления. В радиальных зонах с повышенным (незначительно) показателем преломления распространяется генерируемое излучение, которое многократно отражается от зоны с пониженным показателем преломления вследствие полного внутреннего отражения.

На рис. 3 приведена структура волоконного световода. В центральной части световода находится одномодовый активный волновод (сердцевина) диаметром 5...10 мкм, легированный, например примесью иттербия. Активный волновод находится внутри многомодового волновода диаметром 100...200 мкм для излучения накачки. Излучение полупроводниковых лазеров (диодная накачка) многократно пересекает активный волновод и на определенной длине распространения по всему волноводу практически полностью поглощается при пересечениях с одномодовым активным волноводом, преобразуясь в излучение генерации волоконного лазера с незначительным увеличением длины волны.



**Рис. 3. Структура волоконного световода:**

1 — внешняя полимерная оболочка; 2 — внутренняя кварцевая оболочка; 3 — легированная сердцевина; 4 — брэгговская решетка

Превышение показателя преломления сердцевины составляет  $\Delta n \approx 0,01$ , что обеспечивает одномодовый режим работы лазера, так как более высокие моды распространяются под большими углами и испытывают повышенные потери при распространении в активном волноводе. Вследствие этого происходит выделение (селекция) одной основной волноводной моды генерируемого излучения. В научной литературе внутренний активный волновод и окружающий его волновод для излучения накачки рассматривается как составной волновод с двумя оболочками.

Длина волны генерации иттербиевого волоконного лазера составляет  $\lambda = 1\,081$  нм, а для накачки применяется излучение полупроводниковых лазеров с длиной волны  $\lambda_p = 972$  нм. На практике для ввода излучения накачки используют торцевую или боковую схему. При этом соблюдаются условия согласования параметров пространственного спектра излучения с параметрами конкретного волоконного лазера.

В качестве зеркал резонатора применяются брэгговские решетки, создаваемые на краях активного волновода. Коэффициент отражения «глухого» зеркала на длине волны иттербиевого лазера достигает 99 %, выходным зеркалом часто является торец волновода. Брэгговские решетки представляют собой периодическое изменение показателя преломления в материале активного волновода. Хотя амплитуда изменения показателя преломления мала, в результате фазированного сложения слабых волн возникает значительное суммарное отражение. При этом условие фазированности отраженных волн обеспечивается выполнением условия Брэгга для генерируемой длины волны излучения, падающего на периодическую решетку показателя преломления (фазовую решетку). Такие решетки создаются в поле интерферирующего ультрафиолетового излучения, под воздействием которого происходит необратимое увеличение показателя преломления в активной среде, для чего в среду вносят специальные примеси.

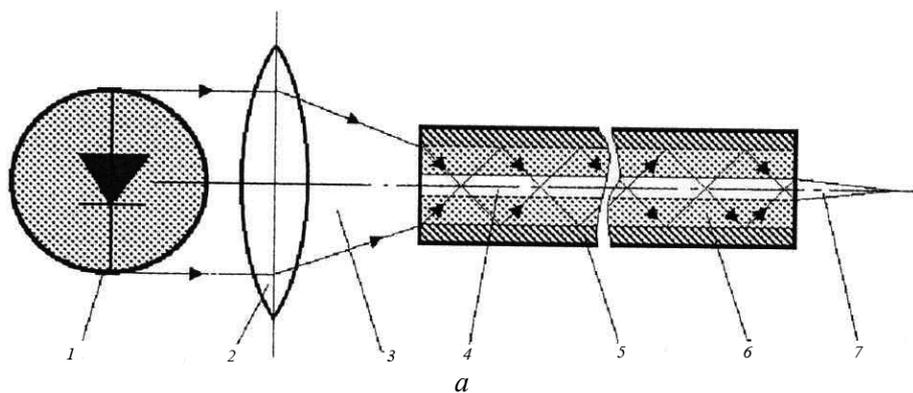
Активная среда волоконных лазеров представляет собой световод диаметром 20...50 мкм из стекла, допированного иттербием ( $\lambda = 1\ 080$  нм) или эрбием и иттербием ( $\lambda = 1\ 565$  нм). Световод окружен двумя прозрачными (стеклянными) оболочками — волноводом для излучения накачки, поступающего по всей внешней поверхности оболочки от диодных лазерных линеек.

Основные преимущества волоконных лазеров:

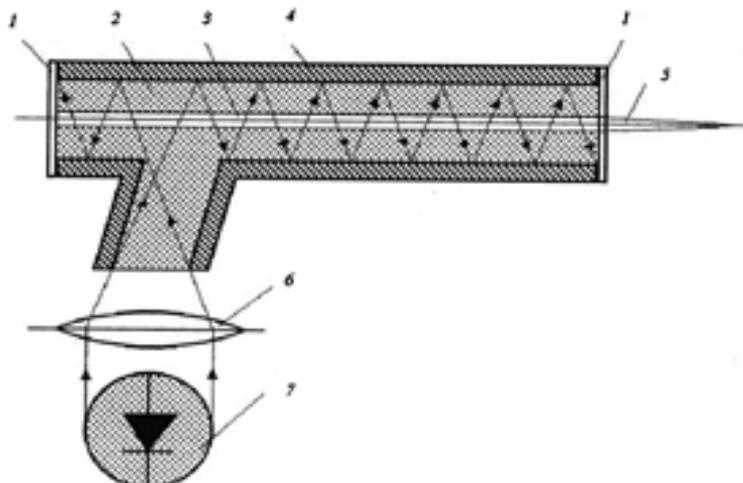
1. Полное отсутствие малоресурсных элементов. По данным НТО «ИРЭ-Полус», ресурс диодов накачки составляет не менее 50 000 ч.
2. Низковольтная конструкция, в лазере нет напряжений более 24 В.
3. Отсутствует оптический тракт передачи излучения рабочей головке, излучение передается по оптическому кабелю длиной 10...200 м.
4. Высокий КПД — 22...25 %, что более чем в 2 раза выше КПД  $\text{CO}_2$ -лазеров и в 7—10 раз выше КПД твердотельных лазеров.
5. Удивительная компактность лазера, особенно по сравнению с  $\text{CO}_2$ -лазерами.
6. Длина волны излучения 1,07 мкм близка к длине волны излучения YAG-лазеров, для фокусировки может быть использована классическая стеклянная и кварцевая оптика.

В первых лазерах (рис. 4, а) проводилась накачка с торца волокна, а усиление осуществлялось за счет многократного переотражения света в волокне большой длины (до 50 м). Для увеличения мощности волоконных лазеров используют многомодовую активированную накачку сбоку и резонатор, представляющий собой зеркала на торцах волокна длиной до 100 м, скрученного в бухту (рис. 4, б).

В мощных лазерах применяют трехслойное стеклянное волокно, активированное редкоземельными элементами. Волоконный лазер, используемый для технологических целей, должен иметь мощность 100 Вт ...4—6 кВт и более. Такие лазеры создаются путем набора мощности излучения от нескольких лазеров с меньшей мощностью. На рис. 5 приведена схема мощного волоконного лазера.



*a*



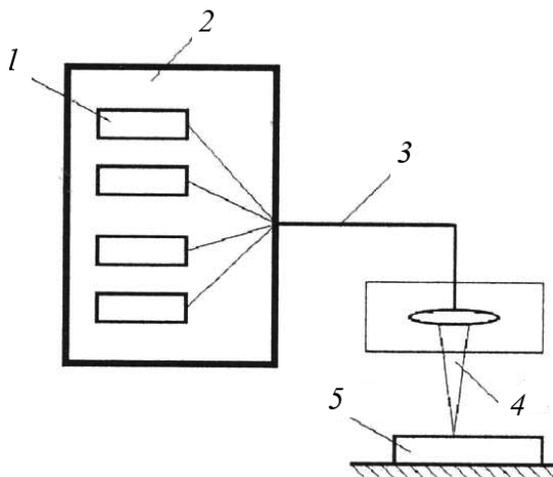
*б*

**Рис. 4. Схемы волоконных лазеров:**

*a* — одномодового (1 — одномодовый фотодиод; 2 — линза; 3 — сфокусированное излучение; 4 — активированное кварцевое волокно; 5 — защита волокна; 6 — оптическое кварцевое волокно; 7 — лазерное излучение); *б* — с активированной боковой накачкой (1 — торцевые зеркала; 2 — оптическое кварцевое волокно; 3 — активированное волокно, 4 — защита волокна; 5 — лазерное излучение; 6 — фокусирующая линза; 7 — светодиод)

В настоящее время модельный ряд лазеров включает в себя излучатели непрерывного режима: одномодовые мощностью 50...750 Вт и многомодовые мощностью 1000...20 000 Вт, импульсные для маркировки мощностью 5...25 Вт.

Технология волоконных лазеров высокой мощности еще находится в стадии доработок, вследствие чего они приобретаются не всеми промышленными пользователями. В последнее время рынок мощных волоконных лазеров стремительно расширяется с ростом объема продаж до 50 % в год. В России лидирующее положение занимает НТО «ИРЭ-Полус».



**Рис. 5. Схема мощного волоконного лазера:**

1 — волоконные лазеры мощностью 100 Вт; 2 — мощный волоконный лазер; 3 — волокно, передающее суммарное излучение; 4 — фокусирующая система; 5 — обрабатываемая деталь

Преимущества волоконных лазеров расширяют сферу применений технологий ЛОМ, что должно отразиться на увеличении общего объема продаж лазеров.

Угол расходимости излучения волоконных лазеров средней и малой мощности определяется дифракцией и близок к своему пределу  $\theta_B \cong \lambda/d_B$ , где  $d_B$  — диаметр активного волновода (сердцевины). Генерация излучения происходит на одной основной волноводной моде и поэтому излучение обладает высоким качеством ( $M^2 \approx 1$ ,  $K \approx 1$ ). Однако угол расходимости излучения на выходе из волновода имеет большее значение ( $\theta_B \approx 0,1$  рад при  $\lambda=1$  мкм и  $d_B = 10^{-3}$  см), поэтому для уменьшения угла расходимости используют коллимирующую линзу с фокусным расстоянием

$$F_k = \frac{D}{\lambda} d_B,$$

где  $D$  — диаметр пучка лазерного излучения на линзе, в фокальной плоскости которой находится выходной торец волновода. Угол расходимости коллимированного пучка, прошедшего линзу:  $\theta = \lambda/D$ . Так, при  $D = 2$  см имеем  $\theta \approx 0,5 \cdot 10^{-4}$  рад. Таким образом, очень малая площадь поперечного сечения активного волновода позволяет получать после телескопирования коллимированный пучок с очень высокой направленностью. Однако малая апертура генерируемого пучка излучения имеет и негативное последствие: с повышением мощности внутри активной среды возникают большие лучевые нагрузки. Например, при мощности непрерывного излучения  $P_L = 10^8$  Вт интенсивность излучения в активном волноводе достигает  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Следует отметить, что в дисковом лазере при той же мощности

интенсивность излучения внутри резонатора составляет около  $10^3$  Вт/см<sup>2</sup>. Тем не менее высокое качество излучения волоконных лазеров с таким значением мощности и их компактность обеспечивают им эффективное применение в различных лазерных технологиях.

Для расширения технологических возможностей этих лазеров разработаны схемы усилителя мощности с задающим генератором. Так удается уменьшить трудности формирования коротких импульсов и, соответственно, высокой частоты их следования, связанных с большими длинами активных волноводов (обычно несколько сотен метров компактно уложенного в бухту волокна). При этом используется импульсное излучение лазерных диодов, которые и определяют форму усиленных импульсов. В результате можно изменять частоту повторения импульсов в широком диапазоне значений, что обеспечивает оптимальные условия воздействия на материалы при различных технологических процессах.

**Применение волоконных лазеров малой и средней мощности.** Волоконные лазеры малой и средней мощности применяются для лазерной маркировки и гравировки, микросварки и микрорезки (например, для создания элементов медицинского оборудования), а также в книгопечатании, производстве полупроводниковых, электронных компонентов и других микрообработках материалов. Для этих целей оказывается достаточной мощность до 400 Вт [14].

Для лазерной маркировки используются импульсные лазерные системы с большой пиковой мощностью, необходимые для создания изменений поверхности материала при минимальном нагреве образца. Оптимальное управление пиковой мощностью и частотой повторения импульсов в зависимости от обрабатываемого материала лучше всего обеспечивается в системе усилитель мощности — задающий генератор. Такие технологии уже разработаны и доведены до коммерческого продукта, например зарубежной компанией SPI и российским НТО «ИРЭ-Полус». Последнее выпускает медицинские аппараты на основе волоконных лазерных модулей для хирургии и силовой терапии.

Для медицинских инструментов и имплантатов, а также для металлических компонентов, используемых в электронике, применяют коррозионно-стойкую сталь толщиной 0,1...0,5 мм. К качеству сварки таких компонентов предъявляются высокие требования, в частности к стабильности мощности. Превышение мощности приводит к перфорации материала, а малая мощность вызывает снижение прочности материала. Волоконные лазеры средней мощности (до 60 Вт) обеспечивают требуемое качество сварки с гладкими сварными швами без пустот и разрушений. Это достигается оптимизацией процесса выбора скорости сварки и параметров модуляции мощности конкретного материала.

Волоконные лазеры предназначены для резки тонких полупроводниковых пластин толщиной менее 100...200 мкм с небольшими

потерями материала по сравнению с потерями при традиционной алмазной резке. Кроме того, с помощью таких лазеров успешно осуществляется структурирование пластин и удаление тонких изолирующих слоев.

Для создания оптимальных характеристик резания используется модуляция интенсивности пучка лазерного излучения как на прямых и кривых участках, так и на углах резки. Такое применение приводит к увеличению выхода годных деталей и повышению их качества.

В медицинской промышленности волоконные лазеры применяются для фигурной вырезки стентов (stent) из тонкостенных трубок диаметром 0,8...12,0 мм и толщиной стенок 0,2 мм, изготавливаемых из коррозионно-стойкой стали, а также из сплава  $\text{SbCr}$ , нитинола (Nitinol) и других редких сплавов. Стенты хирургическим путем устанавливаются в местах сужения вен и артерий для улучшения кровотока.

Сочетание высокоэффективных источников накачки, разработка практичных схем ввода излучения накачки и соединение волокна с резонатором позволили создавать достаточно мощные и одновременно компактные и автоматизированные лазерные системы для промышленного применения. Накопленный опыт показывает, что волоконные лазеры средней мощностью до 400 Вт могут заменить дисковые и  $\text{CO}_2$ -лазеры. Они дают общий коэффициент экономической эффективности порядка 2 по отношению к дисковым лазерам [14]. По сравнению с  $\text{CO}_2$ -лазерами они имеют дополнительные преимущества: уменьшение расходов на обслуживание и волноводная транспортировка излучения.

Следует ожидать, что область технологического применения волоконных лазеров малой и средней мощности с одномодовым излучением будет расширяться, например, в полиграфической промышленности (изготовление гравюр), в медицине и других отраслях.

**Качество излучения мощных волоконных лазеров.** Увеличение мощности волоконных лазеров до 1 кВт и более возможно за счет удлинения одномодовых активных волноводов. Однако возникают принципиальные физические ограничения, связанные с возрастанием интенсивности излучения и длины активной области. Вследствие этого проявляются паразитные нелинейные эффекты: вынужденное комбинационное рассеяние; двухфотонное поглощение; чрезмерные лучевые нагрузки, ограничивающие мощность излучения и затрудняющие работу лазера [14—16]. Поэтому мощные волоконные лазеры создаются по схеме многоканальных лазеров, в которых одновременно генерируют несколько параллельно расположенных волноводных лазеров. Таким способом получают мощность излучения до нескольких десятков киловатт, но оно уже не является одномодовым и не имеет такого высокого качества излучения по параметру  $M^2$ , как у волоконных лазеров малой и средней мощности, хотя по параметру  $BPP$  мощные волоконные лазеры не уступают мощным  $\text{CO}_2$ -лазерам. Следовательно, важным отличительным признаком мощных воло-

конных лазеров является их многоканальность и, соответственно, многопучковость излучения. В связи с этим такие лазеры должны рассматриваться как отдельный тип волоконных лазеров со своими преимуществами по мощности и недостатками по качеству излучения, если оно описывается более общими характеристиками, чем параметр  $BPP$ . Здесь возникает большая аналогия с волноводными  $CO_2$ -лазерами. Однолучевые (одноканальные) волноводные  $CO_2$ -лазеры мощностью не более 1,0...1,5 кВт имеют высокое качество излучения ( $M^2 \approx 1$ ) и успешно применяются в разнообразных лазерных технологиях (в том числе в хирургии). В то же время многоканальные технологические лазеры (МТЛ), обеспечивая высокую мощность излучения (порядка десятка киловатт) и обладая технической простотой конструкции, пока мало используются в лазерных технологиях (термическая обработка, наплавка, легирование и др.) в виду относительно небольшой глубины фокусировки суммарного пучка лазерного излучения.

Мощные волоконные лазеры состоят из набора параллельных одномодовых активных волноводов (сердцевин), расположенных внутри одного многомодового волновода для излучения накачки (см. рис. 5). Число сердцевин пропорционально мощности, например, при мощности 3 кВт число сердцевин может составлять 7 шт. Обычно в каждом одномодовом активном волноводе с диаметром около 10 мкм происходит независимая генерация излучения, поэтому пучки лазерного излучения не фазированы между собой. Общее излучение будет результатом некогерентного сложения генерируемых пучков. Для их пространственного перемешивания используется многомодовый волновод, называемый транспортным, который имеет диаметр, близкий, к диаметру волновода для накачки ( $d_T \approx 100$  мкм). На выходе транспортного волновода угол расходимости суммарного пучка определяется дифракционным углом расходимости каждого отдельного пучка на его выходе:  $\theta_T \approx \lambda/d_B$ , где  $d_B$  — диаметр активного волновода. Следовательно, угол расходимости суммарного пучка превышает дифракционный предел в  $d_T/d_B$  раз, т. е. почти на порядок. Для повышения направленности выходного пучка используется коллимирующая линза, после которой угол его расходимости уменьшается до

$$\theta \approx \frac{d_T}{F_K}. \quad (10)$$

При этом фокусное расстояние коллимирующей линзы удовлетворяет соотношению

$$\frac{\lambda F_K}{d_B} = D, \quad (11)$$

где  $D$  — диаметр пучка излучения на линзе.

С учетом (9) равенство (8) принимает вид

$$\theta \approx \frac{d_T}{d_B} \frac{\lambda}{D}. \quad (12)$$

В соответствие с (10) параметр качества  $BPP$  определяется по формуле

$$BPP = \frac{\theta D}{4} = \frac{D d_T \lambda}{4 d_B}. \quad (13)$$

Например, для  $d_T = 100$  мкм,  $d_B = 10$  мкм,  $\lambda = 10^{-4}$  см имеем  $BPP = 2,5$  мм·мрад. Далее с учетом (3) находим

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} BPP = \frac{\pi d_T}{4 d_B}. \quad (14)$$

Поэтому для тех же значений параметров  $d_B$  и  $d_T$  получаем  $M^2 \approx 8$ .

Отметим, что у современных технологических  $\text{CO}_2$ -лазеров мощностью 2...3 кВт при  $D = 2$  см угол расходимости  $\theta = 0,5$  мм·мрад, следовательно, значение  $BPP$  очень близко к значению 2,5, при этом качество излучения по более важному параметру  $M^2 \approx 1$  значительно выше.

Для мощных волоконных лазеров, как и для многоканальных  $\text{CO}_2$ -лазеров, существует принципиальная возможность повысить качество излучения до дифракционного предела с помощью фазировки излучения отдельных каналов (излучателей). Однако опыт реализации различных методов (фазировка по методу Тальбо и пространственного фильтра) для многоканальных  $\text{CO}_2$ -лазеров показал, что, давая прекрасный экспериментальный результат (угол расходимости менее 0,3 мрад), не обеспечивают необходимой простоты в технологических применениях. Наиболее эффективна и технологична фазировка каналов излучателей в усилительной схеме, когда во всех каналах усиливается излучение одного задающего лазера. В этом случае она ограничена возникающими в каждом канале оптическими неоднородностями, в том числе нелинейными. Полной фазировки всех лазерных пучков можно достичь только методом компенсации фазовых искажений в двухпроходовом усилителе с обращением волнового фронта. Наиболее эффективный способ обращения волнового фронта — четырехволновое смешение с обратной связью [17]. Пример успешной реализации этого метода приведен в работе [18]: угол расходимости непрерывного твердотельного лазера мощностью 2 кВт с ламповой накачкой был уменьшен почти в 20 раз и достигнут дифракционный предел качества излучения ( $M^2 \approx 1$ ) без значительной потери мощности.

Существующие мощные волоконные лазеры не имеют систем фазировки, поэтому параметры качества излучения оцениваются по формулам (10)—(14). Поскольку расходимость излучения мощных волоконных лазеров почти на порядок превышает дифракционный предел, то для оценки параметров сфокусированного пучка излучения используем формулы (6) и (7). В результате для  $F=30$  см,  $D=2$  см и  $BPP = 2,5$  мм·мрад получаем радиус пучка в фокальной плоскости  $r_0 \approx 9,8 \cdot 10^{-2}$  см и глубину фокусировки  $l_0 \approx 0,2$  см. Для  $\text{CO}_2$ -лазера с параметрами  $F=20$  см,  $D=2$  см и  $M^2 \approx 1$ , применяя формулы для гауссова пучка, из (8) и (9) имеем  $r_0 \approx 0,7 \cdot 10^{-2}$  см и  $l_0 \approx 0,2$  см. В рассмотренных случаях расчетные ширина сфокусированного пучка излучения и глубина фокусировки оказываются близкими по значению. Однако для лазерного пучка с невысоким качеством излучения по параметру  $M^2 \gg 1$  этот параметр и  $BPP$  не дают конкретной информации о реальном распределении интенсивности по сечению пучка в фокальной плоскости и близких к ней плоскостях. Другими словами, задание одиночных параметров качества излучения  $BPP$  и  $M^2$  не является полной характеристикой пространственных свойств лазерных пучков с параметром  $M^2 \gg 1$ .

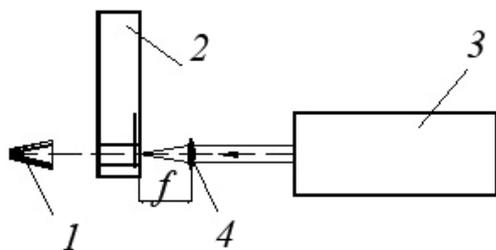
**Измерение пространственных характеристик мощных волноводных и волоконных лазеров.** По стандартной методике с помощью анализатора Lasercope UFF-100 (таблица) были проведены исследования пространственной структуры сфокусированного излучения и параметров качества излучения  $BPP$ ,  $M^2$ , полуширины  $r_0$  пучка в фокальной плоскости и глубины фокусировки  $l_0$ .

### Значения основных характеристик анализатора Lasercope UFF-100

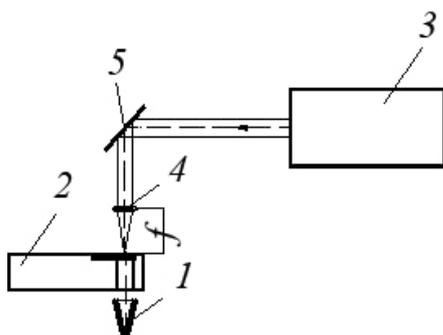
Диаметр измерения пучка:	
несфокусированного, мм.....	6...60
сфокусированного, мкм.....	500...4 000
Средняя мощность излучения, кВт.....	$1 \cdot 10^{-3}$ ...25
Плотность мощности излучения, Вт/см <sup>2</sup> .....	$2 \cdot 10^7$
Точность измерений по оси, мкм:	
X .....	$\pm 50$
Y .....	$\pm 2$

Схемы измерения пространственных характеристик излучения волноводного лазера ТЛ-1200 и волоконного лазера модели СР-3.5 приведены на рис. 6.

Распределение плотности мощности излучения лазеров ТЛ-1200 и СР-3.5 приведены на рис. 7 [19]. Из рисунка ясно, что генерируется практически одна первая волноводная мода.



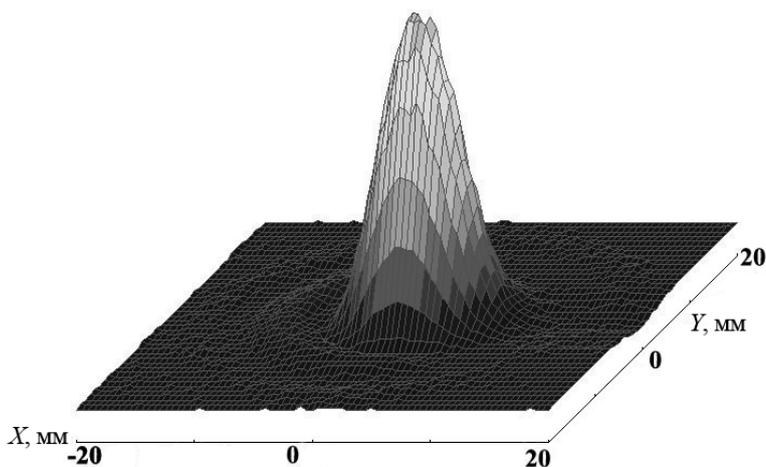
a



б

**Рис. 6. Схемы измерения пространственных характеристик излучения волноводного лазера ТЛ-1200 (а) и волоконного лазера СР-3.5 (б):**

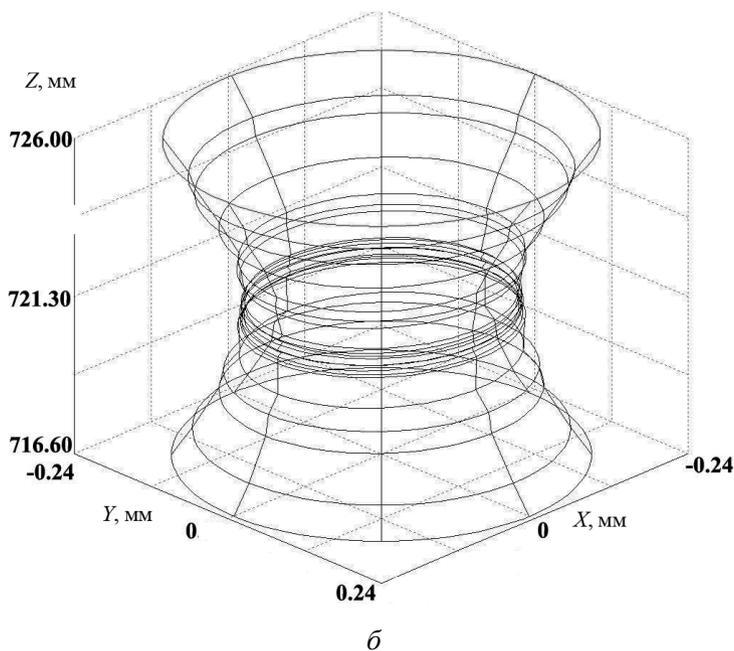
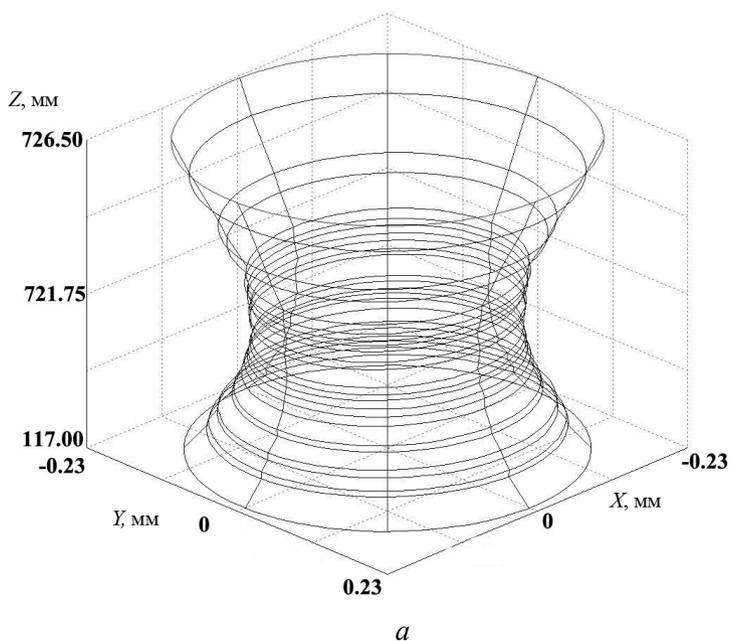
1 — поглотитель излучения; 2 — анализатор Laserscope UFF-100; 3 — излучатель; 4 — фокусирующая линза; 5 — поворотное зеркало;  $f$  — фокусное расстояние линзы



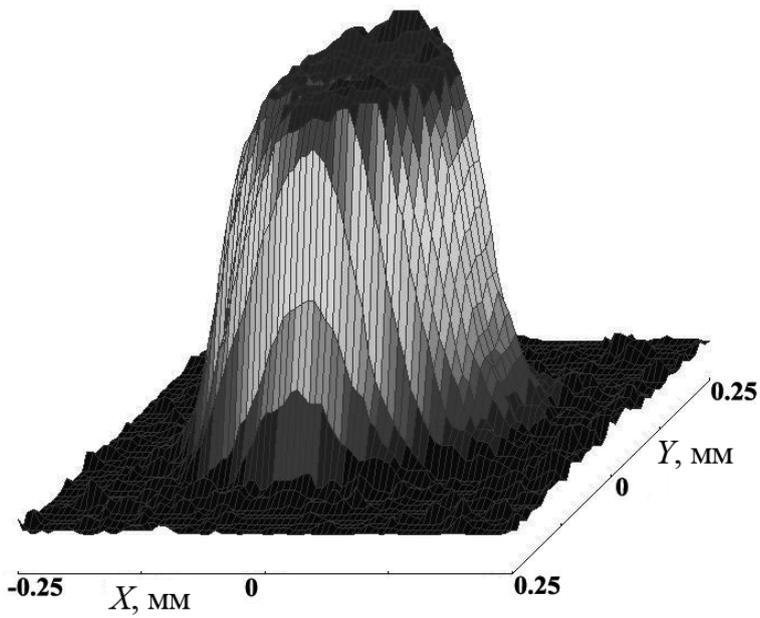
**Рис. 7. Распределение плотности мощности излучения лазера ТЛ-1200:**

угол расходимости по уровню мощности  $0,86 = 1,57$  мрад, по уровню мощности  $0,9 = 1,67$  мрад;  $P = 1250$  Вт по уровню более 17 %,  $P = 1380$  Вт по уровню более 4 %

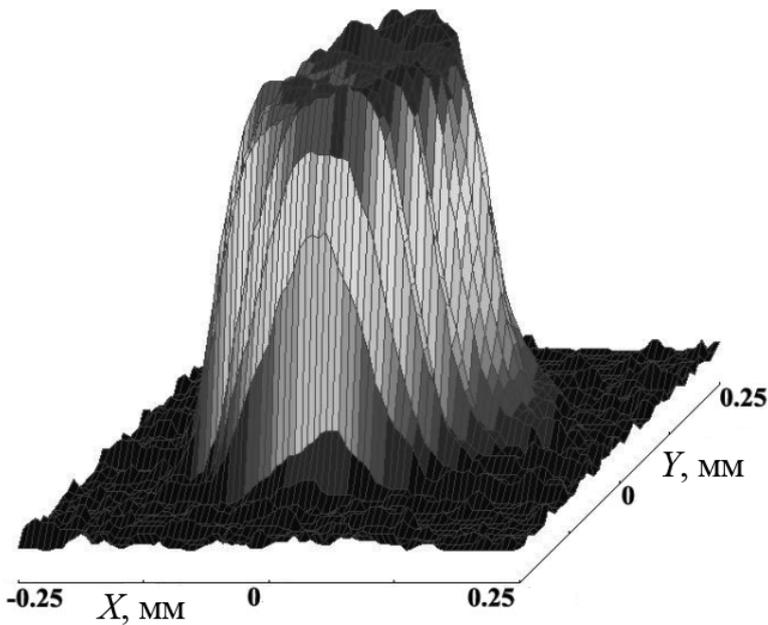
На рис. 8 показаны объемные изображения каустики сфокусированного пучка для двух значений мощности, а на рис. 9 — распределения интенсивности излучения в фокальной плоскости для этих же значений мощности.



**Рис. 8. Объемные изображения каустики сфокусированного пучка для значений мощности 1 (а) и 2 (б) кВт**



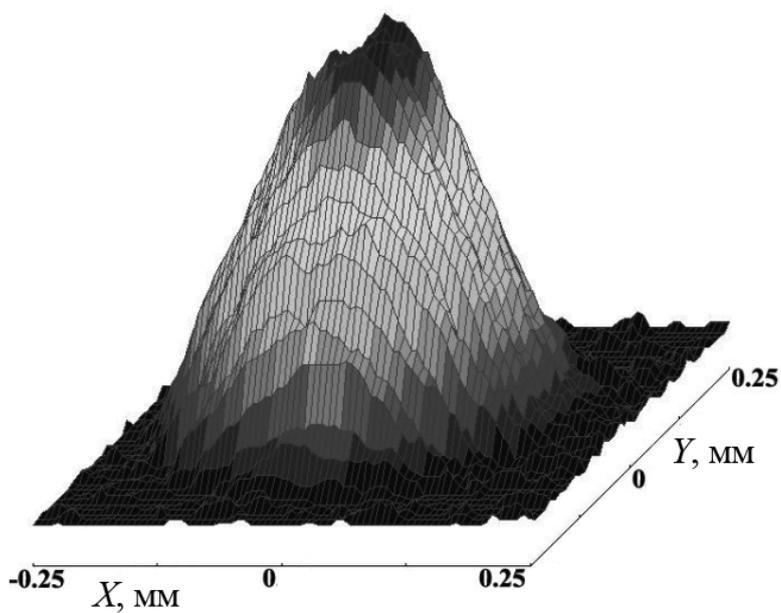
*a*



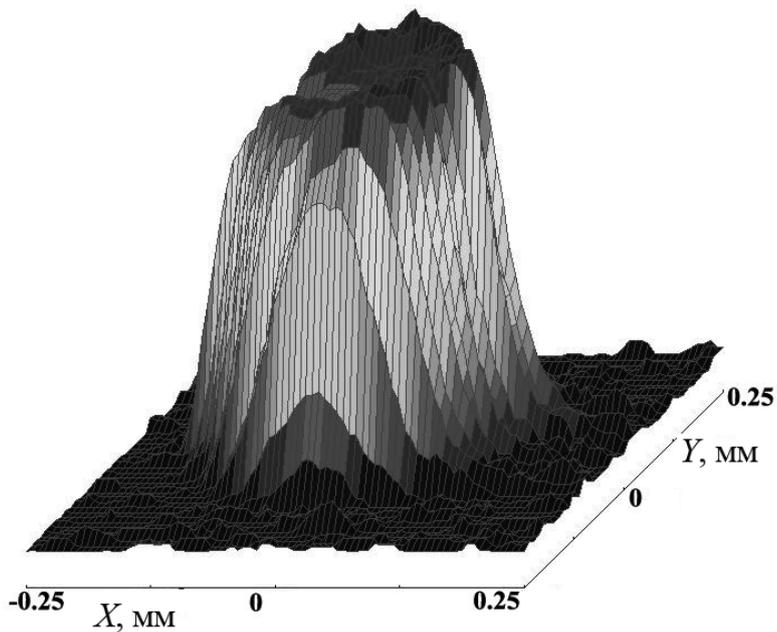
*б*

**Рис. 9.** Распределения интенсивности излучения в фокальной плоскости линзы ( $F = 300$  мм) для значений мощности 1 (*a*) и 2 (*б*) кВт

На рис. 10 представлены распределения интенсивности излучения в плоскостях, удаленных на расстояния  $\Delta z_1$  и  $\Delta z_2$ .

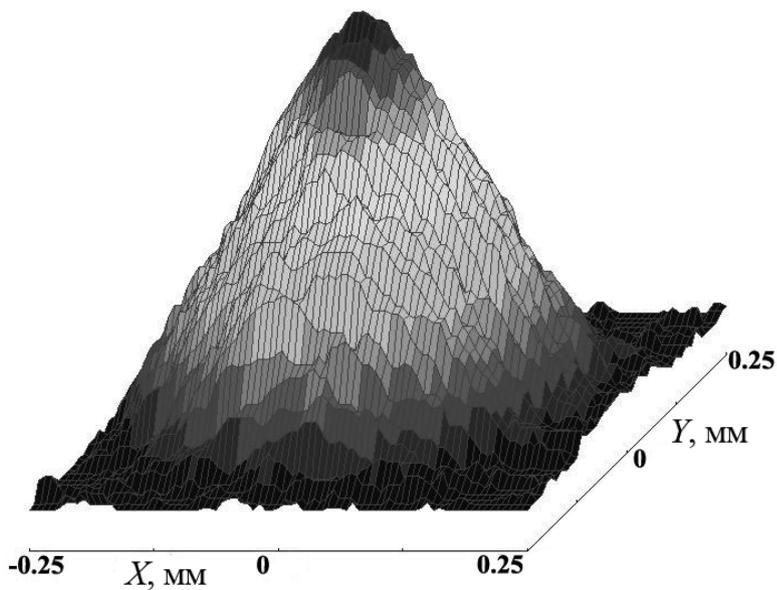


*a*

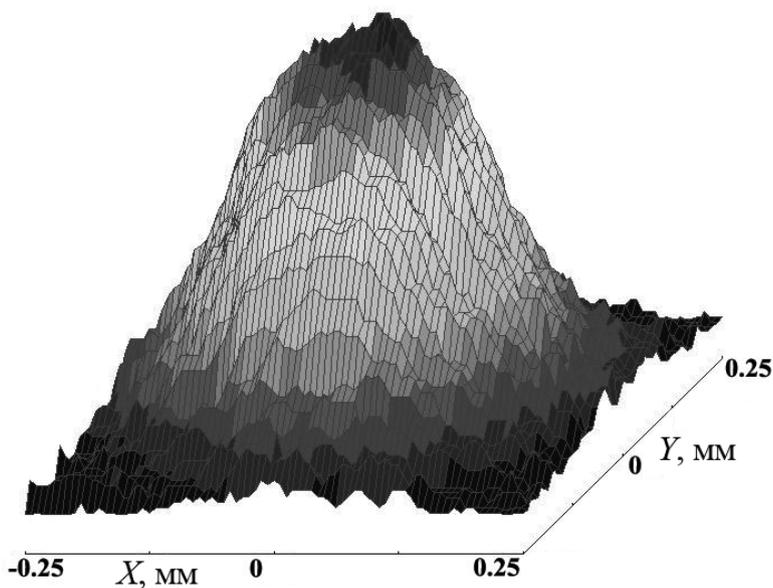


*b*

**Рис. 10.** Распределение интенсивности излучения в плоскостях, лазерному пучку со знаком « $\leftrightarrow$ » и по направлению лазерного



*a*



*b*

удаленных на расстояния  $\Delta z_1 = 1,5$  (*a*, *a*) и  $\Delta z_2 = 2,8$  (*b*, *b*) мм (навстречу пучка со знаком «+»)

В эксперименте также были измерены стандартные значения параметров качества излучения и каустики пучка:  $M^2 = 14,79$ ,  $r_0 = 0,129$  мм,  $l_0 \approx 6,6$  мм для  $P = 1$  кВт;  $M^2 = 15,31$ ,  $r_0 = 1,128$  мм,  $l_0 = 6,38$  мм для  $P = 2$  кВт. При этом глубина фокусировки  $l_0$  определялась из условия увеличения площади сечения каустики в 2 раза. Нетрудно заметить, что в целом измеренные параметры  $BPP$ ,  $M^2$ ,  $d_0$  и  $l_0$  согласуются с теоретическими оценками, полученными по формулам (1)—(5), если диаметры сердцевин и транспортного волновода равны 10 и 100 мкм соответственно, а  $D = 2$  см. Наблюдается значительная неоднородность распределения интенсивности по сечению пучка, особенно перед фокальной плоскостью. При этом имеет место зависимость пространственной структуры сфокусированного пучка от мощности излучения.

Такая специфическая пространственная структура сфокусированного пучка мощного волоконного лазера может быть связана с многопучковостью его излучения и является отличительной особенностью многоканальных лазеров, в том числе многоканальных волноводных  $\text{CO}_2$ -лазеров.

**Вопросы согласования технологических параметров и параметров лазерного пучка мощных волоконных лазеров.** Процессы взаимодействия сконцентрированного лазерного излучения с материалами представляют собой сложные термогазодинамические явления, которые пока не изучены до конца [19—21]. Однако накопленный многолетний опыт позволяет эмпирическим способом оптимизировать и согласовать параметры лазерного пучка с конкретной технологической операцией и режимом ее реализации. Кроме таких параметров, как мощность пучка, его ширина в фокальной плоскости, глубина фокусировки и поляризация большое влияние на эффективность технологического процесса оказывает пространственная структура сфокусированного пучка, т. е. распределения интенсивности в плоскостях его сечения в пределах глубины фокусировки. Например, высокие результаты по скорости, глубине и качеству достигаются при газолазерной резке и лазерной сварке с глубоким проплавлением, когда лазерный пучок близок к гауссову пучку ( $M^2 \approx 1$ ).

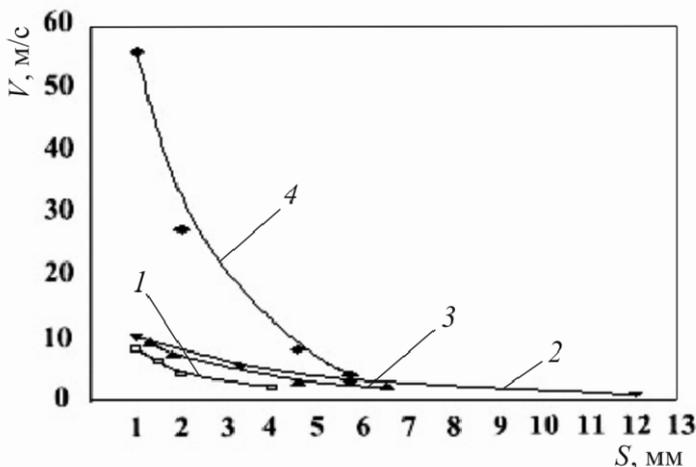
Излучение мощных волоконных лазеров относительно невысокого качества по параметру  $M^2$  по своей пространственной структуре имеет мало общего с гауссовым пучком. Его излучение формируется в транспортном многомодовом волноводе, на выходе которого входное одномодовое излучение каждого канала представляет собой пространственную структуру в виде многомодового излучения, соответствующего модам этого волновода. Суммарное излучение является суперпозицией таких структур, число которых равно числу излучающих каналов (сердцевин). Этим объясняется специфическая структура, сфокусированного пучка в пределах глубины фокусировки. Особенно неблагоприятно для лазерной резки и сварки распределе-

ние интенсивности по сечению пучка, который имеет место перед фокальной плоскостью (почти конусоидальное) (рис. 10, б). Поднимаемая фокальную плоскость над поверхностью материала, можно выбрать участок с более однородным распределением интенсивности, но при этом сокращается глубина фокусировки в объеме образца. На примере мощных волоконных лазеров можно убедиться в том, что параметр качества излучения  $BPP$  не отражает всей необходимой для лазерных технологий информации о пространственной структуре пучка, так как качество излучения по параметру  $M^2$  невысокое. Если параметр  $M^2 \gg 1$ , то отсутствуют конкретные сведения о пространственной структуре лазерного пучка, но при этом однозначно она далека от структуры гауссова пучка. В связи с этим заключение об очень высокой эффективности волоконных лазеров для лазерных технологий на основе параметра качества  $BPP$ , как это делают изготовители лазеров [16], является необоснованным. На самом деле о степени эффективности мощных волоконных лазеров и их конкурентоспособности прежде всего по отношению к дисковым лазерам и, конечно,  $\text{CO}_2$ -лазерам можно судить только после испытаний в каждой конкретной технологической операции и режимов ее реализации. Имеющиеся к настоящему времени данные по использованию волоконных лазеров мощностью 2 кВт показывают, что по глубине и качеству резания они уступают  $\text{CO}_2$ -лазерам.

Немаловажный вопрос — повышенная чувствительность волоконного лазера к отраженному от образца излучению, что понижает срок службы его резонатора. Практический интерес представляет ресурс работы при высоких лучевых нагрузках оптических элементов самого лазера и, в частности, торцов волокон в условиях длительного непрерывного (8 ч в сутки) промышленного использования лазерной установки. Сведения об этом могут быть получены в результате достаточно длительной промышленной эксплуатации волоконных лазеров. Только после этого можно делать заключения о степени применимости этих лазеров для той или иной лазерной технологии или отдельного режима ее реализации. При этом должна решаться и задача эмпирического согласования технологических и лазерных параметров мощных волоконных лазеров.

**Сравнительный анализ эффективности резания мощными  $\text{CO}_2$ -лазерами и волоконными лазерами.** Как уже было отмечено, вопросы влияния параметров лазерного пучка на эффективность технологических процессов могут рассматриваться прежде всего на основе экспериментальных данных, потому что разработка теории физики технологии лазерной резки еще далека от своего завершения.

В работе [22] проведено экспериментальное сравнение эффективности (скорости и качества) резания мощными волоконным лазером IPG VLR-5000-5, 5 кВт, и  $\text{CO}_2$ -лазером TRUMPF TRULASER 3 530, 4 кВт. Зависимости скорости резания  $V$  от толщины металлических пластин с использованием в качестве режущих газов  $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$  представлены



**Рис. 11. Зависимости скорости резания  $V$  от толщины металлических пластин с использованием в качестве режущих газов  $N_2$  и  $O_2$ :**

1 — коррозионно-стойкая сталь, средняя мощность  $CO_2$ -лазера 1,5 кВт, газ  $N_2$ ; 2 — конструкционная сталь, средняя мощность  $CO_2$ -лазера 1,5 кВт, газ  $O_2$ ; 3 — коррозионно-стойкая сталь, средняя мощность  $CO_2$ -лазера 4 кВт, газ  $N_2$ ; 4 — коррозионно-стойкая сталь, средняя мощность волоконного лазера 4 кВт, газ  $N_2$

на рис. 11. Для дополнительного сравнения показаны экспериментальные кривые (кривые 1, 2, см. рис. 11), полученные в ИПЛИТ РАН на установке фирмы TRUMPF модели L2530 со средней мощностью излучения  $CO_2$ -лазера 1,5 кВт [23].

Характерным является более высокая скорость резания волоконным лазером, особенно при резке образцов малой толщины. Это объясняется более высоким поглощением металлами излучения с длиной волны  $\lambda=1$  мкм. В конкретных условиях, для которых получены кривые, приведенные на рис. 11, с уменьшением толщины пластины снижается угол падения пучка на плоскость фронта резания  $\varphi = \pi/2 - d_0/S$ , где  $S$  — толщина пластины. Вследствие этого в области малых толщин коэффициент поглощения излучения технологического  $CO_2$ -лазера, которое всегда поляризовано, понижается, и тем самым возрастает отличие его от коэффициента поглощения излучения волоконного лазера. Излучение только частично поляризовано и остается равным единице для всех толщин. При резке толстых пластин коэффициент поглощения излучения  $CO_2$ -лазера достигает значений 0,8...0,9 для линейной поляризации и 0,5...0,6 для часто используемой круговой поляризации, чтобы избежать потери эффективности резания при поворотах траектории резания. Поэтому в случае резки толстых пластин его отличие от коэффициента поглощения излучения с  $\lambda = 1$  мкм становится минимальным. Тогда различие скоростей резания рассматриваемых лазеров двух типов уменьшается с увеличением толщин образцов.

Согласно экспериментальным данным, также следует, что скорость резания коррозионно-стойкой стали толщиной 10 мм  $\text{CO}_2$ - и волоконным лазерами мощностью 4 кВт составляет 1,0 и 1,4 м/мин соответственно.

Резка кислородом малоуглеродистой стали имеет особенно большое преимущество при относительно малых скоростях резания, когда увеличивается время для проникания кислорода через оксидную пленку. Тогда вследствие выделения химической энергии экзотермической реакции окисления может ослабевать роль коэффициента поглощения в процессе резания. Поэтому в этих условиях разрыв между скоростями резания  $\text{CO}_2$ - и волоконными лазерами существенно сокращается. Этот вывод подтверждается экспериментальными результатами, приведенными в работе [23]: скорость резания кислородом малоуглеродистой стали толщиной 15 мм волоконным лазером мощностью 4 кВт только на 17 % выше скорости резания  $\text{CO}_2$ -лазером той же мощности.

Следует отметить, что более высокое поглощение металлами излучения с  $\lambda = 1$  мкм позволяет проводить резание с повышенной скоростью и тем самым увеличивать число Пекле, что важно для эффективного резания высокоотражающих цветных металлов (медь, латунь и алюминий), обладающих повышенной теплопроводностью. Для резания этих материалов дисковые и волоконные лазеры, несомненно, превосходят по технологическим возможностям  $\text{CO}_2$ -лазеры.

Кроме скорости эффективность резания включает в себя и качество резания, т. е. степень неровности поверхности резания и наличие гратов. Как показывает технологическая практика, по этому параметру волоконные лазеры значительно уступают  $\text{CO}_2$ -лазерам, причем качество резания мощными волоконными лазерами снижается с ростом толщины металлических образцов [16, 24]. В связи с этим ведущие зарубежные фирмы применяют волоконные лазеры для резания относительно тонких листов, используя их преимущество по скорости резания. Здесь следует отметить, что выигрыш в скорости всей технологической операции получается только тогда, когда время резания близко или превышает затраты времени на установку и снятие с координатного стола обработанной детали или на ее перемещение при конвейерном способе обработки.

Более низкое качество резания при использовании мощных волоконных лазеров может быть вызвано специфической пространственной структурой сфокусированного пучка этих лазеров. Другими словами, относительно низкое качество излучения по параметру  $M^2$  является причиной снижения качества резания. Значение  $M^2 = 10$  указывает на значительное отличие распределений интенсивности излучения по сечению сфокусированного пучка в пределах глубины фокусировки от гауссовой формы, что подтверждается результатами проведенных измерений. К тому же более высокое поглощение излу-

чения с  $\lambda = 1$  мкм приводит к усилению влияния распределения интенсивности излучения на качество лазерной резки.

**Заключение.** Показатель  $BPP$  для мощных волоконных лазеров следует рассматривать как необходимую, но недостаточную характеристику пространственных свойств пучка лазерного излучения. В виду значительного отличия пространственной структуры сфокусированного пучка излучения мощных волоконных лазеров от гауссова пучка требуется эмпирическим путем определять согласованные и оптимальные параметры сфокусированного пучка для каждой технологической операции (сварки, резки и др.) и отдельных режимов их реализации. Для этих лазеров задача согласования лазерных и технологических параметров решается труднее, чем для технологических  $\text{CO}_2$ -лазеров или твердотельных дисковых лазеров с высоким качеством излучения ( $M^2 \approx 1$ ).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schlueter H. Advances in Industrial Power Lasers // Proc. SPIE. 2005. Vol. 5777. P. 8—15.
2. Yatsenko N. A. Principal Trends in Development of Gas Lasers with RF Excitation // Proc. SPIE. 1996. Vol. 2713. P. 38—50.
3. New approach to the formation of the basic waveguide mode in HP slab-type  $\text{CO}_2$ -lasers / A.I. Dutov et al. // Proc. SPIE. 2005. Vol. 5777. P. 464—468.
4. Vasil'tsov V. V., Golubev V. S., Panchenko V. Ya. Kilowatt-level High Beam Quality Waveguide Industrial  $\text{CO}_2$ -lasers / Proceeding of IX International Conference "Laser and Laser-Information Technologies" ILLA'2006 Smolyan, Bulgaria, October 4—7. 2006. P. 56—59.
5. Мощные технологические  $\text{CO}_2$ -лазеры с высоким качеством излучения / А.И. Бондаренко, В.В. Васильцов, М.Г. Галушкин и др. // Перспективные материалы. 1999. № 2. С. 60—67.
6. 970 nm Single Emitter Pumps for Multi-kW Systems / V. Gapontsev, I. Berishev, G. Ellis et al.
7. Теоретическое модулирование и экспериментальное исследование YAG: Yb-лазера на тонком диске с диодной накачкой / К. Контаг, М. Каршевский, К. Стивен и др. // Квантовая электроника. 1999. Т. 28. № 2. С. 139—146.
8. Вайлер С. Дисковые лазеры для промышленности // Фотоника. 2009. № 3. С. 10—13.
9. Лазеры на тонких дисках / М. Ларионов, Ф. Даузингер, Ш. Заммер и др. // Фотоника. 2009. № 3. С. 2—8.
10. Vasil'tsov V. V., Galushkin M. G., Golubev V. S., Panchenko V. Ya. High Power Waveguide Industrial  $\text{CO}_2$ -lasers / Proc. SPIE. Vol. 2713. 1995. P. 76—84.
11. Vasil'tsov V. V., Galushkin M. G., Roshin A. P., Solovyov A. V. Waveguide High-power Industrial  $\text{CO}_2$ -lasers // Proc. SPIE, Vol. 4165. 2000. P. 169—177.
12. Курков А. С., Дианов Е. М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 10. С. 881—900.
13. Дианов Е. М. Волоконная оптика: сорок лет спустя // Квантовая электроника. 2010. Т. 40. № 1. С. 1—6.
14. Вудс С., Дака М., Флин Г. Волоконные лазеры средней мощности и их применение // Фотоника. 2008. № 4. С. 6—10.

15. Блеер Е. Идеальная лазерная технология — есть ли она? // Фотоника. 2008. № 3. — С. 2—5.
16. Межевов В.С., Плотников В.М., Стрельцов А.П. Промышленное применение мощных волоконных лазеров. — М.: НТО «ИРЭ-Полус», 2009. [www.ntoire-hjplus.ru](http://www.ntoire-hjplus.ru).
17. Бельдюгин И.М., Галушкин М.Г., Земсков Е.М. Обращение волнового фронта светового излучения с использованием обратной связи при четырехволновом взаимодействии // Квантовая электроника. 1984. Т. 11. № 5. — С. 887—892.
18. 2-kw Awaerage Power Phase-Conjugate Master Oscillator Power Amplifier / Y.A. Zakharenkov, T.O. Clatterbuck, V.V. Shkunov et al. // Proc. SPIE. Vol. 6465. — P. 1—12.
19. New Kilowatt Waveguide CO<sub>2</sub> Process Lasers with High Radiation Quality / V.O. Aleksandrov, V.V. Budanov, V.V. Vasil'tsov, M.G. Galushkin et al. // Journal of Optical Technology. 2009. Vol. 76. Issue 5. — P. 255—258.
20. Лазерные технологии обработки материалов. Современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В.Я. Панченко. — М.: Физматлит, 2009. С. 664.
21. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки / Под ред. А.Г. Григорьянца. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. — С. 664.
22. Wandera C., Kujanpaa V. Industrial Laser Solutions. September — October, 2010. — P. 25—27.
23. Пространственная структура сфокусированного пучка мощных волоконных лазеров и особенности их применения для лазерной резки / В.Я. Панченко, В.В. Васильцов, М.Г. Галушкин и др. // Laser Physics. 2012 (в печати).
24. Introduction to Industrial Laser Material Processing. Roфин. [www.ROFIN.COM](http://www.ROFIN.COM).

Статья поступила в редакцию 11.09.2012