

АКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ

С ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ НАКАЧКОЙ

Прогресс в области полупроводников (п/п) в последние годы привел к созданию мощных лазерных диодов (ЛД) на основе соединений $A^{III}B^V$, излучающих в ближнем ИК-диапазоне (0,75–1,0 мкм). Высокая мощность и эффективность п/п ЛД, в сочетании с большим сроком службы, позволили использовать их для накачки твердотельных лазеров вместо традиционных ламп накачки. Этот факт анализирует автор статьи.

В последние годы практически все новые разработки лазеров и лазерных систем связаны с использованием п/п накачки, и в настоящее время происходит процесс замены традиционных твердотельных лазеров с ламповой накачкой на приборы нового поколения в промышленности, медицине и военной технике.

Предельные характеристики твердотельных лазеров с ламповой накачкой ограничиваются уровнем эффективной концентрации излучения накачки в активной среде. Для его повышения требуется применение крупногабаритных активных элементов, эффективно поглощающих излучение накачки. Спектрально широкополосное излучение ламп накачки – причина того, что только 25–30% мощности оптической накачки, поглощенной в активном элементе, идет на создание усиления в активной среде. Остальная часть переходит в тепло, вызывая температурные изменения показателя преломления, механические напряжения и двулучепреломление. Применение п/п лазеров для оптической накачки решает эти проблемы. Яркость п/п накачки на порядки превосходит яркость газоразрядных источников света, а спектральный состав ее излучения может быть согласован с полосами поглощения редкоземельных ионов-активаторов.

При этом эффективность использования п/п накачки может достигать 80–90%.

В современной лазерной технике широко используются материалы, легированные ионами неодима (Nd), например иттрий-алюминиевый гранат YAG:Nd, имеющий уникальное сочетание физико-химических и спектрально-люминесцентных свойств и отработанной технологии производства это-



Рис. 1 Композитные элементы YAG/YAG:Nd компании "ЭЛС-94" (Россия)

Параметры микролазеров на основе композитных активных элементов

Параметр	RL05-1064	RL05-1064G	RL05-946
Состав композита	YAG:Nd/YAG:Cr ⁴⁺	YAG:Nd/YAG:Cr ⁴⁺	YAG:Nd/YAG:Cr ⁴⁺
Длина волны генерации, нм	1064	532	946
Выходная мощность ($P_{\text{нак}}=1,8$ Вт), мВт	250–300	100–150	100...120
Частота следования импульсов, кГц	5–20	5–20	5...15
Коэффициент качества пучка, M ²	>1,2	>1,2	>1,2
Длительность импульса, нс	0,3–1,2	0,3–0,8	1,5...2
Начальное пропускание затвора, T ₀	0,65–0,9	0,65–0,9	0,9...0,95

го кристалла. Однако особенности п/п накачки: возможность концентрации оптической мощности в ограниченных объемах и малые плотности тепловыделения в активном материале – открывают широкую возможность использования других лазерных материалов, которые не могли применяться в лазерах с ламповой накачкой. Сегодня наряду с кристаллами YAG:Nd [1] в таких лазерах используются: ванадаты иттрия YVO₄:Nd [1] или гадолиния GdVO₄:Nd [2], лантан-скандиевый борат LSB:Nd [3], гадолиний-галлиевый гранат GGG:Nd и кристаллы фторидов – YLiF₄:Nd [1].

Высокая интенсивность излучения п/п накачки открыла возможность применения материалов, содержащих в качестве активатора ионы иттербия Yb³⁺, генерация в которых возможна лишь при очень высокой плотности мощности накачки. Разработка мощных лазеров на основе активных материалов, содержащих ионы Yb³⁺, – одно из важных технических достижений последних лет.

Использование п/п источников накачки в сочетании с достижениями в области оптоволоконных технологий привело к созданию нового типа приборов – лазеров на основе кварцевого волокна, легированного ионами Yb³⁺, дающих рекордные эффективность (20–30%) и выходные мощности (1–5 кВт). Лазеры этого типа уже заняли важное место в ряде практических применений [4].

Заметные успехи достигнуты и в области создания приборов, использующих концепцию дискового лазерного элемента на основе кристаллов, активированных ионами Yb³⁺, таких как YAG:Yb [5]. В настоящее время разработаны дисковые твердотельные лазеры с выходной мощностью 5–50 кВт и пространственными характеристиками выходного излучения, близкими к параметрам дифракционного ограничения и имеющие эффективность более 10%.

Важным направлением в создании лазеров с п/п накачкой является разработка композитных лазерных элементов, которые состоят из различных частей, объединенных в единое целое тем или иным способом. К числу используемых сегодня способов создания композитных элементов относится технология диффузионного сращивания однотипных кристаллов (diffusion welding) и сопряжение оптических деталей методом "оптического контакта" (optical bonding).

Метод высокотемпературного диффузионного сращивания кристаллов позволяет получать монолитные структуры, прочностные характеристики которых практически такие же, как и составляющих их кристаллов. Эта технология, к сожалению, позволяет создавать композитные элементы только из однотипных кристаллов. Технология "оптического контакта" дает возможность создавать многокомпонентные элементы, состоящие из комбинации разнородных кристаллов, в том числе активных, нелинейных, фототропных и др. Однако по прочностным свойствам такие композиты уступают композитным элементам, полученным по методу диффузионного сращивания. На рис.1 и 2 представлены образцы композитных элементов.

Практическая ценность таких элементов была показана в работе [1] на примере элементов из иттрий-алюминиевого граната для мощных лазеров с продольной накачкой, состоящих из двух частей – "чистого" YAG, не содержащего активатора, и активной области из YAG:Nd. При этом не активированная часть элемента являлась фактически тепловым буфером и механическим протектором, обеспечивающим эффективный теплоотвод и препятствующим возникновению значительных напряжений и деформации лазерного элемента при интенсивной лазерной накачке. Использование такого композитного элемента позволяет на порядок уменьшить термическое напряжение и наведенное двулучепреломление, а также существенно улучшить выходные характеристики лазера.

Другим примером успешного использования композитных лазерных элементов являются микрочип-лазеры с пассивной



Рис.2 Композитные элементы YVO₄/YVO₄:Nd компании ONYX OPTICS (США)



Рис.3 Микрочип-лазер RL05-1064G компании "ЭЛС-94" (Россия)

модуляцией добротности – новое семейство монокристаллических твердотельных лазеров, в которых малые размеры резонатора обеспечивают получение пикосекундных (150–700 пс) импульсов излучения с высокой (до 1 МВт) пиковой мощностью. Такие импульсы ранее получали лишь в лазерах с синхронизацией мод. Современный микрочип-лазер состоит из активной среды YAG:Nd или YAG:Yb и фототропной среды YAG:Cr⁴⁺ или YAG:V³⁺, соединенных между собой методом диффузионного сращивания. В таблице приведены параметры некоторых микрочип-лазеров, выпускаемых научным центром "ЭЛС-94" (общий вид лазера RL05-1064G см. на рис.3).

Приведенные примеры далеко не полностью охватывают направления разработок и экспериментальных исследований, нацеленных на создание активных элементов для твердотельных лазеров с диодной накачкой. Так, одно из наиболее ярких достижений последних лет – разработка технологии производства активных элементов из прозрачной кристаллической керамики, созданной на базе материалов, активированных ионами редких земель и переходных элементов [6]. Данная разработка открывает путь к использованию в

лазерах новых перспективных кристаллов, не применяемых ранее из-за ограничений, связанных с условиями выращивания. Аналогичные работы проводятся и в России. Все это свидетельствует о перспективности и больших потенциальных возможностях исследований в этом направлении. Целевые программы с необходимым финансированием могли бы способствовать значительному прогрессу таких разработок в России, консолидировать усилия инженеров и технологов, а также привлечь научные кадры к реализации имеющихся заделов и новых разработок.

ЛИТЕРАТУРА

1. **W.Koehler**. Solid State Laser Engineering. – Springer Verlag, 1999.
2. **A.I.Zagumenny** et al. Soviet Quantum Electronics, 1992, v.22, p.1071.
3. **J.P.Meyn, T.Jensen, G.Huber**. IEEE J. Quantum Electronics, 1994, v.30, p.913.
4. **V.Gaponsev** et al. – Proc. Conference on Laser and Electro-Optics Europe. – Munich, Germany, 2005, p.508.
5. **A.Giesen** et al. – Appl. Physics, 1994, B58, p.365.
6. **A.Ikesue** et al. – J. American Ceram. Soc., 1995, v.78, n.4, p.225-228.