

# ЛАЗЕР СО<sub>2</sub>: ГИБКОЕ, НАДЕЖНОЕ И ИСПЫТАННОЕ СРЕДСТВО

Р. Шаймарданов, ООО "ДЕГ-РУС", www.degrus.ru

Современное эффективное производство невозможно представить без лазеров и лазерных процессов. С самых первых дней СО<sub>2</sub>-лазеры доминировали на рынке непрерывной резки и сварки благодаря своей высокой мощности и эффективности с точки зрения потребления электроэнергии, надежности и рентабельности. В статье рассмотрены параметры качества луча, необходимые для сравнения между собой аналогичных лазерных устройств, особенности систем охлаждения лазеров и вопросы безопасности работы с ними.

Описывая область применений лазерных технологий в операциях непрерывной резки и сварки, будем называть ее макрообластью применения. Представляемый волоконный лазер, или высокоэффективный твердотельный лазер с накачкой светодиодами, – привлекательная альтернатива для макрообластей применения. Потому что за счет длины волны излучения в диапазоне около 1 мкм их области применения отличаются от тех, где традиционно используют СО<sub>2</sub>-лазеры. Но при этом необходимо помнить о соблюдении условий безопасности в работе.

Основным сегментом лазерного рынка является лазерная резка не только металлов, но и дерева, пластика, текстиля и компаундов. На втором месте после резки стоит лазерная сварка. За счет образования малой ванны расплавленного металла лазерная сварка является высокоэффективной. Она обеспечивает высокие скорости сварки и низкую тепловую нагрузку на сваренный участок и, как следствие, низкую степень тепловой деформации. Примерами лазерной сварки может служить сварка компонентов силовых цепей, инжекторных систем, корпусов датчиков и нагнетательных насосов для воздушных подушек и, кроме того, деталей корпусов автомобилей, нестандартных заготовок, труб и профилей с проплавлением от 0,5 до 15 мм. Сильные стороны использования данных технологий раскрываются благодаря возмож-

ности локализовать в малом фокусном пятне лазерное излучение среднего и высокого качества. Тем самым достигается высокая плотность мощности лазерного пучка, которую удобно контролировать. В выборе лазеров для конкретного применения важную роль кроме мощности и длины волны излучения играет качество самого луча и способность лазерной системы к его фокусировке.

## КАЧЕСТВО ЛУЧА

Все лучи лазерного пучка распространяются не параллельно, они расходятся и следуют по так называемой каустике распространения: диаметр пучка изменяется с расстоянием от выходного окна по гиперболической функции, описываемой радиусом перетяжки луча –  $\omega$  [мм] и расходимостью поля –  $\theta$  [мрад]. Произведение этих параметров  $\omega \cdot \theta$  определяет качество лазерного луча, единица измерений, в которой оно выражается, – мм·мрад. Эту величину используют для описания распространения лазерного луча, величины диаметра фокусной перетяжки и глубины фокуса  $\Delta z$ . Если при аналогичных условиях сравнить фокусировку двух лазеров с одинаковыми длинами волн  $\lambda$ , то надо обратить внимание на их качество луча. Допустим, они различаются между собой по качеству луча в два раза, тогда мы получаем, что величины фокусов также отличаются в два раза. Если пятна, в которые сфокусированы их лучи, имеют

одинаковые размеры, то значения величины глубины фокуса  $\Delta z$  для них будут отличаться: луч с более низким показателем произведения  $\omega \cdot \theta$  имеет большую глубину фокуса. Этот факт надо учитывать при резке толстых материалов. Для описания качества луча используют параметры относительного качества  $M^2$  и  $K$ , между ними существует связь:  $M^2 = 1/K$ . (Параметр  $M^2$  служит для оценки степени близости профиля лазерного пучка к профилю гауссового). Параметры  $M^2$  и  $K$  соотносятся с выражением  $\omega \cdot \theta$  через величину  $\lambda/\pi$ :

$$\frac{1}{M^2} = K = \frac{\lambda}{\omega \cdot \theta}$$

Параметры фокусировки, размер и глубина фокуса должны выбираться с учетом конкретного применения. Самое малое фокусное пятно при резке или сварке не всегда является лучшим решением производственной проблемы. Типичные размеры фокусного пятна, используемые в макроприменениях, лежат в пределах 0,1 – 0,6 мм. Глубина фокуса должна быть порядка 1 мм для обеспечения достаточных допусков в процессе производства и достигать половины толщины материала для получения требуемых форм реза или профиля сварки. Эти величины легко достигимы, если использовать лазер с качеством луча в 3,5 мм·мрад. Это качество соответствует основной моде СО<sub>2</sub>-лазера с параме-

тром  $M^2=1$ . Более высокие значения качества луча, как правило, и не требуются. Если необходимо получить малое фокусное пятно, для этого используют специализированные фокусирующие элементы.

### ЛАЗЕР $CO_2$

Шестидесятые годы прошлого века продемонстрировали многообразие лазеров, использующих разные рабочие среды. Большинство из них применяются и сегодня, к примеру молекула  $CO_2$ . В течение следующего десятилетия стали появляться промышленные системы для обработки материалов. В центре внимания оказались две различные технологии. Импульсные твердотельные лазеры с ламповой накачкой для применений в импульсном режиме с длиной волны около 1 мкм. Основными областями их применения были, например, сверление и точечная сварка. Газовые лазеры  $CO_2$  с накачкой электрическим разрядом в газовой среде и с длиной волны 10,6 мкм использовались как источники непрерывного излучения. В наши дни эти технологии дополнены вы-

сокоэффективными дисковыми и волоконными лазерами с диодной накачкой и волоконной передачей излучения к обрабатываемому материалу.

### ОПТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ

Оптические компоненты для передачи излучения  $CO_2$ -лазеров хорошо известны и испытаны для простых и комплексных систем. Надежная асферическая оптика рассчитанная для длины волны 10,6 мкм, изготавливается с помощью высокопрецизионной алмазной механической обработки. Покрытия оптических зеркал имеют высокий коэффициент отражения. Часто для зеркал, используемых в сварочных головках, применяют прочные покрытия из молибдена. С этих покрытий можно удалять даже металлические брызги.

Луч лазера  $CO_2$  открыто передается по лучевому тракту при диаметре луча 20 мм или более. Поэтому плотность мощности, приходящаяся на оптические детали такого лазера, гораздо ниже, чем плотность мощности, приходящая на торцы передающего волокна.

Следовательно, чувствительность к загрязнению оптических поверхностей для луча лазера  $CO_2$  намного ниже, чем для луча, передаваемого волоконной оптикой.

Другим важным фактом, связанным с длиной волны, является потенциальная опасность для человеческого глаза в случае попадания в него лазерного излучения. Излучение с длиной волны 1 мкм проходит через роговую оболочку глаза и фокусируется на сетчатке в очень маленькое пятно с крайне высокой плотностью мощности. Механизм мигательного рефлекса не защищает глаз для длины волны, близкой к ИК-излучению. Происходит выгорание сетчатки и потеря зрения. Длина волны 10,6 мкм лазера  $CO_2$  поглощается у поверхности глаз, поэтому потенциальный риск гораздо ниже. Именно поэтому номинальное безопасное для глаз расстояние для длины волны 1 мкм значительно больше, чем для 10,6 мкм. Это указано в международных стандартах обеспечения безопасности при работе с лазерами

## ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРА CO<sub>2</sub>

### 1. Возбуждение разряда: DC (постоянный ток) или RF (СВЧ накачка)

В газовом лазере используют низкий энергетический уровень молекулы CO<sub>2</sub>. Для эффективной энергопередачи используются молекулы азота N<sub>2</sub>, которые, в свою очередь, возбуждаются электронами электрического разряда в газовой смеси CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He под давлением в несколько десятков тысяч паскаль. Накачка лазерного газа может осуществляться как постоянным током (DC) с помощью электродов, расположенных в емкости с газом, так и высокочастотным электромагнитным излучением (RF). Последний способ накачки обладает рядом преимуществ:

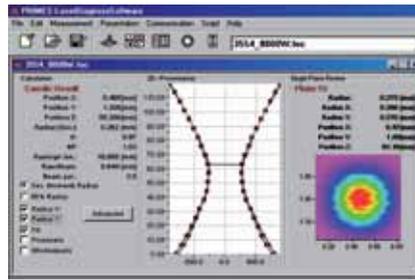
- отсутствие износа электродов;
- однородность возбуждения;
- легкая установка уровня мощности за счет модуляции длительности импульса;
- превосходные характеристики импульсного режима.

При высокочастотной генерации используются различные способы доставки энергии: разделение лазерной головки и генератора и использование согласованного высокочастотного кабеля или непосредственное присоединение электродов к СВЧ-генератору, что позволяет получить более широкий диапазон согласования и применения высоковольтного кабеля для питания генератора.

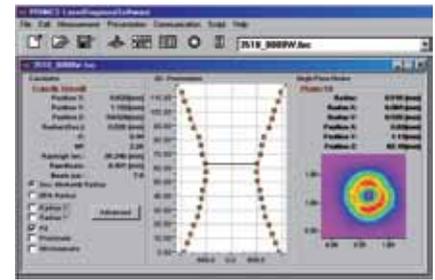
### 2. Метод охлаждения: поперечный поток, скоростной аксиальный поток или диффузия?

Основная конструктивная проблема в разработке лазеров заключается в охлаждении активной среды. Для промышленных CO<sub>2</sub>-лазеров сегодня используют два различных метода охлаждения: конвекция и диффузия.

Охлаждение методом конвекции требует применения воздуходувки или турбины для перекачки газа через активную область с высокими скоростями потока. На входе в активную область подается холодный газ, где он возбуждается разрядом и нагревается до своей максимальной температуры на выходе. После этого газ перекачивается через теплообменники для его



а



б

Качество луча SLAB CO<sub>2</sub>-лазера, 8 кВт, распределение плотности мощности: а – гауссова мода; б – донатова (кольцевая) мода

охлаждения и снова подается в активную зону.

Существуют два способа прокачки газа: *поперечная прокачка*, когда газовый поток проходит поперек к оси резонатора (Cross Flow Lasers) и *продольная прокачка*, когда газовый поток проходит вдоль оси резонатора, или аксиальный поток (Fast Axial Flow).

Преимущество принципа поперечного потока состоит в том, что длина потока малая, а поперечное сечение большое. Следовательно, гораздо меньше усилий потребуются для обеспечения необходимого объема потока для достижения заданной мощности конкретного лазера. Преимущество скоростного аксиального потока в том, что симметрия потока аналогична симметрии оптического резонатора. Следовательно, можно генерировать более высокое качество луча с меньшим влиянием градиента температуры разряда и градиента давления потока газа.

Тем не менее, в обоих методах применяется дорогостоящая система технических средств для создания потока: теплообменники, воздуходувки или турбины. Все это требует относительно высокого расхода энергии и дополнительных средств для поддержания чистого вакуума в комплексной системе, использующей вращающиеся вентиляторы или турбины. К особенностям системы с продольной прокачкой надо отнести тенденцию к переносу мелких частиц на поверхность элементов оптического резонатора. Тогда они могут вызвать повышенную абсорбцию и привести к снижению срока службы. Из-за подобных ограничений для данных технологий используется непрерывная подача свежего газа для поддержания стабильного качества газа внутри лазера.

И как результат – высокий расход газа и потребность в подключении лазера к внешней системе подачи смеси CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He.

Другой технологической проблемой является высокая плотность мощности на оптических компонентах, используемых в основном для устойчивых резонаторов лазеров со скоростным аксиальным потоком и высоким качеством луча. Оптические элементы, пропускающие длину волны 10,6 мкм, обычно изготавливаются из ZnSe, а отражающая оптика выполнена из меди. Медные зеркала, охлаждаемые водой, стойки к высоким плотностям мощности и обладают высокой надежностью. Прозрачные компоненты на основе ZnSe в основном применяются в качестве выходных зеркал для устойчивых резонаторов лазерных систем со скоростным аксиальным потоком. Их недостатком является ограниченный срок службы и необходимость регулярного техобслуживания.

### 3. Простая конструкция – надежная техника: SLAB CO<sub>2</sub>-лазер

Всех этих технических ограничений можно избежать, если механизмом охлаждения служит диффузия. С самого начала этот метод применялся в системах с низкой плотностью потока или отсутствием потока. В подобных системах для охлаждения активного газа лазера применяют водяную рубашку, окружающую трубу активного разряда. Из-за слабой радиальной холодопроизводительности данных конструкций съем мощности подобных лазеров ограничивался примерно 70 Вт на метр длины разряда.

В 80-е годы был разработан принцип пластинчатой конфигурации CO<sub>2</sub>-лазеров. Его предложили независимо друг от друга два изобретателя: профессор Оповер из немецкого города Штутгарта и профессор Тулип из Канады. Суть его заключается в том, что газовый разряд возбуждается между двумя плоскими электродами с зазором всего в несколько миллиметров. Так как диффузионное охлаждение молекул высокоэффективно для небольших расстояний, то, следовательно, резко возрастает возможность теплоотвода. Охлаждаемые водой медные электроды соединяют в себе три элемента: стены резонатора, электроды для ВЧ-разряда и теплообменник для охлаждения газа. На основе данной конструкции получены отпаянные лазеры с выходной мощностью до 600 Вт и лазеры мощностью 1,000 – 8,000 Вт с интегрированным газовым баллоном, питающим лазер газом до одного года работы.

Адаптация оптического резонатора к данному SLAB-принципу была решена с помощью устрой-

ства так называемого гибридного резонатора. Одна ось предназначена для формирования основной моды в пределах небольшого интервала между электродами. Другая ось – с большой апертурой. Она образуется параллельно к поверхности электрода и используется в неустойчивом резонаторе, который формирует основную моду из крупных поперечных сечений.

Поскольку качество луча обоих типов резонаторов определяется основной модой низшего порядка, то можно спроектировать простую оптику. В ее состав входят элементы, фокусирующие лазерные лучи в двух резонаторах до одного и того же размера при аналогичной плоскости распространения. Данная конструкция позволяет получать хорошо коллимированный луч высокого качества. Пространственный фильтр, применяемый у промежуточного фокуса оси неустойчивого резонатора, очищает луч от боковых мод неустойчивого резонатора, обеспечивая генерирование луча лазера CO<sub>2</sub> очень высокого качества. Профиль лазерного луча

имеет гауссову форму (то есть законы гауссовой оптики описывают его распространение и фокусировку), поэтому качество луча близко к единице. Для областей применения, требующих более крупных размеров фокуса, за пределами резонатора можно генерировать донатовую (кольцевую) моду (см. рисунок). Данная мода имеет распределение интенсивности TEM<sub>01\*</sub> и параметры качества луча: K=0,45 или M<sup>2</sup>=2,2.

Поскольку резонатор не использует какое-либо полупрозрачное зеркало, то зеркала резонатора (их всего два) можно изготовить из меди. Это обеспечит устройству надежность и долгий срок службы. Компоненты резонатора более не являются запчастями! Отпадает необходимость замены выходных зеркал и окон и не требуется проводить после каждой замены перенастройку резонатора, на которую может затрачиваться много времени.

Тем не менее, для выхода лазерного излучения из вакуумной камеры необходимо иметь прозрачный компонент – окно, функционально

несвязанное с резонатором. Окно изготовлено из алмаза, выращенного синтетическим способом. Данный материал обладает высокой степенью прозрачности, очень высокой теплопроводностью и высокой прочностью. Такой тип окна был применен в более чем 6000 SLAB CO<sub>2</sub>-лазерах высокой мощности (1,000 – 8,000 Вт) и день за днем, год за годом демонстрирует свою надежность.

Вся конструкция нечувствительна к тепловой нагрузке и это обеспечено, не в последнюю очередь, благодаря алмазному окну. У многих классических лазеров

существует зависимость между размером пучка, положением перетяжки и мощностью излучения. Происходит это из-за того, что выходное зеркало меняет свои оптические свойства в зависимости от пропускаемой мощности. У SLAB CO<sub>2</sub>-лазера, благодаря использованию в конструкции исключительно отражательных элементов и алмазного окна, параметры распространения луча постоянны и почти не зависят от излучаемой мощности. Простая конструкция SLAB CO<sub>2</sub>-лазера упрощает его эксплуатацию и техобслуживание. Интервал заме-

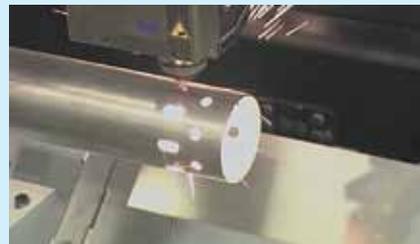
ны газа из внутреннего баллона – 72 ч. Отсутствует внешний подвод газа. Статистические данные по опыту эксплуатации этих систем подтверждают минимальные затраты по расходу газа, по техобслуживанию, а также длительные сроки службы. Во второй части обзора будут рассмотрены различные лазерные технологии с использованием CO<sub>2</sub>-лазеров, в том числе лазерная газоплазменная резка и лазерная резка плавлением с помощью азота.

*Продолжение следует*

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

Международная Ассоциация Участников Космической Деятельности (МАКД) регулярно проводит семинары под эгидой Роскосмоса. Семинары проходят в формате круглых столов, где обсуждают вопросы практического применения различных инновационных технологий в производственных процессах на предприятиях ракетно-космического комплекса РФ. Цель данных семинаров – рассказать представителям компаний Роскосмоса (МАКД) о достижениях в той или иной области, проконсультировать слушателей по вопросам их использования. Акценты в таких встречах сделаны на практическое применение данных технологий в производстве, на "подводные" камни, которые могут встретиться на пути внедрения и использования того или иного типа оборудования. Компания ООО "ДЕГ-РУС", возглавляющая секцию МАКД по вопросам применения инновационных техноло-

гий механической обработки металлов и композитных материалов, организовала и провела уже несколько семинаров. Один из них, 27 июля 2011 года, был посвящен лазерным технологиям обработки металлов и композитных материалов. Доклад руководителя направления компании ООО "ДЕГ-РУС" Рената Шаймарданова "Современные методы лазерной обработки металлов" познакомил участников заседания с последними технологическими достижениями в области лазерной обработки металлов. В частности, были рассмотрены общие вопросы лазерной обработки, подробно раскрыта сущность технологий лазерной резки, сварки и наплавки. Докладчик выделил области практического применения и его экономические аспекты. Часть выступления была посвящена лазерным технологическим установкам, в том числе порталным установкам обработки. Особо глубоко была затронута тема



CO<sub>2</sub>-лазеров. Выше опубликован фрагмент этого доклада. На семинаре присутствовали технические специалисты и инженеры "РКК Энергия", компаний "КОМПОЗИТ", "Энергоконтракт", "НПО Энергомаш" им. академика В.П. Глушко, "НИИ ТП", НПОА им. академика Н.А. Семихатова, ЦНИИмаш и других предприятий. Следующий семинар "Практические аспекты использования лазерных технологий и технологии гидроабразивной резки на предприятиях ракетно-космического комплекса" состоится 5 октября в 10.00 в зале коллегии Роскосмоса. Ждем Вас на этом семинаре.

*Безнаев А. ООО "ДЕГ-РУС",  
www.degrus.ru,  
тел.: +7 (495) 223-5454*

