

## ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ОСЕЙ АНИЗОТРОПНОГО КРИСТАЛЛА $\text{KGW:Nd}^{3+}$ В ОСВЕТИТЕЛЕ ЛАЗЕРА С ЕСТЕСТВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ НА ПРЕДЕЛЬНУЮ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЕГО РАБОТЫ С БОЛЬШИМИ ЧАСТОТАМИ ПОВТОРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2004 г. В. А. Алексеева\*, А. В. Лукин\*, канд. техн. наук; С. И. Ханков\*, доктор. техн. наук; У. Канг\*\*, доктор филос.; К.-Х. Ли\*\*

\* ВНИИ "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург

\*\* Korean Electrotechnology Research Institute, Changwon, Kyungnam, Korea

Представлены результаты исследования предельных режимов работы лазера периодического действия с естественным охлаждением на кристалле  $\text{KGW:Nd}^{3+}$ , которое показало возможность существенного увеличения продолжительности работы лазера с большими частотами повторения импульсов излучения за счет установки активного элемента в осветителе таким образом, чтобы направлению максимального температурного градиента в анизотропном кристалле, приводящего к его клиновидной термической деформации, соответствовало минимальное значение термооптической постоянной.

Коды OCIS: 140.3380, 140.3430, 140.3530, 140.3580, 140.6810.

Поступила в редакцию 21.10.2003.

Малогабаритные твердотельные лазеры (ТЛ) на кристаллах калий-гадолиниевого вольфрамата (КГВ)  $\text{KGW:Nd}^{3+}$  обеспечивают низкие пороги генерации на длине волны 1,06 мкм, что позволяет использовать такие лазеры без систем принудительной термостабилизации для работы в импульсно-периодическом режиме с частотами повторения десятки–сотни герц при начальной энергии излучения единицы–десятки миллиджоулей [1, 2]. Однако вследствие низкой эффективности теплоотвода рабочие частоты повторения лазеров с естественным охлаждением ограничены, а при больших частотах ограничено время работы до срыва генерации [2]. Термические эффекты в лазерах проявляются вследствие роста температуры активной среды, а также в результате термонаведенных искажений резонатора [3], которые при естественном охлаждении определяются односторонним теплопритоком от нагретого баллона лампы накачки (ЛН) и имеют характер оптического клина, что эквивалентно разъюстировке резонатора [4–7]. Клиновидная термическая деформация активного элемента (АЭ) может быть скомпенсирована оптическими [4] или тепловыми [5, 6] способами. Однако применение методов оптической компенсации в компактных конструкциях ТЛ часто невозможно, а методы тепловой компенсации (например, при помещении АЭ в сапфировую трубку) дают снижение оптического клина, а не его полное устранение [5, 6].

Особо остро стоит вопрос о минимизации термических деформаций резонаторов ТЛ на КГВ, который обладает не только умеренной теплопроводностью и относительно высоким значением главной термооптической постоянной, но и анизотропией теплофизических и термооптических свойств

по разным кристаллографическим и оптическим осям [8, 9]. В данной работе исследованы возможности повышения предельного времени работы ТЛ за счет минимизации термоискажения резонатора при соответствующей установке АЭ в отражателе для кристалла стандартной ориентации – выращенного вдоль кристаллографической оси 010 [8, 9].

Ранее [2, 7] были введены характеристики, определяющие работоспособность ТЛ с естественным охлаждением. Первой из них является предельная частота повторения импульсов излучения  $f_n$ , при которой лазер может работать неопределенно долгое время. Другой характеристикой является предельное время работы  $\tau_n$  лазера с частотой повторения импульсов  $f \gg f_n$ . Этот последний случай характеризуется тем, что число импульсов от начала работы до срыва генерации  $N$  не зависит от частоты следования импульсов  $N = \tau_n f_n$ . Поскольку эти две характеристики связаны между собой, достаточно ограничиться анализом предельного времени работы ТЛ с большой частотой, которое можно быстро определить в эксперименте [2]. Тем самым достигается быстрая оценка границ, отделяющих возможные режимы работы лазера от недостижимых.

Поскольку теоретический анализ из-за неопределенности ряда параметров может быть проведен только качественно, целесообразно проведение экспериментальных исследований. Такие исследования проводились в конструкции ТЛ с одноламповой осветительной системой, включающей полный трубчатый отражатель (кварцевая трубка с наружным серебряным покрытием)  $\varnothing 22 \times 40$  мм, ксенонную импульсную лампу накачки ИИП 3×45 и АЭ на основе кристалла КГВ. Расстояние между осями ЛН и АЭ со-



Таблица 1. Характеристики вариантов исследуемых лазеров

Номер варианта лазера	Размер активного элемента, мм	Концентрация неодима в КГВ (весовые проценты)	Коэффициент отражения выходного зеркала резонатора	Порог генерации, Дж	Наличие сапфировой трубки на активном элементе
1	Ø5×50	2	0,9	0,8	-
2	Ø5×50	3	0,9	0,65-0,72	-
3	Ø3×46	3	0,9	0,6	-
4	Ø3×46	3	0,79	0,8	+

ставляло 7 мм. Резонатор состоял из плоских зеркал, одно из которых имело коэффициент отражения 99,5%; расстояние между зеркалами 180 мм.

Всего исследовались четыре варианта ТЛ, отличающиеся параметрами АЭ и резонатора, что отражено в табл. 1. В последнем (четвертом) варианте АЭ помещался в сапфировую трубку с наружным диаметром 6,3 мм и с толщиной стенки 1,5 мм, которая на 20 мм выступала за пределы осветительной камеры. Выдвинутая за пределы нагретой зоны часть трубки способствует понижению уровня температуры как сапфировой трубки, так и АЭ. Высокая теплопроводность сапфира обеспечивала выравнивание температуры в сечении АЭ, что обеспечивало снижение его клиновидной термической деформации. В осветительной системе осуществлялась вертикальная компоновка, при которой АЭ располагался под ЛН. В каждом из описанных вариантов осуществлялась установка АЭ двумя способами: так, чтобы плоскость поляризации генерируемого излучения была перпендикулярна к плоскости, проходящей через оси ЛН и АЭ, а во втором случае – параллельно. Для краткости эти два варианта будем называть соответственно горизонтальной и вертикальной ориентациями поляризации.

В табл. 2 представлены результаты измерений зависимости энергии излучения от энергии накачки в первом импульсе, а также предельного времени работы ТЛ с частотой 50 Гц для всех вариантов, описанных в табл. 1. Как видно из данных таблицы, для горизонтальной ориентации предельное время работы  $\tau_1$  превышает предельное время  $\tau_2$  для вертикальной ориентации кроме одного случая (вариант 2). В этом отдельном случае для вертикальной ориентации реализовывался меньший порог генерации (0,65 Дж), чем при горизонтальной ориентации (0,72 Дж), хотя в зависимости энергии излучения от энергии накачки различий для двух ориентаций не наблюдалось. Измерение пороговых значений энергии накачки при разных коэффициентах отражения выходного зеркала резонатора показало, что во всех случаях порог генерации для вертикальной ориентации в данном варианте был ниже на ~10%. Понижение порога генерации повышает устойчивость работы ТЛ не только к клиновидной деформации, но и к нагреву АЭ [2, 7, 10], что и дает в результате заметное увеличение предельного времени работы  $\tau_n$ .

На рис. 1 и 2 представлены зависимости  $\tau_n$  от энергии накачки для всех восьми исследованных вариантов (для каждого из четырех вариантов исследуемых лазеров).

Таблица 2. Зависимость энергии излучения и предельного времени работы лазера с частотой повторения 50 Гц от энергии накачки

Вариант лазера	Параметры режима работы	Энергия накачки, Дж					
		1	1,4	2	2,5	3,6	4,9
1	E, МДж	1	2,5	4	6	10	14
	$\tau_1$ , с	6	10	12	12,2	10,2	8,4
	$\tau_2$ , с	2,5	2,7	3	3,2	3,6	3,7
2	E, МДж	3	4	7	10	17	26
	$\tau_1$ , с	2	2,4	2,8	3	3,3	3,4
	$\tau_2$ , с	5	8	5,7	5,3	4,9	4,7
3	E, МДж	1	2,5	4	6	9	14
	$\tau_1$ , с	15	17	15	12,8	9,5	—
	$\tau_2$ , с	7	8	9	8	4	—
4	E, МДж	2	3,5	6,5	10	16	20
	$\tau_1$ , с	60	82	67	45	30	18
	$\tau_2$ , с	17	45	37	30	22	17



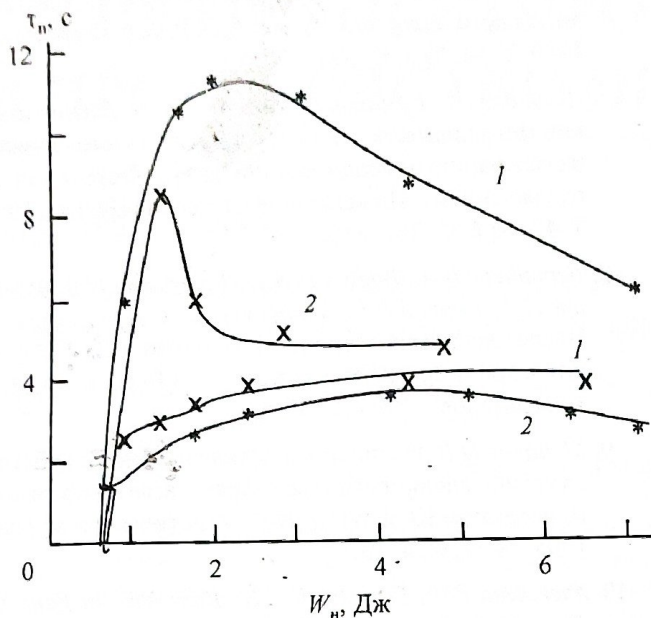


Рис. 1. Зависимости предельного времени работы лазера на кристалле КГВ диаметром 5 мм с частотой повторения импульсов 50 Гц от энергии накачки. 1 – кристалл с содержанием неодима 2%, 2 – 3%. Звездочками обозначены экспериментальные данные, полученные при горизонтальной ориентации плоскости поляризации генерируемого излучения, крестиками – при вертикальной.

довались случаи двух ориентаций АЭ, устанавливаемых его разворотом вокруг оси на  $90^\circ$ ). Данные рисунков получены из независимых от представленных в табл. 2 серий измерений, осуществленных при иных значениях энергии накачки. Во всех сериях измерений наблюдалась хорошая воспроизводимость результатов. За исключением второго варианта, во всех остальных случаях предельное время работы  $\tau_n$  наибольшее при горизонтальной ориентации поляризации, которая соответствует наименьшей величине термооптической постоянной ( $W$ ) в направлении прохождения теплового потока от нагретого баллона ЛН через сечение АЭ – сверху вниз.

В зависимости  $\tau_n(W_n)$  устойчиво наблюдается наличие оптимального значения энергии накачки, соответствующего примерно двух–трехкратному превышению над порогом, при котором предельная продолжительность работы ТЛ максимальна. Наибольший выигрыш по  $\tau_n$  за счет оптимальной ориентации кристалла КГВ в осветителе относительно направления на ЛН реализуется до и вблизи оптимальных значений  $W_n$ . При дальнейшем повышении энергии накачки этот выигрыш снижается вследствие возрастания роли нагрева АЭ с ростом мощности накачки. При уменьшении концентрации неодима в КГВ и при уменьшении диаметра АЭ  $\tau_n$  повышается, что, однако, сопровождается потерей в величине энергии излучения.

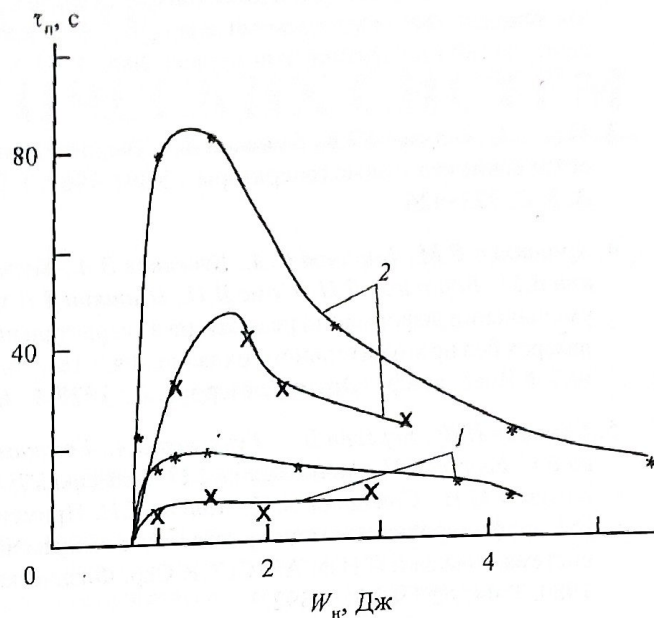


Рис. 2. Зависимости предельного времени работы лазера на кристалле КГВ диаметром 3 мм с концентрацией неодима 3%, работающего с частотой повторения 50 Гц, от энергии накачки при отсутствии трубки на активном элементе (1) и при помещении активного элемента в сапфировую трубку (2). Звездочками указаны данные при горизонтальной ориентации поляризации излучения, крестиками – при вертикальной.

Помещение АЭ в сапфировую трубку обеспечивает значительное увеличение продолжительности работы ТЛ. При этом можно добиться даже повышения выходной энергии излучения за счет снижения коэффициента отражения выходного зеркала резонатора, что приводит к уменьшению величины  $\tau_n$  (которая тем больше, чем больше коэффициент отражения зеркала [2, 7]), однако конечный выигрыш все равно велик. Но и в этом случае наилучшая ориентация кристалла КГВ обеспечивает дополнительный двукратный выигрыш по величине  $\tau_n$  в области оптимальных значений  $W_n$ , когда реализуется энергия излучения в первом импульсе 3,5–6,5 мДж.

Исследования, проведенные для кристалла КГВ стандартной ориентации, показали важность выбора наилучшей ориентации анизотропного кристалла КГВ в осветителе и подкрепляют высказанные в работе [9] предположения о перспективности использования атермальных кристаллов КГВ, в которых ориентация кристаллографических и оптических осей относительно оси АЭ обеспечивает в сечении АЭ значения термооптических коэффициентов, близких к нулевым.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Musset O., Boquillon J.P. Flash-lamp Nd:KGW laser at repetition rates up to 50 Hz // Appl. Phys. 1997. V. 65. P. 13–18.

2. *Волынкин В.М., Лукин А.В., Саховский С.Е., Ханков С.И.* Малогабаритный твердотельный лазер с частотой повторения до 100 Гц // *Оптический журнал*. 2000. Т. 67. № 8. С. 74–79.
3. *Мак А.А., Ананьев Ю.А., Ермаков Б.А.* Твердотельные оптические квантовые генераторы // *УФН*. 1967. Т. 92. В. 3. С. 373–426.
4. *Аршишкин В.М., Баранов С.А., Бученков В.А., Волынкин В.М., Воронцов Д.Н., Сомс Л.Н., Шашкин В.В.* Об уменьшении деформации резонатора в твердотельных лазерах без принудительного охлаждения // *Тез. докл. на 2-й Всес. конф. "Оптика лазеров"*. Л.: 1979. С. 60.
5. *Балашов И.Ф., Березин Б.Г., Бученков В.А., Евдокимова В.Г., Егоров Л.П., Затуловский Л.М., Кравецкий Д.Я., Поляков М.И., Степанов А.И., Ханков С.И.* Применение профилированных монокристаллов в импульсных системах накачки // *Изв. АН СССР. Сер. Физическая*. 1980. Т. 44. № 2. С. 389–392.
6. *Балашов И.Ф., Березин Б.Г., Егоров Л.П., Затуловский Л.М., Кравецкий Д.Я., Письменный В.А., Поляков М.И., Ханков С.И.* Применение монокристаллических труб для выравнивания температуры в активной среде твердотельного лазера // *Изв. АН СССР. Сер. Физическая*. 1980. Т. 44. № 2. С. 393–396.
7. *Дульнев Г.Н., Ермаков Б.А., Ханков С.И.* Аналитический метод расчета тепловых процессов и их влияние на генерацию в твердотельном лазере с естественным охлаждением // *Инженерно-физический журнал*. 1982. Т. 42. № 2. С. 307–313.
8. *Беренберг В.А., Васильев А.Е., Гульбинас И.А., Жиленис А.А., Коркин В.В., Мочалов И.В., Сакалаускас С.В.* Исследование анизотропии термооптических aberrаций в кристалле КГВ // *Тез. докл. VI Всес. конф. "Оптика лазеров"*. 1990. С. 60.
9. *Мочалов И.В.* Нелинейная оптика лазерного кристалла калий-гадолиниевого вольфрамата, активированного неодимом  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2:\text{Nd}^{3+}$  // *Оптический журнал*. 1995. № 11. С. 4–15.
10. *Алексеева В.А., Газарский С.В., Канг Ук, Ли Кенг Хи, Лукин А.В., Сибирев М.Ю., Ханков С.И.* Температурная зависимость энергетических параметров  $\text{KGW}:\text{Nd}^{3+}$ -лазера, генерирующего на длинах волн 1,06 и 1,35 мкм // *Оптический журнал*. 2003. Т. 70. № 2. С. 33–39.