

# ДИСКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**Д**исковые лазеры коротко- и ультракоротких импульсов сочетают в себе высокую эффективность, превосходящее качество луча, высокую среднюю и пиковую мощность, надежность и умеренную стоимость. Этот тип излучателей был использован для разработки самой успешной промышленной технологии обработки материалов высоко-мощными лазерами.

Высокое качество луча, эффективность дисковых лазеров, привлекательность использования в дистанционной сварке позволяют широко применять их в современном автомобилестроении и промышленности для резки, сверления, глубокой сварки, гибридной сварки и прочих технологических операций. Дисковые лазеры с модуляцией добротности и лазерные системы с синхронизацией мод и высокой средней мощностью обеспечивают оптимальные условия протекания процессов абляции. Поэтому в 2007 году компания TRUMPF приступила к производству ультракороткоимпульсных лазеров серии TruMicro 5000, основанных на дисковой технологии.

Ряд преимуществ коротко- и ультракороткоимпульсных лазеров в промышленных технологиях положен в основу концепции использования дискового лазера. Высокая яркость за счет незначительного воздействия эффекта тепловых линз на центральный тепловой поток повлекла за собой снятие ограничений на яркость диодов накачки. Это позволило снизить стоимость излучателя, при этом заметно повысив эффективность электрооптического преобразования, особенно в режиме высокой средней мощности. При постоянстве внутренней энергии варьирование мощности излучателя обеспечивается за счет использования функции масштабирования площади поперечного сечения луча. Площадь поперечного сечения луча типового дискового лазера существенно больше относительного удлинения активной среды в осевом направлении.

Это устраняет проблемы, связанные с нелинейными искажениями, и позволяет реализовывать высокие значения пиковых мощностей.

## КОНСТРУКЦИЯ ДИСКОВОГО ЛАЗЕРА

Принцип работы дискового лазера основан на использовании охлаждаемого кристалла в форме диска. Высокая эффективность охлаждения лазерной среды обеспечивается за счет большой площади поверхности диска в сравнении с его объемом. Поэтому средняя мощность излучения в пучке достигает высоких значений. На рис.1 показано, как за счет охлаждения в пределах дискового лазера не возникает эффект тепловой линзы и генерируется осевой поток тепла. Этот же рисунок демонстрирует эволюционный процесс перехода от стержневой конструкции к концепции дискового лазера. Из-за того, что стержневой лазер охлаждается через цилиндрическую поверхность кристалла, через нее распространяется двухмерный поток тепла, формирующий параболический профиль температурного искажения. Зависимость показателя преломления от температуры приводит к возникновению эффекта тепловой линзы. Такая линза ухудшает качество выходящего луча и ограничивает его выходную мощность.

Тонкий диск, напротив, охлаждается через покрытие с обратной стороны кристалла с высокими отражающими свойствами, при этом генерируется одномерный поток теп-

ла. Как следствие, температурный градиент распределяется параллельно лазерному лучу и не приводит к появлению эффекта тепловой линзы. На практике тонкий лазерный кристалл в дисковых лазерах с высокой мощностью либо соединен с теплоотводящим элементом, либо охлаждается принудительно. В обоих случаях нежелательное воздействие эффекта тепловых линз устраняется оптимальной компоновкой элементов конструкции дискового лазера. Коэффициент теплопроводности охлаждающего радиатора кристалла непосредственно зависит от площади зоны накачки. При постоянной температуре кристалла достигаемая средняя выходная мощность прямо пропорциональна площади зоны накачки

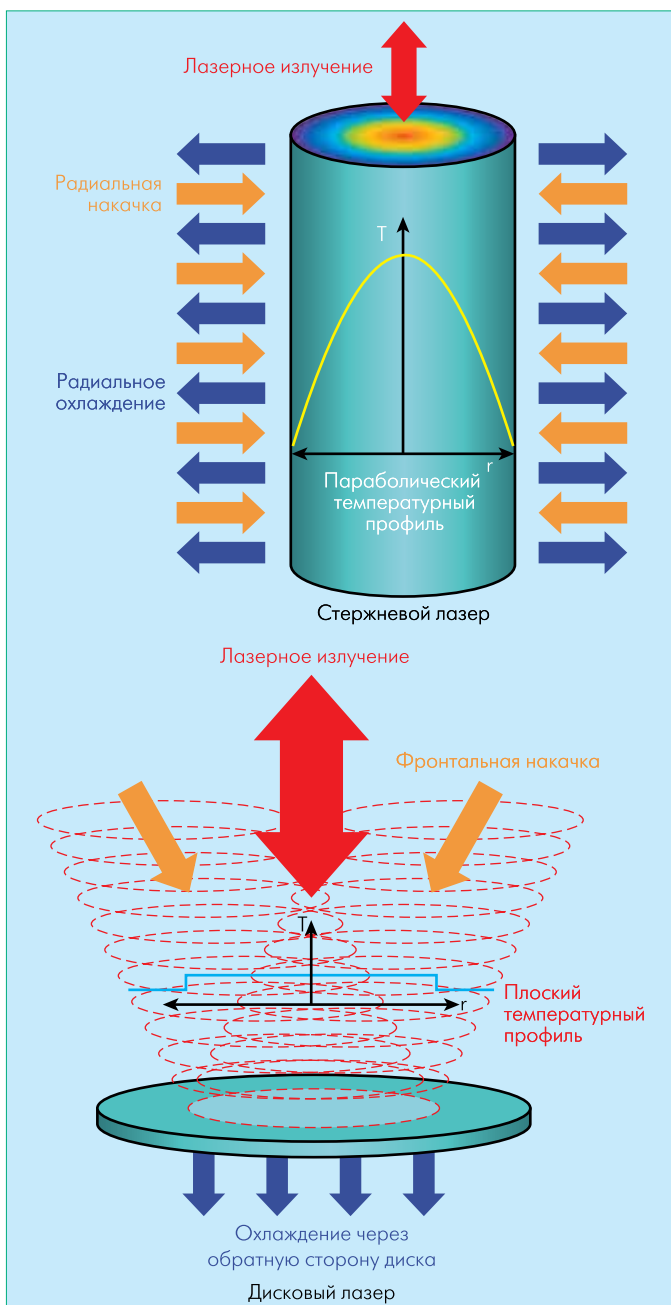


Рис.1 Зависимость температурного градиента от различных схем накачки в стержневом и дисковом лазерах

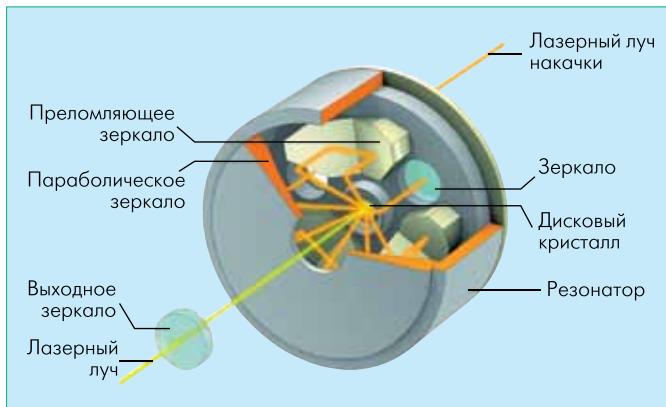
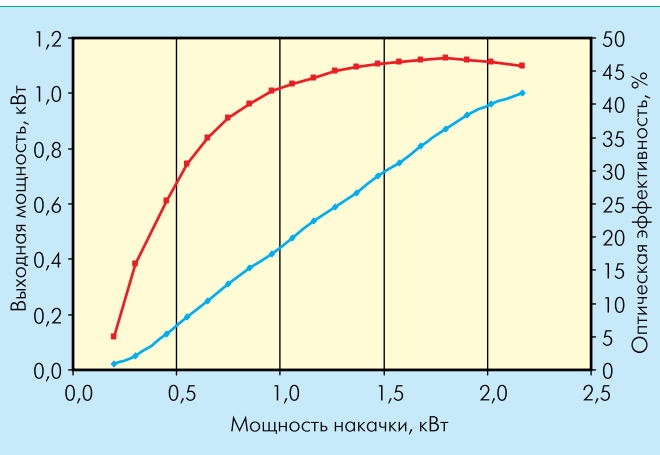


Рис.2 Дисковый резонатор

ки и, соответственно, площади поверхности лазерного луча на диске. Это является уникальной особенностью дисковых лазеров и позволяет масштабировать среднюю мощность при постоянной энергии луча на диске. Данное свойство важно для мультикиловаттных источников, потому что оно позволяет регулировать мощность, не изменяя при этом параметры, оказывающие влияние на надежность системы.

На первый взгляд, определенную проблему ставит выбор толщины кристалла, необходимой для эффективного отвода тепла. Потому что данная схема предполагает низкую способность поглощения энергии накачки. Однако геометрическая схема накачки дискового лазера позволяет найти изящное решение этой проблемы. Процесс накачки можно представить в виде многоканальной конфигурации, состоящей из параболического зеркала и системы отклонения. На рис.2 показана типовая оптическая схема резонатора для лазерных устройств с высокой средней мощностью. Параболическое зеркало фокусирует коллимированный пучок накачки, который поступает в резонатор лазерного кристалла. После частичного поглощения оставшаяся часть пучка отражается от зеркала, имеющего высокий коэффициент отражения, на тыльной стороне диска. В результате многократного отклонения через призмы и параболического зеркала получается в общей сложности до 20 поглощений при прохождении через диск. Этим достигается высокая эффективность поглощения световой энергии пучка накачки. Оптическая схема таких резонаторов допускает не строгие ограничения яркости для источника накачки. Как правило, для накачки дискового лазера с высокой средней мощностью требуются пучок, качество которого определяется величиной  $500 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ . Именно поэтому допускается применение как волоконных лазерных диодов, так и лазерных диодных схем с равномерным распределением интенсивности. С точки зрения практического использования лазерные диоды с равномерным распределением интенсивности более предпочтительны ввиду заметно меньших затрат, приходящихся на один ватт мощности накачки.

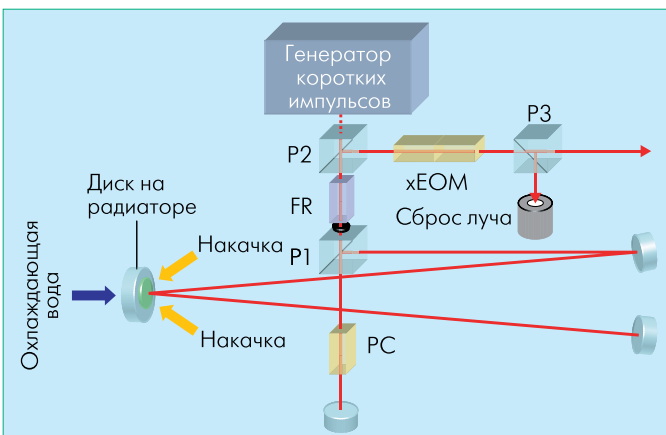


**Рис. 3** Зависимость выходной мощности и оптической эффективности дискового лазера с модуляцией добротности от мощности накачки. (Лазер подсоединен к оптоволоконному кабелю диаметром 400 мкм. Длительность импульса – 300 нс, частота повторения импульса – 10 кГц)

### РЕЖИМ МИКРОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Для эффективной обработки материалов: резки, сверления, полирования и удаления тонкой пленки с поверхности различных материалов нужны длинные микросекундные импульсы с высокой энергией и частотой повторения. С учетом продолжительной работы лазеров Yb:YAG в режиме верхнего состояния и относительно небольшого усиления в тонком дисковом лазере типичная длительность импульса простого дискового лазера с модуляцией добротности находится в пределах одной микросекунды. Модуляция добротности осуществляется с помощью акустооптического модулятора. Питание лазерной головки обеспечивается через шкаф "TruDisk DD 1000". В зависимости от геометрии резонатора возможна генерация импульсов с длительностью от нескольких сотен наносекунд до многих микросекунд.

Средняя выходная мощность такого устройства показана на рис.3. Длительность импульса здесь составляет приблизительно 300 нс, и лазер работает с частотой повторения импульса 10 кГц. Максимальная энергия импульса, таким



**Рис. 4** Генератор коротких импульсов: P – поляризаторы; FR – вращатель плоскости поляризации на эффекте Фарадея; PC – ячейка Погкельса; xEOM – внешний электрооптический модулятор

образом, составляет 100 мДж. Пиковая мощность превышает 200 кВт. Лазерный луч от такого источника передается по оптоволоконному кабелю диаметром 400 мкм. Это обеспечивает гибкое наведение луча на объект. Геометрия резонатора влияет на достижимое качество луча. Для его передачи по оптоволоконному кабелю с диаметром 100 мкм обеспечивают необходимое значение параметра качества – произведение радиуса луча на его расходимость (4 мм·мрад).

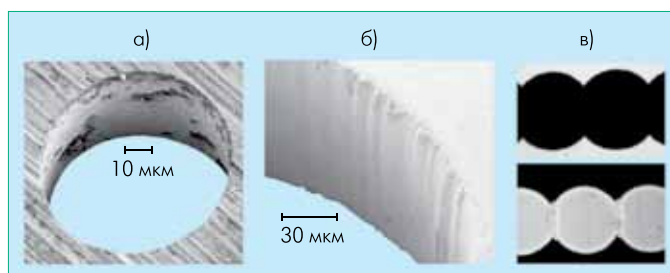
### РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Дисковый лазер, так же как и волоконный, характеризуется большим отношением площади охлаждаемой поверхности к коэффициенту усиления лазера. Однако эти две разные концепции устройства лазера отличаются значениями достижимой пиковой мощности. Качество луча волоконных лазеров определяется свойствами волноводов, разностью показателей преломления между сердцевинкой и оболочкой, а также величиной внутреннего диаметра. С другой стороны, качество луча дискового лазера зависит от конструкции резонатора. Увеличивая размер зоны оптической накачки (ее диаметр, как правило, составляет несколько миллиметров) при постоянной оптической энергии на поверхности диска, осуществляют масштабирование выходной мощности. Регулировка резонатора тоже обладает подобными возможностями. Фазовая автомодуляция определяет типичный предел нелинейного усиления ультракоротких импульсов. Она приводит к расширению спектральной линии пропорционально отношению эффективной величины оптического хода внутри материала с нелинейными характеристиками к эффективной площади поверхности пучка, умноженной на квадрат длительности импульса.

Электрооптический переключатель в регенеративном усилителе дискового лазера вносит вклад в нелинейные характеристики, больший, чем собственно диск. Даже принимая во внимание этот факт, нужно подчеркнуть, что значения энергии, достигаемые в импульсе, намного превышают значения, получаемые в волоконных усилителях за исключением лазеров с усилением chirпированных импульсов (Chirped Pulse Amplification). На рис.4 схематично представлена конструкция регенеративного усилителя дискового лазера, имеющего оптический КПД почти 50%, с выходной мощностью более 60 Вт. При энергии импульса в диапазоне до миллиджоулей длительность импульса 10 пс не приводит к нелинейному расширению. Флуктуации импульса не превышают 1%. Форма выходного пучка максимально приближена к форме луча, ограниченного дифракционным пределом ( $M^2 < 1,2$ , форма сечения луча приближена к круглой, почти на 95%).

### ПРИМЕНЕНИЕ

Задача лазерной микрообработки, как правило, включает резку, сверление и абляцию тонких слоев. Например, более точная обработка частей системы впрыска топлива автомоби-



**Рис.5** Результаты использования дисковых лазеров: а) отверстие диаметром 50 мкм в форсунке топливного инжектора, мягкая сталь; б) разрезанный нитинол, медицинский стент; в) удаление слоя толщиной  $h=0,5$  мкм со стеклянной подложки (сверху) и слоя  $\text{SiN}_2$   $h=0,3$  мкм с кремниевой подложки (внизу)

лей позволяет уменьшить выброс токсичных веществ вместе с выхлопными газами двигателя. На рисунке 5а показано отверстие в форсунке топливного инжектора, которое просверливается в течение нескольких секунд, при этом точность обработки обеспечивает высокую эффективность дисперсии топлива в процессе эксплуатации двигателя. Важную роль в этом вопросе играют чистые и острые кромки, низкая шероховатость поверхности внутренних стенок.

Оптические устройства для спирального сверления позволяют получать как положительную, так и отрицательную конусность расточки. Срез нитинола на рис.5б выполнен без применения технологического газа или последующей обработки. На

поверхности среза нет следов шлифования или термического воздействия. Данный способ позволяет резать медицинский стент без использования последующей обработки. На рис.5в показаны два варианта обработки тонких слоев на солнечных элементах: на обоих изображениях видны чистые следы отдельных абляционных импульсов с небольшим перекрытием в результате высокой скорости сканирования. На поверхности структурированного профиля не наблюдается никаких следов механического шлифования или оплавления материала. Также не видно никаких признаков расслаивания. В целях абляционной микрообработки используются лазеры с различной длительностью импульса. Геометрия луча и пропускная способность играют решающую роль, когда длительность импульса не превышает нескольких микросекунд и доходит до единиц и нескольких сотен пикосекунд.

Технология дискового лазера обеспечивает превосходную гибкость в масштабировании выходной мощности, сочетая ее с высокой энергией импульса и превосходным качеством луча.

Дополнительная информация по адресу:  
111033, Россия, г. Москва, ул. Золоторожский Вал, 4а.  
Тел.: +7 (495) 228-07-10; факс: +7 (495) 228-07-11;  
[www.ru.trumpf.com](http://www.ru.trumpf.com);  
e-mail: [info@ru.trumpf.com](mailto:info@ru.trumpf.com)