

МОЩНЫЕ ДИОДНЫЕ ЛАЗЕРЫ – НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЙ

Новое поколение мощных диодных лазеров (ДЛ) открывает новые области их применения в обработке материалов. Промышленность требует гибких и компактных лазеров с оптимальной для конкретного применения геометрией пучка и распределением интенсивности излучения. Микрооптическое формирование пучка позволило создать компактные сверхъяркие ДЛ с высоким КПД, простым обслуживанием и широким диапазоном применения.

Мощные компактные ДЛ, используемые при лазерной обработке материалов, имеют высокую надежность. Так, непрерывные ДЛ мощностью до 1 кВт с вводом излучения в волокно с диаметром сердцевины 200–600 мкм, широко используются при сварке пластмасс, нержавеющей стали или при пайке в полупроводниковой, электронной и автомобильной промышленности (рис.1 и 2).

Однако этим их возможности далеко не исчерпаны. Заказчиков привлекают также возможности микросварки корпусов, функциональных элементов или электрических соединений при производстве печатных плат; резки тонкой жести; микросварки пластмассовых деталей; пайки и отжига в производстве полупроводников и дисплеев. Экономичные решения и внедрение ДЛ в промышленные установки требуют простых интерфейсов и индивидуального формирования пучка. Масштабируемые по мощности сверхъяркие ДЛ с вводом излучения в волокно, а также мощные лазеры со свободным излучением открывают новые перспективы применения лазерных технологий.

Индивидуальное формирование пучка позволяет экономично обрабатывать материалы. Так, при использовании линейных лазеров одиночный лазерный импульс произво-

дит сварной шов по всему периметру сварки. Это значит, что процесс протекает за очень короткое время и требует относительно небольших капитальных затрат, а для установки ДЛ необходимо к тому же и меньшая, чем обычно, площадь.

Для пользователя решающие параметры – скорость и безопасность. Один интегрированный лазерный инструмент не только создает излучение, но и индивидуально формирует лазерный пучок в месте его применения. Консультации по применению и сервисное обслуживание облегчают быструю интеграцию таких инструментов, что важно, когда оператив-



Рис.1 Использование лазерной системы (200 Вт) для сварки пластмасс при производстве систем подачи топлива в компании Siemens VDO в Дортмунде (оптический модуль с формированием пучка в руке 6-координатного манипулятора)

¹ Диплом. инженер Петер Брунс. Руководитель отдела применений и сервисного обслуживания, CIMO GmbH; p.brunns@limo.de

² Д-р Франк Кубаки. Менеджер лазерного производства, CIMO GmbH; f.kubacki@limo.de



Рис.2 Автономная комплексная система ДЛ с номинальной мощностью до 700 Вт с выходом в волокно 400 мкм

ность вывода нового изделия на рынок является решающим фактором успеха предприятия.

Для индивидуального формирования пучка используется микрооптика и требуется высококачественное гомогенное (равномерное по интенсивности) распределение лазерного излучения по обрабатываемой поверхности. Реализация такого распределения осуществляется с помощью гомогенизирующих модулей, производимых в виде микрооптических решеток. Это позволяет снизить уровень негомогенности до величины менее одного процента при мощности излучения в несколько киловатт.

Больших перспектив применения ДЛ со свободным излучением в качестве генераторов линии можно ожидать при обработке поверхностей, например при отжиге, сварке, пайке или сушке. Так, технология линейных модулей ЛМО позволяет производить модули линейных лазеров мощностью в несколько киловатт (как с вводом излучения в волокно, так и свободного излучения). Формат кадра линейных лазеров

может изменяться вплоть до 1:3000, а длина линии может меняться от 10 до 15000 мм (при высоте линии от 30 мкм до нескольких миллиметров).

На базе новых сверхъярких ДЛ удалось впервые создать системы ДЛ с таким, как у обычных лазерных (CO₂- или Nd:YAG-лазеры) систем, качеством пучка при сохранении таких преимуществ, как малые размеры, прочность и гибкость ДЛ. Так, ДЛ свободного излучения мощностью 50 Вт позволяет получить качество пучка 5 мм-мрад. Улучшенная фокусировка таких систем открывает новые возможности для их применения в процессах скрепления, резки и маркировки.

Даже использование микрооптики с ограниченным показателем преломления позволяет эффективно формировать пучок, что снижает рабочие токи. Это увеличивает сроки эксплуатации диодов (в соответствии с ISO 17526 (2003)Е они нормируются как ожидаемый срок службы и составляют 20 000 часов). Кроме того, малый рабочий ток – это малая тепловая нагрузка, позволяющая использовать компактные элементы охлаждения (лазерные модули без микроканалов могут охлаждаться элементами Пельтье или технической, а не дистиллированной, водой).

НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ МОЩНЫХ ДЛ ВЫСОКОЙ ЯРКОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

ДЛ достигают качества излучения, характерного для обычных лазерных источников. Так, качество пучка мощных новейших ДЛ достигает 5 мм-мрад, что лежит в области традиционных лазерных источников излучения, таких как CO₂- или Nd:YAG-лазеров (рис.3). Как упомянуто выше, в волокно диаметром сердцевины 50 мкм можно ввести до 50 Вт. Достигаемая плотность мощности открывает новые возможности применений, недоступные ранее для ДЛ.

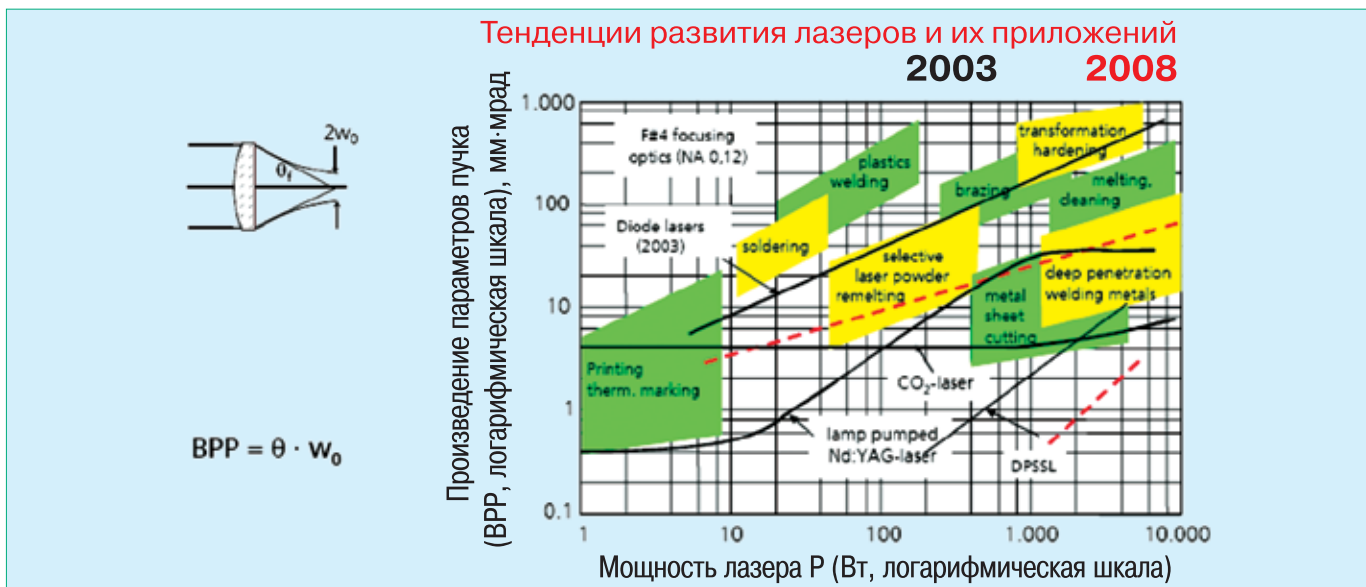


Рис.3 Позиции нового поколения мощных ДЛ ЛМО (представлено на выставке AKL-2008 в Ахене)

Новые и ожидаемые модули ДЛ нового поколения

Мощность, Вт	Длина волны, нм	Сердцевина, мкм	Апертура	Яркость, кВт/см ² ·мрад ²	КПД, %
40	9xx	100	0,12	$1,11 \cdot 10^5$	39
100	808–980	100	0,22	$0,83 \cdot 10^5$	36
400	980	200	0,22	$0,83 \cdot 10^5$	40
1000	808–980	200	0,22	$2,10 \cdot 10^5$	25
Перспектива на 2009 год					
150	808–980	100	0,12	$5,00 \cdot 10^5$	39
150	9xx	100	0,22	$1,24 \cdot 10^5$	39
2000	808–980	200	0,22	$4,13 \cdot 10^5$	25

Лазерные модули могут при этом иметь компактную конструкцию, а линейки ДЛ нового поколения высокой яркости могут комбинироваться с эффективным формированием пучка с помощью микрооптики (яркость здесь означает высокую мощность при малых размерах и расходимости пучка). Дополнительно можно повышать эффективность пассивного охлаждения, применяя новые материалы и улучшая конструкцию, что позволяет увеличить (до удвоения) выходную мощность при более высокой температуре и меньшей мощности охлаждения. Так, лазерный модуль LIMO200F400 выходной мощности 200 Вт с волокном 400 мкм при компактной конструкции, одинаковых размерах водяного охлаждения и той же мощности лазерного драйвера может выдавать мощность до уровня 350 Вт.

КПД модулей ДЛ (то есть отношение подводимой электрической мощности к оптической мощности, выходящей из волокна) впервые превысил 50%. Эта величина достигается оптимизированным формированием пучка с помощью микрооптики, адаптированной к параметрам излучения новых диодных линеек. Эффективность ввода излучения в волокно находится в пределах 85–92% (для волокон без просветляющего покрытия). Возможные сегодня мощности ДЛ и качество их излучения представлены в таблице.

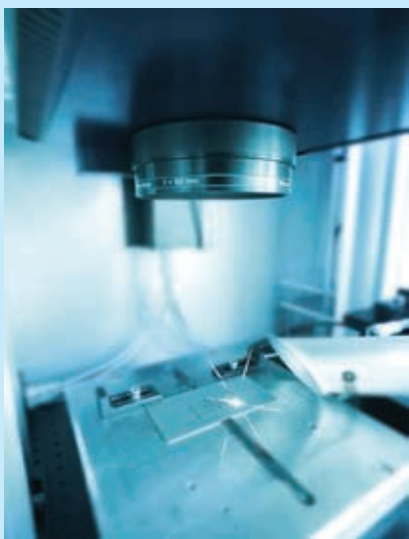


Рис.4 Лазерная маркировка нержавеющей стали путем изменения цвета с помощью стандартной сканерной системы

Лазерная маркировка

Повышение плотности мощности излучения открывает перед ДЛ те области применения, где раньше работали только такие источники, как CO₂- или Nd:YAG-лазеры. Лазерная маркировка (рис.4) показывает, что такие преимущества, как компактность, энергетическая эффективность, простота внедрения, хорошее сервисное обслуживание и малые капитальные затраты могут сочетаться с высокими скоростями и возможностью применения ДЛ как для известных, так и новых технологических процессов.

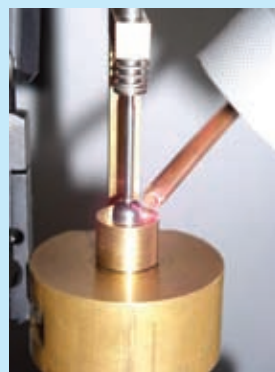


Рис.5 Теплопроводящая сварка топливных клапанов (1-й эксперимент в лаборатории: сварка штанги с шариком и диска с шариком). Параметры: мощность лазера (постоянная) 185 Вт, размер пятна 400 мкм, время сварки (оба соединения одновременно) 3,7 с

Сварка и резка в микронном диапазоне

Еще одна новая область применения ДЛ – это теплопроводящая сварка и сварка плавлением деталей очень малого размера. Раньше для этого применялись в основном импульсные лазеры, позволяющие точно управлять вводом энергии в материал (особенно для сильно отражающих материалов) благодаря хорошей пульсации с высокой частотой и малой скважностью импульсов или за счет модуляции добротности. Поэтому Nd:YAG-лазеры имеют преимущество при вводе энергии в материал.

Для большинства применений (рис.5 и 6) превышения высоты импульса не требуется, оно даже неблагоприятно. При формировании полного контура сварки в виде плотного набора сварных точек с перекрытием соседних импульсов остается обычно чешуйчатый наплавленный валик и образуются сварочные брызги и поры.

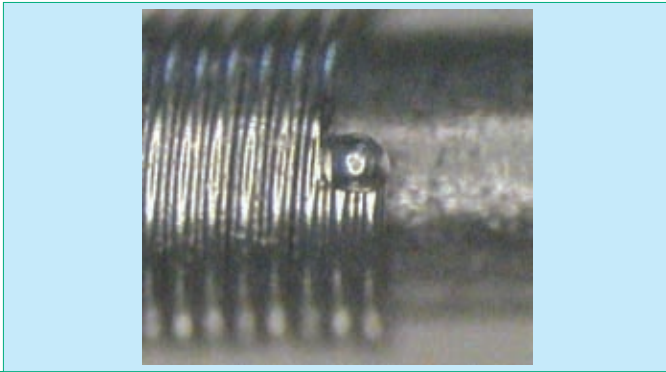


Рис.6 Соединение точечной сваркой двух тонких стальных пружинок. Параметры: мощность лазера (постоянная) 20 Вт, размер пятна 50 мкм, число лазерных импульсов 3, длительность импульса 4 мс

ДЛ здесь имеют явные преимущества. Меньший размер пятна дает бóльшую интенсивность, обеспечивая высокую скорость сварки в непрерывном режиме. Хорошая абсорбция материалов в диапазоне ИК-длин волн ДЛ (808–980 нм) усиливает этот эффект. Сварные швы имеют очень тонкую чешуйчатую структуру, а качество их поверхности мало отличается от поверхности свариваемого материала. Использование подходящего технологического газа и способа его подачи обеспечивает очень хорошее покрытие в месте сварки и позволяет избежать цветов побежалости, возникающих на материале при его нагреве.

На рис.5 показано производство оптически качественных сварных соединений, в которых достигаемая прочность шва на разрыв соответствует прочности свариваемого материала (что подтверждается испытаниями). Этот метод сварки (после серии тестов в лаборатории ЦМО) был интегрирован в производство заказчика. Сварка здесь может быть двухточечной (сварка штанги с шариком и диска с шариком) на периметре в один оборот с перекрытием (расчетное время обработки удается сократить).

На рис.6 показан образец тонкой точечной сварки лежащих один над другим концов пружинок из нержавеющей стали (при импульсном режиме работы лазера они соединяются за очень короткое время). Мощность лазера можно точно настраивать путем управления диодным током. Контролируемая передача энергии в сочетании с постоянством мощнос-

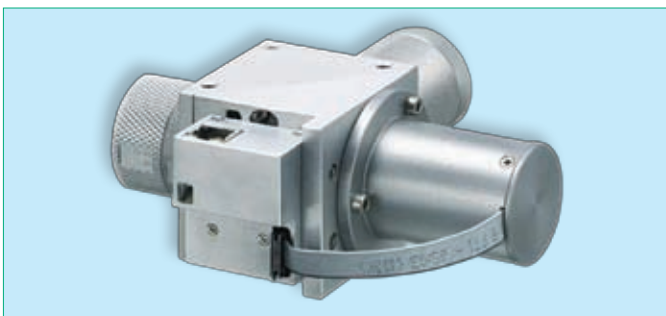


Рис.7 Лазерная головка с измерением мощности и температуры (пирометром). Снабжена следящей видеокамерой и цифровым интерфейсом для лазерного драйвера, регулирующего температуру или мощность

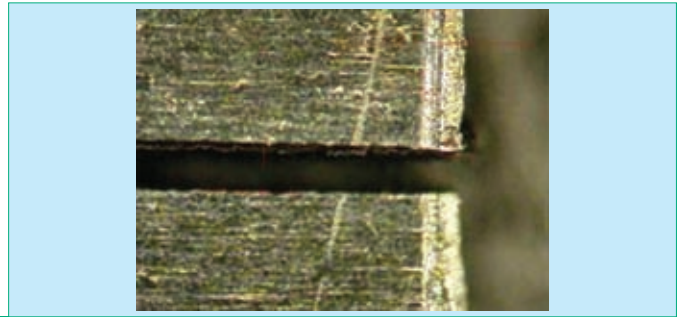


Рис.8 Прорез лазерным плавлением в пластине из ковара толщиной 0,2 мм. Параметры: мощность лазера 50 Вт, размер пятна 100 мкм, скорость резки 1 м/мин, давление технологического газа (азот) 10 бар, ширина краев прореза ≈100 мкм

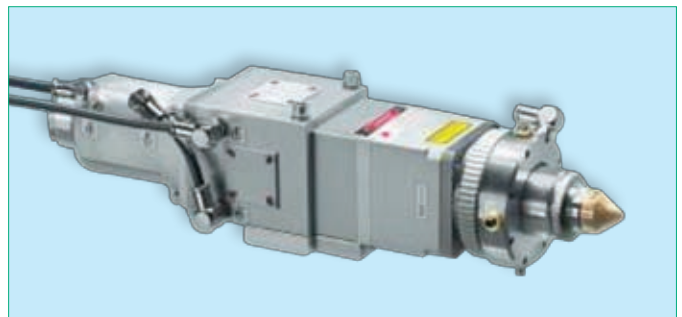


Рис.9 Режущая лазерная головка для ДЛ с волоконным выходом

ти лазера в месте обработки обеспечивают высокое качество и прочность сварного шва на протяжении всего срока службы лазерного инструмента. Лазерные системы или рабочие головки можно оснащать различными устройствами, повышающими надежность технологического процесса.

Так, детектором, интегрированным в установку, можно измерить мощность, сравнить ее с заданной величиной и при отклонении автоматически откалибровать лазерный драйвер, чтобы гарантировать стабильность мощности лазера. Если требуется еще бóльшая точность, то необходим онлайн-контроль процесса путем регулировки мощности и температуры, который интегрируется в лазерную головку (рис.7). При этом мощность подстраивается с запаздыванием в 1 мс (скорость опроса датчиков температуры и мощности 1 кГц). Так достигается стабильность при быстротекущих процессах. Лазерные головки могут комбинироваться с видеокамерой, используемой для точного позиционирования лазерного фокуса или для передачи изображения обрабатываемых деталей.

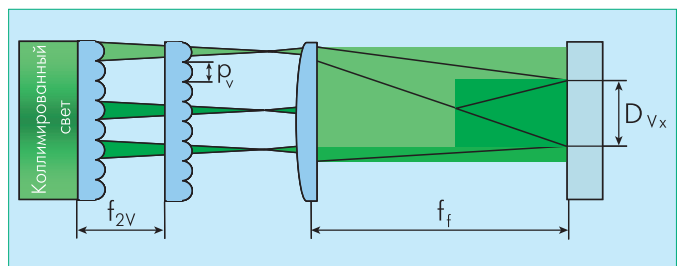


Рис.10 Принцип перемешивания света для многомодовых лазеров



Рис.11 Модуль формирования пучка и результат его действия

Экономичная лазерная резка плавлением требует высокой интенсивности и хорошей фокусировки излучения, что ограничивало такое применение для ДЛ. Однако с появлением новых лазерных источников это стало возможным и для тонких металлических листов и фольги. Из рис.8 видно, что можно получать очень хорошие края прореза с малой зоной теплового влияния при высоких скоростях резки. Во многих случаях требуется произвести малые прямолинейные разрезы для разделения деталей. Это – идеальный случай для применения малогабаритных и легко интегрируемых ДЛ-систем. Режущая головка для ДЛ показана на рис.9.

Гомогенное распределение поля с помощью решеток цилиндрических микролинз

Рис.10 иллюстрирует принцип формирования лазерного пучка для гомогенного распределения поля с помощью микрооптических решеток. Для создания поля облучения с хорошей гомогенностью нужно иметь коллимированный лазерный пучок, прецизионную решетку цилиндрических линз и полевую линзу. Используя фокусное расстояние полевой линзы, а также фокусное расстояние и период гомогенизатора, можно сформировать практически любой размер пучка с заданным рабочим расстоянием. Благодаря уникальной технологии изготовления микрооптики компания LIMO производит на любых подложках очень точные цилиндрические поверхности линз до глубины 3 мм, что позволяет использовать мощность лазера почти без потерь. Промежутки между линзами в решетке настолько точны, что гарантируют нормальное прохождение лазерного излучения и его участие в окончательном распределении световой энергии.

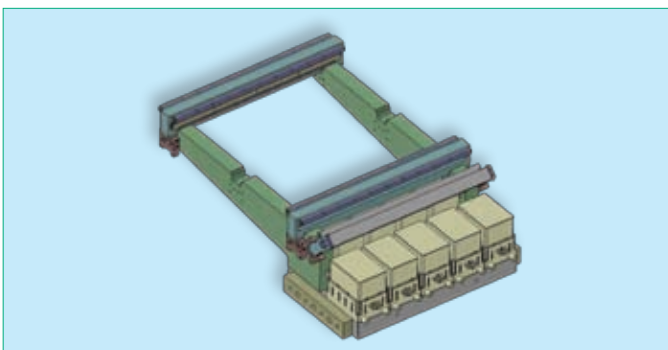


Рис.12 Компоновка линейного модуля с длиной линии 600 мм, включающего 9 отдельных модулей. При отказе одного модуля гомогенность линии сохраняется

Этот принцип может применяться в ДЛ свободного излучения или в компактных модулях формирования пучка для систем с волоконным выходом или коллимированных систем UV-IR. Ниже приводятся примеры системы ДЛ свободного излучения и (рис.11) модуля формирования пучка с результатом обжига зачерненной поликарбонатной пластины. Возможна быстрая синхронная сварка/пайка благодаря гомогенным профилям пучка и мощности лазеров до киловаттного уровня.

Таким примером служит система ДЛ свободного излучения и постоянной мощностью 2,1 кВт с гомогенным профилем пучка, используемая в синхронной сварке при производстве плоских экранов. Компоновка модуля показана на

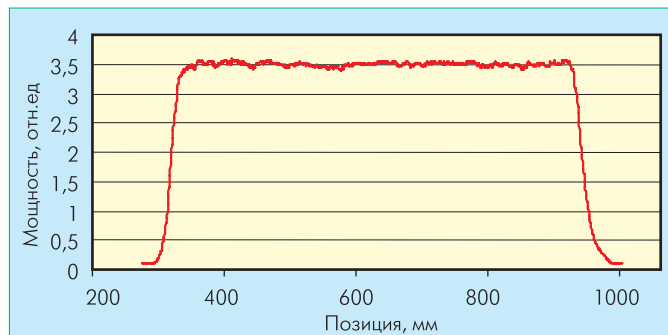


Рис.13 Профиль интенсивности по линии длиной 600 мм, производимой ДЛ. Колебания интенсивности в пределах 1%



Рис.14 Автономная производственная лазерная система с раздельно управляемым лазером на 200 Вт и ДЛ на 32 Вт с волокном 400 мкм

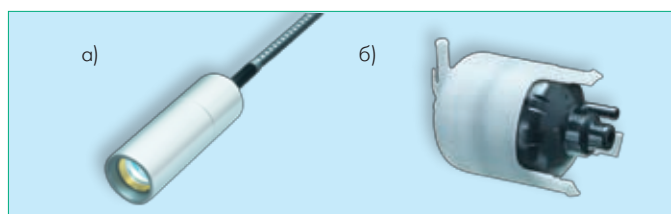


Рис.15 а) Компактный формирователь пучка для получения гомогенного профиля 15×15 мм
б) Герметично сваренный пластмассовый корпус

рис.12. Готовая система состоит из 9 отдельных модулей, причем каждый из модулей через элементы формирования пучка высвечивает гомогенную линию длиной 600 мм. При отказе одного модуля размер и гомогенность распределения освещенности в линии сохраняются. Интегрированные микрооп-



Рис.16 Круговая система ДЛ свободного излучения для обработки заготовок диаметром ≤ 100 мм. Ширина пучка 2 мм ($1/e^2$)

тические компоненты производят равномерное распределение интенсивности с колебаниями по всей длине линии в пределах 1% (рис.13). Профиль интенсивности по длине линии соответствует форме топ-хэт, поэтому для процесса сварки используется вся имеющаяся мощность. Вертикально по линии лазер имеет гауссовский профиль. При этом, благодаря синхронности процесса и концентрированному прямому вводу энергии лазерного излучения, в отличие от традиционного метода топ-плэйт, время процесса очень короткое, а качество сварных соединений высокое (оно не зависит от неомогенности материала или различных термических переходов).

Еще один пример – синхронная сварка сквозным просвечиванием термопластов или плоскостная пайка полупроводниковых контактов (штампованная пайка). Ее можно осуществить двойной системой ДЛ с волоконным выходом (рис.14), включающей модуль формирования пучка. С помощью интегрированного в ней лазера мощностью 32 Вт и простой оптики пятна, точки пайки производятся с помощью "метода выстреливания шариков" (Ball Bumping), при котором шарик припоя подается в отверстие газового сопла, где он расплавляется лазерным излучением и стружкой газа наносится на обрабатываемую поверхность. Система мощностью 200 Вт с формированием пучка через "компактный формирователь" (рис.15а) в процессе синхронной пайки облучает плоские места пайки.

Описанные выше преимущества синхронной обработки материалов касаются также сварки сквозным просвечиванием термопластов. При этом можно быстро осуществить разные конфигурации сварного шва (даже проходящие по внешним контурам заготовки). Была также разработана система сварки, открытая внутри, для герметичной сварки заготовок из пластика. Формирование пучка микрооптикой позволяет сваривать заготовки диаметром до 100 мм (рис. 15б, 16).

Если требуется создать очень узкую лазерную линию шириной 50 мкм, то используется особая система (в связи с проблемой в обеспечении точности юстировки микрооптики). Эта система служит для сварки корпусов микровыключателей и включает линейные лазеры свободного излучения с гомогенизацией. Они основаны на стандартных модулях и адаптированы к размерам обрабатываемых заготовок благодаря выбору подходящих параметров микрооптики.

Обработка материалов методом абляции

Для высокоточных методов абляции (*абляция – унос массы материала с поверхности потоком газов или лазерным лучом. – Прим. ред.*) в производстве дисплеев используются импульсные лазерные системы, излучение которых должно освещать маски с изменяемой геометрией (маска задает геометрическую форму абляции). С помощью маски, отображаемой прецизионной сканирующей системой, можно обрабатывать только определенную рабочую зону заготовки.

Лазерный пучок регулируется аттенуатором и с помощью телескопа расширяется до диаметра, идеального для гомогенизации (рис.17).

Путем обработки высокостойких слоев ИТО (индий-окись олова) интенсивными гомогенными лазерными импульсами достигаются высокие скорости абляции и высокая скорость обработки, которая выше, чем у других известных способов обработки материалов.

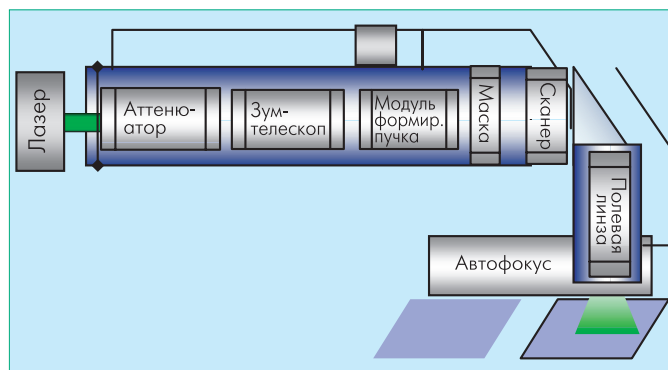


Рис.17 Лазерная система с оптическим комплексом для гомогенного освещения масок и отображения сканирующей системой. Применение: импульсная абляция очень точных структур в покрытии ИТО

Скорость абляции составляет 10000 "выстрелов" в секунду. Геометрия масок, благодаря использованию специальной технологии ЛМО, отличается высокой точностью и возможностью гибкого внесения изменений.

В статье дан обзор возможностей и применений, которые позволяют реализовать системы ДЛ с очень высоким качеством излучения, оптимизированным путем формирования пучка для каждого применения.

Преимущества и результаты использования ДЛ и гомогенных световых полей показаны на ряде практических примеров. Технические основы систем были также проиллюстрированы на примерах, чтобы пользователь смог оценить этот инструмент и у него возникло желание самому заняться поиском новых возможностей и применений.

Цель статьи – подтвердить надежность и экономичность ДЛ и основанных на них оптических систем; указать на большой потенциал возможностей повышения производительности как традиционных, так и новых процессов в области макро- и микрообработки материалов, в автомобилестроении, электронике и производстве полупроводников.