

ЭФФЕКТИВНЫЙ 10-кВт Nd:YAG-ЛАЗЕР

С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Сегодня для резки и сварки металлов и других материалов широко используются лазеры. Скорость и эффективность процесса определяются в первую очередь мощностью лазерного источника. В недавнем прошлом в области киловаттных лазеров доминирующими были газовые (CO₂) лазеры. Сегодня их догоняют твердотельные и оптоволоконные лазеры. О мощных и эффективных твердотельных Nd:YAG-лазерах новой генерации для систем резки и сварки идет речь в этой статье [1].

ВВЕДЕНИЕ

Твердотельный лазер средней мощностью порядка 10 кВт на основе кристалла (цилиндрического стержня) алюмоиттриевого граната, легированного неодимом, в качестве активной среды разрабатывался нами для использования в системах высокоскоростной и точной резки и сварки материалов. В конструкции лазера модуль с лазерными диодами (ЛД) накачки состоял из нескольких ЛД, расположенных вокруг цилиндрического стержня кристалла, а резонаторная головка состояла из нескольких модулей ЛД-накачки, расположенными последовательно для достижения средней выходной мощности порядка 10 кВт на выходном модуле. В 1997 году был разработан прототип лазерной системы с ЛД-накачкой киловаттного класса, позволивший получить выходную мощность 1,8 кВт с эффективностью электрооптического преобразования порядка 14% [2]. В 1998-м был разработан новый модуль накачки мощностью 1 кВт и эффективностью 19% [3] в режиме непрерывного излучения (CW).

Чтобы достичь больших мощностей, мы экспериментировали с цилиндрическими стержнями Nd:YAG большой длины (203 мм) и в 1999 разработали 2-кВт систему с эффективностью 22% в режиме CW и 26% в режиме квазинепрерывного излучения (QCW) при работе с одним модулем ЛД-накачки

[4,5]. Эта система в 2001 году была доработана до уровня излучения 10 кВт. Нам удалось получить среднюю мощность 11,3 кВт в режиме CW и конфигурации с шестью головками и 7,2 кВт в комбинированном режиме CW-QCW (при этом объем головки был меньше 0,05 м³). Полученные экспериментальные результаты описаны в этой статье. В ней также приведены результаты экспериментальной резки 100-мм стальной пластины и сварки SUS-пластин.

МОЩНЫЙ МОДУЛЬ ЛД-НАКАЧКИ ВЫСОКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

На рис.1. показаны два типа модулей накачки: старый 1-кВт модуль накачки (а), в котором лазерный кристаллический

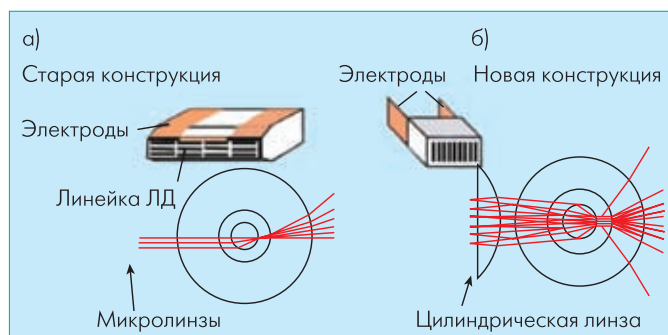


Рис.1 Конструкции модуля накачки: старая (а) и новая (б)

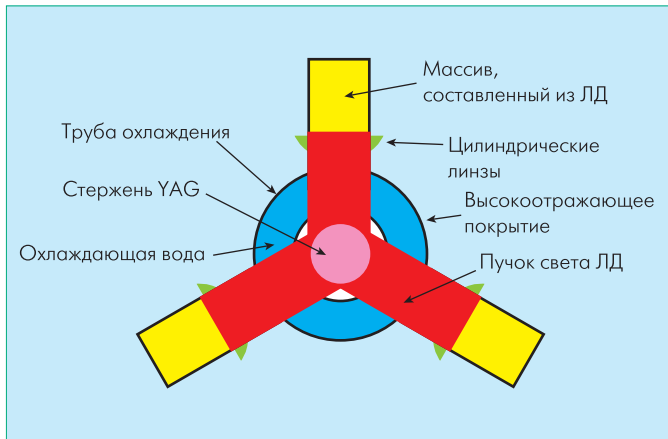


Рис.2 Схема расположения элементов модуля ЛД-накачки

Стержень накачивается с трех направлений вокруг него с электрической эффективностью 14% [2]. Основной причиной такой низкой эффективности были потери передачи на поверхности стержня, вызванные S-поляризацией света на выходе ЛД. Для улучшения передачи конструкция ЛД-накачки была изменена так, как показано на рис.1б. Детали конструкции показаны на рис.2.

В этой конструкции используется Р-поляризация света на выходе ЛД, который должен передаваться в стержень с малыми потерями на поверхности. Свет ЛД-накачки поступает в стержень с трех направлений. Лазерный стержень монтируется внутри трубки водяного охлаждения, внешняя поверхность которой имеет просветляющее (AR) и высокоотражающее (HR) покрытия для длины волны ЛД. Источник оптической накачки состоит из трех массивов, составленных из ЛД. Фотография такого массива показана на рис.3. Массив составлен из 36 линеек ЛД непрерывного излучения, расположенных с шагом 4,2 мм.

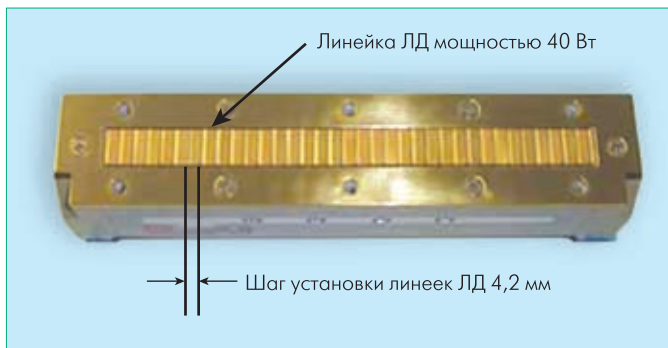


Рис.3 Схема массива лазерных диодов

Каждая линейка ЛД имеет выходную мощность 40 Вт. Излучение накачки от массива ЛД коллимируется в лазерный стержень с помощью цилиндрической линзы, расположенной перед каждым таким массивом ЛД. Переход от микролинз к коллимирующему лучи ЛД-устройству с цилиндрической линзой также помог уменьшить потери мощности при передаче.

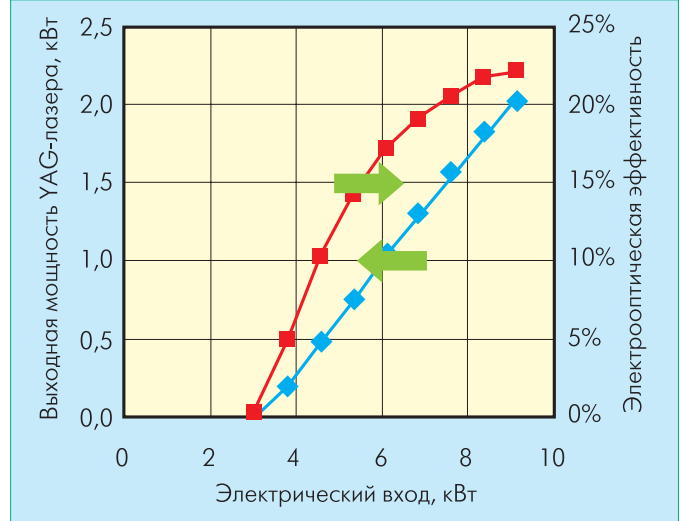


Рис.4 Зависимость выходной мощности и эффективности от входной мощности в режиме CW

ВОЛНОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДУЛЯ ЛД-НАКАЧКИ

Для начала новый модуль накачки был протестирован. Параметры лазерного стержня при этом были такими: диаметр – 8 мм, длина – 203 мм, уровень легирования Nd – 0,6%. Зеркала резонаторов находились на расстоянии 230 мм. Зеркало оптимальной связи ввода-вывода имело коэффициент отражения 70% для длины волны 1064 нм. Температура охлаждающей воды – 20°C. Было использовано два типа массивов ЛД: один – с непрерывным излучением (CW) типа SPL EN81-X компании Infineon, другой – с квазинепрерывным излучением (QCW) типа SPL UN81-X компании Infineon.

Зависимость выходной оптической мощности лазера от входной электрической мощности приведена на рис.4. Максимальная выходная мощность составила 2 кВт и была достигнута при мощности накачки примерно 9 кВт с оптической эффективностью 48% и электрооптической эффективностью 22%. С другой стороны, при использовании квазинепрерывного режима, показанного на рис.5, была получена оптическая эффективность 56% и электрооптическая эффективность 26%. Все данные по указанным эффективностям,

Оценка оптической и электрооптической эффективности

	1997	1998(1кВт)		1999(2кВт)	
	(1кВт)	CW	QCW	CW	QCW
Эффективность ЛД,%	41	41	34	47	46
Эффективность передачи,%	75	92	92	92	92
Эффективность поглощения,%	98	98	98	98	98
Эффективность верхнего состояния,%	72	72	72	72	72
Эффективность перекрытия пучка,%	93	95	95	95	95
Эффективность выделения,%	70	75	83	76	92
Электрооптическая эффективность,%	14	19	17	22	26

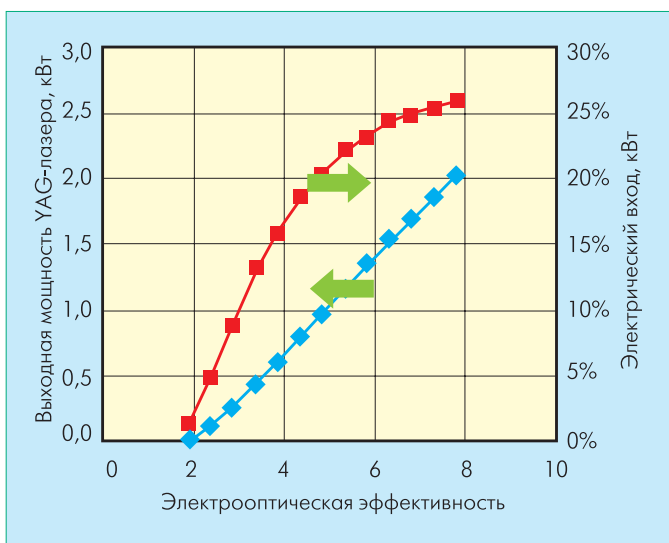


Рис. 5 Зависимость выходной мощности и эффективности от входной мощности в режиме QCW

полученные в ходе работы над проектом лазеров с ЛД-накачкой, сведены в таблице для сравнительного анализа.

Электрооптическая эффективность в непрерывном режиме в 1997 году была 14% с модулем 1кВт Nd:YAG. Она была улучшена до 19% в 1998 году благодаря изменению поляризации ЛД по отношению к поверхности стержня с направления S на направление P. В дальнейшем она была увеличена до 22% благодаря улучшению эффективности ЛД с 41% до 47%. Этот результат превысил то, что закладывалось в проекте.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕНЕРАЦИИ МОЩНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

После оценки характеристик модуля ЛД-накачки были оценены характеристики мощного оптического излучения лазера. Цель этого тестирования была в том, чтобы реализовать мощное излучение, используя конструкцию резонатора со многими головками. Конфигурация со многими головками, которая использует несколько головок накачки в одном лазерном резонаторе, удобна для увеличения лазерной мощности с сохранением тех же характеристик пучка, что и при одной головке. В этой конфигурации интервал между стержнями выбирался вдвое больше расстояния между стержнем и зеркалом, используемым в схеме генератора с одной головкой (рис.6).

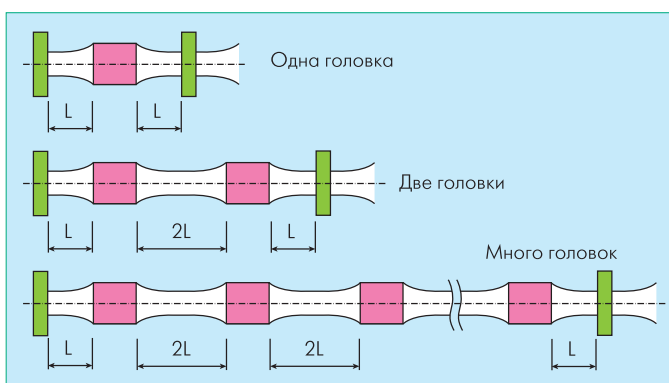


Рис. 6 Концепция использования многих головок лазерным генератором

В эксперименте лазерной генерации, который проводился в непрерывном режиме CW, использовались шесть новых модулей накачки, разработанных для одного резонатора. Схема установки показана на рис.7, а характеристики входа-выхода – на рис.8. Выход Nd:YAG-лазера на уровне 11,3 кВт был получен при мощности источника электрического питания 52,5 кВт, что соответствует электрооптической эффективности 22%. Мы могли бы линейно увеличить выходную мощность лазера без уменьшения эффективности, если сравнить достигнутый результат с тем, что был получен для CW в эксперименте с одним модулем (1,9 кВт выходная мощность и те же 22% эффективности).

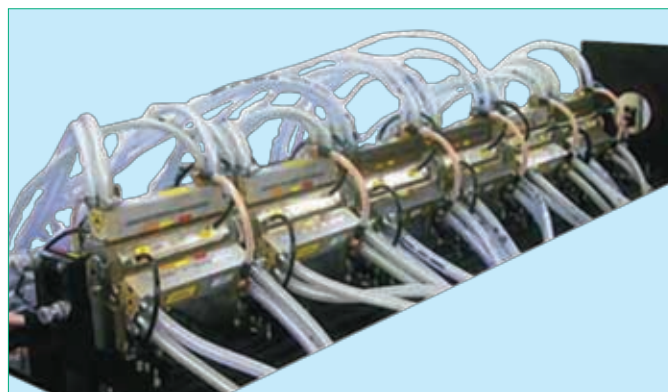


Рис. 7 Лазерный резонатор с шестью головками

В следующем эксперименте мы взяли три модуля с режимом CW и один модуль с режимом QCW и сформировали один резонатор с четырьмя головками. Характеристики входа-выхода такого лазера показаны на рис.9. В результате мы получили выходную мощность 7,2 кВт с той же электрооптической эффективностью 22%, как и для режима CW, но уже для комбинированного режима: CW-QCW. Вид формы волны на выходе лазера в комбинированном режиме показан на рис.10. На этом рисунке видно, что составляющие CW и QCW режимов перекрываются. Эксперименты показывают, что комбинированный режим дает возможность реализовать высокоскоростную лазерную резку и сварку высокого качества.

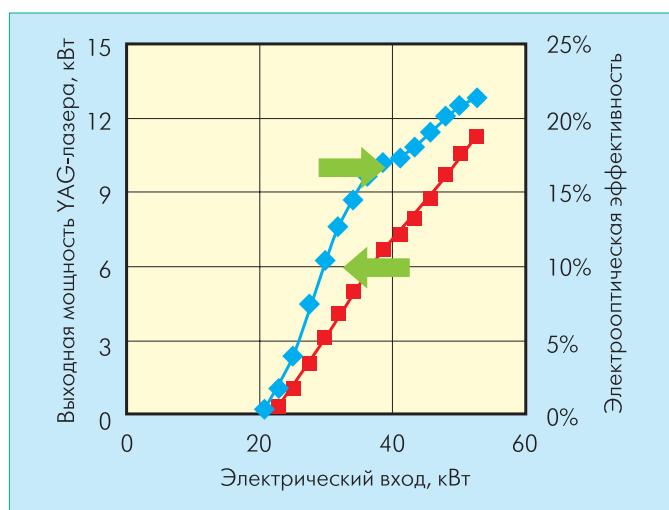


Рис. 8 Выходные характеристики лазера с шестью головками

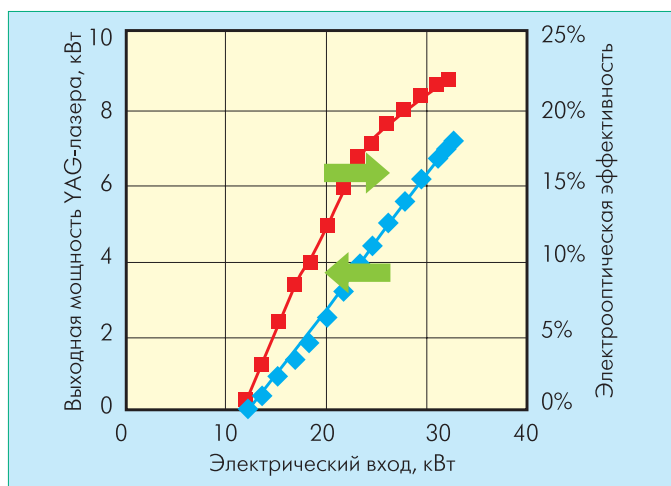


Рис.9 Выходные характеристики комбинированного (CW-QCW) режима работы

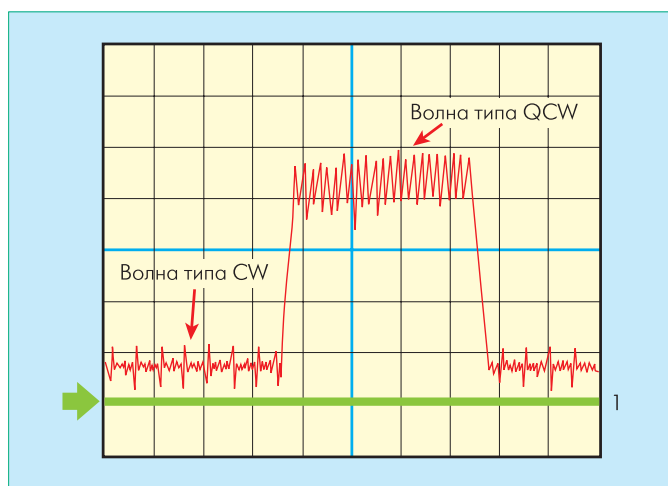


Рис.10 Форма волны CW и QCW при комбинированном режиме работы

ПРИМЕРЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РЕЗКЕ И СВАРКЕ

Для оценки возможностей разработанной модели Nd:YAG-лазера были проведены эксперименты по резке и сварке металлов, результаты которых кратко описаны ниже.

Эксперименты по резке металлов

Результаты экспериментов по резке металлов с помощью Nd:YAG-лазера с ЛД-накачкой приведены на рис.11 и 12. На рис.11 представлена фотография процесса лазерной резки металлического образца, а на рис.12 показан образец для

резки — клиновидный стальной блок SS400 толщиной 100 мм. В эксперименте использовался вариант лазера с тремя головками, генерирующий на выходе пучок оптической мощностью 3 кВт. Этот пучок передавался к месту резки с помощью оптического волокна. При этом мощность, переданная в точку резки, составляла 2,5 кВт, что было достаточно для резки стальных пластин толщиной 100 мм. Диаметр сердцевины оптического волокна составлял 0,6 мм. Ширина разреза со стороны входа была равна 1 мм, а со стороны



Рис.11 Эксперимент с лазерной резкой

выхода – 8 мм. В эксперименте применялась линза с фокусным расстоянием 200 мм, для фокусировки лазерного пучка, и вспомогательный газ (использовался кислород), который подавался со скоростью 80 литров/мин. В этих условиях скорость резки составляла 50 мм/мин.

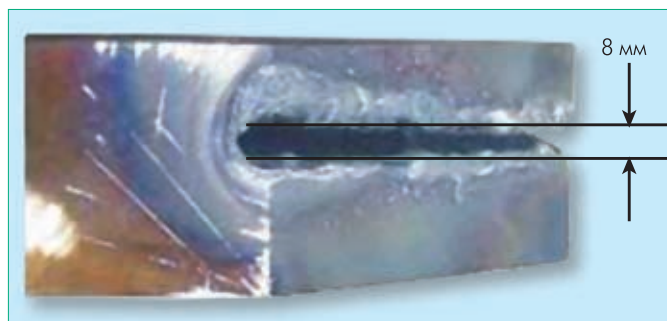


Рис.12 Образец для резки – клиновидной стальной блок типа SS400 с максимальной толщиной 100 мм

Эксперименты по сварке металлов

Ниже представлены эксперименты по лазерной сварке. Для них применялись образцы пластин SUS304, обычно используемые в подобных экспериментах. Мощность лазера в точке контакта составляла 2 кВт. Лазерный пучок подавался через оптическое волокно с диаметром сердцевины 0,3 мм.

При этом использовалась линза с фокусным расстоянием 200 мм, а также азот в качестве защитного газа. На рис.13 показаны поперечные сечения образцов, сваренных с различными скоростями: 50 мм/с (рис.13а), 100 мм/с (рис.13б) и 300 мм/с (рис.13в). Для всех скоростей получены хорошие рисунки сварки. Глубина проникновения составила: при 50 мм/с – 12,3 мм, при 100 мм/с – 8,7 мм и при 300 мм/с – 5,4 мм.

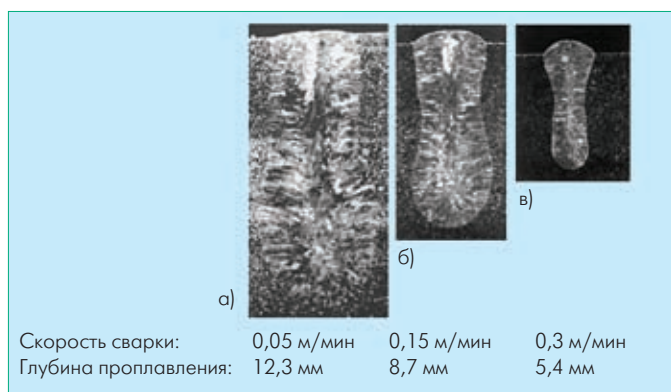


Рис. 13 Поперечные сечения свариваемых образцов типа SUS304 для трех разных скоростей

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе разработки твердотельных лазерных систем на кристаллических стержнях мощностью более 10 кВт, которые могут быть использованы для высокоскоростной резки и сварки материалов с высокой точностью, нами на сегодня (2001 год) получены следующие результаты:

- разработаны новые модули ЛД-накачки с оптической и электрооптической эффективностью 48 и 22%, соответственно, для режима непрерывного излучения (CW) и 56 и 26%, соответственно, для квазинепрерывного излучения (QCW);
- в непрерывном режиме получена максимальная мощность твердотельного (Nd:YAG) лазера 11,3 кВт с электроопти-

ческой эффективностью 22% от лазерного резонатора с шестью модулями ЛД-накачки;

- в комбинированном (CW-QCW) режиме была получена мощность 7,2 кВт с электрооптической эффективностью 22%.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Y.Akiyama** et al. Efficient 10 kW Diode-pumped Nd:YAG Rod Laser. – LaserOpto, v.33, No.4, 2001, p.46-49.
2. **A.Takada** et al. Advanced Solid-State Lasers. – OSA Trends in Optics and Photonics 26, OSA – Washington DC, 1999, p.21–23.
3. **A.Takada** et al. Advanced High-Power Lasers. – Proceedings of SPIE 3889, 2000, p.216–223.
4. **Y.Akiyama** et al. Advanced Solid-State Lasers. – OSA Trends in Optics and Photonics 34, OSA – Washington DC, 2000, p.48–51.
5. **A.Takada** et al. High-power Laser Ablation III. – Proceeding of SPIE 4065, 2000, p.782–789.

Перевод с англ. с согласия журнала LaserOpto

ОБ АВТОРЕ

Д-р. Ясухи́ро Акияма (Yasuhiro Akiyama) – Токио, Япония, инженер-электрик, получил степени бакалавра (1988), мастера (1990) и доктора (1993) в Университете Кейо, Иокогама (Япония). С 1993 года занимается исследованием и разработкой твердотельных лазеров с диодной накачкой в Исследовательском центре инженерного оборудования компании Тошиба, Иокогама (Япония). Член Японского общества прикладной физики.