

УДК 535:621.373.8;535:530.182:621.372.623

А. А. БУЙ, В. И. ДАШКЕВИЧ, В. А. ОРЛОВИЧ

НЕПРЕРЫВНЫЙ ДИОДНО НАКАЧИВАЕМЫЙ Nd:KGd(WO₄)₂/КТР-ЛАЗЕР С ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫМ УДВОЕНИЕМ ЧАСТОТЫ

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси

(Поступила в редакцию 27.02.2015)

Введение. Недавно семейство Eu-легированных материалов, обеспечивающих генерацию вынужденного излучения и свечение фосфоресцирующих сред в видимой области спектра, пополнилось монокристаллами двойных вольфраматов Eu:KRE(WO₄)₂ (Eu:KREW), где RE = Gd, Y и Lu [1–3]. Спектроскопические исследования показывают, что наиболее сильные линии поглощения Eu:KREW лежат в ультрафиолетовой, фиолетовой, синей и зеленой областях спектра. С точки зрения реализации генерации с использованием объемного одиночного монокристалла предпочтительно осуществлять накачку в полосу поглощения ${}^7F_1 - {}^5D_1$ (534 нм), поскольку излучение из зеленой области спектра не вызывает окрашивания матрицы KREW, как это свойственно более коротковолновому излучению, принадлежащему фиолетовой и особенно ультрафиолетовой области спектра.

Однако осуществление накачки Eu:KREW-кристаллов в полосу ${}^7F_1 - {}^5D_1$ имеет определенные трудности. Во-первых, до сих пор еще не решена проблема создания для зеленой области спектра лазерных диодов, мощность которых была бы сравнимой с мощностью диодов, широко используемых для накачки Nd-содержащих лазеров на длинах волн 808 и 880 нм (~1–30 Вт). Пока лучшие разработки, например [4], характеризуются мощностью ~0,1 Вт, при этом наибольшая длина волны генерации диода лежит в коротковолновой области полосы ${}^7F_0 - {}^5D_1$. Во-вторых, полоса ${}^7F_0 - {}^5D_1$, имеющая максимум поглощения на $\lambda \sim 534$ нм, достаточно узка. Ее полуширина не превышает ~1,5 нм. В силу этого хорошо разработанные на данный момент непрерывные Nd:YAG-, Nd:YVO₄- и Nd:GdVO₄-лазеры с удвоением частоты, обеспечивающие на $\lambda = 532$ нм мощность ~3,5 Вт [5, 6], практически малоэффективны для накачки Eu:KREW-сред.

Запись поляризационных спектров моноклинных кристаллов Eu:KREW показывает, что их накачка в полосу поглощения ${}^7F_1 - {}^5D_1$ может быть успешно осуществлена излучением второй гармоники (ВГ) Nd:KGdW-лазера, имеющим длину волны 533,6 нм. Например, для кристалла Eu:KGdW коэффициент поглощения на данной длине волны всего лишь в ~2 раза ниже пикового значения на $\lambda = 534,2$ нм. Именно с использованием импульсного (модуляция потерь) Nd:KGdW-лазера с удвоением частоты впервые для Eu-легированной среды (25%Eu:KGdW) была получена генерация на неосвоенном до публикации [1] переходе ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_4$, обеспечивающем темно-красное излучение на $\lambda \sim 703$ нм.

Известно, что матрицы KREW активны к вынужденному комбинационному рассеянию (ВКР). В силу этого высокоэффективные Nd:KGdW-лазеры с ламповой и диодной накачкой продемонстрированы как на длинах волн основных лазерных переходов ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ [7–9] и ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{13/2}$ [10–12] (1067,2 и 1351 нм соответственно), так и на длинах волн стоксовых компонент, генерируемых в результате ВКР-самопреобразования основного лазерного излучения (1180 [13], 1500 [14] и 1538 [15] нм). Сочетание ВКР-преобразования с эффектом генерации ВГ или же суммарной частоты позволяет получать с помощью Nd:KGdW-лазеров когерентное излучение в желтой области спектра на длинах волн 560 [16] и 590 [17] нм. Имеются сообщения и о Nd:KGdW-лазерах

с удвоением частоты основного излучения на $\lambda = 1,0672$ мкм [18–19]. Однако высокая мощность ВГ характерна лишь для Nd:KGdW-лазеров с модуляцией потерь. Если касаться реализации непрерывной или квазинепрерывной генерации Eu:KReW-лазеров, то мощность известных (напр., [18]) Nd:KGdW-лазеров с диодной накачкой, непрерывно излучающих на $\lambda = 533,6$ нм, невысока и, как правило, не превышает нескольких десятков милливатт.

Цель настоящей работы – разработка и исследование как непрерывного, так и квазинепрерывного Nd:KGdW/КТП-лазера с продольной диодной накачкой и внутриврезонаторным преобразованием основного излучения канала ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ в ВГ, мощность которого достигает ваттного уровня. Основное предназначение данного лазера с удвоением частоты – создание квазинепрерывных и непрерывных лазерных систем Nd:KGdW/Eu:KReW, излучающих на длине волны ~ 703 нм.

Экспериментальная часть. Оптическая схема Nd:KGdW-лазера с внутриврезонаторной генерацией ВГ приведена на рис. 1. В качестве активного элемента используются кристаллы Nd:KGdW с концентрацией ионов неодима ~ 3 ат.%. Кристаллы вырезаны в виде пластинок размером $1,2(N_m) \times 6(N_g) \times 10(N_p)$ мм и $1,2(N_m) \times 6(N_p) \times 5(N_g)$ мм (соответственно, N_p - и N_g -срез). Используемые Nd:KGdW-элементы обеспечивают генерацию излучения, линейно поляризованного вдоль оси N_m . Рабочие грани кристаллов размером $1,2 \times 6$ мм просветлены на длине волны 1067,2 нм. Полированные грани размером 6×10 мм (кристалл N_p -среза) и 6×5 мм (кристалл N_g -среза) используются для охлаждения элементов. Каждый из кристаллов обернут индиевой фольгой толщиной ~ 300 мкм и закреплен в медном держателе. Охлаждение держателя осуществляется термоэлектрическим способом с использованием элемента Пельтье.

Для накачки элементов Nd:KGdW используется лазерный диод с длиной волны ~ 879 нм и выходной мощностью до 30 Вт. Излучение накачки транспортируется оптическим волокном с внутренним диаметром 100 мкм и фокусируется в активном элементе системой линз. Асферическая линза с фокусным расстоянием 12 мм используется в качестве коллимирующей. Фокусировка излучения накачки в Nd:KGdW-элементе осуществляется асферической линзой с фокусным расстоянием 50 мм. Диаметр пятна накачки, измеренный методом острого движущегося края, составляет в перетяжке ~ 500 мкм. Коэффициент отражения рабочих граней Nd:KGdW в области 879 нм не превышает 2 %.

Квазинепрерывный режим генерации Nd:KGdW-лазера обеспечивается использованием механического прерывателя излучения накачки. Прерыватель расположен между фокусирующей линзой и зеркалом M_1 и обеспечивает работу лазера с рабочим циклом ≈ 10 %. При этом лазером генерируются импульсы миллисекундного диапазона длительностей. Длительность импульсов накачки и, следовательно, импульсов ВГ регулируется скоростью вращения диска прерывателя. Для получения непрерывного режима работы Nd:KGdW-лазера механический прерыватель устанавливается таким образом, чтобы не препятствовать прохождению излучения лазерного диода.

Генерация основного лазерного излучения на $\lambda = 1067,2$ нм осуществляется в высокодобротном резонаторе, образованном оконечными зеркалами M_1 и M_2 . Входное (с точки зрения накачки) зеркало M_1 является прозрачным для излучения накачки ($T > 96$ %). Оба оконечных зеркала являются высоко отражающими ($R > 99,9$ %) на длине волны лазерного излучения. Длина резонатора лазера L_p составляет 55 мм. Плоское промежуточное зеркало M_3 является прозрачными ($T \sim 99$ %) для лазерного излучения и высоко отражающим для излучения ВГ ($R > 99,8$ % на $\lambda = 533,6$ нм). Данное зеркало препятствует попаданию излучения с удвоенной частотой в Nd:KGdW-кристалл,

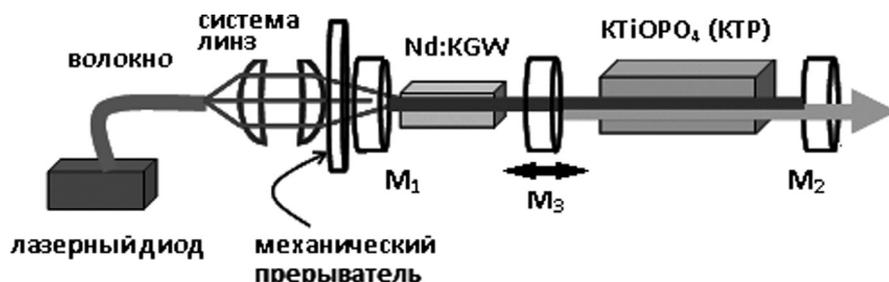


Рис. 1. Схема Nd:KGdW/КТП-лазера с внутриврезонаторным удвоением частоты

где возможно его сильное поглощение. Вывод излучения ВГ во внешнее пространство осуществляется через зеркало M_2 . Коэффициент отражения этого зеркала на $\lambda = 533,6$ нм составляет $\sim 5\%$. В экспериментах использовались как плосковогнутые входные и выходные зеркала с радиусом кривизны $r_{\text{вх,вых}} = 100$ мм, так и плоские входные и выходные зеркала ($r_{\text{вх,вых}} = \infty$). Промежуточное зеркало M_3 установлено на механическую подвижку. Расстояние между зеркалами M_2 и M_3 регулируется так, что разность фаз волн лазерного излучения и излучения ВГ на входе в кристалл КТР является кратной 2π (максимальная эффективность генерации ВГ).

Для преобразования основного лазерного излучения во вторую гармонику используется кристалл КТР размером $4 \times 4 \times 10$ мм, обеспечивающий II тип фазового синхронизма ($\theta = 90^\circ$, $\varphi = 20,4^\circ$). Торцы кристалла просветлены на длинах волн 533,6 и 1067,2 нм. Кристалл установлен так, что его боковые поверхности составляют угол 45° с осью N_m кристалла Nd:KGdW. Температура кристалла КТР поддерживается постоянной термоэлектрическим способом с использованием элемента Пельтье.

Для определения мощности излучения использовались измерительные термоэлектрические головки 3A-P-SH и F150A-BB (Ophir). Временная структура излучения регистрировалась осциллографом Tektronix TDS 3052. Пространственные распределения плотности мощности в выходном пучке регистрировались ПЗС-камерой BeamON (DUMA OPTRONICS LTD).

Результаты и их обсуждение. Исследования показали, что доля поглощенной мощности накачки составила $\sim 55\%$ для кристалла N_p -среза и $\sim 42\%$ для кристалла N_g -среза. Однако кристалл N_g -среза характеризовался вдвое меньшей площадью тепловода. В силу этого допустимая мощность падающей непрерывной накачки для него была ограничена величиной 15,9 Вт, в то время как кристалл N_p -среза допускал накачку с максимальной мощностью 27,1 Вт. При мощностях падающей накачки свыше указанных величин возникающие в кристаллах термомеханические напряжения были столь велики, что приводили к их растрескиванию.

В случае резонатора с конфигурацией $r_{\text{вх}} = 100$ мм, $r_{\text{вых}} = \infty$ перетяжка пучка лазерного излучения по определению находится на плоском зеркале, и с точки зрения генерации ВГ такой резонатор обеспечивает высокую плотность мощности основного излучения в кристалле КТР при расположении его около выходного отражателя. В случае непрерывного режима работы зависимость мощности ВГ $P_{\text{ВГ}}$ от мощности накачки $P_{\text{нак}}$ для Nd:KGdW-кристалла N_p -среза, находящегося в таком резонаторе, отображена на рис. 2, а кривой 1. Порог генерации на удвоенной частоте составил 0,3 Вт. Вначале мощность ВГ монотонно возрастала, однако, достигнув при критическом уровне накачки $P_{\text{кр}} \sim 19,7$ Вт максимальной величины $\sim 0,6$ Вт, в дальнейшем снижалась. Согласно [20], такое поведение мощности $P_{\text{ВГ}}$ объясняется тем, что формирующаяся в активном Nd:KGdW-элементе термолинза сначала подводит резонатор лазера, предназначенный

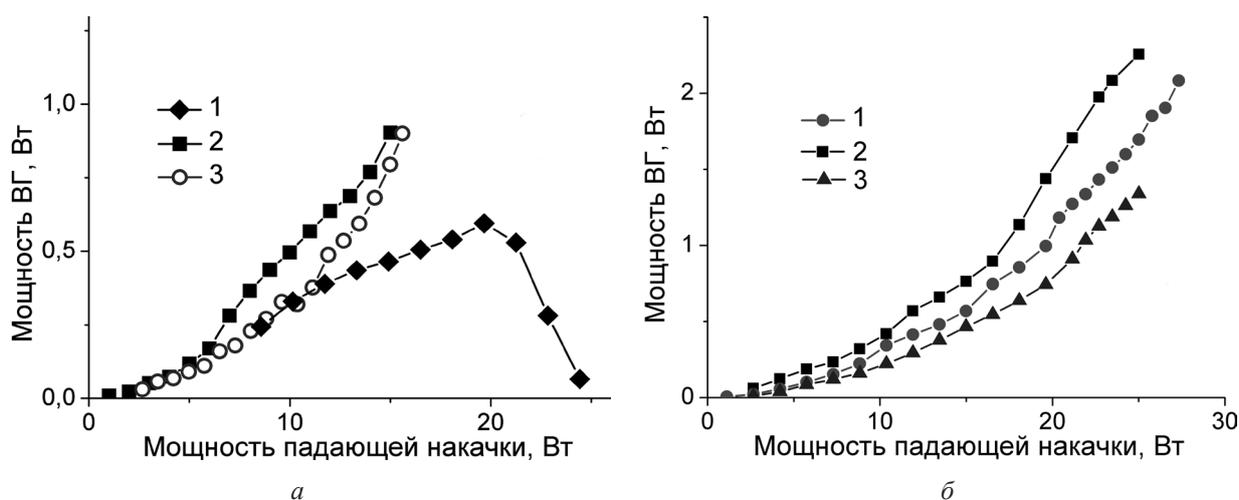


Рис. 2. Зависимость мощности ВГ от мощности падающей накачки для Nd:KGdW-кристаллов N_p - (кривая 1) и N_g -срезов (кривые 2, 3) при непрерывном (а) и квазинепрерывном (б) режимах генерации; параметры резонатора – $r_{\text{вх}} = 100$ мм, $r_{\text{вых}} = \infty$ (кривые 1, 2) и $r_{\text{вх}} = \infty$, $r_{\text{вых}} = 100$ мм (кривая 3)

для генерации основного излучения на $\lambda = 1067,2$ нм, к границе зоны устойчивости, а затем делает его неустойчивым.

Известно (напр., [21]), что в Nd:KGdW-элементах N_p -среза термолинза является астигматической, при этом ее оптические силы в плоскостях $N_m N_p$ и $N_g N_p$ имеют разные знаки. Полагая, что термическая линза расположена вблизи входного зеркала и используя формулы (13.11)–(13.14) из [20], можно определить, что критическими значениями оптической силы термолинзы, при которых резонатор исследуемого лазера находится на границе устойчивости, являются $D_1^I = 1/r_{\text{BX}}$ и $D_2^I = 1/(L_p - l + l n^{-1}) - 1/r_{\text{BX}}$, где l – длина Nd:KGdW, n – его показатель преломления ($n \approx 2$ [22]). Приведенные формулы показывают, что при увеличении длины резонатора значение D_1^I остается неизменным и составляет 10 м^{-1} , а D_2^I изменяется от $\sim 84 \text{ м}^{-1}$ (все элементы Nd:KGdW/КТР-лазера расположены вплотную) до 0. Это обстоятельство позволяет сделать вывод, что снижение мощности $P_{\text{ВГ}}$ (выход резонатора по одному из направлений в область неустойчивости) обусловлено фокусирующей составляющей термолинзы Nd:KGdW. Для нее критическое значение оптической силы достигается при меньшем уровне накачки, чем для составляющей, обладающей рассеивающим эффектом. Это подтверждается и тем фактом, что увеличение расстояния между оконечными зеркалами резонатора до 75 мм привело к снижению параметра $P_{\text{кр}}$ до 17,3 Вт.

Расчеты с применением закона ABCD показывают, что для рассматриваемой конфигурации резонатора размер моды TEM_{00} (основное излучение) на выходном зеркале уменьшается при увеличении оптической силы фокусирующей линзы в активном элементе и увеличивается при возрастании оптической силы рассеивающей линзы. Данное обстоятельство приводит к тому, что сечение каустики основного излучения в резонаторе, являясь круглым при небольших превышениях порога, становится при высоких уровнях накачки эллиптическим, и вследствие этого эллиптическим является и выходной пучок ВГ (рис. 3, а). При регистрации распределения пучок ВГ попадал в ПЗС-камеру, расположенную на расстоянии 18 см от выходного зеркала лазера, отразившись от поверхности пластинки.

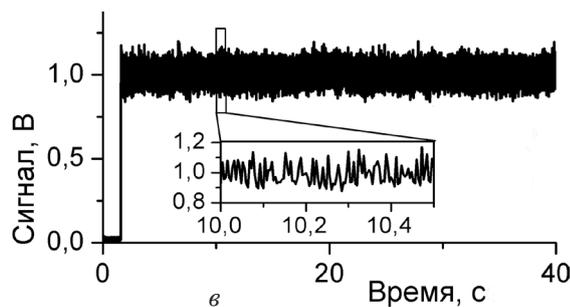
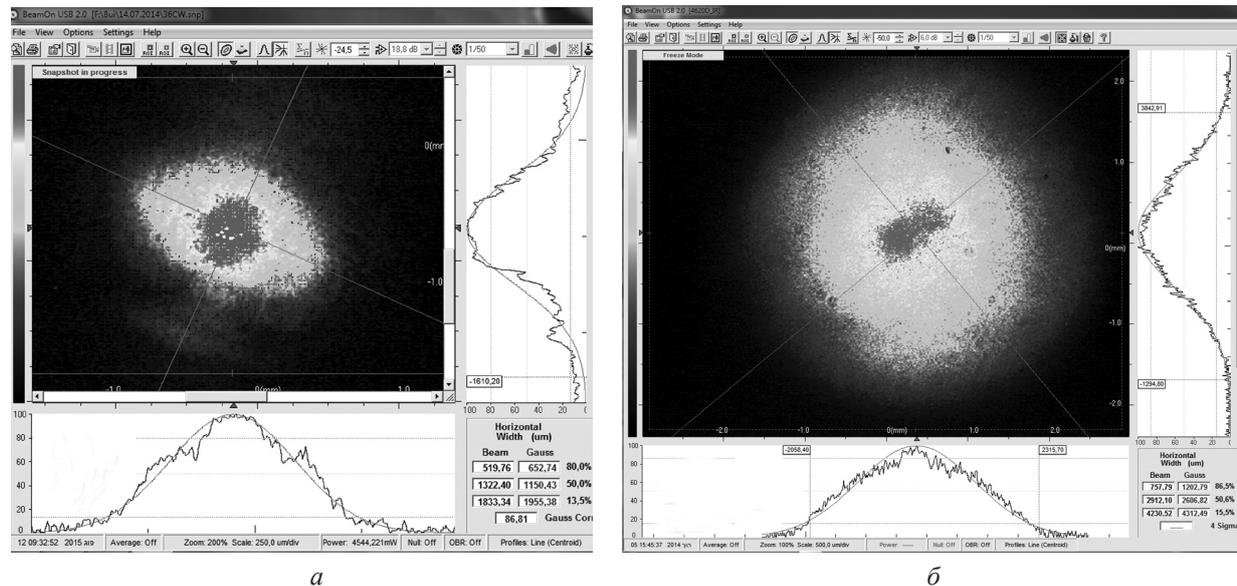


Рис. 3. Пространственное распределение интенсивности в непрерывном пучке ВГ в случае Nd:KGdW-кристаллов N_p - (а) и N_g -срезов (б) и осциллограммы непрерывного излучения ВГ при использовании лазерного элемента N_g -среза (в)

Термолинза Nd:KGdW-кристалла N_g -среза также является астигматической [21]. Ее оптические силы в плоскостях $N_m N_g$ и $N_p N_g$ характеризуются разными значениями, однако в отличие от термолинзы кристалла N_p -среза имеют одинаковый положительный знак, т. е. линза является фокусирующей. Зависимость $P_{ВГ}(P_{нак})$ для активного элемента N_g -среза, помещенного в резонатор с вышеупомянутой конфигурацией, проиллюстрирована на рис. 2 кривой 2. Как видно, эффективность преобразования основного излучения в ВГ в случае кристалла N_g -среза более высокая. Это связано с тем, что при непрерывной накачке элемента N_g -среза из-за одинаковых знаков оптических сил составляющих термолинзы в направлениях N_g и N_m координатная зависимость волновых aberrаций оптического пути между зеркалами резонатора (в плоскости, ортогональной оси резонатора) является не такой сложной, как в случае элемента N_g -среза. Порог генерации ВГ равнялся $\approx 0,35$ Вт. При мощности накачки 15,6 Вт средняя мощность ВГ составила $\sim 0,9$ Вт, что соответствовало эффективности генерации 5,8 %.

Удвоение частоты также было произведено при другой конфигурации резонатора: $r_{вх} = \infty$, $r_{вых} = 100$ мм. Использование вышеуказанных формул из [20] показывает, что для данного резонатора критические значения оптической силы термолинзы имеют величины $D_1^{II} = -1/(r_{вых} - (L_p - l + l n^{-1}))$ и $D_2^{II} = 1/(L_p - l + l n^{-1})$. Сопоставление $D_{1,2}^I$ и $D_{1,2}^{II}$ показывает, что данный резонатор по сравнению с вышерассмотренным при той же длине L_p становится неустойчивым при более высокой оптической силе термолинзы (иными словами, допускает для активных элементов более высокие уровни накачки). Зависимость $P_{ВГ}(P_{нак})$ для данного резонатора представлена на рис. 2 кривой 3. Видно, что при накачке в области 6,0–13,5 Вт эффективность генерации ВГ несколько ниже. Как показывают расчеты на основе закона ABCD, это связано с тем, что при указанных мощностях накачки пучок основного лазерного излучения в кристалле КТР для резонатора с параметрами $r_{вх} = \infty$, $r_{вых} = 100$ мм являлся более широким (т. е. плотность мощности преобразуемого излучения была несколько меньшей).

Оценки также показывают, что в резонаторе с плоским входным зеркалом диаметр пучка (например, нулевой моды d_{00}) при возрастании оптической силы положительной термолинзы увеличивается в активном элементе Nd:KGdW и уменьшается в области выходного вогнутого зеркала. Как следует из данных рис. 2, при $P_{нак} > 15$ Вт пучок основного излучения сужался так, что оба резонатора обеспечивали примерно одинаковую мощность $P_{ВГ} \sim 0,9$ Вт ($P_{нак} = 15,6$ Вт). Запись в ближней волновой зоне структуры поля излучения на $\lambda = 533,6$ нм показала, что распределения интенсивности в круглом пучке ВГ достаточно хорошо аппроксимируются функцией Гаусса (рис. 3, б). При записи картины поля пучок ВГ был прямо направлен в камеру, находящуюся на расстоянии 27 см от выходного зеркала. Генерация гауссова пучка объясняется тем, что при $P_{нак} > 15$ Вт для каустики основного лазерного излучения в области активного элемента Nd:KGdW выполнялось соотношение $d_p/d_{00} \leq 2^{-1/2}$ ($2^{-1/2}$ есть соотношение диаметров ТЕМ₀₁ и ТЕМ₀₀ мод в случае круглых пучков [21]). То, что при $P_{нак} > 15$ Вт генерация фундаментального лазерного излучения в резонаторе с параметрами $r_{вх} = \infty$, $r_{вых} = 100$ мм происходит на основной моде ТЕМ₀₀, было подтверждено дополнительным экспериментом, в котором лазер генерировал только на $\lambda = 1067,2$ нм. При оптимальном пропускании выходного зеркала ~ 10 % и мощности накачки 15,6 Вт мощность излучения в одномодовом пучке достигала 4,6 Вт.

Время, за которое в активном элементе лазера формируется термолинза, можно приблизительно оценить с помощью выражения, определяющего время установления теплового градиента: $t = d_p^2 C \rho / 4 K_c$ [23], где d_p – диаметр пучка накачки, C – удельная теплоемкость, K_c – теплопроводность, ρ – удельная плотность лазерной среды. Для кристалла Nd:KGdW $C = 0,5$ Дж г⁻¹ К⁻¹, $\rho = 7,27$ г см⁻³, $K_c = 0,028$ (100) Вт см⁻¹ К⁻¹, и, следовательно, при $d_p \approx 500$ мкм время установления теплового градиента составляет ~ 81 мс. Таким образом, за время действия импульса накачки с длительностью ~ 10 – 20 мс термическая линза не успевает сформироваться в активном элементе полностью. Это обстоятельство предопределило явное различие зависимостей $P_{ВГ}(P_{нак})$ для рассматриваемых резонаторов в случае квазинепрерывной накачки Nd:KGdW-кристалла. Ясно, что при невысоких термоискажениях активного элемента N_g -среза резонатор с параметрами $r_{вх} = 100$ мм, $r_{вых} = \infty$ обеспечивал в кристалле КТР более высокую плотность мощности фундаментального лазерного излучения. Зависимость $P_{ВГ}(P_{нак})$ для данного резонатора проиллюстрирована на рис. 2, б

кривой 2. При мощности излучения лазерного диода $P_{\text{нак}} = 25$ Вт мгновенная мощность ВГ составила 2,25 Вт, что соответствовало эффективности преобразования 9 %. В случае резонатора с параметрами $r_{\text{вх}} = \infty$, $r_{\text{вых}} = 100$ мм пучок фундаментального излучения не испытывал столь сильного сужения в кристалле КТР, как при непрерывной накачке, и мощность ВГ при той же максимальной мощности накачки не превышала 1,34 Вт (рис. 2, б, кривая 3). Следует отметить, что несмотря на квазинепрерывный режим накачки мощность лазерного диода не поднималась свыше 25 Вт из-за риска повреждения лазерного элемента N_g -среза.

Как уже говорилось выше, при квазинепрерывной накачке термолинза не успевает сформироваться полностью. Однако она все же имеет определенную оптическую силу, и в случае Nd:KGdW-элемента N_p -среза способствует образованию более сложных волновых aberrаций оптического пути между зеркалами резонатора, чем в случае элемента N_g -среза. Это выражается в более низкой эффективности генерации ВГ. Зависимость $P_{\text{ВГ}}(P_{\text{нак}})$ для элемента N_p -среза, помещенного в резонатор с параметрами $r_{\text{вх}} = 100$ мм, $r_{\text{вых}} = \infty$, представлена на рис. 2, б кривой 1. При квазинепрерывной накачке импульсами длительностью ~ 20 мс мгновенная мощность ВГ составила 2,1 Вт при мощности излучения лазерного диода $P_{\text{нак}} = 27,3$ Вт. При $P_{\text{нак}} > 20$ Вт термооптические искажения элемента N_p -среза были способны придать выходному пучку лазера некоторую эллиптичность.

Известно, что внутрирезонаторное удвоение частоты может характеризоваться так называемой «зеленой проблемой» (green problem), суть которой заключается в хаотических шумовых флуктуациях интенсивности ВГ. Хаотические пульсации интенсивности возникают в том случае, когда на фундаментальной частоте лазера генерируются одновременно несколько продольных мод резонатора. Причиной этих пульсаций является возникновение взаимосвязи между продольными модами резонатора в результате процесса генерации суммарной частоты в нелинейном кристалле [24]. Запись осциллограмм мощности ВГ с помощью быстрых фотодиодов показала, что флуктуации интенсивности ВГ свойственны и исследуемому Nd:KGdW/КТР-лазеру, поскольку никаких мер для селекции продольных мод резонатора в нем не применялось. При мощности непрерывной генерации $P_{\text{ВГ}} \sim 0,85$ Вт пульсации интенсивности не превышали ± 20 % относительно ее среднего значения (рис. 3, в).

Следует отметить, что при непрерывном режиме работы значение мощности ВГ и ее стабильность во многом зависят от настройки кристалла КТР. Двухлучепреломляющий кристалл КТР представляет собой фазосдвигающую пластинку, вносящую разность фаз между o - и e -компонентами фундаментального лазерного излучения. И только в том случае, когда кристалл КТР действует постоянно как полуволновая пластинка, мощность ВГ максимальна и стабильна. Такое свойство придавалось кристаллу КТР путем его жесткой температурной стабилизации при 21 °С. При изменении температуры кристалла всего на несколько градусов мощность ВГ снижалась в 3–6 раз.

Заключение. Реализована мощная квазинепрерывная, а также реально непрерывная генерация Nd:KGdW/КТР-лазера с внутрирезонаторным удвоением частоты при расположении кристалла КТР в одной из секций трехзеркального линейного резонатора. В лазере использованы активные элементы N_p - и N_g -среза, продольная накачка которых осуществлена излучением лазерного диода на $\lambda = 879$ нм. Допустимая мощность непрерывной накачки, не вызывающая термомеханического разрушения кристаллов, составила 26,8 Вт для элемента N_p -среза и 15,9 Вт для элемента N_g -среза, имеющего меньшую площадь теплоотвода. В силу того, что возникающие при непрерывной накачке термоискажения кристалла N_p -среза приводили к наиболее сложным волновым aberrациям оптического пути между зеркалами резонатора, мощность генерации ВГ при этом кристалле не превышала 0,6 Вт и была сосредоточена в эллиптическом пучке. Квазинепрерывный режим характеризовался максимальной мгновенной мощностью 2,1 Вт. В случае кристалла N_g -среза, находящегося в резонаторе с параметрами $r_{\text{вх}} = \infty$, $r_{\text{вых}} = 100$ мм, нарастание оптической силы положительной термолинзы способствовало эффективному сужению пучка фундаментального излучения в кристалле КТР и мощность непрерывной генерации ВГ при максимальной мощности накачки 15,6 Вт достигала 0,9 Вт. При этом распределение интенсивности в круглом пучке ВГ имело практически гауссов профиль. При квазинепрерывной генерации с рабочим циклом 10 %, когда ограничения на подводимую мощность накачки отсутствовали, наилучшие результаты обеспечил резонатор с параметрами $r_{\text{вх}} = 100$ мм, $r_{\text{вых}} = \infty$. При мощности лазерного диода 25 Вт мгно-

венная мощность излучения ВГ длительностью ~10–20 мс составила 2,25 Вт, что соответствовало эффективности преобразования 9 %. Насколько известно авторам, достигнутые уровни мощности ВГ являются рекордными для Nd:KGdW-лазеров с удвоением частоты при продольной диодной накачке. Несомненно, что при соответствующей оптимизации параметров резонатора и использовании кристаллов N_g -среза с большей площадью теплоотвода мощность непрерывного излучения ВГ может быть увеличена.

Литература

1. Багаев С., Дашкевич В. И., Орлович В. А. и др. // Квантовая электроника. 2011. Т. 41, № 3. С. 189–192.
2. Pujol M. C., Carvajal J. J., Mateos X. et al. // J. Lumin. 2013. Vol. 138. P. 77–82.
3. Loiko P. A., Dashkevich V. I., Bagaev S. N. et al. // J. Lumin. 2014. Vol. 153. P. 221–226.
4. Takagi S., Enya Y., Kyono T. et al. // Appl. Phys. Express. 2012. Vol. 5. DOI: 10.1143/APEX.5.082102. 3 p.
5. Liu L., Oka M., Wiechmann W., Kubota S. // Opt. Lett. 1994. Vol. 19, N 3. P. 189–191.
6. Liu J., Shao Z., Zhang H., Meng X. et al. // Opt. Commun. 2000. Vol. 173, N 1. P. 311–314.
7. Абазадзе А., Зверев Г. М., Колбацков Ю. М., Устименко Н. С. // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. С. 20–22.
8. Musset O., Boquillon J. P. // Appl. Phys. B. 1997. Vol. 65. P. 13–18.
9. Kalisky Y., Kravchik L., Labbe C. // Opt. Commun. 2001. Vol. 189. P. 113–125.
10. Kushawaha V., Yan Y., Chen Y. // Appl. Phys. B. 1996. Vol. 62. P. 533–535.
11. Grabtchikov A., Kuzmin A. N., Lisinetskii V. A. et al. // Opt. Mater. 2001. Vol. 16, N 3. P. 349–352.
12. Savitski V. G., Malyarevich A. M., Yumashev K. V. et al. // Appl. Phys. B. 2003. Vol. 76. P. 253–256.
13. Lisinetskii V. A., Grabtchikov A. S., Demidovich A. A. et al. // Appl. Phys. B. 2007. Vol. 88, N 4. P. 499–501.
14. Дашкевич В. И., Орлович В. А., Шкадаревич А. П. // Журн. прикладной спектроскопии. 2009. Т. 76. С. 725–732.
15. Ustimenko N. S., Zabolotn E. M. // Instr. and Exp. Tech. 2005. Vol. 48. P. 239–240.
16. Xia J., Lü Y. F., Zhang X. H. et al. // Laser Phys. Lett. 2011. Vol. 8. P. 21–23.
17. Findeisen J., Eichler H. J., Kaminskii A. A. // IEEE J. Quant. Electron. 1999. Vol. 35, N 2. P. 173–178.
18. Demidovich A., Shkadarevich A. P., Batay L. E. et al. // Proc. SPIE. 1997. Vol. 3176. P. 272–275.
19. Stankov K., Marowsky G. // Appl. Phys. B. 1995. Vol. 61. P. 213–215.
20. Hodson, N., Weber H. Laser Resonators and Beam Propagation: Fundamentals, Advanced Concepts and Applications, Second Edition. Springer, 2005.
21. Loiko P. A., Yumashev K. V., Kuleshov N. V. et al. // Opt. Express. 2009. Vol. 17, N 26. P. 23536–23543.
22. Мочалов И. В. // Опт. журн. 1995. № 11. С. 4–15.
23. Boyd R. W. Nonlinear Optics. Third Edition. Elsevier, Acad. Press, 2008.
24. Baer T. // J. Opt. Soc. Am. B. 1986. Vol. 3, N 9. P. 1175–1180.

A. A. BUI, U. I. DASHKEVICH, V. A. ORLOVICH

CONTINUOUS-WAVE DIODE-PUMPED Nd:KGdW/KTP LASER WITH INTRACAVITY FREQUENCY DOUBLING

Summary

A CW and quasi-CW Nd:KGd(WO₄)₂/KTP laser with longitudinal diode-pumping at $\lambda \sim 879$ nm and intracavity frequency doubling in a three-mirror linear cavity has been created. At frequency doubling, superior results are achieved with a N_g -cut crystal by virtue of a simpler character of its thermal lens. At a CW pump power of 15.6 W, the power of the second harmonic generated at a wavelength of 533.6 nm amounts to ~0.9 W. At quasi-CW pumping, the laser generates with a duty cycle of 10 % and emits 10–20 ms long pulses, whose peak power reaches 2.25 W with an optical conversion efficiency of 9%. In the case of a N_p -cut Nd:KGd(WO₄)₂ crystal, the peak power of the second harmonic does not exceed 2.1 W.