

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ

**В. П. ГАРАЩУК, В. Д. ШЕЛЯГИН**, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализированы на основе материалов ярмарки «Laser-2005» и выставки «Schweissen und Schneiden» в Эссене современные тенденции развития технологических CO<sub>2</sub>-лазеров, твердотельных с оптическим возбуждением и полупроводниковых. В последние годы технологические параметры волоконных и полупроводниковых лазеров улучшаются, CO<sub>2</sub>-лазеров остаются практически без изменений. В технологических комплексах, построенных на декартовых манипуляторах, дополнительно применяют двухкоординатную развертку. В технологиях сварки особое внимание уделяют комбинированным способам сварки, в которых объединяются лазерное излучение с другими источниками тепла: электрической дугой, некогерентными источниками света и др.

*Ключевые слова: технологические лазеры, CO<sub>2</sub>-лазеры, дисковые и волоконные твердотельные лазеры, лазерные технологические комплексы, комбинированные способы сварки*

13–16 июня 2005 г. в Мюнхене (ФРГ) состоялась XVII Международная ярмарка и международный конгресс «Laser-2005 World of Photonics», 10–21 сентября 2005 г. — XVI Международная ярмарка «Schweissen & Schneiden 2005» в Эссене.

На ярмарке «Laser-2005» были представлены следующие разделы: лазеры и опtronика; оптика; технологии изготовления оптических деталей; измерительная и испытательная техника; оптические измерительные системы; медицинская техника; технологическое оборудование; изображение. Во время проведения ярмарки состоялись также XVII Международная конференция по лазерам и электронике в Европе и международная профессиональная ярмарка и конгресс по оптическим, информационным и коммуникационным технологиям «FiberComm».

На ярмарке авторов наиболее интересовало технологическое лазерное оборудование для термических технологий обработки материалов: сварки, резки, термообработки, наплавки. По этим направлениям в ярмарке принимало участие 43 фирмы, в том числе по сварке — 27, пайке — 9, резке — 26, поверхностной обработке — 19; из них постоянных участников — более половины.

Данные о мировых объемах продаж лазерного оборудования в 2004 г. опубликованы в специально выпущенном сборнике [1]. Общий объем продаж лазерных систем для обработки материалов в 2004 г. составил 4,65 млрд евро. Из них 3,45 млрд — сумма продаж лазерных систем для макрообработки, в том числе для сварки и резки — 2,45 млрд, маркировки — 650 млн, структурных превращений, перфорации и др. — 350 млн евро. Остальные 1,2 млрд евро — сумма продаж лазерных систем для микрообработки в полупроводниковой промышленности, производстве электронных приборов и электронных плат, а также эксимерных лазеров для фотолитографии.

По отраслям промышленности в стоимостном отношении лазерные технологические системы

распределились следующим образом: автомобильная — 475 млн, электротехническая — 400, металлообработка в других отраслях — 1130, обработка неметаллов — 445, «джоб-шоп» — 950, электроника, полупроводники, производство дисплеев — 1250 млн евро.

Объем продаж в Европе составляет 34 % мировых продаж, в Северной Америке, Японии — по 22, в Восточной Азии — 19, в других регионах — 3 %. Основным потребителем лазерного оборудования в Европе является Германия, состояние развития промышленности которой существенно отражается на рынке сбыта.

Мировой объем продаж лазерных источников света в 2004 г. составил 1,65 млрд евро. Из них CO<sub>2</sub>-лазеры были реализованы на сумму 660 млн евро, что составляет 40 % всех продаж, при этом CO<sub>2</sub>-лазеры мощностью более 500 Вт проданы на сумму почти 600 млн евро. Сумма продаж твердотельных лазеров составила 650 млн евро (или 39 % общего рынка). Эксимерные лазеры реализованы на сумму 320, диодные за короткое время достигли уровня 20 млн евро. Таким образом, в настоящее время CO<sub>2</sub>-лазеры, судя по реализации, потеряли лидирующее положение, занимаемое с середины 1970-х гг. Дальнейшее развитие твердотельных лазеров еще больше потеснит CO<sub>2</sub>-лазеры, однако и в дальнейшем они будут применяться в значительных количествах.

Спрос на лазеры и лазерные системы для материалообработки существенно зависит от динамики развития промышленности. Прогнозируется, что в ближайшие 10 лет ежегодный прирост мирового рынка лазерных систем для материалообработки составит примерно 14 % и будет оцениваться суммой около 9,5 млрд евро, при этом 6,1 и 3,4 млрд евро — лазерные системы соответственно для макро- и микротехнологий (с условием, что в прогнозируемом интервале времени не будет никаких революционных изменений в методах обработки материалов).

В лазерных технологических технологиях обработки материалов (ЛТТОМ) в основном используются лазеры трех типов: CO<sub>2</sub>-лазеры с диффузионным (трубчатые и щелевые) и конвективным охлаж-



дением (в основном с осевой прокачкой); твердотельные лазеры с оптическим возбуждением (стержневые, дисковые, волоконные) и диодные (полупроводниковые) лазеры [2].

Технологические возможности лазеров для резки и сварки определяются не только мощностью лазерного излучения, но и постоянной преобразования пучка  $Q$  (произведение минимального поперечного размера фокусируемого пучка на его расходимость) [2]. При фокусировке пучка произведение минимального поперечного размера сфокусированного пучка на угол его сходимости также равно постоянной  $Q$ . Следовательно, чем она меньше, тем в меньшие размеры можно сфокусировать лазерный пучок с меньшей расходимостью сфокусированного пучка. Поэтому чем меньше постоянная преобразования пучка, тем выше его качество, поскольку при этом обеспечивается большая глубина резкости при тех же значениях минимального сечения сфокусированного пучка.

**СО<sub>2</sub>-лазеры.** В группе СО<sub>2</sub>-лазеров особых новинок не появилось. Трубочатые лазеры с диффузионным и конвективным охлаждением не улучшили своих технологических параметров, достигнув, очевидно, своих предельных значений. В будущем возможно еще появление отдельных инженерных решений, однако их основные технологические параметры уже predeterminedены. Щелевые лазеры, получившие развитие в последнее десятилетие, были представлены лазером мощностью 3000 Вт и  $Q < 4$  мм-мрад фирмы «Rofin Sinag» с параметрами лазерного пучка, практически соответствующими одноименному режиму генерации. Такой же лазер рекламировался (но не экспонировался) Институтом лазерной физики из С.-Петербурга. По-видимому, этот тип лазеров будет конкурировать с одноименными трубочатыми.

**Твердотельные лазеры с оптическим возбуждением.** Технологические параметры стержневых лазеров за последние два года не изменились. Их максимальная мощность составляет 4500 Вт и  $Q = 25$  мм-мрад. Лазеры мощностью менее 1000 Вт имеют постоянную преобразования пучка в 2 раза лучше ( $Q = 12$  мм-мрад).

Намного улучшились технологические параметры дисковых лазеров. Фирма «TRUMPF» рекламировала свои дисковые лазеры мощностью излучения от 250 до 4000 Вт с постоянной преобразования пучка  $Q = 8$  мм-мрад для самых мощных лазеров и 4 мм-мрад для лазеров мощностью до 500 Вт. Следовательно, с увеличением мощности излучения лазера качество лазерного пучка ухудшается (так как  $Q$  увеличивается). Для сравнения на ярмарке 2003 г. эта же фирма представляла лазеры такого типа с мощностью только 1000 Вт и  $Q = 6$  мм-мрад.

В области волоконных лазеров наиболее плодотворно работает транснациональная компания «IPG Laser GmbH» (РФ, ФРГ, США). Если на ярмарке «Laser-2003» она представила лазерный модуль мощностью 300 Вт и  $Q = 0,4$  мм-мрад, то на ярмарке 2005 г. такой модуль имел мощность уже 1000 Вт и то же значение  $Q$ , соответствующее

одноименному режиму генерации, т. е. предельно возможному. Лазеры многокиловаттной мощности создаются из отдельных одноименных блоков, выходные концы волокон которых укладываются параллельно друг другу, благодаря чему образуется многоканальный лазерный пучок. Его постоянная преобразования увеличивается примерно в корень квадратный раз из количества использованных выходных волокон. В волоконных лазерах используются световолокна, легированные итербием, с длиной волны генерации 1,07...1,12 мкм. Для их возбуждения используются диодные лазеры. Создан типоразмерный ряд промышленных лазеров (по мощности 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 20000 и 50000 Вт) с КПД 25 %. Такие значения мощности лазерного излучения были достигнуты только в СО<sub>2</sub>-лазерах при значительно худшем качестве пучка. На ярмарке экспонировался лазер мощностью 20 кВт с габаритами примерно 800×800×1500 мм без охлаждающего блока и источника питания.

За короткое время компания IPG создала самый мощный твердотельный лазер, в то время как твердотельные лазеры стержневого типа достигли мощности 4500 Вт почти за двадцать лет развития. По-видимому, использование принципа оптоволоконного лазера способствует устранению многих проблем, которые не удается решить в лазерах другой конструкции. Лазеры IPG имеют высокое качество пучка, что позволяет их использовать для резки, сварки, сверления, микрообработки, термической печати, гравировки. Фирмой созданы также оптоволоконные лазеры для медицинских целей с очень высоким качеством пучка. Их активная среда легирована тулием с длиной генерируемых волн 1,75...2,2 мкм.

**Диодные (полупроводниковые) лазеры.** Значительный успех достигнут в развитии диодных (полупроводниковых) лазеров — их мощности увеличились за два года более чем в полтора раза. Данные о технологических параметрах лазеров прямого действия и с передачей излучения по оптоволокну фирмы «LASERLINE», экспонированных на ярмарках в 2003 и 2005 гг., приведены в табл. 1 и 2.

Достигнутые плотности световой мощности позволяют использовать их излучение для сварки, пайки твердыми припоями, наплавки и термообработки. Большие значения постоянной преобразования пучка не позволяют использовать эти лазеры для высококачественной резки толстого металла, хотя резка листа толщиной около 1 мм вполне возможна (то же можно сказать и о сварке в режиме глубокого проплавления). Рекордно высокий КПД таких лазеров ставит перед разработчиками задачу достичь не только больших значений мощности, но и возможности сфокусировать лазерный луч в меньшие размеры при малой расходимости сфокусированного пучка, т. е. малых значениях постоянной преобразования пучка, что создает условия использования их в технологиях обработки материалов без ограничений.

Фирмы-разработчики технологических лазеров уделяют большое внимание автоматизации сварочных, резательных и маркировочных процессов. На

Таблица 1. Сравнение технологических параметров полупроводниковых лазеров прямого действия

Постоянная преобразования пучка, мм-мрад	Минимальные размеры светового пятна при фокусировке линзой ( $F = 100$ мм), мм	Максимальная мощность лазера, Вт		Достигнутая плотность световой мощности в сфокусированном пучке $\cdot 10^{-6}$ , Вт/см <sup>2</sup>
		2003 г.	2005 г.	
40×40	0,4×0,4	600	1500	0,94
40×60	0,4×0,6	900	2000	0,84
60×100	0,6×1,0	1600	3500	0,58
60×300	0,6×3,0	6000	10000	0,55

Таблица 2. Сравнение технологических параметров полупроводниковых лазеров с передачей излучения по оптоволокну

Постоянная преобразования пучка, мм-мрад	Диаметр оптоволоконка с числовой апертурой $A_N = 0,2$ , мкм	Минимальный диаметр светового пятна при фокусировке линзой ( $F = 100$ мм), мм	Максимальная мощность лазера, кВт		Достигнутая плотность световой мощности в сфокусированном пучке $\cdot 10^{-6}$ , Вт/см <sup>2</sup>
			2003 г.	2005 г.	
40	400	0,4	0,85	1,4	1,11
60	600	0,6	1,30	3,0	1,06
100	1000	1,0	4,00	6,0	0,76
150	1500	1,5	4,00	6,0	0,34

ярмарке были представлены роботизированные комплексы фирм «Reis» и «Kuka» для выполнения сварочных и резательных операций в трехмерном измерении (в частности в автомобильной промышленности). В большинстве случаев лазерное излучение подводится к исполняющему органу робота с помощью оптоволоконка, в котором неизбежны потери мощности пучка, особенно на его входе и выходе. Кроме того, передача пучка по оптоволокну несколько ухудшает его качество. Компактность и легкость лазерной головки диодного лазера позволило фирме «Reis» разместить ее на исполняющем органе антропоморфного робота и избежать указанных выше потерь и искажений пучка.

Сварку, резку, маркировку на плоскости целесообразнее выполнять с помощью двухкоординатной развертки. Эта задача решается не только декартовыми манипуляторами, но и сканаторами, у которых развертка на плоскости выполняется с помощью двух зеркал, колеблющихся во взаимно перпендикулярных плоскостях. Сканаторы применяются в составе технологической аппаратуры с любыми лазерами. Так, фирма «LASERLINE» использует их вместе с полупроводниковыми лазерами, а завод «ФЕНА» — с CO<sub>2</sub>-лазерами. На рисунке показана пластина, на которую приварена скоба, а в нее вварено кольцо и сделаны надписи. Все эти операции выполнены за одну установку предварительно механически собранной конструкции в течение 1 мин. Одним из разработчиков сканаторов является фирма «Scanlab».

В предыдущие годы на ярмарках демонстрировались сканаторы, обеспечивавшие развертку на плоскости диаметром не более 500 мм. На XVI сварочной ярмарке в Эссене, состоявшейся в сентябре 2005 г., фирма «TRUMPF» демонстрировала лазерный комплекс TrumaScan L4000, снабженный CO<sub>2</sub>-лазером мощностью 6 кВт, в котором сканатор обрабатывал поле диаметром 1500 мм. По требованиям производства можно установить несколько

сканаторов или перемещать один в пределах 2400 мм. Рабочий объем комплекса составляет 1500×2400×500 мм. Сканатор обеспечивает скорость перемещения сфокусированного пучка по поверхности обрабатываемой детали 4 м/с, что для механического перемещения фокусирующей головки является трудновыполнимой задачей.

Фирма «ФЕНА» специализируется на разработке и серийном выпуске CO<sub>2</sub>-лазеров, которые могут генерировать на длинах волн 9,3; 9,6; 10,3; 10,6 и 11,2 мкм, что позволяет использовать их не только для сварки и резки металлов, но и пластмасс. При обработке пластмасс выбирают наиболее подходящую длину волны для данной операции. Например, полипропилен имеет наибольшую прозрачность на длине волны 9,3, несколько меньшую на длине 10,6 и полностью непрозрачный на длине волны 10,3 мкм. Очевидно, что резать полипропилен наиболее эффективно излучением именно этой длины волны. За последние несколько лет разработана технология получения неразъемных нахлесточных соединений пластмасс проникающей сваркой. Суть способа заключается в том, что верхний лист пластмассы прозрачный для данного излучения, а нижний поглощает его, благодаря чему нагревается и подогревает нижнюю поверхность верхнего листа. При последующих сжатии и остывании образуется неразъемное со-



Образец, выполненный и промаркированный с одной установки



единение. При этой сварке нижним листом может быть также металл. Для получения соединений различных пластмасс проникающей сваркой используются лазеры, изготавливаемые заводом «ФЕНА».

Из технологических разработок по сварке металлов необходимо отметить комбинированные способы, разрабатываемые также в ИЭС им. Е. О. Патона [3], в которых используются лазерное излучение совместно с электрической дугой с плавящимся или неплавящимся электродом, а также светолучевыми подогревателями. Для реализации таких процессов специально разрабатываются фокусирующие головки, на которых монтируются механизмы подачи проволоки, дуговые электроды, светолучевые подогреватели. В этой области заметное положение занимают фирмы «Precitec» и «Highyag», которые специализируются на производстве фокусирующих головок. Так, «Precitec» выпускает фокусирующие головки для сварки

внахлест с прижимом свариваемых листов с одной и двух сторон с помощью вращающихся роликов, которые применяются в автомобильной промышленности при производстве кузовов.

На ярмарке были представлены также всевозможные комплектующие к лазерам и технологической оснастке различных фирм. Это в первую очередь оптика (линзы, окна, зеркала), измерители мощности, оптоволоконна, сканаторы, фокусирующие головки для сварки и резки, компрессоры для быстропотоочных CO<sub>2</sub>-лазеров, холодильники для охлаждения активных лазерных сред, очистители воздуха и др.

1. *World of laser technology. Core of photonics.* — 7th Ed. — Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH. — 2005. — 38 p.
2. *Гарашук В. П.* Основы фізики лазерів. Лазери для термічних технологій: Навч. посібник. — К.: Ін-т електродозварювання ім. Е. О. Патона, 2005. — 244 с.
3. *Laser-arc and laser-plasma welding and coating technologies* / V. D. Shelyagin, I. V. Krivtsov, Yu. S. Borisov et al. // *The Paton Welding J.* — 2005. — № 8. — P. 44–49.

Current trends in development of technological CO<sub>2</sub>-lasers, optically excited solid-state lasers and semiconductor lasers have been analysed on the basis of information derived from exhibition «Laser-2005» and Essen Fair «Schweissen und Schneiden». Process parameters of fibre and semiconductor lasers have been improved in the last years, and those of CO<sub>2</sub>-lasers have remained almost unchanged. Two-coordinate scanning is additionally applied in technological systems based on the Cartesian manipulators. In welding technologies, the special consideration is given to hybrid welding methods, which combine laser radiation with other heat sources, such as electric arc, non-coherent light sources, etc.

Поступила в редакцию 26.09.2005



## 6-я ЕВРОПЕЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО СВАРКЕ, СОЕДИНЕНИЮ И РЕЗКЕ

*6-я Европейская конференция, спонсируемая Европейской федерацией соединения, сварки и резки (EWF), будет проведена в г. Сантьяго-де-Компостела (Испания) с 28 по 30 июня 2006 г. одновременно с 16-й технической сессией по сварке, проводимой раз в два года Испанской ассоциацией технологий сварки и соединений (CESOL).*

**Программа конференции включает следующие темы:**

**сварка, соединение, наплавка, резка**

лазерная, плазменная и дуговая сварка

пайка

сварка трением с перемешиванием

сварка сопротивлением

сварочное оборудование

**материалы для сварки**

высокопрочные стали

легкие сплавы и конструкции из низких сплавов

соединение разнородных материалов

**производство и применение**

обучение, сертификация персонала

технические стандарты в сварке, соединение, тестирование и инспекция

безопасность и здоровье при сварке и соединении

моделирование сварочных процессов, моделирование металлургических процессов при сварке

стоимость производства

[www.palaciosantiago.com](http://www.palaciosantiago.com)