

ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Хотя научно-технические издания сообщают о достижениях, связанных с последними разработками мощных волоконных лазеров, найдется не так много публикаций, обсуждающих детали тех приложений, где используются волоконные лазеры. Лазерная маркировка и приложения, использующие обработку материалов, демонстрируют быстрый взлет лазерных волоконных технологий благодаря высокому качеству луча, а также их надежности и робастности. Этому и посвящена предлагаемая статья.

Рынок все больше рассматривает волоконные лазеры как альтернативу обычным лазерам. Причина – в том выигрыше, который дает использование волоконной технологии. Особенно важным для промышленных приложений является отличное качество лазерного луча при большой излучаемой мощности (рис.1), снижение текущих эксплуатационных расходов, увеличение выхода годных изделий и рост надежности.

Волоконные лазеры особенно популярны в системах лазерной маркировки и лазерной обработки материалов, таких как микросварка и микрорезка, при создании, например, элементов медицинского оборудования. Другими областями применения могут быть: книгопечатание, производство полупроводниковых (п/п) и электронных компонентов, а также микрообработка материалов, например при формировании микроизгибов (рис.2).

Важно то, что ни одно из этих приложений не требует киловаттных мощностей и может обслуживаться волоконными лазерами мощностью до 400 Вт [1].

ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ

Принципиально конструкция резонатора волоконного лазера мало чем отличается от того, что используется в обычном твердотельном лазере с диодной накачкой (DPSS). Основная

конструкция резонатора также состоит из мощных диодов накачки и схемы ввода энергии накачки в активную среду. Конфигурация резонатора имеет зеркала и проработанную схему отвода избыточного тепла. Есть, конечно, и элементы тонкой настройки всего устройства для получения оптимальных характеристик волоконного лазера.

Активной средой служит оптическое волокно (ОВ), легированное редкоземельными элементами. Оно, благодаря сложной структуре профиля показателя преломления (ПП) сердцевинки, выполняет также ряд других функций. Одномодовая (ОМ) сердцевина в центре волокна придает лучу исключительно высокое качество, тогда как многомодовая (ММ) сер-

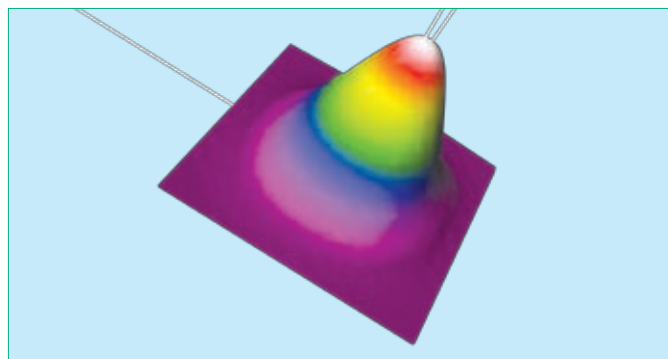


Рис.1 Профиль луча волоконного лазера ($M^2=1,1$)

АВТОРЫ

С. Вудс (Stuart Woods), М. Дака (Michael Duka) –
 сотрудники компании SPI Lasers UK Ltd.,
 Southampton, UK, michael.duka@spilasers.com
Г. Флинн (Dr. Gregory Flinn) – технический писатель
 и консультант по лазерам (Мюнхен, Герма-
 ния), gregory.flinn@gmx.net

дцевина (обычно концентричная ей) обеспечивает путь для эффективного ввода энергии накачки в легированную ОМ-сердцевину. Волокно в целом защищается полимерным покрытием (рис.3а). Большая площадь поверхности волокна позволяет эффективно рассеивать тепло, генерируемое лазером. В этом причина того, почему твердотельные лазеры не страдают от проблем образования тепловой линзы, сопутствующих, как правило, конструкциям мощных твердотельных стержневых лазеров. Примечательно, что различные производители пришли к разным схемам расположения ОМ- и ММ-сердцевин волокна, а значит, и разным схемам ввода энергии накачки в активную среду.

Дополнительно к этим свойствам в конструкции лазера используется технология зеркал на основе *волоконных решеток Брэгга (FBG)*, которая позволяет формировать зеркала в ОМ-сердцевине, что приводит к необычайно робастной структуре резонатора. Все это (наряду с очень долгим сроком службы, лазерными диодами накачки и большой площадью волокна для ее ввода) формирует высоконадежную лазерную систему, практически не требующую обслуживания, предлагающую более высокую эффективность использования расходуемой мощности по сравнению с обычными DPSS- и CO₂-лазерами.

Волоконные лазеры доступны в виде непрерывных (CW) или импульсных систем, хотя число приложений, где требуется чисто CW-системы, сравнительно невелико. Чаще непрерывное излучение модулируется по амплитуде (интенсивности) для лучшего его использования во многих приложениях. Для применения в системах сварки и резки, например при



Рис.2 При изготовлении микромеханических компонентов с помощью компактных 10-Вт волоконных лазеров генерируются микроизгибы, требуемые, например, при изготовлении компьютерных жестких дисков

старте процесса на поверхности, требуется кратковременное превышение мощности пучка (по сравнению с тем, что требуется для продолжения основного процесса). Последовательность таких стадий процесса (периодов) используется для создания квазинепрерывной сварки или резки при обработке материала. В системах маркировки такие перепады амплитуды могут быть значительно больше, например для формирования цвета материала. В этом случае часто требуются системы, способные создать большой пик мощности на короткое время (импульс энергии).

Для импульсных лазерных систем добротность резонатора, или его величина Q, поддерживается на низком уровне, в то время как активная среда непрерывно накачивается энергией. Затем величина Q резко увеличивается с помощью электрооптических или акустооптических модуляторов, чтобы сформировать короткий лазерный импульс с большой пиковой мощностью. Такие лазеры называются лазерами с Q-переключением.

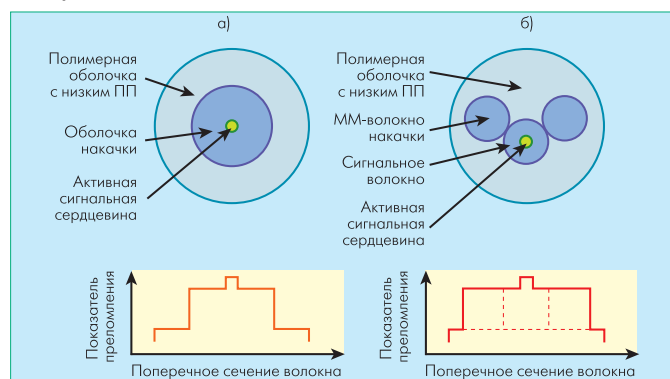


Рис.3 Поперечное сечение и профиль показателя преломления: стандартное волокно с двойной оболочкой (а); сечение волокна GTWave компании SPI (б)

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ

Геометрия систем накачки

Большинство волоконных лазеров построено по классической схеме ОВ с двойной оболочкой, в котором центральная ОМ-сердцевина покрыта ММ-сердцевинной, которая играет роль первой оболочки ОМ-сердцевины с меньшим ПП, чем у ОМ-сердцевины (рис.3а). Вторая концентрическая оболочка является полимерной, она наносится на первую и имеет еще меньший ПП. Для такой конфигурации энергия накачки вводится в активную среду или на концах волокна, или через промежуточные точки сплавления ОМ- и ММ-волокон, распределенные вдоль волокон. ММ-сердцевина расположена относительно ОМ-сердцевины несколько асимметрично для того, чтобы оптимизировать условия ввода энергии накачки в легированную ОМ-сердцевину по всей длине ОМ-волокна.

Компания SPI вместо этого использует собственную схему расположения волокон при формировании резонатора, в которой ОМ-волокно находится в контакте не с одним, а с



Рис. 4 Итоговый контроль процесса вытягивания волокна

двумя ММ-волокнами, используемыми для накачки. Все три волокна при этом покрываются полимерной оболочкой, как и в предыдущей схеме (рис.3б) [2]. В этой схеме заготовки для каждого волокна можно приготовить независимо, используя обычную технологию, а затем соединить их вместе в процессе протяжки при нанесении полимерной оболочки (рис.4). Концы трех разных волокон остаются сначала разделенными, что существенно упрощает двухшаговую процедуру сращивания концов ММ-волокон (этих источников накачки), а также процедуру нанесения зеркал на основе FBG на концах ОМ-волокна. Подготовленные таким образом волокна затем покрываются полимером.

Дополнительно к этому формируют несколько "стандартных длин" полученных пар ММ-волокон, которые можно затем срастить с помощью концов ОМ-волокна. Это дает возможность легко наращивать мощность волоконного лазера компании SPI, используя до четырех источников накачки на одну секцию рабочего волокна, что дает возможность использовать такую сборку для формирования двух рабочих и двух резервных источников накачки на одну секцию с целью повышения надежности лазера.

Формирование импульса

Одним из слабых мест лазеров с переключаемой добротностью Q (в частности, волоконных лазеров такого типа, которые имеют большую длину резонатора) является недостаток средств формирования импульсов. При функционировании лазера переключение добротности позволяет управлять скоростью повторения импульсов (и до некоторой степени пиковой мощностью) путем подстройки скорости накачки и скорости повторения импульсов. Однако при этом возникают труд-

ности с управлением длительностью импульса. Управление длительностью импульса было бы возможно, если бы пиковая мощность была постоянна в диапазоне скоростей повторения импульсов, но это обычно зависит от конструкции резонатора.

Для решения этой проблемы компания SPI использует модификацию усилителя мощности с задающим генератором (МОРА), а точнее волоконного МОРА (или усилителя МОФРА), для лучшего управления формой импульса (рис.5) [2]. Системы с МОФРА используют для этого импульсные лазерные диоды. Благодаря малой длине резонатора их можно использовать для создания коротких импульсов, которые затем уже можно сформировать, используя электронику. Луч лазерного диода направляется непосредственно в ОМ-сердцевину, а импульсы затем усиливаются за один проход. В этом случае мы имеем дело с характеристиками импульсов лазерного диода, которые и определяют форму усиленных импульсов на выходе волоконного лазера. При соответствующей настройке параметров, таких как форма импульса, энергия накачки и т.д., можно удерживать пиковую мощность импульсов примерно постоянной в широком диапазоне изменения скорости повторения импульсов, гарантируя тем самым достижение оптимальных характеристик для широкого круга материалов и методов маркировки.

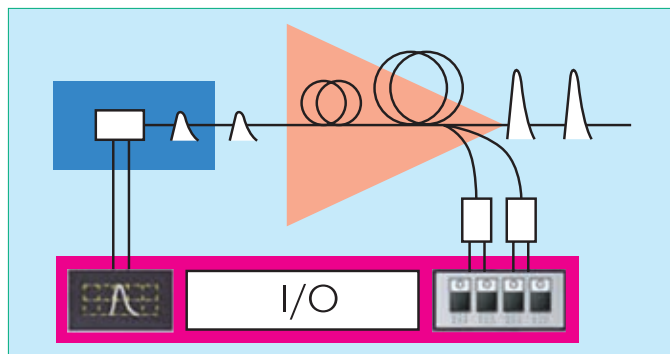


Рис.5 Блок-схема волоконного усилителя мощности с задающим генератором (МОФРА), используемого для формирования импульсов (с импульсами ЛД на входе слева (I) и импульсами света накачки на выходе (O) справа)

ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ВОЛОКОННЫМИ ЛАЗЕРАМИ МОЩНОСТЬЮ ДО 400 Вт

Лазерная маркировка

Лазерная маркировка включает два чем-то отличающихся приложения. Одно использует массовый тип маркировки (например, бар-коды и др.), применяемый для целей идентификации (рис.6). Другое – маркировку более доходчивой информации с текстами и сложными рисунками.

Система маркировки бар-кода может быть быстро и гибко встроена в продуктовую линию. Бар-код часто используется для целей трассировки продукции в схемах контроля качества. В зависимости от приложения процесс маркировки связан с изменением свойств поверхности материала (цвета или

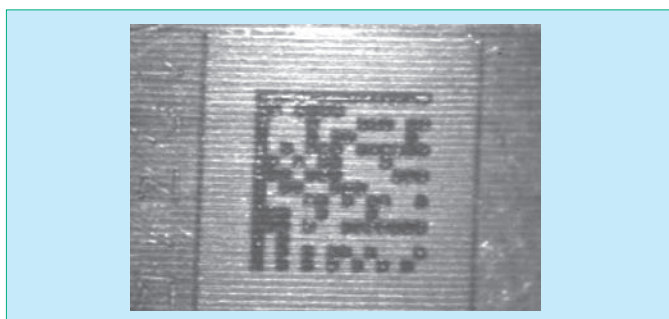


Рис. 6 Двумерный бар-код на нержавеющей стали, воспроизведенный с помощью 10-Вт волоконного лазера

текстуры) или с удалением поверхностного слоя для выявления материала нижнего слоя, имеющего другой цвет.

Последний метод также используется для нанесения текста и рисунков, так как это гарантирует долгий срок жизни маркировки и обеспечивает высокий контраст элементов маркировки, обычно используемых в потребительской сфере, например на автомобилях, клавиатуре, портативных MP3-плеерах и велосипедных рамах. Для этого типа приложений внешний вид и качество отделки при маркировке приобретают особую важность.

В общем случае лазерная маркировка связана с использованием импульсных лазерных систем, и большая пиковая мощность, требуемая для создания изменений поверхности материала, является здесь принципиальным параметром. Использование при этом коротких импульсов гарантирует, что нагрев облучаемого образца будет минимальным, а значит, маркировка произойдет точно в требуемом месте.

Для создания оптимального пика мощности (обеспечивающего высокую скорость передачи энергии и формирование четкого контура при минимальном нагреве), зависящего от конкретного типа маркировки, можно изменять частоту повторения импульсов и энергию накачки в зависимости от обрабатываемого материала. Пластик и металлы требуют пиковой мощности порядка 5 или 10 кВт, соответственно, при частоте повторения 20 или 200 кГц и длительности импульса 10 или 100 нс.

Максимально допустимая средняя мощность пучка порой не используется, то есть скорость маркировки снижается, чтобы обеспечить высокое качество. В этом случае (как и при максимальной скорости маркировки) больше всего подходит технология компании SPI. Она позволяет выбрать практически любую требуемую комбинацию пиковой импульсной мощности и энергии импульса, доступную в каком-то диапазоне средних мощностей, чтобы установить такую частоту повторения, которая обеспечит наилучшие характеристики маркировки.

Микросварка

Лазерная сварка высокого качества требует исключительно стабильной выходной мощности. При средней мощности ниже 500 Вт непрерывный лазерный пучок модулируется по амплитуде для создания серии точек сварки, очень точно

моделирующей процесс непрерывной сварки. Оптимизация этого процесса включает выбор лучшей комбинации скорости сварки и параметров модуляции для какого-то конкретного материала.

В медицинских инструментах и имплантатах, а также в металлических компонентах, используемых в электронике, часто применяют нержавеющую сталь типа 304 толщиной 0,1–0,5 мм. Требования к качеству сварки таких компонентов очень высоки, несмотря на то, что процесс сварки весьма сложный: слишком большая мощность может привести к большой глубине проплавления и перфорации материала, а слишком малая мощность – к недостаточной прочности сварки.

Волоконные лазеры средней мощностью до 60 Вт позволяют достичь желаемого качества сварки (рис.7) с гладкими сварными швами без пустот и разрушений.

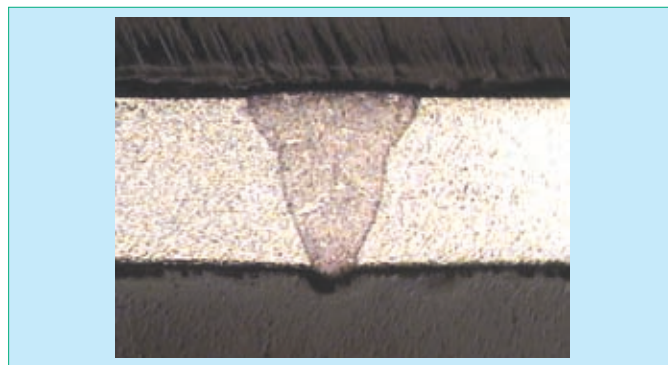


Рис. 7 Разрез стыка, сваренного с помощью 100-Вт волоконного лазера (показан образец нержавеющей стали толщиной 0,5 мм)

Обработка полупроводников и электронных компонентов

Полупроводниковая промышленность использует все более тонкие п/п пластины. Компоненты, полученные из них, находят применение в механически гибких или многослойных электронных схемах. Использование традиционных технологий алмазной резки для разделения п/п пластины на кристаллы становится затруднительным при толщинах пластин меньше 200–100 мкм, ввиду ограничений на скорость резания, вызванных вибрациями пластины, и низкого выхода годных при резке чипов. Высокое качество луча волоконного лазера приводит к существенно меньшей потере материала, что позволяет этой лазерной технологии стать альтернативной для таких применений. Дополнительные процессы (такие как структурирование пластин и удаление тонких изолирующих слоев) также могут быть успешно осуществлены с помощью импульсных волоконных лазеров.

В рамках высокоавтоматизированной электронной промышленности компоненты оперативно устанавливаются на печатные платы, фиксируются с помощью паяльной пасты и с помощью процесса оплавления припаиваются окончательно. При фиксации (печатании) с помощью паяльной пасты

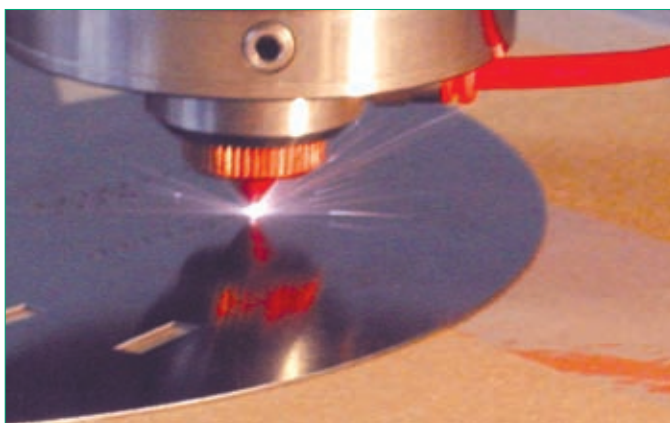


Рис.8 Резка нержавеющей стали с помощью 100-Вт волоконного лазера

используется техника трафаретной печати. Форму, необходимую для такой трафаретной печати, можно исключительно хорошо приготовить с помощью волоконного лазера.

Микрорезка

Как и для лазерной сварки, качество лазерной резки (рис.8) существенно зависит от нескольких параметров: глубины фокусировки, постоянства выходной мощности, скорости резки и параметров материала (причем, все они являются решающими факторами). Большая глубина фокусировки используется для симметричных и плоских стенок среза, тогда как постоянство выходной мощности лазера гарантирует сохранение этих физических особенностей среза на всей его длине. Еще раз подчеркнем, что стабильные характеристики среза особенно важны для тонкостенных материалов. При их несоблюдении наблюдаются разрушения на нижней кромке среза.

И снова для создания оптимальных характеристик резания используется сложная модуляция интенсивности лазерного пучка как на прямых и кривых линиях, так и на углах и в точках пересечения. В общем случае применение волоконного лазера приводит как к увеличению выхода годных, так и к улучшению качества готовых компонентов.

В медицинской промышленности волоконные лазеры используются для фигурной вырезки стентов (stent) из тонкостенных трубок (рис.9) диаметром 0,8–12 мм и толщи-

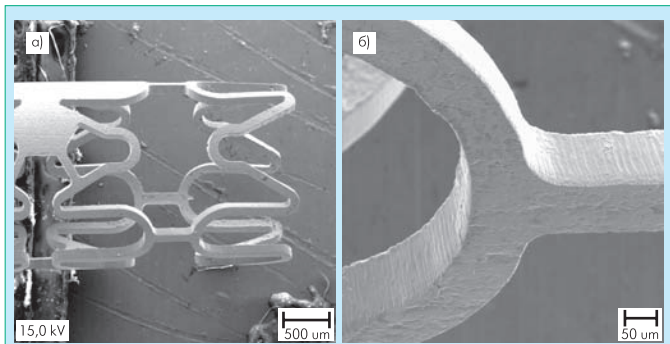


Рис.9 Детали вырезки (в трубке из нержавеющей стали диаметром 2 мм) медицинского стента для реконструкции просвета органа (а, б), сделанной с помощью 100-Вт волоконного лазера

ной стенок 0,2 мм. Эти стенты, как правило, производят из нержавеющей стали типа 304, а также из СbСr, нитинола (Nitinol) и других экзотичных сплавов. Такие стенты хирургически устанавливаются внутри суженных вен и артерий для улучшения кровотока. Минимальные по диаметру стенты используются в кровеносных сосудах мозга, а максимальные – в сосудах бедра.

Комбинация предпочтительных источников накачки, практических схем ввода энергии накачки и соединения волокна с резонатором позволяет производителю создавать мощные и в то же время компактные и робастные лазерные системы, хорошо приспособленные для использования в промышленности.

Волоконные лазеры средней мощностью до 400 Вт доказали, что они могут служить заменой для DPSS- и CO₂-лазерных систем. Ключевым моментом с экономической точки зрения является то, что они дают общий коэффициент увеличения эффективности порядка 2 по отношению к DPSS-лазерам. Дополнительными важными преимуществами являются уменьшение расходов на обслуживание, исключение проблем, связанных с использованием ламп-вспышек для накачки, и их компактное исполнение, использующее волоконный выход. Примечательно, что небольшая выходная оптика, устанавливаемая на конце волокна, позволяет конструировать значительно меньшие по размерам (по сравнению с обычными системами без волоконного выхода луча) быстродействующие системы лазерной обработки материалов.

Волоконные лазерные системы зачастую совместимы с усовершенствованными и дорогими машинами лазерной резки с ЧПУ, что дает возможность легко заменять старомодные Nd:YAG-лазеры с ламповой накачкой, существенно облегчая тем самым переход конечных пользователей на новый уровень лазерной технологии.

Ожидается, что рынок волоконных лазеров продолжит свой рост, например в полиграфической промышленности (изготовление гравюр), в различных областях медицинской промышленности, а также в области быстрого создания опытных образцов [3].

Перевод статьи S.Woods, M.Duka, G.Flinn. Medium power fibre lasers. – Photonik International, 2006, p.46. Выполнен редакцией журнала "Фотоника" и публикуется с разрешения редакции Photonik (Germany).

ЛИТЕРАТУРА

1. Laser Marketplace 2005. – Laser Focus World, Jan. 2005, p.83.
2. Zervas M.N. et al. Single and few-moded high power fiber lasers for industrial applications. – Conf. on Advanced Laser Appl. Technology, Nov. 2004.
3. O'Neill W. et al. High Power High Brightness Industrial Fiber Laser Technology. – Proc. ICALEO 2004.