



ЛАЗЕРНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ОБРАБОТКИ НЕМЕТАЛЛОВ

А.В. Конюшин, НПФ "Прибор-Т", Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., avkon@yandex.ru;

К.В. Бережной, к.ф.-м.н., С.Ю. Пентегов, к.ф.-м.н., ООО Лазертрэк, www.lasertrack.ru

Лазер – идеальный инструмент для прецизионной микрообработки хрупких неметаллов в микроэлектронике: для реза и сверления корпусов из низкотемпературной керамики (Low Temperature Cofired Ceramics – LTCC) и высокотемпературных отожженных керамических модулей (High Temperature Cofired Ceramics – HTCC). В статье рассмотрен малогабаритный CO₂-лазерный модуль для изготовления в керамических материалах отверстий и полостей и представлен опыт его использования.

Парк лазерного технологического оборудования с каждым годом становится более насыщенным и разнообразным. Совсем недавно появившиеся волоконные лазеры прочно заняли лидирующее положение на рынке по обработке металлов. Результаты, сопровождающие фундаментальные исследования, внедряются в производственные технологии. Во многих индустриально развитых странах ежегодно возрастает использование пико- и фемтосекундных лазеров в производстве электроники и микрообработке материалов. Развиваются ставшие уже классическими промышленными инструментами газовые и твердотельные лазеры. В годы раннего развития индустриальной фотоники, когда CO₂-лазеры хотя и представляли собой объемную конструкцию, все же обладали недостижимой для других типов лазеров мощностью, твердотельные лазеры, создаваемые на базе активных элементов на стекле или YAG-кристалле, не превышали по своей мощности сотен ватт.

Традиционно широко в электронной промышленности применялись YAG-лазеры – в тех операциях, где не требовалась высокая мощность, а большее значение придавалось качеству и точности исполнения, – в резке и прошивке керамических подложек, тонколистовых металлов, сварке корпусов, обработке тонких пленок. CO₂-лазеры применяли в основном для обработки неметаллов – различных пластиков, оргстекла, дерева, керамических изделий в электронике – стержней, подложек для микросхем, теплоизоляторов и тому подобных деталей (рис.1). Эти лазерные технологии, развиваясь параллельно, делили и технологический лазерный рынок практически пополам.

Про CO₂-системы, используемые для промышленной резки листовых материалов толщиной от 1 мм и выше (то есть мощностью выше 1 кВт), здесь говорить не будем. Этот сегмент рынка известен,

описан и по большому счету сейчас практически уступил по всем статьям волоконным лазерам, особенно в потребляемой мощности, удобстве транспортировки излучения, габаритам, техническом обслуживании. Однако современные маломощные CO₂-лазеры до 500 Вт, не требующие прокачки активного газа, практически не уступают по габаритам и потребляемой мощности волоконным. Они находят широкое применение там, где волоконные лазеры не могут быть использованы или имеют ограничение из-за разницы в длине волны, в особенности в обработке неметаллов. Наличие разных подходов и, соответственно, применение различных типов лазеров для одних и тех же операций, например лазерной прошивки отверстий в керамике типа поликор, ситалл, нитрид алюминия, ставит вопрос о поиске оптимального технического решения [1].

Изготовление высокочастотных плат на основе вышеперечисленных керамик началось задолго до внедрения лазеров для их обработки. Отверстия сверлились либо алмазным инструментом, либо с помощью ультразвука. Получение отверстий малого диаметра, порядка до 300 мкм в толщине 0,5-1 мм, было практически неразрешимой задачей. Прорывом в использовании лазеров для обработки хрупких неметаллов явилась лазерная прошивка отверстий в часовых камнях с использованием лазера на стекле, легированном неодимом. Оптические характеристики лазера обеспечивали отличные параметры форм-фактора получаемых отверстий, но ограничивались температурной нестойкостью активного элемента, что обуславливало получение частоты следования импульсов не более 1-2 Гц.

Потом появились первые установки на CO₂ для обработки керамики. Они требовали высокотехнологического обслуживания, но позволяли качественно получать отверстия сложной формы благодаря тому, что длина волны CO₂-лазера 10,6 мкм

лежит в области лучшего поглощения излучения керамикой. Активный элемент на рубине, некоторое время использовавшийся для прошивки и резки керамических подложек, не нашел широкого применения из-за высоких требований к охлаждению лазера и из-за невозможности получить пятно правильной технологической формы. YAG-лазеры, используемые для этой операции, были намного технологичнее, меньше по габаритам, легче в обслуживании, но для длины волны YAG-лазера 1,064 мкм керамика была полупрозрачной и начало испарения материала основывалось на поглощении излучения на поверхностных дефектах. Энергии требовалось больше, зона плавления вокруг прошиваемого отверстия была значительной, возникали наплывы и выплески, что требовало дополнительной доработки после прошивки.

Технологические приемы также отличались друг от друга. Для CO₂-лазеров резка и прошивка отверстий была первой операцией. Обработка велась по чистой подложке, с последующим нанесением топологии. Прошивка же на YAG-лазерах производилась в большинстве своем на подложках уже с нанесенными топологическими элементами. Иногда это было вызвано простой причиной – технология отработывалась на том оборудовании, что уже было, и его обслуживание не вызывало проблем, иногда это объяснялось тем, что лазерные операции внедрялись уже после разработки топологической схемы и плат и изменение маршрута изготовления которых было затруднительным или невозможным.

Этот исторический экскурс позволяет понять, что внедрение лазеров шло непростым путем, и на разных этапах превалирование одного типа лазеров над другим не было полным замещением, а оставляло каждому свою зону применения. В результате этого разработка и усовершенствование технологических лазеров малой мощности не останавливаются и по сей день. К сожалению, российская промышленность в период с начала 90-х годов прошлого века больше выживала, чем развивалась, что вызвало практически разрушение массового производства лазерных установок, стагнацию в разработке оптических элементов, а вместе и кадровую проблему. Примеров этому много. Одни заводы закрылись, другие перепрофилировались, ведущие специалисты, не найдя поддержки, открывали предприятия за рубежом. Таким образом, было практически свернуто производство технологических лазеров.

Сейчас рынок современного лазерного технологического оборудования представлен традиционно сильными американскими (рис.2), немецкими, швейцарскими фирмами. И, конечно, так быстро

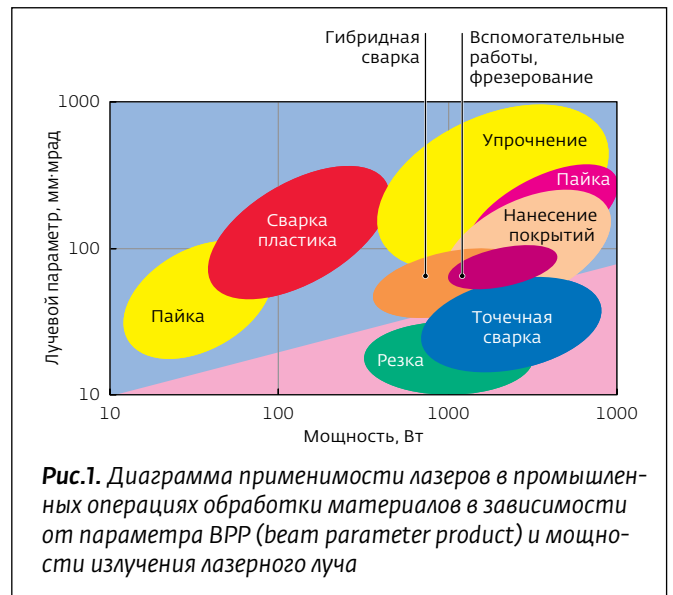


Рис.1. Диаграмма применимости лазеров в промышленных операциях обработки материалов в зависимости от параметра BPP (beam parameter product) и мощности излучения лазерного луча

заявившими о себе китайскими производителями, во многом отнявшими у российских производителей пальму первенства в производстве оптических элементов, систем позиционирования и лазерного оборудования в целом. Практически все российские производители лазерной техники в этих условиях вынуждены использовать импортные излучатели и отдельные комплектующие, что, однако, с учетом традиционно сильного технологического и научного уровня специалистов-лазерщиков, не мешает успешно создавать самые сложные технологические процессы для разработки и внедрения лазерных технологий самого высокого уровня. В зависимости от задач, используются различные лазерные источники: твердотельные, волоконные лазеры или CO₂-лазеры.

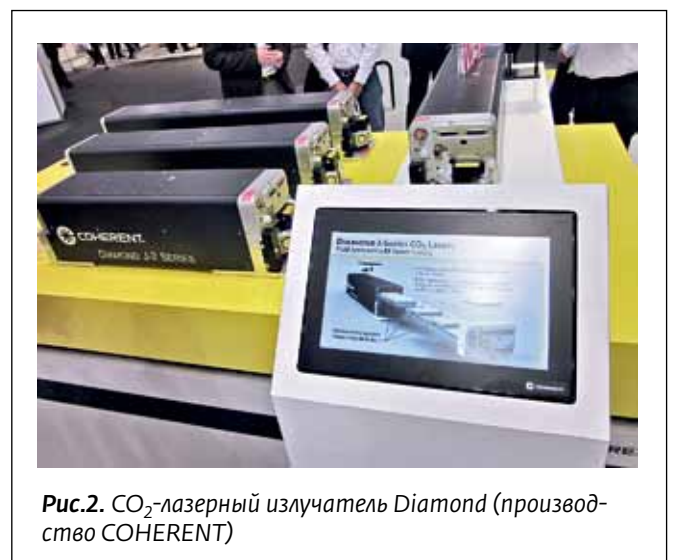


Рис.2. CO₂-лазерный излучатель Diamond (производство COHERENT)



Рис.3. Современные CO₂-лазерные излучатели Diamond J-серии фирмы COHERENT

Современные лазерные излучатели на CO₂ (в частности излучатели серии Diamond фирмы COHERENT) представляют собой полностью отпаянную компактную герметичную конструкцию с встроенным внутренним источником питания (рис.3). Конструкции лазеров отличаются только габаритами в соответствии с мощностью лазера и выбором системы охлаждения: воздушной или жидкостной. Независимо от мощности все лазеры одной серии имеют общие принципы оптической, электрической конфигурации, одинаковое программное обеспечение и интерфейс управления. Все это позволяет при разработке оборудования заменой только излуча-

теля получить линейку оборудования для реализации самого широкого спектра поставленных задач. Единый программный интерфейс для всех моделей не требует дополнительных разработок в электронном управлении системой. Все это позволяет разработчику экономить время и минимизировать затраты. Современное производство электронных компонентов отличается широким ассортиментом и разнообразием материалов, что требует от разработчиков оборудования умения быстро переориентироваться на новую задачу и предложить готовый продукт в кратчайшие сроки и с оптимальной ценой. Особое внимание уделяется качеству луча.

Лазеры имеют частоту следования импульсов от 0 до 25 кГц (лазеры Diamond C-серии) и до 100 кГц (E-, K- и G-серии), отличную модовую характеристику ($M^2 < 1,2$) и высокое качество пучка (рис.4). Излучение лазеров обеспечивает обработку хрупких материалов. Материал удаляется без термического повреждения поверхности и обеспечивает хорошее качество реза. Лазер позволяет с прецизионной точностью обрабатывать различные неметаллические материалы: картон, ткани, кожу, акриловые пластики, стекло.

Однако наибольший интерес представляет применение лазеров Diamond C-серии в микроэлектронике для прецизионной резки, прошивки, гравировки пластин из керамики. Например, для такой керамики, как высокотемпературная типа поликора (High Temperature Co-fired Ceramic – HTCC-технология с температурой обжига до 2500°C), или низкотемпературная, созданная по технологии LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic с температурой обжига не выше 1000°C) [2]. Керамика LTCC используется для высокочастотных схем гигагерцевого диапазона из-за своих хороших характеристик: диэлектрическая проницаемость от 6 до 9, механическая стабильность, хорошая теплопроводность (2-4 Вт/мК) и низкий коэффициент теплового расширения (КТР), близкий к КТР таких полупроводников как Si, GaAs, InP. Все это позволяет монтировать кристаллы прямо на плате. Технология LTCC легко реализует пластины керамики толщиной до 100 мкм, а их герметичность и возможность использования высокотемпературной пайки обеспечивает возможность применения керамики для 3D-интеграции в многослойные объемные конструкции.

Ранее многослойные платы изготавливались на основе алюмооксидной керамики. Обработка таких плат имеет много особенностей. Изготовление отверстий различной формы с помощью лазерного излучения сопровождается выносом на поверхность аморфной фазы, обогащенной Al и сосредоточенной

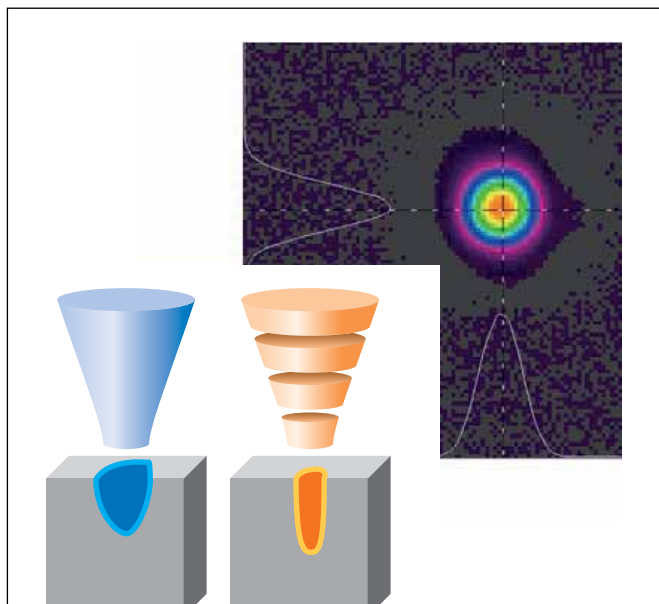


Рис.4. Распределение плотности мощности в сечении лазера серии Diamond (фото COHERENT Inc.)



на периферии отверстия в виде валика с высотой, пропорциональной коэффициенту температуропроводности. Там же наблюдаются микротрещины, выходящие на стенки отверстия. Наличие аморфной фазы уменьшается с увеличением длины волны излучения лазера. При обработке полифазной керамики происходит миграция стеклофазы в область локального нагрева. Это одно из отличий обработки керамики излучением CO_2 -лазера от обработки твердотельным: стеклофаза активно поглощает излучение CO_2 -лазера, и выплески стеклофазы на поверхность минимизируются.

В случае коэффициента поглощения, типичного для диэлектриков ($\alpha \approx 10^4 \text{ см}^{-1}$), скорости звука $V_e = 5,3 \cdot 10^5 \text{ см/с}$, плотности $\rho = 4 \text{ г/см}^3$ импульс с длительностью $t = 10^{-7} \text{ с}$ создает ударную волну при $E/\rho > 0,3 \text{ Дж}$, что и выполняется в реальных условиях. Для режима свободной генерации при $t_1 = 10^{-6} \text{ с}$, $n = 100$ энергия импульса создания ударных волн должна превышать $3 \cdot 10^4 \text{ Дж}$ и импульс свободной генерации с энергией обычного уровня ударных волн не образует, что важно для лазерной обработки тонких пластин керамики [3].

Из параллельно проведенных исследований также следует, что увеличение объема отверстия прямо пропорционально энергии излучения. При-

чем при малых значениях плотности энергии (около 800 Дж/см^2) количество расплавленной массы керамики сравнимо с массой испаренного вещества.

Корундовая керамика типа ВК 100 (ее производство относится к высокотемпературным технологиям НТСС) и керамика, изготовленная по ЛТСС-технологии, различаются тем, что гранулы Al_2O_3 "разбавлены" мелкодисперсными гранулами стекла. Стекланные гранулы могут быть разного состава, что обеспечивает возможность изготовления керамики с различными свойствами. При выпекании керамики при температурах порядка 1000°C происходит расплавление зерен стекла, а зерна Al_2O_3 практически равномерно распределяются по объему пластины, что в свою очередь обеспечивает стабильность свойств ЛТСС.

Применение лазерной резки такой керамики на CO_2 -лазерах позволяет получать качественные отверстия с минимумом выноса аморфной стеклофазы и характеризуется снижением числа микротрещин. Причина в том, что в компактных диэлектриках типа поликора кратерное формообразование обусловлено поверхностным испарением, а также процессами плавления и выдавливания расплава из лунки за счет градиента давления пара. В диэлектриках типа ЛТСС наряду с этими процессами в тон-



Рис.5. Малогабаритный лазерный модуль на базе лазера Diamond C-40 компании COHERENT для обработки различных типов керамических плат и изготовления в керамических материалах отверстий и полостей с высокой точностью (установка представлена с открытым кожухом)

бует дополнительной разработки, что снижает затраты при производстве и стоимость продукта. В установке предусмотрена возможность изменения системы позиционирования: либо с помощью гальванических сканаторов, либо с помощью координатного XYZ-стола, – все зависит от задачи, решаемой заказчиком.

Разработка лазерного модуля (рис.5) была ориентирована на обработку хрупких диэлектриков, в частности подложек для изготовления электронных плат. Это определило оптимальные размеры рабочего поля системы позиционирования не более 150×150 мм. Что дает возможность не менять габариты опорной конструкции и внутреннего пространства кабины. Комплектацию установки дополняет цифровая система наблюдения и беспроводное управление. Эти опции позволяют вести технологический процесс при полностью закрытом внешнем кожухе, что обеспечивает лазерную безопасность оператору. Для обдува зоны обработки и для защиты оптических элементов (линз и зеркал) необходима регулируемая периодическая подача газа. Подача газа регулируется с помощью ПО. Вытяжка может быть установлена при комплектации установки, но также предусмотрено подключение модуля к общей линии вытяжки на территории заказчика. Вне зависимости от мощности все лазеры до 400 Вт подключаются к сетевому напряжению 220 В. Следует отметить, что в случае применения лазера мощностью более 100 Вт с жидкостным охлаждением, рекомендуется использовать автономный чиллер (аппарат для охлаждения жидкости) для поддержания оптимальной температуры охлаждающей жидкости.

Подобный подход позволяет решить многие задачи микроэлектронного производства, обеспечить с минимальными доработками разные требования заказчиков и снизить стоимость оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вакс Е.Д., Миленский М.Н., Сапрыкин Л.Г.** Практика прецизионной лазерной обработки. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2013.
2. **Богданов Ю., Кочемасов В., Хасьянова Е.** Неорганические подложки. Характеристики, критерии выбора. – Печатный монтаж, 2014, №1, с.204–216.
3. **Surmenko E.L., Sokolova T.N.** Drilling in ceramic materials based on polycrystalline corundum. – Proc. of VI International Conference "Beam technologies and laser application", 2009, p. 48.