

Виктор Волков, д. т. н., академик РАН, профессор | volkvik2009@yandex.ru

Лазерные диоды

для накачки волоконных лазеров

В статье рассматриваются лазерные диоды, используемые для накачки волоконных лазеров и усилителей лазерного излучения. Представлены основные параметры типичных лазерных диодов, а также волоконных лазеров и усилителей с накачкой излучением лазерных диодов.

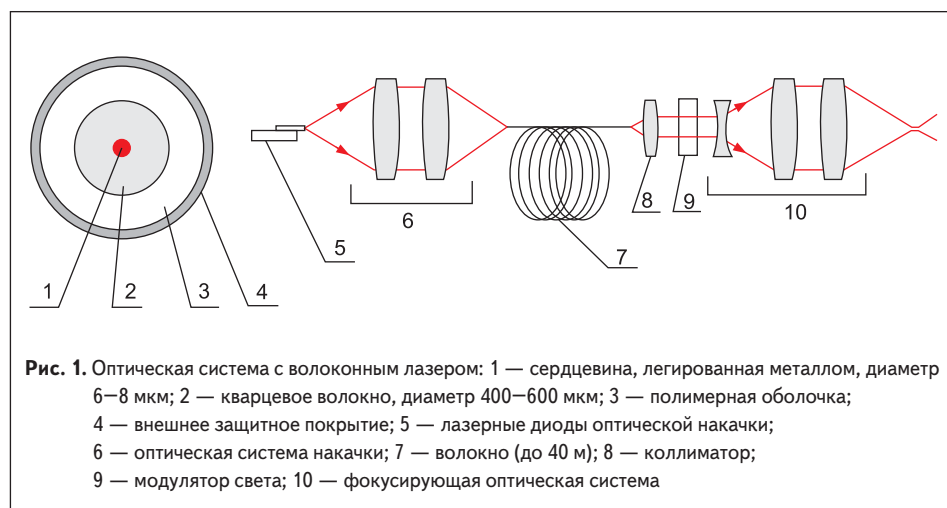
В настоящее время интенсивное развитие твердотельных лазеров привело к созданию волоконных лазеров. В них накачка обеспечивается с помощью лазерных диодов (ЛД), которые обладают значительным КПД, малыми массой, габаритами и энергопотреблением, высокими эксплуатационными характеристиками. Для обеспечения повышенной мощности излучения отдельные ЛД объединяются в линейки или в матрицы (решетки). Они входят в состав модулей ЛД, содержащих собственно лазерный излучатель, блок накачки, систему охлаждения или термостабилизации, согласующую оптику и волоконный вывод для стыковки с накачиваемым волоконным лазером. Волоконные лазеры используются в волоконно-оптических системах связи, для гравировки и резки металлов, лазерной маркировки, точной сварки и т. д.

Рассмотрим вначале принцип действия волоконного лазера. На рис. 1 представлена схема работы волоконного лазера с накачкой ЛД и в общем виде весь оптический тракт вплоть до обрабатываемого материала [1]. Главная особенность этого лазера в том, что излучение здесь рождается в тонком, диаметром всего 6–8 мкм, волокне (сердцевине — например, активная среда иттербий), которое фактически находится внутри кварцевого волокна диаметром 400–600 мкм. Излучение ЛД накачки вводится в кварцевое волокно и распространяется вдоль всего сложного составного волокна, имеющего длину несколько десятков метров. Упрощенно говоря, это излучение «пересекает», то есть оптически накачивает сердцевину. Именно в ней на атомах иттербия (Yb) происходят физические превращения, приводящие к возникновению лазерного излучения. Вблизи концов волокна на сердцевине делают два так называемых дифракционных зеркала — в виде набора «насечек» на цилиндрической поверхности сердцевины (дифракционные решетки); таким образом создается резонатор волоконного лазера. Общую длину волокна и количество лазерных диодов выбирают исходя из требуемой мощности, эффективности. На выходе получается идеальный одномодовый лазерный пучок с весьма равномерным

распределением мощности, что позволяет сфокусировать излучение в пятно малого размера и иметь большую, чем в случае мощных твердотельных Nd:YAG-лазеров, глубину резкости, а это чрезвычайно важно для лазерных систем свойство, особенно для многолучевых оптических систем. Также следует отметить, что ряд свойств излучения волоконных лазеров, например характер поляризации пучка, делает более удобным и надежным управление этим излучением с помощью акустооптических компонентов, позволяет реализовать многолучевые схемы записи изображений. В целом повышается надежность всего оптического тракта лазерной системы. Поскольку оптическая накачка идет по всей длине волокна, отсутствуют, в частности, такие свойственные обычным твердотельным лазерам эффекты, как термолинза в кристалле, искажения волнового фронта вследствие дефектов самого кристалла, девиация луча со временем и др. Эти эффекты всегда были препятствием для достижения максимальных возможностей твердотельных систем. В волоконном же лазере сам принцип его устройства и работы гарантирует высокие «отчетные характеристики» и делает такие лазеры совершенными, практически идеальными преобразователями светового излучения в лазерное [1]. Волоконные лазеры имеют очень высокую (до 80%) эффективность

преобразования излучения ЛД в полезное излучение. Для обеспечения их работы достаточно воздушного охлаждения. Это самые удобные и перспективные лазерные источники для волоконно-оптических линий связи и систем цифровой флексографии.

На рис. 2 представлена схема многокаскадного усиления в волокнах путем набора мощности излучения от нескольких лазеров с меньшей мощностью [2]. Принцип работы такого лазера заключается в следующем. Сначала накачивается задающий волоконный лазер 1 с помощью излучения ЛД 7, пропущенного через фокусирующие системы светодиодов 8. Затем световое излучение передается по световому волокну 2 к изолятору. От изолятора излучение передается мощному волоконному лазеру первой ступени 4, накачивая его, а от лазера первой ступени соответственно к мощному волоконному лазеру второй ступени 5, который тоже накачивается. После фокусировки из лазера второй ступени выходит конечный лазерный луч 6 [2]. С помощью такого лазера можно получить мощность излучения до 100 Вт. Причем КПД лазера составляет до 23%. В этом случае наблюдается весьма малое тепловыделение (около 8–10 Вт), а значит, есть возможность использовать воздушное охлаждение и исключить применение сложных систем водяного охлаждения, что присуще другим типам технологических лазеров. Для получения мощностей 2, 4, 6 и 10 кВт создают блочные системы, в которых излучение отдельных одномодовых волоконных лазеров 1 мощностью 100 Вт собирается в одном волокне 3.



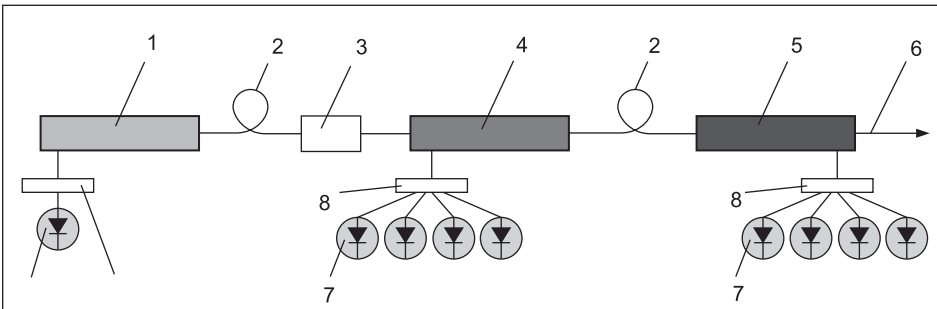


Рис. 2. Схема многокаскадного усиления в волокнах путем набора мощности излучения от нескольких лазеров с меньшей мощностью: 1 — задающий волоконный лазер; 2 — соединяющее световое волокно; 3 — изолятор; 4 — мощный усиливающий волоконный лазер первой ступени; 5 — мощный усиливающий волоконный лазер второй ступени; 6 — лазерный луч; 7 — ЛД; 8 — фокусирующие системы ЛД

И после прохождения через фокусирующую систему 4 лазерный луч попадает на обрабатываемую деталь 5. Схема такого волоконного лазера приведена на рис. 3 [2].

Исторически первыми вызвали интерес волоконные лазеры непрерывной генерации (англ. *CW-lasers*), легированные неодимом и работающие на длине волны около 800 нм. Благодаря широкой полосе поглощения они хорошо перестраиваются в пределах 50–60 нм. Обычно они применяются для генерации на длинах волн свыше 1360 нм, для более коротких длин волн предусмотрено легирование неодимом ZBLAN-волокон [3].

Иттербиевые лазеры по длинам волн генерации в значительной степени подобны неодимовым. Однако благодаря отсутствию поглощения с возбужденных уровней (эффект, при котором возбужденные энергетические уровни не только усиливают вынужденное излучение, но и поглощают излучение накачки, переходя на более высокий энергетический уровень) легирование ионами иттербия позволяет получить

большую мощность. Верхний предел на их излучаемую мощность определяет плотность излучения, которая, превышая 1 ГВт/см^2 , может приводить к сильным нелинейным эффектам. Поэтому на практике требуется искать баланс между диаметром сердцевины, чье увеличение позволяет повысить мощность накачки, и значением числовой апертуры, которая при этом уменьшается. 10-киловаттная мощность лазерной установки может потребовать диаметр сердцевины, равный 100 мкм, и внутреннюю оболочку (волновод накачки) диаметром в 1 мм, что не очень удобно. Одним из оригинальных решений для лазеров подобной мощности стало изготовление волокна, в котором легированная сердцевина скручена в спираль [3].

Волоконные лазеры, использующие эрбиевое волокно (иногда с примесями Yb_2O_3 для сенсibilизации), позволяют получать генерацию как в видимом, так и в инфракрасном диапазоне. Для их накачки применяются GaAs-полупроводниковые и Nd:YAG-лазеры. Они наиболее эффективны при накачке на длинах волн 950 или 1480 нм, где отсутствует поглощение с возбужденных уровней. Преимуществом эрбиевых лазеров является возможность перестройки длины волны в широком диапазоне, что также используется для уменьшения спектральной ширины линии генерации. С помощью связанных резонаторов был создан лазер, способный генерировать излучение на двух различных длинах волн с шириной каждой из них в 16 кГц [3].

Для получения мощных наносекундных импульсов с частотой следования в единицы и десятки килогерц часто применяется модуляция добротности. Использующие ее волоконные лазеры способны генерировать излучение с энергией порядка 1 мДж в импульсе с пиковой мощностью более 100 кВт [3]. Модуляция добротности на практике может достигаться различными способами. Внутррезонаторные акустооптические модуляторы были использованы еще в середине 1980-х, а к концу 1990-х стали применяться эрбиевые волоконные лазеры с длиной активного волокна до 79 см и площадью мод, работающие с помощью задающих генераторов [3]. Нелинейные процессы во время рассеяния Рамана или Манделъштама-Бриллюэна,

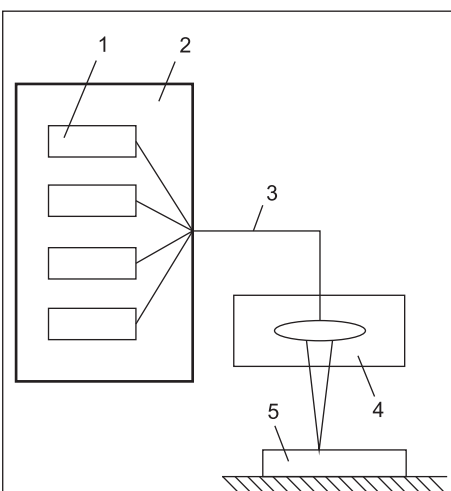


Рис. 3. Схема мощного волоконного лазера: 1 — волоконные лазеры мощностью 100 Вт; 2 — мощный волоконный лазер; 3 — волокно, передающее суммированное излучение; 4 — фокусирующая система; 5 — обрабатываемая деталь

которые приводили к самомодуляции добротности обычного (нелегированного) волокна, были известны довольно давно. В 1998 году получена генерация импульсов длительностью 2 нс с помощью неодимового волоконного лазера, к которому было присоединено десятиметровое одномодовое волокно. Обратная волна Стокса заходила в резонатор лазера в виде коротких импульсов, что и приводило к необходимому режиму генерации. Через два года был продемонстрирован 4-метровый иттербиевый лазер, генерирующий импульсы длительностью около 100 нс. Необходимо отметить, что на практике без дополнительных устройств стохастическая природа этих типов рассеяния приводит к нестабильности амплитуды генерации [3]. Обычным методом получения пико- и фемтосекундных лазерных импульсов является синхронизация мод. В волоконном лазере одновременно может излучаться большое количество продольных мод с частотным расстоянием между ними. О синхронизации мод говорят в том случае, когда между любыми соседними модами возникает одна и та же разность в фазе. Тогда интенсивность излучения I будет пропорциональна функции, зависящей от количества связанных мод M и разницы частот между ними [3]. Результатом является испускание лазером последовательности импульсов с малой длительностью с промежутком между ними [3].

В волоконных лазерах используют несколько типов синхронизации мод. Активная синхронизация заключается в модуляции оптического поля по амплитуде или фазе. Для волоконных лазеров приемлемыми по габаритам и потерям при подключении к волоконным приборам являются LiNbO_3 -электрооптические модуляторы. Длительность импульсов и промежуток между ними определяются конструкцией резонатора. Так, в кольцевом резонаторе с подключенным к нему обычным волокном длиной 2 км с сильной аномальной дисперсией можно получить длительность импульса около 4 пс. Резонатор Фабри-Перо позволяет достичь длительностей порядка пикосекунд. Существуют приборы, способные получать импульсы длительностью до 10 пс при частоте их следования до 10 ГГц. Однако общей проблемой лазеров подобного типа является неустойчивость амплитуды импульсов при длительном периоде генерации. В полностью волоконной конструкции с активной синхронизацией мод используется взаимная фазовая модуляция [3]. Для получения фемтосекундных импульсов применяется пассивная синхронизация мод. В этом случае используется некоторый нелинейный элемент, при прохождении которого импульс становится уже. В роли нелинейных элементов могут выступать так называемые насыщаемые поглотители, нелинейные зеркала типа волоконной петли и др. Идея использования насыщаемого поглотителя состоит в том, что при распространении импульса через такой прибор его края поглощаются существенно сильнее, чем центр (амплитуда которого намного больше). Это эквивалентно уменьшению длительности импульса. Существуют образцы лазеров, использующие насыщаемые поглотители

для генерации импульсов длительностью 320 фс. Нелинейные зеркала, или нелинейное вращение поляризации, позволяют создать полностью волоконную конструкцию [3].

Даже в одномодовом волокне существует связь между модами с близкими постоянными распространения и ортогональными поляризациями. Для волоконно-оптических линий связи это является фактором, ограничивающим пропускную способность и длину, так как предпочтительным является сохранение поляризации при распространении импульса по волокну [3]. Поляризация излучения волоконного лазера в общем случае нелинейным образом зависит от многих факторов, в частности от мощности накачки. Часто для подавления одной из ортогональных поляризаций применяют внутриволоконный поляризатор. В его роли выступает металлическая нить определенного сечения (например, в форме латинской буквы D), встроенная в волокно и протянутая вдоль его сердцевинки. Для поляризации, ортогональной к плоской поверхности D-образной нити, омические потери будут достаточно сильными, чтобы значительно понизить ее интенсивность. Для создания другого типа волоконного поляризатора, основанного на том же физическом принципе, оптическое волокно обрабатывается таким образом, что на расстоянии порядка длины волны от сердцевинки образуется полированная поверхность, на которую напыляется слой металла. Экспериментальные исследования описанных конструкций показывали разницу амплитуд поляризаций до 25 дБ в инфракрасном диапазоне при выходной мощности порядка нескольких милливатт и КПД около 25% [3]. Принципиально иной метод заключается в использовании оптических волокон с сильным двулучепреломлением мод. Это волокна, в которых искусственно создана асимметрия канала распространения света, например путем создания эллиптической сердцевинки или боковых выемок, вызывающих механические напряжения в волокне в определенном направлении. В них моды с различной поляризацией имеют различные постоянные распространения. Генерации необходимой поляризации добиваются с помощью внутриволоконных брэгговских решеток, в которых коэффициент отражения зависит от поляризации для резонатора Фабри-Перо [3].

Известны Ур-конверсионные (ап-конверсионные) лазеры, в которых длина волны излучения меньше, чем длина волны накачки (в большинстве обычных лазеров, накачиваемых светом, реализуется противоположная ситуация). Ур-конверсионная схема накачки заключается в поглощении активной средой нескольких фотонов, вследствие чего энергия перехода с конечного энергетического уровня превышает энергию каждого из поглощенных фотонов. В волоконных лазерах ее применение часто требует использования флюоридных волокон (ZBLAN). Ур-конверсия используется в тулий-, эрбий- и празеодим/иттербий-легированных лазерах. Необходимо отметить, что каждый энергетический уровень иона, используемого для генерации, является уширенным вследствие взаимодействия с матрицей. Ур-конверсия представляет значительный интерес, так как

позволяет создавать лазеры, работающие в синей области спектра при использовании накачки в красном или инфракрасном диапазоне [3]. Ур-конверсионная схема для волокон, легированных им, позволяет получать генерацию красного, оранжевого, зеленого и синего цветов. Часто применяется дополнительное легирование иттербием, благодаря очень широкой полосе поглощения лежащей в диапазоне работы мощных GaAs ЛД. Ионы Yt^{3+} служат в качестве сенсibilизаторов (частиц, передающих энергию между различными уровнями ионов, служащих для генерации) [3].

Преобразование частоты генерации лазера может быть осуществлено с помощью вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР, эффект Рамана). В стеклах оно проявляется существенно слабее, чем в некоторых нелинейных кристаллах и жидкостях, но благодаря низким оптическим потерям в оптическом волокне ВКР происходит достаточно эффективно для практического использования. Впервые эффект Рамана в волоконных лазерах был продемонстрирован Роджером Столеном в 1972 году, и с тех пор продолжается активная разработка волоконных ВКР-лазеров. Они представляют значительный интерес благодаря переносу частоты генерации в инфракрасную область спектра, где редкоземельные твердотельные лазеры малоэффективны. Вместе с дисперсионными резонаторами можно получить перестройку частоты в них в диапазоне 1,1–1,6 мкм при сохранении высокой выходной мощности. Резонаторы волоконных ВКР-лазеров создаются парами брэгговских решеток, которые рассчитываются на полное пропускание излучения накачки и заметное отражение на длине волны стоксовой компоненты рассеянного излучения (порядка 99,9% для полностью отражающего зеркала и 5% для выходного зеркала). Иногда применяют несколько пар решеток для получения стоксовых компонент более высоких порядков. Наиболее распространенными являются ВКР-лазеры, использующие германосиликатные волокна, поскольку в них эффективность вынужденного комбинационного рассеяния и фоточувствительность существенно выше, чем в чисто кварцевых волокнах, и растет с повышением концентрации германия. Типичный лазер непрерывной генерации накачивается другим YAG:Nd³⁺-лазером на длине волны 1,06 мкм. Первичная накачка неодимового лазера осуществляется ЛД. Длина активного волокна может составлять 800 м. Резонаторы в нем создаются тремя и более парами (каскадами) брэгговских решеток. Подобный пятикаскадный лазер с длиной волны 1,48 мкм дает выходную мощность 1,5 Вт и используется для накачки волоконных усилителей в ВОЛС.

Основные преимущества волоконных лазеров [1, 3–5]:

- Высокий КПД, малое энергопотребление и масса, например системы LaserGraver представляют собой практически офисную технику, питание которой осуществляется от обычной розетки.
- Отсутствие водяного охлаждения, для компонентов волоконного лазера достаточно охлаждения воздушного.

- Отсутствие сменных элементов и профилактических операций со стороны оператора.
- Удобство для построения многолучевых оптических систем.
- Высокая надежность оборудования.
- В волоконных лазерах генерация излучения происходит непосредственно в волокне, и оно имеет высокое оптическое качество.
- Малая чувствительность к вибрациям.
- Если длина излучения волны у волоконного лазера $l = 1,09$ мкм, то она дает волоконному лазеру ряд преимуществ, поскольку излучение такой длины волны:
 - будет прекрасно фокусироваться через стеклянные линзы, что позволяет сэкономить денежные средства при установке фокусирующей системы;
 - может передаваться по волокну на большие расстояния. Поэтому сама лазерная установка может находиться в удобном для работы месте, а волокно от лазерной установки уже непосредственно протягивается на место сварки;
 - очень интенсивно поглощается металлом.
- Малый размер выходной апертуры луча (300 мкм) позволяет сфокусировать конечный лазерный луч в очень маленькую точку.
- Волоконный лазер имеет малую расходимость луча.
- Возможно создание излучателей высокой мощности до 100 кВт путем объединения излучений нескольких волоконных лазеров в одно.
- Для волоконных лазеров практически не требуется такое техническое обслуживание, как настройка, юстировка, чистка и др.
- Волоконные лазеры допускают размещение в обычных рабочих помещениях цехов без учета специальных требований.
- Компактность установок, обусловленная тем, что лазер может занимать удобное для работы месторасположение, даже если оно находится на значительном расстоянии от места сварки и обработки деталей.
- Возможность передачи излучения по световоду.
- Срок работы доходит до 100 000 часов, так как ЛД и волокно не испытывают большой нагрузки.
- Отсутствие настроечных операций на лазере.
- Высокая эффективность проплавления. Недостатками данного типа лазеров являются опасность возникновения нелинейных эффектов из-за высокой плотности излучения в волокне и сравнительно небольшая выходная энергия в импульсе, обусловленная малым объемом активного вещества. Волоконные лазеры проигрывают твердотельным в сферах применения, где требуется высокая стабильность поляризации, а использование сохраняющего поляризацию волокна затруднено по различным причинам [3].
- Фирма НТО «ИРЭ-Полус» [6] разработала мощные модули ЛД серии PDL с волоконным выходом. Модули серии PDL собираются на основе мощных высокоэффективных ЛД с рабочей длиной волны 970 нм и с шириной излучающей

области 100 мкм. Излучение ЛД с помощью микрообъектива вводится в кварц-кварцевое многомодовое волокно диаметром 110 мкм. Все элементы модуля смонтированы в компактном герметичном корпусе. В нем могут быть также

установлены ТЭО и датчик температуры. Модули серии PDL могут быть использованы для накачки различных типов волоконных лазеров и усилителей. Изделия характеризуются малыми габаритами и массой. При этом они

обладают очень высокой надежностью и превосходят по ресурсу существующие аналоги в десятки и сотни раз. Надежность модулей обеспечивается высоким уровнем технологии производства и чрезвычайно жесткой про-

Таблица 1. Основные характеристики мощных ЛД для накачки волоконных лазеров [6–8]

Страна, фирма-поставщик	Модель	$\lambda, \text{ нм}/\Delta\lambda_{0,5}, \text{ нм}$	P, Вт	$t_{\text{и}}, \text{ мс}/F, \text{ Гц}$	Размеры излучающей области, мм	$\Theta_{0,5}, \text{ град.}$	IN, A/U, В	Режим работы/охлаждение	Габариты, мм/масса, г	Примечание
РФ, РФЯЦ ВНИИТФ	ЛД05-975-xxxx-xxxx	975/4	8,5			8×29	9/1,8		20×4,5×6,5	Одиночный ЛД с изолированными от теплоотвода контактами
	МЛД01-xxx-yzzz-0000	808, 975/3-5	До 1000				110/20			Матрица ЛД на микроканальных тепловодах (режим непрерывный)
	ЛМ-975-30-ТФ	975/7	30		$\varnothing_{\text{ов}} 0,125; NA=0,22$		9/12	Водяное охлаждение	86×73×30	Лазерный модуль
	ЛМ-975-40-ТФ	975/7	42				9/13,5	Водяное охлаждение	86×64×40	Лазерный модуль
	Линейка ЛД	950-960/-	100	4/10			80/4,5		16×10×7	Ресурс 5×10^7 импульсов
РФ, НТО «ИРЭ-Полюс»	PLD-2	956-972/10	1,5				2,5		48×21×13/50	Многомодовое волокно 110×125 мкм, числовая апертура 0,19-0,21 $\Delta t_p = (-40)-(+40) \text{ }^\circ\text{C}$, наработка на отказ 3×10^4 часов
	PLD-4	956-972/10	4				6		48×21×13/50	Многомодовое волокно 110×125 мкм, числовая апертура 0,19-0,21 $\Delta t_p = (-40)-(+70) \text{ }^\circ\text{C}$, наработка на отказ 3×10^5 часов
	PLD-6	956-972/10	4				6		41×20×13/40	
	PLD-7	956-972/10	1,5				2,5		18×18×6/12	
	PLD-25	950-974/6	18				7,5/-		41×20×8,7/30	Длина волокна 1,5 м, диаметр 0,11 мм, срок службы $>5 \times 10^5$ часов
	ДЛМ-5	970	5	-/до 5×10^4					130×230×36,5/3	Длина волокна до 20 м, диаметр 0,1 — 0,3 мм, срок службы $>5 \times 10^5$ часов
	ДЛМ-10	970	10					Непрерывное/кондуктивное или принудительное воздушное охлаждение	130×230×36,5/3	
	ДЛМ-15	970	15						130×230×36,5/3	
	ДЛМ-30	970	30						130×230×36,5/5	
	ДЛМ-50	970	50						130×230×36,5/5	
ДЛМ-75	970	75					251×220×75/7			
ДЛМ-100	970	100					251×220×75/8			
Германия, JENO OPTIK Laser	JOLD-20-BA-4E	808/3	20			32×19	26/2		139×250×250	Непрерывный режим, срок службы 10^4 часов
	JOLD-30-BA-4E	976/3	30			20×35	33/1,8			
	JUM 25k/200/20-808/_915/_978	808/5; 915/6; 978/6	25		$\varnothing 0,2$		45/2		99×72,4×27	
	JOLD-75-CPXF-2PTEC	808/6; 915/6; 938/6; 976/6	75		$\varnothing 0,4; \varnothing 0,6$		59×64/4,5		152,3×130,5×44	
	JOLD-45-CPXF-1L		45				59-64/2		121×66×49	
	JOLD-30-FC-12		30		$\varnothing 0,2; \varnothing 0,4$		6-7/2,2		70×48×22,5	Непрерывный режим, срок службы 2×10^4 часов, длина волокна 2 м
	JUM4000/100/20 (2500/50/20, 4000/50/20, 2800/50/16)		2,5-4		$\varnothing 0,125$		4,5-8/2-2,5		69×48×20	
	JUM7800/100/20 (4500/50/20, 7500/50/20, 5200/50/15)		4,5-7,5		$\varnothing 0,5-0,1$		4-6,5/4-5		80×58×27	Непрерывный режим, срок службы 10^4 часов
	JUM20k/100/20_976	976	20		$\varnothing 0,1$		38/25		100×56×34	
	JOLD-210-CAXF-6P	976	210		$\varnothing 0,6$		59-64/3,2-3,8		399,3×81,6×80	
	JOLD-400-CAXF-6P2	976	400		$\varnothing 0,6$		60/26		378,5×162×90	
	JOLD-100-CPXF-2PW	976	100-140		$\varnothing 0,6$		70-112/4,5		169×116×50	
	JDL-BAB-30-19-808-TE-40-1.5	808/6	40		0,15×0,12	60×36	39/1,8			
	JDL-BAB-50-47-808-TE-50-1.5	808/6	50		0,15×0,12	62×36	56/2			
	JDL-BAB-50-47-940-TE-120-2.0	938/6	120		2×0,12	47×28	123/1,7			
	JOLD-x-CABN-xA	808/5; 938/5; 976/5	200-1250			4×0,5	59-64/8-45		45×40,7×20	
	JOLD-x-CANN-xA	808/5; 938/5; 976/5	240-2500			(27-57) × (34×48)	85-105/6-50		46,4×44,4×19,2	
JOLD-x-CAMN-xA	938/6; 976/6	360-3000			46×34	125/6-49		82,8×42×32		
JUM7000/dental_810VDMOO228	810/10			$\varnothing 0,2$		13/2,5		Непрерывное/водяное	55×55×25,5	
JUM7000/dental_975VDMOO128	975/10			$\varnothing 0,2$		13/2,5				

Примечания: λ — длина волны, $\Delta\lambda_{0,5}$ — полуширина спектра, P — мощность излучения, $t_{\text{и}}$ — длительность импульса излучения, F — частота, $\Theta_{0,5}$ — угловая расходимость излучения на уровне половинной интенсивности, $I_{\text{и}}$ — ток накачки, U — напряжение питания, Δt_p — диапазон рабочих температур, $\varnothing_{\text{ов}}$ — диаметр оптического волокна, NA — его апертура, $W_{\text{и}}$ — энергия в импульсе.

цедурой тестирования на всех этапах сборки каждого изделия. Модули допускают непрерывный и модулированный режим работы. Их основные параметры приведены в таблице 1, а внешний вид типичных моделей ЛД — на рис. 4–7 [6–8].

Диодные лазерные модули серии ДЛМ этой же фирмы [13] (таблица 1) выпускаются с выходной мощностью до 100 Вт. Эти ЛД работают на длине волны около 970 нм, имеют КПД = 40–45% (от розетки), рассчитаны на кондуктивное или принудительное воздушное охлаждение, не требуют замены каких-либо элементов в процессе всего срока эксплуатации. Вывод излучения осуществляется по гибкому оптическому волокну диаметром 0,1–0,3 мм, защищенному металлическим кожухом. Для удобства эксплуатации модулей к невидимому рабочему излучению к ним может быть добавлено маломощное излучение пилот-лазера красного или зеленого диапазонов спектра. Допустимые частоты модуляции выходного излучения — до 50 кГц. Питание модулей осуществляется от низковольтных источников постоянного тока. Диодные лазерные модули серии ЛМ [13] работают на длинах волн 970 и 1560 нм с КПД соответственно 40–45 и 10–15% (от розетки) при мощности излучения соответственно до 30 и до 15 Вт. ЛД имеют кондуктивное охлаждение, красный и зеленый пилот-лазеры для визуализации излучения, три излучения в одном волокне диаметром 0,1–0,3 мм.

Безопасные для глаз непрерывные одномодовые эрбиевые волоконные лазеры с мощностью 1, 5, 10 и 15 Вт серии ELD [9] обеспечивают дифракционно-ограниченный высокоэнергетический пучок излучения в безопасном для глаз диапазоне (1535–1610 нм) (таблица 2) [8–12, 15, 16]. Эти компактные лазеры не требуют обслуживания во время эксплуатации. Их КПД >9%. Излучение передается по одномодовому световоду. В лазерах для накачки используются ЛД с площадью излучающей поверхности 1×100 мкм, работающие на длине волны 970 нм. До установки в лазер все ЛД накачки подвергаются жесткому тестированию. Такие же ЛД применяются для накачки перестраиваемых в диапазоне длин волн 1530–1575 нм эрбиевых волоконных лазеров серии ELT [10]. Их мощность меняется от 0,1 до 0,5 Вт. Излучение вводится в волокно длиной до 2 м. Одномодовые иттербиевые волоконные лазеры (таблица 2) серии YLD [9] генерируют излучение с мощностью 1–40 Вт в диапазоне длин волн 1030–1120 нм. Они не требуют водяного охлаждения, настройки и технического обслуживания. Высокомощные иттербиевые волоконные лазеры с мощностью излучения до 20 Вт допускают широкополосную модуляцию излучения до 300 МГц. Они имеют одномодовый режим работы и не требуют водяного охлаждения, их КПД составляет 10%. Излучение вводится в одномодовый оптический кабель длиной 3–5 м. Кабель заканчивается коллиматором, обеспечивающим диаметр пучка излучения 2–8 мм.

Иттербиевые волоконные лазеры серии PYL [10] генерируют мощность излучения 5, 10, 50 и 100 Вт с КПД, равным 20%. Излучение вводится в волокно длиной до 20 м. Рабочий диапазон длин волн 1050–1120 нм. Импульсные иттербиевые волоконные лазеры серии YLP [9] применяются для обработки материалов. Лазерное излучение с мощностью до 10 Вт и с длиной волны 1060 нм подводится к рабочей зоне с помощью волоконного кабеля с защитной металлической оболочкой. Длительность импульса излучения может составлять 40 или 200 нс, энергия в импульсе — 0,5 мДж, частота перестраивается в диапазоне 20–100 кГц. Для накачки лазеров используются многомодовые ЛД с длиной волны 970 нм. Излучение лазера вводится в оптический кабель длиной 5 м. Этот компактный лазер способен работать при больших ударных и вибрационных нагрузках и может быть встроено прямо в маркируемые и обрабатываемые материалы без необходимости последующего вмешательства. Рамановские лазеры серии PYL, PYL-R, PYL-R2 [9, 10] имеют выходную мощность излучения от 0,5 до 5 Вт, а при необходимости — и до 10 Вт. Такие лазеры идеальны для волоконно-оптических линий связи. Длина волны может быть выбрана от 1240 до 1500 нм при типичных представляющих интерес длинах волн 1427, 1450, 1455, 1487, 1497 нм. Лазеры имеют одномодовый волоконный выход. Для накачки используются ЛД с площадью излучающей поверхности 1×100 мкм, действующие на длине волны 970 нм и имеющие время жизни при номинальном токе и температуре 20 °С до 5×10^6 часов. Высокомощные туллиевые волоконные лазеры работают в области спектра 1750–2000 нм в непрерывном режиме с мощностью излучения 10–100 Вт. Излучение вводится в оптический кабель длиной 3 м. Для накачки используются ЛД с площадью излучающей поверхности 1×100 мкм, работающие на длине волны 960 нм, и временем жизни при номинальном токе и температуре 20 °С до 2×10^5 часов.

В таблице 3 [9, 10, 16] представлены параметры волоконных усилителей с накачкой ЛД. Универсальные мощные одномодовые суперширокополосные эрбиевые волоконные усилители серии EAD-CL [9, 14] имеют оптическую мощность 0,1–2 Вт при ширине полосы усиления свыше 60 нм для области рабочих длин волн 1540–1600 нм. Усиление обеспечивается накачкой многослойного световода, легированного ионами Yb и Er, от многомодового ЛД с площадью излучающей поверхности 1×100 мкм, работающие на длине волны 970 нм и с временем жизни при номинальном токе и температуре 20 °С до 5×10^6 часов. Вход и выход стандартного усилителя оснащены стандартным волоконным кабелем SMF-28 длиной 1,5 м с оптическими разъемами FC/PC, FC/SPC, FC/APC на входе и выходе. Типичный уровень шума 5,5–6 дБ при максимальной потребляемой мощности 30–60 Вт. Одномодовые иттербиевые волоконные усилители серии YAM [9]



Рис. 4. Одиночный лазерный диод с изолированными от теплоотвода контактами ЛД05-975-xxxx-xxxx



Рис. 5. Матрица лазерных диодов на микроканальных теплоотводах МЛД01-xxx-yzzz-0000



Рис. 6. Лазерный модуль ЛМ-975-40-ТФ



Рис. 7. Лазерный модуль ЛМ-975-30-ТФ

Таблица 2. Основные параметры волоконных лазеров с накачкой ЛД

Фирма	Модель	λ , нм	$\Delta\lambda_{0,5}$, нм	W_{in} , мДж	$P_{ср}$, Вт	t_{in} , нс	F, кГц	Длина выходного волокна, м	U, В/Р ₃ , Вт	Масса, кг	Габариты, мм	Примечание
НТО «ИРЭ-Полюс»	YLP-0.5/40/20 (MOPFA)	1050-1070	10	0,5	10	15-400	20-200	5	24/120	7	290×230×90	
	YLP-0.5/200/20	1060-1070	10	0,5	10	200-300	20-50	5	24/120	7	290×230×85	Q-модуляция
	ELD-1	1535-1610	0,2-0,3		1				~110; 220/25	3	250×260×100	Непрерывное
	EDL-5	1540-1600	0,4-0,8		5				~110; 220/80	4	350×250×100	
	EDL-10	1540-1570	0,5-0,8		10				~110; 220/150	5	440×350×140	
	EDL-15	1540-1565	0,6-1		15				~110; 220/200	6	440×350×140	
	YLPM	1068-1076	4		10, 15, 20		300 МГц	3-5	24/240	10	230×290×90	
	YDL-1	1030-1120	0,3		1				~110; 220/15	1	250×260×100	
	YDL-2	1030-1120	0,3-0,5		2				~110; 220/15	1	250×260×100	
	YDL-5	1050-1120	0,3-0,5		5				~110; 220/50	3	250×260×100	
	YDL-10	1050-1120	0,3-0,5		10				~110; 220/100	4	250×325×100	
	YDL-20	1055-1120	0,4-0,8		20				~110; 220/180	6	440×350×140	
	YDL-40	1064-1120	1-2		40				~110; 220/290	10	440×350×140	
	PYL-1-xxxx-R	1455	0,8-1,5		1				12/20	2	250×140×36	Непрерывное
	PYL-2-xxxx-R	1455	1-2		2				24/35	2	250×140×36	
PYL-3-xxxx-R	1455	1,2-2,4		3				24/45	2,5	250×140×36		
PYL-1-1455-R	1455	1-1,5		1				12/<20		230×180×25		
PYL-3-1455-R	1455	2-4		5				12/<70		230×180×25		
IPG Photonics	TFL-xx	1750-2000	0,3-0,8		1, 2, 5, 10, 15		40	3	~110; 110; ~220; 240/-			Ø пучка 1,6-5,5 мм, охлаждение воздушное
	DL Series	960-890	3		4, 10, 20, 50, 100		300		5-48/-			Ø волокна (50-100)-650 мкм
	PYL-10-M	1050-1120	<1		10			1-20	24 или ~110; 220/60	3	230×130×36	Лазерный модуль
	PYL-20-M	1060-1120	<1,5		20			1-10	24 или ~110; 220/120	5	270×190×36	
	PYL-50-M	1065-1120	<2		50			1-10	30 или ~110; 220/300	7	270×252×75	
	PYR-100	1075-1120	<4		100			1-20	60 или ~110; 220/600	15		
	ELT-100-500-C	1530-1575	0,2		0,1-0,5			2	~100; 240 или ~220; 240			340×310×140
РЯЦ-ВНИИТФ	ИВЛ-100-ТФ	1085	2		100				~220/120		500×380×80	Ø волокна 125/6 мкм, водяное охлаждение
	ИВП-300-ТФ	1085	2		300				~220/3000		500×500×290	Ø волокна 125/15 мкм, водяное охлаждение
JENO OPTIK Laser	Jenlas fiber ns 10-Basic	1062 ±3		≥0,5	10	30-200	100	2	24/168	<6	352×198,2×77	Ø пучка 1,15 мм, воздушное охлаждение
	20-Basic			≥0,8	20	30-200	100	2	24/240	<6		
	12-Advanced			≥0,6	12	9-200	500	2	24/168	<6		
	20-Advanced			≥0,8	20	9-200	500	2 (3)	24/240	<6		
	30-Advanced			≥1	30	9-200	500	3 (5)	24/240	<6		
	40-Advanced			≥1,25	40	9-250	500	3 (5)	24/312	<6		
Jenlas® fiber cw 1000 (Preliminary)	1070				1000	1000	5	10	~400/7000, 50-60 Гц	~60	871,5×266×483	Импульсный или непрерывный режим, водяное охлаждение
Coherent	HighLight 1000FL	1100 ±20			1000		5×103		~208 или 400/480 В, 50/60 Гц/до 4800	90	566×380×1000	Водяное
NKT Photonics A/S	aeroPULSE	1035	1			5 пс/20 пс	80 МГц		~100-240 В, 50/60 Гц/100	7,2 (И); 6-10 (БП); 3 (Б0)	344×60×394 (И); 375×177×440 (БП); 330×197×279 (Б0)	Водяное

Таблица 3. Основные параметры волоконных усилителей

Фирма	Модель	Режим работы/поляризация	λ , нм	$\Delta\lambda_{0,5}$, нм	$\Delta P_{вх}$, мВт	ΔF_{min} , кГц	$P_{вых, max}$, Вт (при $P_{вх} = 1$ мВт)	$N_{вых}$, % (в течение 8 часов)	$K_{ус, max}$, дБ ($P_{вх} = 1$ мВт)	$Ш_{max}$, дБ	U, В/Р ₃ , Вт	Масса, кг	Габариты, мм
НТО «ИРЭ Полюс»	YAM-1	Непрерывный/Случайная	1050-1120	30	1-50	0,01	1	2	30	7	5/15	0,5	160×90×18
	YAM-3		1050-1120	30	1-50	0,1	3	2	34	7	12/22	2,5	230×130×36 (255×178×70 с охлаждающим устройством)
	YAM-5		1055-1120	30	1-50	0,1	5	2	37	7	12/35	3,0	270×190×36 (270×240×74 с охлаждающим устройством)
	YAM-10		1050-1120	30	1-50	100	10	2	40	7	24/65	4,0	270×190×36 (270×240×74 с охлаждающим устройством)
	EAD-CL		1535-1605	60	30-37 дБ			0,1-0,2			5,5-6	~100-110; 220 В, 50-60 Гц/60	
IPD Photonics	TAM-80-S		1455-1505				Усиление 23 дБ			6,5	5/16		150×125×33
	EAD-C		1530-1570	35			0,04-0,5		5		~100-110; 220 В, 50-60 Гц/20		287×257,5×116
	EAD-L		1555-1610	35			0,04-0,5		6				
	EAD-C		1533-1567	60			1-5		<6				
	EAD-L		1570-1605	60			1-5		<6		~100-110; 220 В, 50-60 Гц/60		327×257,5×116
	EAD-CL		1540-1605	60			1-5		<6				
	FAU-W-2-I-W		1529-1564; 1570-1605				До 2		30-36	<5,5			
EAU-Mxx-C		1529-1565						20	4,5-5			90×70×12	
EAU-Mxx-L		1565-1605						20					90×70×15
NKT Photonics A/S	aeroGAIN-Base-1.0		1030-1070		500		25-50		17			1,7	360×360×120

Примечания: λ – рабочая область спектра, $\Delta\lambda_{0,5}$ – ширина полосы усиления на полувысоте, $\Delta P_{вх}$ – диапазон входных мощностей, ΔF_{min} – минимальная ширина входного сигнала, $P_{вых, max}$ – предельная выходная мощность, $N_{вых}$ – нестабильность на выходе, $K_{ус, max}$ – наибольший коэффициент усиления, $Ш_{max}$ – максимальный уровень шума, U – напряжение питания, P_3 – энергопотребление.



Рис. 8. Наносекундный волоконный лазер с воздушным охлаждением JenLas fiber ns 10-40

предназначены для работы в жестких условиях, не требуют водяного охлаждения. Они действуют в диапазоне длин волн 1050–1120 нм при мощности излучения 1,3, 5 и 10 Вт. Возможна версия, сохраняющая поляризацию. Это может быть актуально в открытых системах связи, в системах когерентного детектирования, для накачки He³ и др. Полный КПД >15%. Для накачки используются ЛД с параметрами, указанными выше. Ввод излучения осуществляется через оптический кабель длиной 2 м, а вывод — через коллиimator (диаметр пучка можно выбрать в пределах 0,4–0,8 мм) или отрезок оптического кабеля. Ширина полосы усиления составляет 30 нм (на полувысоте), максимальный уровень шума — 7 дБ. Прибор может быть изготовлен как сохраняющий линейную поляризацию усилитель с экстинкцией ~16–20 дБ. Эрбиевые волоконные усилители серии EAD [10] с мощностью излучения 1–5 Вт (возможно и до 20 Вт) способны работать в областях спектра 1533–1565 и 1565–1610 нм. Вход и выход стандартного усилителя оснащены стандартным волоконным кабелем SMF-28 длиной 1,5 м. Для накачки применяются ЛД с параметрами, указанными выше. Примеры образцов волоконных лазеров с накачкой ЛД представлены на рис. 8–11.

Таким образом, существует значительное количество ЛД и на их основе — волоконных лазеров и усилителей, которые обладают достаточно высокими параме-

трами для применения в различных областях науки и техники.

Литература

- Ласкин А. От лазеров твердотельных — к лазерам волоконным // Флексо Плюс. 2002. № 2.
- Гладких Ю. А., Шмаков И. Н. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Волоконные технологические лазеры и оценка эффективности их применения // Наука и образование. 2008. № 2.
- Волоконные лазеры и усилители. www.laserportal.ru/content_354.
- МИКСИС: Преимущества волоконного лазера. micsys.ru>article_fiber_laser_priority.php.
- Оптоволоконные лазерные системы. Проспект института автоматики и электротехники СО РАНЭ, ООО «Инверсия-Файбер». Новосибирск. 2013. www.sibai.ru/archive/index-246.htm.
- Диодные лазерные модули НТО «ИРЭ-Полюс». М., 2013. www.ntoire-polus.ru/products_low_dlm.html.
- Лазерные диоды, их матрицы и модули. Каталог Российского федерального лазерного центра — Всероссийского НИИ технической физики им. академика Е. И. Забабахина. Г. Смежинск Челябинской обл. 2013. www.i-mash.ru/predpr/1217.
- Diode Laser Modules. Каталог фирмы JENOPTIK GmbH, Германия, 2013. www.ru.jenoptik.com.
- Волоконные лазеры и усилители. Каталог НТО «ИРЭ-Полюс». Г. Фрязино Моск. обл., 2013.
- Fiber lasers and fiber amplifiers. Каталог фирмы IPD Photonics Corporation США, 2013.
- Волоконные лазеры. Каталог Российского федерального лазерного центра — Всероссийского НИИ технической физики им. академика Е. И. Забабахина. Г. Смежинск Челябинской обл. 2013. www.i-mash.ru/predpr/1217.
- JenLas fiber lasers. Каталог фирмы JENOPTIK GmbH, Германия, 2013. www.ru.jenoptik.com.
- НТО НИИ «ИРЭ-Полюс». Сравнение лазеров различных типов. www.ntoire-polus.ru/apps_lasers.html.
- Волоконно-оптическая техника: современное состояние и перспективы. Сборник статей под ред. Дмитриева С. А., Слепова Н. Н. М.: ООО «Волоконно-оптическая техника», 2005.
- Highlight 1000FL. Проспект фирмы Coherent, США, 2014. www.lasermir.ru/o_kompanii/postavlyaemye_lendy/coherent.
- Мощные волоконные лазеры и усилители. Каталог фирмы NKT Photonics A/S, Дания, 2014.

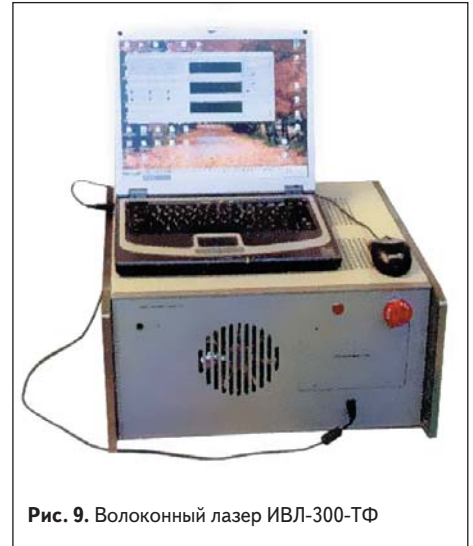


Рис. 9. Волоконный лазер ИВЛ-300-ТФ



Рис. 10. Типичный непрерывный иттербиевый волоконный лазер серии ИЛМ фирмы НТО «ИРЭ-Полюс»



Рис. 11. Волоконный иттербиевый лазер с диодной накачкой Zenith 10F Heavy Duty Industrial System