



УДК 691:621.375.826

**В.С. Голубев** – доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора  
**Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН (ИПЛИТ РАН)**

**Р.К. Сафиуллин** – доктор физико-математических наук, профессор

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)**

## **ПРИМЕНЕНИЕ МОЩНЫХ CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

### **АННОТАЦИЯ**

Со времени открытия CO<sub>2</sub>-лазера в 1964 году мощность CO<sub>2</sub>-лазеров увеличилась на 7-8 порядков и достигла более 100 кВт в непрерывном режиме. В настоящее время CO<sub>2</sub>-лазеры широко применяются для лазерной резки, сварки, перфорации, лазерной модификации поверхностей обрабатываемых материалов, для лазерной стереолитографии и в медицине. В статье описываются конструкции ряда мощных CO<sub>2</sub>-лазеров и многочисленные области их применения для обработки различных материалов и изделий.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** CO<sub>2</sub>-лазер, лазерная резка, лазерная сварка, лазерная стереолитография.

**V.S. Golubev** – doctor of physical-mathematical sciences, professor, deputy director  
**Institute on Laser and Information Technologies RAS (ILIT RAS)**

**R.K. Safullin** – doctor of physical-mathematical sciences, professor

**Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUA)**

## **APPLICATION OF HIGH POWER CO<sub>2</sub> LASERS FOR PROCESSING OF MATERIALS AND MANUFACTURES**

### **ABSTRACT**

From the first time of CO<sub>2</sub> lasers appearance in 1964 the output of continuous wave CO<sub>2</sub>-lasers has increased up to hundred millions times and has achieved more than 100 kW. Nowadays the CO<sub>2</sub> lasers are employed for laser cutting, laser welding, laser perforation, for laser surface modification of materials, for laser stereolithography, and in medicine. In the paper the constructions of several powerful CO<sub>2</sub> lasers are described as well as the numerous applications of CO<sub>2</sub> lasers for processing of various materials and manufactures.

**KEYWORDS:** CO<sub>2</sub>-laser, laser cutting, laser welding, laser stereolithography.

С момента открытия CO<sub>2</sub>-лазера прошло 45 лет. За этот отрезок времени мощность CO<sub>2</sub>-лазеров в непрерывном режиме увеличилась в десятки миллионов раз: от единиц мВт до сотен кВт. Во многих странах уже созданы обрабатывающие технологические центры, в состав которых входят лазеры мощностью свыше 1 кВт [1-10]. Большой интерес представляют лазеры мощностью 5 кВт и выше, которые эффективно используются для сварки, резки, перфорации и модификации поверхности различных материалов. В этом диапазоне мощностей наиболее оптимальными по совокупности технических и экономических параметров оказались газоразрядные быстропотоочные CO<sub>2</sub>-лазеры.

В России для промышленного освоения были разработаны лазерные технологические установки мощностью 5 кВт и выше: ТЛ-5, ЛОКОН, ЛАНТАН, CO<sub>2</sub>-ЭИЛи др. [1, 2].

Основными зарубежными организациями, разрабатывающими мощные лазеры и лазерные технологические комплексы, являются следующие фирмы: в США – “Spectra Physics”, в Англии – “Culham Laboratory” и “Ferranty”, в Японии – “Mitsubishi”, в Италии – “CISE”, в Болгарии – “ДСО “Металлхим”, в ФРГ – “Oriol” (совместно с “Photon Sources”, США). Из образцов зарубежной лазерной техники следует отметить лазеры CL-5 и CL-10, разработанные в “Culham Laboratory” (Англия); лазер фирмы “CISE” (Италия); лазеры M973 и M975 фирмы “Spectra Physics” (США); японский пятикиловаттный лазер С-65 (фирма “Heraeus”). Сведения о других современных мощных лазерных комплексах приведены в [1-10]. Все перечисленные лазеры отличаются высоким качеством излучения и стабильностью.

### 1. Конструкции и важнейшие параметры современных CO<sub>2</sub>-лазеров

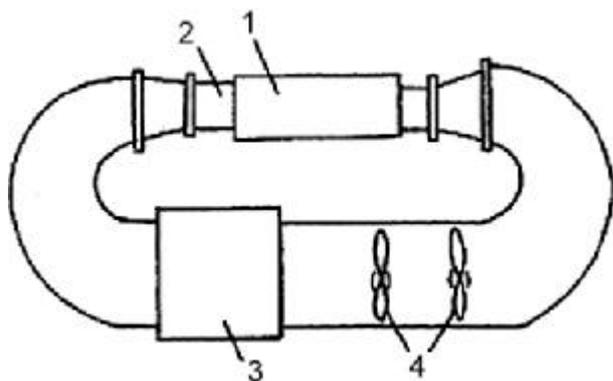


Рис. 1. Лазер "Лантан"

1 – разрядная камера; 2 – диэлектрические переходники;  
3 – теплообменник; 4 – вентиляторы

Ниже кратко описаны конструкции и важнейшие параметры некоторых из упомянутых лазеров.

Принципиальная схема лазера ЛАНТАН [1, 11, 12] показана на рис. 1. Газ в замкнутом контуре прокачивается двумя вентиляторами, работающими параллельно. Скорость газа в камере около 90 м/с (7500 об/мин) и 60 м/с (6000 об/мин). Перед входом в камеру установлен турбулизатор в виде трубки диаметром 15 мм, расположенный в среднем сечении по всей ширине камеры. Поток газа входит в камеру через диэлектрический переходник-конфузор. Такой же переходник-диффузор расположен на выходе из камеры. Охлаждение газа, нагретого в камере разрядом, происходит в теплообменнике. Ток основного разряда, осуществляющего накачку лазера, течет вдоль потока газа между электродами, расположенными на входе и выходе газа из разрядного объема. Электроды представляют собой медные водоохлаждаемые трубки. Трубка, расположенная вверх по потоку, постоянно заземлена. К другой трубке подводится либо постоянное, либо импульсное напряжение от источника питания. Расстояние между электродами вдоль потока – 16 см. Весь разрядный объем заключен между диэлектрическими пластинами, на которые подаются короткие высоковольтные импульсы. В результате в газе между обкладками возникает импульсно-периодический емкостный разряд. Отличительной особенностью данного способа ионизации газа является высокая однородность концентрации электронов во всем объеме. Для получения непрерывного излучения импульсы ионизации подаются с частотой несколько кГц, а к аноду прикладывается постоянное напряжение. Соотношение мощности, потребляемой ионизацией и основным разрядом, составляет около 1:25. В непрерывном режиме основной разряд несамостоятельный.

В излучателе ЛАНТАНА используется пятипроходный устойчивый резонатор. Радиус кривизны глухого зеркала 20-25 м. Излучение выводится через окно из ZnSe. Поворотные и глухое зеркала медные. Резонатор в целом имеет высокую стабильность. Расходимость излучения  $2 \cdot 10^{-3}$  рад. Лазер работает на смеси газов CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/He = 7.7/15.4/76.9 при общем давлении смеси 40 Торр. Установка может работать на безгелиевых смесях.

На рис. 2 представлен промышленный образец технологического лазера ЛТ-1 [13]. Он представляет собой быстропротеочный CO<sub>2</sub>-лазер с замкнутым газодинамическим контуром, по которому газ прокачивается перпендикулярно оптической оси и электрическому полю. Для вывода излучения используется окно диаметром 50 мм из KCl. При общем рабочем давлении 40-60 Торр и составе газовой смеси CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/He = 1/2/20 достигается длительная непрерывная генерация излучения в течение 5-6 часов мощностью до 5,2 кВт.

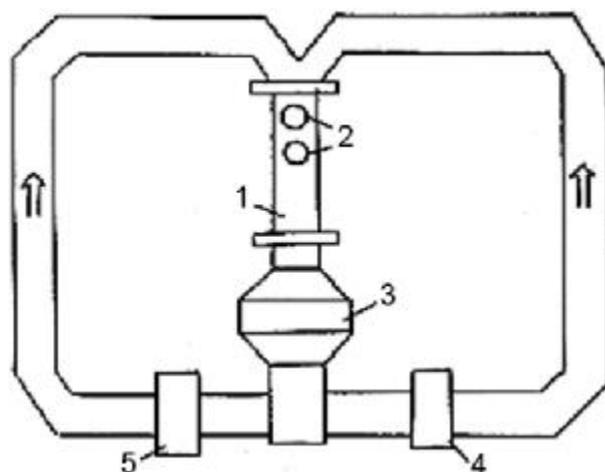


Рис. 2. Схема лазера ЛТ-1

1 – разрядная камера; 2 – зеркала резонатора;  
3 – теплообменник; 4, 5 – компрессоры

В Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (ранее ФИАН) был разработан электроионизационный лазер ЭИЛ-CO<sub>2</sub>, в котором накачка разрядной зоны осуществляется электронным пучком (рис. 3). Применение регенератора и малых добавок CO в газовой смеси CO<sub>2</sub>-лазера обеспечивает длительную работу лазера замкнутого цикла без смены газовой смеси на уровне 10 кВт.

В Институте прикладной и теоретической механики СО РАН был разработан промышленный образец технологического лазера ЛОКОН-3 [14, 15]. Установка ЛОКОН-3 состоит из излучателя, источника питания, системы газообмена, системы охлаждения. Все элементы газодинамического контура, включая газоразрядную камеру и резонатор, размещены внутри общего герметичного корпуса. Прокачка газа



осуществляется двумя специально разработанными центробежными вентиляторами. Вентиляторы обеспечивают объемный расход  $9 \text{ м}^3/\text{с}$ . Мощность генерации превышает  $5 \text{ кВт}$ . Максимальный КПД получен при мощности  $4 \text{ кВт}$ .

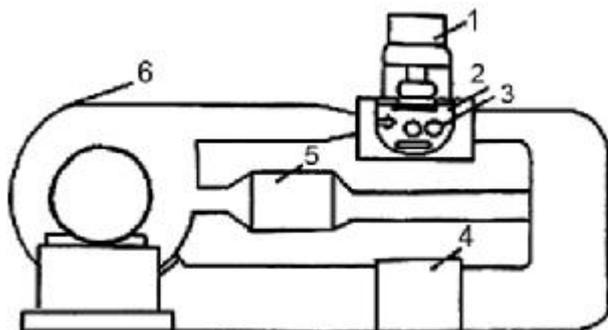


Рис. 3. Электроионизационный лазер  
1 – электронная пушка; 2 – разрядная камера;  
3 – резонатор; 4 – теплообменник; 5 – регенератор;  
6 – вентиляторы

В НИЦТЛе (Научно-исследовательский центр по технологическим лазерам – с 1998 г. ИПЛИТ РАН – Институт проблем лазерных и информационных технологий) был сконструирован и изготовлен промышленный образец технологического лазера ТЛ-5 [1]. Газодинамический контур включает в себя компрессор, два теплообменника и разрядную камеру. Специально разработанный для этого лазера компрессор прокачивает газовую смесь через разрядную зону со скоростью  $100 \text{ м/с}$ . Рабочее давление смеси газов находится в пределах от 20 до 40 Торр. Особенностью лазера является его способность работать на безгелиевой смеси с мощностью излучения  $5 \text{ кВт}$  в номинальном режиме при удельном энергокладе  $2 \text{ Вт/см}^3$ .

В литературе приведены также сведения о  $\text{CO}_2$ -лазерах мощностью до  $20 \text{ кВт}$  [3], мобильных лазерных многоцелевых комплексах до  $30 \text{ кВт}$  [8], установках мощностью до  $50 \text{ кВт}$  [7] и до  $135 \text{ кВт}$  [9] в непрерывном режиме генерации.

## 2. Лазерные технологии обработки материалов

Лазерная обработка материалов имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с обычными методами обработки [2, 10, 16], а именно:

1) Лазерные методы обработки не требуют вакуума. В большинстве случаев обработка может проводиться в любой атмосфере, хотя для некоторых химически активных металлов может потребоваться защитная среда;

2) Отсутствует контакт обрабатываемого образца с посторонними материалами, в связи с чем снижается опасность загрязнения;

3) Отсутствие механических усилий на обрабатываемый образец дает возможность

обрабатывать хрупкие и ажурные конструкции;

4) Возможность обработки на воздухе, легкость автоматизации процессов, отсутствие вредных отходов при обработке определяют высокую технологичность лазерного луча;

5) Возможность транспортировать излучение на значительные расстояния и подвод его с помощью специальных оптических систем в труднодоступные места позволяют производить обработку в тех случаях, когда другие методы применить невозможно;

6) Размер подвергающейся нагреву зоны, которая окружает обрабатываемый участок, достаточно мал;

7) С помощью лазеров хорошо обрабатываются твердые, хрупкие и тугоплавкие материалы. В ряде случаев они обеспечивают сварку таких металлов, которые не поддаются сварке обычными методами;

8) Лазером можно пробивать отверстия малого диаметра;

9) Процесс обработки протекает очень быстро на протяжении  $1 \text{ мс}$ ;

10) Для лазерной сварки не нужны электроды;

11) Лазерная сварка обеспечивает получение чрезвычайно малых сварных соединений на хрупких материалах;

12) Лазеры позволяют получать высокую плотность мощности без какого бы то ни было дополнительного подогрева;

13) Высокая производительность процессов и быстрая окупаемость капитальных затрат ( $1 \text{ год}$ );

14) Экологическая чистота технологии.

### 2.1. Лазерная модификация поверхности материалов

К методам лазерной обработки поверхностей материалов относятся: закалка, легирование, наплавка, химическое или физическое осаждение покрытий из газовой фазы [1, 2, 10, 16]. Толщина обрабатываемого слоя может составлять от сотен нанометров до нескольких миллиметров. Процесс лазерной модификации поверхности осуществляется путем сканирования поверхности металла лазерным лучом.

Основная цель закалки (лазерной термообработки) заключается в повышении твердости поверхности материалов в результате изменения их структуры. Иногда процесс лазерной термообработки рассматривают как “незавершенную сварку”. Лазерный пучок перемещается по поверхности настолько быстро, что процесс плавления не успевает начаться. Глубина зоны термообработки определяется теплопроводностью материала. Быстрый нагрев и закалка, осуществляемые в результате облучения  $\text{CO}_2$ -лазером мощностью несколько кВт, существенно повышает твердость материала. Глубину слоя закалки можно регулировать за счет изменения скорости перемещения луча.

Главными достоинствами лазерной модификации



поверхности являются: локальность обработки, возможность обработки труднодоступных участков, химическая чистота, контроль толщины обработки, возможность дистанционного контроля и автоматизации процесса, малая пористость созданного поверхностного слоя, высокая производительность процесса, высокая работоспособность созданного поверхностного слоя.

В ИПЛИТ РАН проведены работы по ряду технологических процессов лазерного упрочнения изделий машиностроения: направляющих обрабатывающих центров, длинномерных изделий, деталей двигателей внутреннего сгорания.

Наиболее распространенными методами лазерной обработки поверхности являются лазерная наплавка и лазерное легирование. Типичные толщины наплавленных слоев при лазерной обработке составляют от 0,1 до 3 мм при средней мощности лазерных установок до 5 кВт.

В результате проведенных исследований в ИПЛИТ РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана и ЦУНИИ КМ «Прометей» были созданы новые композитные высокопрочные толстолистовые материалы с гетерогенным поверхностным слоем толщиной 10-20 мм с повышенной противоударной стойкостью [2].

## 2.2. Перспективные процессы лазерной сварки

Доля рынка лазеров и соответствующего оборудования для лазерной сварки в 2005 году составила около 20% [10]. Главными достоинствами лазерной сварки являются:

- а) высокое качество сварного шва;
- б) высокая скорость процесса;
- в) широкий спектр свариваемых разнородных материалов;
- г) высокая контролируемость процессов “on-line”.

Технология лазерной сварки основана на применении излучения мощных  $\text{CO}_2$ -лазеров (единицы и десятки кВт), хотя применяются и  $\text{CO}_2$ -лазеры мощностью в сотни Вт [16].

В ИПЛИТ РАН разработаны технология и оборудование для лазерной сварки листов из алюминиевых сплавов и стальных труб. В качестве примеров можно привести следующие:

1) Высокоскоростная лазерная сварка толстостенных труб из нержавеющей стали. Диаметр труб до 400 мм, толщина стенок до 5 мм, скорость сварки до 15 м/мин (лазер ТЛ-5М, 5 кВт).

2) Лазерная сварка несущих алмазный абразив зубьев пил для распиловки камня. Толщина пилы 3-10 мм (лазер ТЛ-5М, 5 кВт).

3) Высокоскоростная лазерная сварка консервных банок. Толщина стенок 0,15 – 0,25 мм. Скорость сварки до 30 м/мин (лазер ТЛ-5М, 5 кВт).

4) Лазерная сварка магистральных газо- и нефтепроводов. Толщина стенок 10-15 мм. Скорость

сварки 3 м/мин (лазер ТЛ-10, 10 кВт).

5) Лазерная сварка алюминиевых сплавов АМг6 и 1420.

$\text{CO}_2$ -лазеры мощностью несколько кВт позволяют получать глубокие и узкие сварные швы, похожие на швы, получаемые методом электронно-лучевой сварки, но не требуют при этом вакуумной системы. При мощности 15 кВт глубина сварки для нержавеющей стали составляет 17,8 мм [16]. При мощности 80 кВт можно сваривать нержавеющую сталь толщиной 50 мм со скоростью 2,7 м/мин. Эксперименты по сварке при помощи непрерывных лазеров мощностью от нескольких кВт до 100 кВт показали, что глубина сварного шва возрастает с увеличением мощности лазерного излучения по степенному закону с показателем, равным 0,7 [16].

В настоящее время производится ЛС металлов в диапазоне толщин 0,5-50 мм (сталь, титан, алюминий, реакторные сплавы).

Практически ЛС широко применяется в отраслях: автомобилестроение, приборостроение, инструментальная, электротехническая, аэрокосмическая отрасли промышленности. ЛС (вместе с электронно-лучевой и плазменной) занимает около 10% объема сварных работ в промышленности развитых стран, особенно при серийном производстве с использованием роботов. В автомобильной промышленности Японии и Западной Европы особенно быстро развивается применение “лазеров-роботов” для сварки кузовов непосредственно после лазерного раскроя листов и последующей штамповки [10]. Это позволяет экономить до 40 кг металла на каждом кузове; кроме того, резко возрастают коррозионная стойкость и водонепроницаемость сварных соединений в кузовах.

## 2.3. Лазерная резка конструкционных и перспективных материалов

К традиционным технологиям разделения материалов относятся механическая, электродуговая, плазменная и кислородно-ацетиленовая технологии. Главными преимуществами лазерной резки (ЛР) перед перечисленными выше являются: высокая производительность и точность процесса; малая ширина и высокое качество реза; узкая зона термического влияния; отсутствие деформаций обработанного изделия; бесшумность процесса; отсутствие необходимости закреплять материал; гибкость перенастройки режимов; возможность резки труднообрабатываемых материалов: тугоплавких, хрупких, сверхтвердых, слоистых, волокнистых, токсичных, радиоактивных; возможность выполнения сложных фигур резки; возможность гибко наладить обработку малых партий изделий [10].

Доля операций ЛР в общем объеме применения лазеров при обработке материалов составляет около



50%. В настоящее время возможна ЛР практически любых материалов в диапазоне толщин 0,1-70 мм, скоростей резки 1-80 м/мин, ширины реза 0,05-1 мм. Это стало возможным благодаря наличию на мировом рынке индустриальных лазеров мощностью от 0,1 до 50 кВт [10].

В настоящее время, стандартными CO<sub>2</sub>-лазерами мощностью 1,5-2 кВт производится резка конструкционных сталей толщиной до 14 мм, нержавеющей сталей – до 9 мм; алюминия – до 4 мм; титана – до 6 мм, композитов – до 5 мм; кварца – до 2 мм; бетона – до 40 мм (лазером мощностью 8 кВт) [2].

В последние годы лазеры все больше стали применяться для резки металлов, сталей, графита, керамики и ряда минералов. Глубина реза – до 20 мм, скорость резки – до 6 м/мин.

Применение ЛР оказывается экономически оправданным при обработке таких изделий, как кузова и детали автомобилей, корпуса бронемашин, судов, самолетов; технологические каналы ядерных реакторов; металлические двери; сейфы, кабины; трубопроводная фурнитура; дисковые пилы; медицинские инструменты; мебель; кварцевые трубы; хрупкие и ювелирные изделия; паркет; архитектурные аксессуары; штампы; клапана; лопасти; панели приборов [10].

ЛР широко применяется в таких отраслях промышленности, как автомобилестроение; станкоинструментальная; медицинская; фармацевтическая; машиностроение для пищевой промышленности; радиоэлектроника; электротехнология; производство строительных машин и инструментов. В последние годы активно развивается технология ЛР для раскроя и утилизации крупнотоннажных изделий (котлы, вагоны, суда, фермы, морские платформы), а также для проходки тоннелей и штолен.

Появилась технология ЛР стали толщиной 50 мм с помощью струи кислорода высокого давления при поддержке процесса излучением CO<sub>2</sub>-лазера мощностью 2 кВт [2]. Ведутся исследования резки конструкций ядерных реакторов с помощью CO<sub>2</sub>-лазера мощностью 21 кВт: разрезалась сталь толщиной 300 мм (на воздухе) и 150 мм (под водой) [10]. С помощью специально разработанного CO<sub>2</sub>-лазера мощностью до 50 кВт выполнены лабораторные эксперименты по дистанционной ЛР стальных оголовков горящих нефтяных скважин [10].

В последние десятилетия широко применяется лазерное скрайбирование – это метод резки и фасонной обработки образцов, в ходе которого охватывается лишь часть поверхности вдоль границы раздела. Этот метод применим для обработки хрупких материалов типа керамики, кремния или стекла. Скрайбирование осуществляется путем нанесения на поверхности сплошной канавки или пробивки последовательности близко расположенных отверстий, после чего материал легко разламывается вдоль линии скрайбирования.

Керамика хорошо поглощает излучение с длиной волны 10,6 мкм. Обычно для скрайбирования керамики используется CO<sub>2</sub>-лазер, работающий либо в непрерывном режиме, либо в режиме повторения импульсов [16].

Находит применение также лазерное раскалывание: при перемещении материала относительно лазерного пучка трещина распространяется вдоль пути, проходимого пучком. Разделение материала на куски происходит без разрушения его поверхности и без потерь самого материала [16].

#### 2.4. Лазерная стереолитография

В лазерной стереолитографии реализуется принцип прямого формообразования трехмерных объектов путем послойного наращивания материала [2]. Исходным объектом для лазерной стереолитографии является трехмерная компьютерная модель, созданная средствами САПР. Спроектированный на компьютере трехмерный объект выращивается из жидкой фотополимеризующейся композиции (ФПК) последовательными тонкими (~ 0,1 мм) слоями, формируемыми под действием лазерного излучения на подвижной платформе, погружающейся в ванну с ФПК. Шероховатость поверхности изготавливаемых деталей без дополнительной обработки не превышает десятков мкм. Пластиковые модели хорошо шлифуются и полируются. Прочность готовых изделий сравнима с прочностью изделий из отвержденных эпоксидных смол.

Изготовленные методом лазерной стереолитографии пластиковые модели могут использоваться в таких областях, как точное машиностроение, авиа- и космическая промышленность, автомобильная промышленность, радиоэлектроника, медицина и медицинская техника, архитектура и строительство, образование и подготовка кадров.

Использование лазерной стереолитографии позволяет в десятки раз сократить затраты времени на изготовление опытных изделий и подготовку их производства.

Современная лазерная стереолитография интегрирует в себе последние достижения в области квантовой электроники и нелинейной оптики, информационных технологий, физики и химии высокомолекулярных соединений, прецизионной механики.

В настоящее время в мире работает более 2500 установок лазерной стереолитографии [2, 10], основным производителем которых является фирма 3D Systems. Область применения стереолитографии непрерывно расширяется, и в настоящее время она проникла практически во все сферы производственной и исследовательской деятельности, т.к. позволяет оперативно (всего за несколько часов) изготавливать пластиковые копии трехмерных объектов и структур с практически сколь угодно сложной формой поверхности.



В России работы по лазерной стереолитографии были начаты в 1991 году в ИПЛИТ РАН. В результате были созданы установки ЛС-120 и ЛС-250 для оперативного изготовления трехмерных изделий практически любой степени сложности из отвержденных под действием лазерного излучения полимерных (в том числе композитных) материалов [2].

### Литература

1. Голубев В.С., Гофман З.Н., Низьев В.Г. Современные разработки технологических лазеров большой мощности // Препринт НИЦГЛАН, 1988, № 42. – 38 с.
2. Бондаренко А.И., Васильцов В.В., Галушкин М.Г., Голубев В.С., Низьев В.Г., Панченко В.Я., Забелин А.М., Завалов Ю.Н., Якунин В.П. Индустриальные CO<sub>2</sub>-лазеры с высоким качеством излучения // Сборник трудов ИПЛИТ РАН “Современные лазерно-информационные и лазерные технологии” / Под ред. В.Я. Панченко и В.С. Голубева. – М.: Интерконтакт Наука, 2005. – С. 251-259.
3. Baranov G.A., Khukharov V.V. Soviet Development of Laser Equipment for Commercial Applications. (CO<sub>2</sub>-laser up to 20 kW) / The Industrial Laser Handbook 1992-1993. Ed. Springer-Verlag, 1993. – pp. 132-140.
4. Bohn W.L. High Power Gas Lasers in Germany. The Industrial Laser Handbook 1992-1993. Ed. Springer-Verlag, 1993. – pp. 343-358.
5. Golubev V.S. Recent investigations of gas discharge and beam quality problems of fast-flow CO<sub>2</sub>-lasers // Proc. SPIE, 2502, 1994. – pp. 111-119.
6. Vassil'tsov V.V., Golubev V.S., Zabelin A.V., Panchenko V.Ya. High Power Industrial CO<sub>2</sub> lasers based upon new Concepts of Gas Discharge and Optical Schemes // Proc. SPIE, 2206, paper 42 (1994).
7. Naumov V.G., Rodin A.V. Physics of Low Temperature Plasma and CO<sub>2</sub>-Lasers with Average Power up to 50 kW for Industrial Applications // Proc. Of the International Conference on Lasers' 94. Quebec, Canada, 12-16/XII 94. – pp. 171-175.
8. Красюков А.Г. Новые горизонты открывают созданные в ТРИНИТИ мобильные многоцелевые лазерные комплексы (30 kW) // Препринт ТРИНИТИ. – Троицк, 1996.
9. Lander M.L. et al. CW CO<sub>2</sub> laser system producing output power up to 135 kW // Proc. SPIE, 3092, 1997. – pp. 186-189.
10. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. акад. РАН В.Я. Панченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 704 с.
11. Богданов М.П., Верин В.М., Генералов Н.А. и др. Технологическая лазерная установка УЛГ-2.01 комбинированного действия: импульсно-периодического и непрерывного // В кн. Применение лазеров в народном хозяйстве: Труды Всесоюз. конф. – М.: Наука, 1986.
12. Генералов Н.А., Зимаков В.П., Косынкин В.Д. и др. Быстропроточный технологический CO<sub>2</sub>-лазер комбинированного действия // Квантовая электроника, 1982, 9, № 8. – С. 1549-1557.
13. Басов Н.Г., Бабаев И.К., Данилычев В.А. Электроионизационный CO<sub>2</sub>-лазер замкнутого цикла непрерывного действия // Квантовая электроника, 1979, 6, № 4.
14. Иванченко А.И., Крашенинников В.В., Пономаренко А.Г., Шепеленко А.А. Компактный излучатель технологического CO<sub>2</sub>-лазера // Квантовая электроника, 1985, 12, № 10.
15. Иванченко А.И., Крашенинников В.В., Пономаренко А.Г., Шепеленко А.А. // Препринт № 6 ИТПМ СО АН СССР, 1986.
16. Реди Дж. Промышленные применения лазеров. – М.: Мир, 1981. – 640 с.