

# Исследование лазера на кристалле $\text{KGW} : \text{Nd}^{3+}$ с поперечной накачкой линейками лазерных диодов

А.Ю.Абазадзе, Г.М.Зверев, Ю.М.Колбацков, Н.С.Устименко

*Проведены экспериментальные исследования импульсного лазера на кристалле  $\text{KGW} : \text{Nd}^{3+}$  с поперечной накачкой излучением линеек лазерных диодов. Оптимизация параметров лазера позволила получить максимальную дифференциальную эффективность около 50 % на  $\lambda = 1.067$  мкм в режиме свободной генерации. С помощью ВКР-самопреобразования в кристалле  $\text{KGW} : \text{Nd}^{3+}$  получена генерация в безопасной для зрения области спектра ( $\lambda = 1.538$  мкм) с энергией до 5 мДж и частотой следования импульсов до 20 Гц.*

**Ключевые слова:** линейки лазерных диодов, поперечная накачка, вынужденное комбинационное рассеяние.

Кристаллы калий-гадолиниевого вольфрамата, активированные ионами неодима ( $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2 : \text{Nd}^{3+}$  ( $\text{KGW} : \text{Nd}^{3+}$ )), обладают рядом физических свойств, позволяющих использовать их как эффективную лазерную среду для генерации излучения в ближнем ИК диапазоне [1]. В кристалле  $\text{KGW} : \text{Nd}^{3+}$  возможно изменение атомной концентрации активных ионов неодима от 3 % до 10 %, что позволяет оптимизировать этот параметр с целью получения максимального КПД. Высокий коэффициент нелинейной восприимчивости третьего порядка  $\chi^{(3)}$  кристалла  $\text{KGW} : \text{Nd}^{3+}$  обеспечивает эффективное преобразование основного излучения ионов неодима в стоксовы компоненты различных порядков при ВКР [2]. Так, в работе [3] сообщалось о создании многоволнового лазера на кристалле  $\text{KGW} : \text{Nd}^{3+}$ , в котором была реализована генерация как основного излучения ионов неодима с  $\lambda = 1.067$  и 1.351 мкм, так и соответствующих им стоксовых компонент с  $\lambda = 1.18, 1.32$  и 1.538 мкм. В данном наборе длин волн практический интерес представляет волна с  $\lambda = 1.538$  мкм, возникающая в процессе внутриволнового ВКР излучения ионов неодима с  $\lambda = 1.351$  мкм, поскольку излучение лазера на этой длине волны безопасно для человеческого зрения. В работе [4] было проведено экспериментальное исследование ВКР-лазера на кристалле  $\text{KGW} : \text{Nd}^{3+}$  с ламповой накачкой и получена генерация импульсов излучения с  $\lambda = 1.538$  мкм и энергией 4–5 мДж при модуляции добротности резонатора.

Один из существенных недостатков кристаллов  $\text{KGW} : \text{Nd}^{3+}$  – их относительно низкие коэффициенты теплопроводности (примерно в три раза меньшие, чем у кристаллов  $\text{YAG} : \text{Nd}^{3+}$  [5]). Это приводит к ухудшению энергетических и пространственных характеристик излучения лазеров с ламповой накачкой при увеличении ее средней мощности. Решением данной проблемы является

применение в качестве источника накачки кристалла  $\text{KGW} : \text{Nd}^{3+}$  линеек лазерных диодов (ЛЛД).

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования лазера на кристалле  $\text{KGW} : \text{Nd}^{3+}$  с поперечной накачкой квазинепрерывными ЛЛД. При проведении экспериментов использовались два модуля с симметричным и несимметричным расположением ЛЛД у поверхности активного элемента (АЭ), созданные для исследования  $\text{YAG} : \text{Nd}^{3+}$ -лазеров, характеристики которых подробно описаны в работе [6].

ЛЛД были изготовлены во ФГУП "НИИ «Полус» им. М.Ф.Стедьмаха" и обладали импульсной мощностью излучения не менее 60 Вт каждая. Излучение отобранных для экспериментов ЛЛД практически равномерно распределялось в спектральном диапазоне 803–809 нм. При этом модуль с симметричной конфигурацией [6] состоял из одной секции, в которой восемь ЛЛД располагались на расстоянии примерно 0.5 мм от боковой поверхности АЭ независимо от его диаметра. Несимметричный модуль имел две модификации [6]. В первой двенадцать ЛЛД объединялись в три секции, находящиеся на таком же расстоянии от АЭ, как и в симметричном модуле, во второй модификации для более равномерного распределения излучения накачки в сечении АЭ зазор между ЛЛД и АЭ был увеличен примерно до 1.3 мм (при диаметре АЭ, равном 4 мм), а общее число ЛЛД доведено до шестнадцати в четырех секциях вдоль оси элемента.

В ходе эксперимента для определения эффективности поперечной схемы накачки кристалла  $\text{KGW} : \text{Nd}^{3+}$  излучением ЛЛД измерялись энергетические характеристики лазера при различных коэффициентах отражения выходного зеркала в режиме свободной генерации. При этом использовались модули с симметричной и несимметричной (первой модификации) геометрией, в которых ЛЛД устанавливались у поверхности цилиндрического АЭ с диаметром 4 мм и атомной концентрацией ионов неодима  $C = 3$  %. Частота следования импульсов накачки длительностью 200 мкс составляла 5 Гц. Максимально возможная эффективность накачки  $\text{KGW} : \text{Nd}^{3+}$ -лазера была реализована в многомодовом режиме свободной генерации в плоско-сферическом резонаторе с длиной 22 см и радиусом кривизны глухого зеркала 100 см. Результа-

А.Ю.Абазадзе, Г.М.Зверев, Ю.М.Колбацков, Н.С.Устименко. ФГУП "НИИ «Полус» им. М.Ф.Стедьмаха", Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; тел.: (095) 334 21 44, факс: (095) 333 00 03, e-mail: mail@polyus.msk.ru, http://www.polyus.msk.ru.

Поступила в редакцию 7 апреля 2003 г., после доработки – 1 июля 2003 г.

ты измерений энергетических характеристик излучения KGW: Nd<sup>3+</sup>-лазера на  $\lambda = 1.067$  мкм приведены на рис.1. Видно, что при использовании симметричного и несимметричного модулей накачки максимальная дифференциальная эффективность свободной генерации составляла 50 % и 51 % соответственно для коэффициента отражения выходного зеркала, близкого к оптимальному.

Проведенные эксперименты позволили определить эффективный коэффициент поглощения излучения накачки в кристалле KGW: Nd<sup>3+</sup> диаметром 4 мм, который оказался равным  $6.5 \text{ см}^{-1}$ . Для сравнения отметим, что полученный в [6] коэффициент поглощения для кристалла YAG: Nd<sup>3+</sup> при максимальной концентрации ионов неодима 1.2 % составил  $\sim 4.7 \text{ см}^{-1}$ .

Для исследования энергетических характеристик излучения KGW: Nd<sup>3+</sup>-лазера при увеличенной до 10 % концентрации ионов неодима в АЭ диаметром 3 мм использовался несимметричный модуль с двенадцатью ЛЛД. Отметим, что представленные на рис.1 результаты этого эксперимента были получены при смещении с помощью нагрева спектрального диапазона излучения ЛЛД в диапазон 813–819 нм, поскольку в исходном спектральном диапазоне 803–809 нм порог генерации достигался только при максимальной накачке.

Из рис.1 видно, что даже при выборе оптимального для данного АЭ спектра излучения накачки энергетические характеристики свободной генерации при увеличенной до 10 % концентрации ионов неодима были существенно хуже, чем при  $C = 3 \%$ . Это можно объяснить высоким уровнем поглощения излучения ЛЛД и, соответственно, высокой плотностью инверсной населенности в приповерхностной области АЭ, что создавало условия для эффективного усиления только поперечных мод высокого порядка, характеризовавшихся большими дифракционными потерями и, следовательно, большим порогом генерации. Аналогичный эффект наблюдался авторами работы [7] при исследовании лазера на кристалле скандората цезия с неодимом ( $C = 25 \%$ ) с поперечной накачкой одной ЛЛД.

Результаты измерений энергетических характеристик

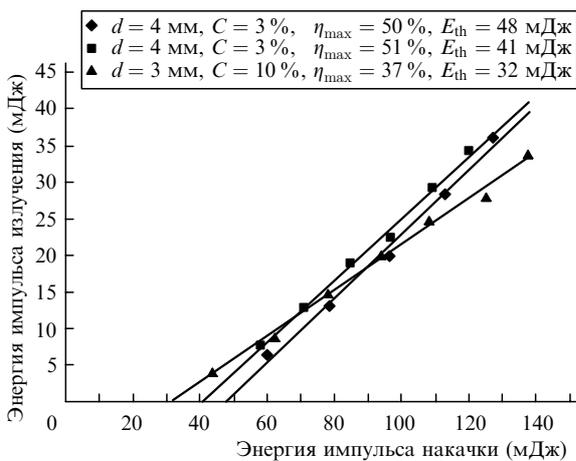


Рис.1. Энергетические характеристики KGW: Nd<sup>3+</sup>-лазера с симметричным (◆) и несимметричным (■,▲) модулями накачки в режиме свободной генерации при вариации концентрации C ионов неодима в АЭ. Коэффициент отражения выходного зеркала 60 %, радиус кривизны глухого зеркала 100 см, длина резонатора 22 см; d – диаметр АЭ,  $\eta_{\max}$  – максимальная дифференциальная эффективность,  $E_{\text{th}}$  – пороговая энергия генерации.

при изменении концентрации ионов неодима в кристалле KGW: Nd<sup>3+</sup> свидетельствуют о существовании оптимального коэффициента поглощения для АЭ данного диаметра в случае поперечной схемы накачки. Реализуемое при оптимальном коэффициенте поглощения распределение плотности инверсной населенности в АЭ соответствует максимальной эффективности использования излучения накачки для генерации многомодового пучка. Приведенное выше значение коэффициента поглощения ( $6.5 \text{ см}^{-1}$ ) для кристалла KGW: Nd<sup>3+</sup>, по-видимому, соответствовало диапазону оптимальных коэффициентов.

В эксперименте с модуляцией добротности резонатора KGW: Nd<sup>3+</sup>-лазера был использован несимметричный модуль с шестнадцатью ЛЛД, создающий более равномерное распределение инверсной населенности в сечении АЭ. Это важно именно при работе лазера в режиме модуляции добротности резонатора, т. к. возникающая в этом режиме локальная плотность мощности излучения может превысить допустимую для элементов лазера. Для модуляции добротности резонатора между АЭ и глухим зеркалом располагался электрооптический затвор на кристалле LiNbO<sub>3</sub> с торцами, срезанными под углом Брюстера к оптической оси. С целью снижения длительности моноимпульса и увеличения его мощности длина резонатора была уменьшена до минимально возможного значения 12 см при радиусе кривизны глухого зеркала 300 см. Коэффициент отражения выходного зеркала на  $\lambda = 1.067$  мкм был равен 30 %. Полученные на  $\lambda = 1.067$  мкм энергетические характеристики излучения KGW: Nd<sup>3+</sup>-лазера с АЭ диаметром 3 и 4 мм в режиме модуляции добротности резонатора представлены на рис.2. Видно, что максимальная дифференциальная эффективность излучения в этом случае составляла соответственно 20 % и 16 %.

Для получения генерации KGW: Nd<sup>3+</sup>-лазера в безопасной для зрения области спектра было использовано преобразование в процессе ВКР волны с  $\lambda = 1.351$  мкм (соответствующей переходу  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  ионов неодима) в первую стоксову компоненту с  $\lambda = 1.538$  мкм. ВКР-лазер был реализован на кристаллах KGW: Nd<sup>3+</sup> диамет-

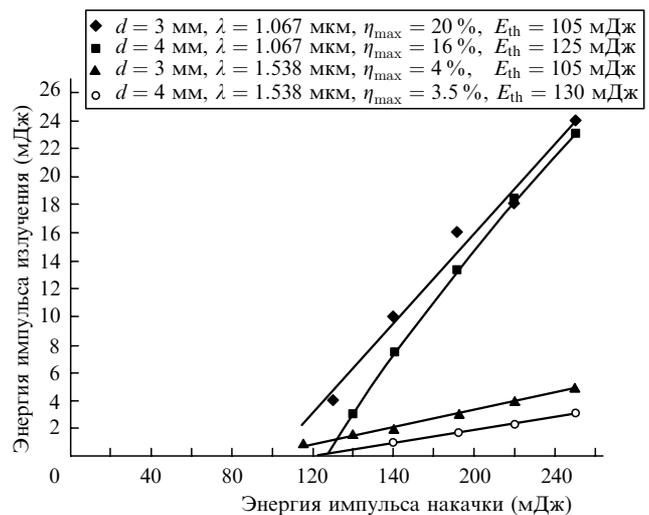


Рис.2. Энергетические характеристики KGW: Nd<sup>3+</sup>-лазера в режиме модуляции добротности резонатора на  $\lambda = 1.067$  и  $1.538$  мкм с АЭ диаметром 3 и 4 мм в несимметричном модуле с шестнадцатью ЛЛД в четырех секциях. Радиус кривизны глухого зеркала 300 см, длина резонатора 12 см.

ром 3 и 4 мм. Зеркала резонатора имели коэффициенты отражения 15 % и 99.9 % на  $\lambda = 1.538$  мкм и 99.9 % на  $\lambda = 1.351$  мкм. Результаты измерений энергетических характеристик на  $\lambda = 1.538$  мкм также приведены на рис.2. Из полученных данных видно, что при диаметре АЭ, равном 3 и 4 мм, максимальная дифференциальная эффективность генерации ВКР-лазера составляла 4 % и 3.5 % соответственно. Отметим, что, как следует из описания несимметричного модуля второй модификации, расстояние в нем между ЛЛД и поверхностью АЭ диаметром 3 мм было на 0.5 мм больше, чем для АЭ диаметром 4 мм. Иными словами, в АЭ диаметром 3 мм попадала меньшая часть излучения накачки, чем в АЭ диаметром 4 мм. Однако даже при таком неоптимальном согласовании пучка излучения ЛЛД с АЭ диаметром 3 мм за счет более высокой плотности излучения накачки порог ВКР был существенно ниже и была достигнута максимальная энергия моноимпульса 5 мДж, тогда как при АЭ диаметром 4 мм – только 3 мДж. При максимальной энергии импульса накачки длительность моноимпульса ВКР-лазера (на полувысоте) составляла 30 нс.

В связи с отмеченными выше относительно низкими термооптическими свойствами кристаллов  $\text{KGW}:\text{Nd}^{3+}$  большой практический интерес представляет изменение энергетических характеристик ВКР-лазера при увеличении частоты следования импульсов накачки. На рис.3 представлена зависимость энергии излучения ВКР-лазера с АЭ диаметром 3 мм от частоты следования импульсов накачки с энергией 220 мДж. Видно, что уменьшение энергии импульса излучения ВКР-лазера не превышает 25 % при изменении частоты следования импульсов в диапазоне 5–20 Гц.

Проведенные исследования показали перспективность применения кристаллов  $\text{KGW}:\text{Nd}^{3+}$  в качестве АЭ лазеров с поперечной накачкой лазерными диодами. При оптимальных условиях была получена свободная генерация  $\text{KGW}:\text{Nd}^{3+}$ -лазера на  $\lambda = 1.067$  мкм с максимальной дифференциальной эффективностью 55 %, что соответствовало эффективности использования излучения линеек 70 % (с учетом френелевских потерь излучения ЛЛД на границе воздух – АЭ). Отметим, что данный результат близок к тому, который был получен при аналогичных условиях в эксперименте с лазером на кристалле  $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$  в работе [6].

В связи с тем, что время жизни возбужденного состояния ионов неодима в кристалле  $\text{KGW}:\text{Nd}^{3+}$  составляет примерно 100 мкс, эффективность использования излучения накачки при работе исследуемых лазеров в режиме модулированной добротности может быть увеличена в полтора раза за счет уменьшения длительности импульса ЛЛД от 200 до 100 мкс. Однако, поскольку мощность излучения ЛЛД ограничена предельным током через  $p-n$ -переход и не может быть увеличена при уменьшении длительности импульса, полная энергия на-

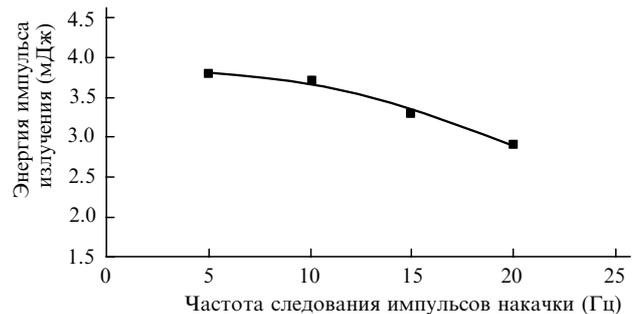


Рис.3. Частотная характеристика ВКР-лазера на кристалле  $\text{KGW}:\text{Nd}^{3+}$  диаметром 3 мм с поперечной накачкой шестнадцатью ЛЛД при энергии импульса накачки 220 мДж.

качки АЭ уменьшится в два раза, что приведет к уменьшению достижимых максимальных энергий моноимпульса  $\text{KGW}:\text{Nd}^{3+}$ -лазера.

Отметим, что в отличие от лазеров на иттербий-эрбиевом стекле с безопасной для зрения длиной волны излучения дальнейшее увеличение энергии импульса ВКР-лазера не может быть реализовано за счет применения импульсов накачки с длительностью, увеличенной до нескольких миллисекунд, а требует увеличения предельного тока или использования большого числа ЛЛД.

При близких значениях КПД и выходных энергий ВКР-лазера и лазера на иттербий-эрбиевом стекле [8] несомненным преимуществом ВКР-лазера на кристалле  $\text{KGW}:\text{Nd}^{3+}$  является отсутствие принудительного охлаждения при частотах следования импульсов несколько десятков герц, в то время как для лазера на иттербий-эрбиевом стекле частота следования составляет несколько герц.

Энергии моноимпульса 3–5 мДж, достигнутые на  $\lambda = 1.538$  мкм, свидетельствуют о возможности практического применения ВКР-лазера на кристалле  $\text{KGW}:\text{Nd}^{3+}$  с поперечной накачкой ЛЛД, хотя они не являются предельными и могут быть увеличены с помощью оптимизации параметров резонатора и схемы накачки.

1. Breiner A., Bourgeois F., Metrat G., Muhlstein N., Boudeulle M., Boulon G. *J. Luminescence*, **81**, 135 (1999).
2. Mochalov I.V. *Opt. Eng.*, **36** (6), 1660 (1997).
3. Гулин А.В., Нархова Г.И., Устименко Н.С. *Квантовая электроника*, **25**, 825 (1998).
4. Гулин А.В., Устименко Н.С. *Квантовая электроника*, **32**, 229 (2002).
5. Musset O., Voquillon J.P. *Appl. Phys. B*, **65**, 13 (1997).
6. Абазадзе А.Ю., Колбацков Ю.М., Зверев Г.М. *Квантовая электроника*, **32**, 205 (2002).
7. Abazadze A.J., Durmanov S.T., Gruden M.N., Kolbatskov J.M., Koval J.P., Kuzmin O.V., Kutovoi S.A., Panyutin V.L., Rudnitsky J.P., Smirnov G.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3682**, 50 (1999).
8. Абазадзе А.Ю., Быков В.Н., Зверев Г.М., Плешаков А.А., Смаков В.А. *Квантовая электроника*, **32**, 210 (2002).