

Новые ВКР-лазеры на кристалле $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2:\text{Nd}^{3+}$ с самопреобразованием частоты излучения

Н.С.Устименко, А.В.Гулин

Экспериментально уточнена пространственная ориентация осей оптической индикатрисы в активно-нелинейном кристалле калий-гадолиниевого вольфрамата с неодимом $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2:\text{Nd}^{3+}$. Созданы миниатюрные ВКР-лазеры двух типов на длине волны 1538 нм с самопреобразованием частоты излучения в этом кристалле. Лазер одного типа имеет выходную энергию 5–7 мДж и частоту повторения до 1 Гц, другого – около 20 мДж и до 20 Гц.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеяние, калий-гадолиниевый вольфраMAT с неодимом, самопреобразование частоты.

1. Введение

В последнее время среди активно развивающихся направлений в области твердотельных лазеров особый интерес представляет исследование и создание ВКР-лазеров [1]. Такие лазеры позволяют получить новые источники излучения в широком спектральном диапазоне, в том числе и на длинах волн, безопасных для человеческого глаза. ВКР-лазеры созданы как на основе самопреобразования частоты излучения в активно-нелинейных средах в пикосекундном [2, 3] и наносекундном [4–6] диапазонах длительностей импульса, так и с помощью преобразования излучения лазеров на традиционных кристаллических средах в различных комбинационно-активных кристаллах [7, 8].

Успешное развитие этого направления связано, в частности, и с появлением активно-нелинейного кристалла калий-гадолиниевого вольфрамата с неодимом $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2:\text{Nd}^{3+}$ (КГВ). Этот кристалл обладает уникальной совокупностью физических свойств. К таковым можно отнести возможность получения в нём высокой атомной концентрации ионов неодима (до 10 %) без существенного ухудшения оптического качества, низкие пороговые мощности ВКР-преобразования (~ 4 ГВт/см), а также относительно высокие сечения основных генерационных переходов.

Изучение и систематизация оптических свойств активно-нелинейного кристалла КГВ проводились, например, в работах [9, 10]. Однако новые аспекты применения кристалла КГВ, в частности в качестве ВКР-преобразователя, требуют, на наш взгляд, уточнения пространственной ориентации осей его оптической индикатрисы относительно кристаллографических осей, что и явилось предметом эксперимента в настоящей работе.

Приводятся также параметры новых ВКР-лазеров на длине волны излучения, безопасной для человеческого глаза.

2. Ориентация осей оптической индикатрисы кристалла КГВ

Двуосный кристалл КГВ относится к моноклинной системе группы 2m. На рис.1 показано экспериментально определённое нами (методика эксперимента будет приведена ниже) пространственное расположение осей оптической индикатрисы относительно кристаллографических осей a , b и c этого кристалла. В принятой терминологии (см., напр., [11]) полуоси оптической индикатрисы N_p , N_m и N_g пропорциональны главным показателям преломления n_p , n_m и n_g , причём $n_p < n_m < n_g$. Отметим, что угол между кристаллографической осью c и осью оптической индикатрисы N_g равняется 20° , однако пространственное расположение оси N_g на 40° отличается от указанного в работе [9]. На рис.1 показано также расположение одной из оптических осей. Она лежит в плоскости $N_p N_g$ и составляет угол V_g с осью N_g . Вторая оптическая ось расположена симметрично с другой стороны от оси N_g под тем же углом к ней.

Необходимо отметить, что в моноклинных кристаллах имеет место зависимость ориентации оптических осей от длины волны [11], а также от температуры, электрического поля, механических напряжений. Но об этом в работах по кристаллам КГВ, в том числе и в [9, 10],

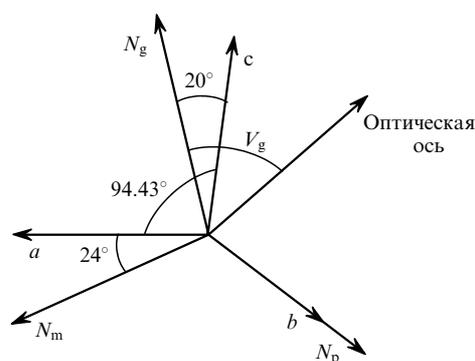


Рис.1. Ориентация осей оптической индикатрисы в кристалле КГВ относительно кристаллографических осей.

практически не упоминается. Оси N_m и N_g , соответствующие разным длинам волн, располагаются веерообразно вокруг оси N_p перпендикулярно ей, а направление оси N_p является одинаковым для всех длин волн.

Количественные зависимости пространственных координат положения оптических осей индикатрисы, т.е. их ориентации, от длины волны в кристалле КГВ в литературе нами также не обнаружены. В связи с этим косвенную оценку данных величин мы проведём с помощью вычисления дисперсии угла оптических осей, которая имеет место в кристалле КГВ [11].

Угол V_g между одной из оптических осей и осью оптической индикатрисы N_g определяется формулой [11]

$$\tan V_g = \left[\frac{(c/n_p)^2 - (c/n_m)^2}{(c/n_m) - (c/n_g)} \right]^{1/2},$$

где c – скорость света в вакууме. Очевидно, что угол между оптическими осями равняется $2V_g$. Определим углы V_g для $\lambda = 1064$ и 633 нм. Именно эти углы важны при экспериментальных исследованиях схем лазеров на КГВ, потому что на одной из этих длин волн (633 нм), как правило, проводится юстировка оптических схем, в том числе и азимутальная ориентация активных элементов, а на другой часто исследуются генерационные характеристики.

Расчёты, основанные на значениях, взятых из работы [10]: $n_p = 1.937$, $n_m = 1.986$, $n_g = 2.033$ для $\lambda = 1064$ нм и $n_p = 1.95$, $n_m = 2.0$, $n_g = 2.05$ для $\lambda = 633$ нм, дают углы $V_g(1064 \text{ нм}) = 46.6^\circ$ и $V_g(633 \text{ нм}) = 46.075^\circ$. Соответственно дисперсия $dV_g/d\lambda = 0.12 \times 10^{-3}$ угл.град/нм. Таким образом, дисперсия этого угла относительно мала и её можно не учитывать в экспериментальных исследованиях при юстировке оптических схем лазеров на длине волны излучения, отличающейся от длины волны, на которой ведутся исследования.

Измерения пространственного положения осей оптической индикатрисы проводились на изготовленном в виде скошенного параллелепипеда образце из кристалла КГВ, грани которого совпадали с кристаллографическими осями a , b и c . Этот образец помещался между двумя скрещенными поляроидами так, чтобы направление распространения излучения совпадало с осью b . (Отметим, что серийные лазерные активные цилиндрические элементы из кристалла КГВ также вырезаны в направлении оси b .) Эта ось, совпадающая с осью оптической индикатрисы N_p , в эксперименте являлась осью вращения образца.

Через такую систему поочередно пропусклось излучение двух идентичных по направлению распространения и по поляризации лазерных пучков с длинами волн 633 нм (He–Ne-лазер) и 1064 нм (YAG:Nd-лазер). При вращении образца вокруг оси c мы находили такие угловые положения образца, для которых система имела минимальное пропускание. Учитывая, что два направления поляризации падающего на систему излучения, соответствующие минимальному пропусканию такой системы, совпадают с направлениями осей оптической индикатрисы N_m и N_g , мы определяли угловое положение этих осей относительно известных в данном образце направлений кристаллографических осей a и c (рис.1). Меняя в эксперименте поочередно источники с $\lambda = 633$ и 1064 нм, мы также определили зависимость этого углового поло-

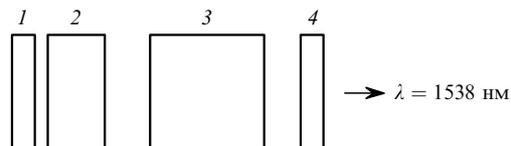


Рис.2. Блок-схема ВКР-лазера с длиной волны $\lambda = 1538$ нм: 1 – глухое зеркало; 2 – электрооптический элемент на основе LiNbO_3 ; 3 – активный элемент КГВ; 4 – выходное зеркало.

жения от длины волны. В пределах погрешности эксперимента, равняющейся 1° , различия в угловом положении осей N_m и N_g для указанных длин волн не было обнаружено, что подтверждает косвенные оценки, приведённые выше.

Мы предполагаем, что уточнение пространственной ориентации осей оптической индикатрисы в кристалле КГВ, проведённое нами, необходимо при поиске более оптимальных с точки зрения эффективности генерации ориентаций лазерных элементов, в том числе и в режиме самопреобразования частоты излучения на ВКР.

3. ВКР-лазеры на кристаллах КГВ с $\lambda = 1538$ нм

Одним из наиболее актуальных применений ВКР-лазеров в настоящее время является создание источников излучения на длине волны, безопасной для человеческого глаза. Выходная энергия, необходимая для создания приборов на основе таких лазеров, определяется в каждом конкретном случае, исходя из требований к прибору. В частности, для дальномеров с дальностью действия до 10 км необходима энергия 5–7 мДж.

Нами уже сообщалось о ВКР-лазерах на самопреобразовании в кристаллах КГВ в наносекундном диапазоне длительностей импульсов излучения [4–6, 12]. В лазерах такого типа излучение на $\lambda = 1351$ нм преобразуется в активном элементе в первую стоксову компоненту с $\lambda = 1538$ нм при участии частоты ВКР-активных колебаний 901 см^{-1} .

Последняя модификация разработанного нами ВКР-лазера на кристалле КГВ диаметром 3 мм и длиной 50 мм с электрооптической модуляцией добротности резонатора на кристалле LiNbO_3 (рис.2) имеет энергетические характеристики (высокий КПД в сочетании с низким порогом генерации), рекордные в настоящее время для класса лазеров, безопасных для человеческого глаза.

На рис.3 (кривая 1) приведена зависимость выходной энергии этого лазера от энергии накачки. Видно, что

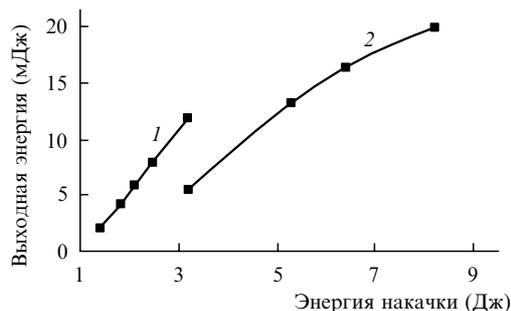


Рис.3. Зависимости выходной энергии лазеров с активным элементом КГВ диаметром 3 (1) и 4 мм (2) от энергии накачки.

дифференциальный КПД лазера равен 0.5 % при пороговой энергии около 1 Дж. Рабочий температурный диапазон разработанного нами лазера составляет $-50 \dots +60^\circ\text{C}$. Длительность импульса излучения лазера по половинной интенсивности близка к 20 нс. Конструкция лазера выполнена в виде компактного миниатюрного модуля, вес которого составляет 45 г. Фланцевое крепление модуля позволяет при необходимости удобно стыковать его с передающим телескопом или другим устройством. Лазер работает без принудительного охлаждения в стационарном режиме с максимальной частотой повторения до 0.25 Гц, однако конструктивная модификация такого лазера позволяет увеличить частоту повторения импульсов до 1 Гц.

Некоторые задачи лазерной техники требуют более высоких частот повторения импульсов излучения. Мы создали миниатюрный вариант ВКР-лазера на кристалле КГВ, увеличив частоту повторения до 20 Гц за счёт принудительного жидкостного охлаждения. Выходная энергия лазера этого типа также увеличена до 20 мДж за счёт увеличения объёма активного элемента. Для этого был выбран активный элемент диаметром 4 мм и длиной 50 мм. На рис.3 (кривая 2) показана зависимость выходной энергии такого лазера от энергии накачки. При использовании устойчивых к отрицательным температурам жидкостных теплоносителей рабочий температурный диапазон этого лазера имеет те же границы, что и у предыдущего лазера.

Сравнительный анализ созданных в настоящее время лазеров различных типов с безопасной для человеческого

глаза длиной волны излучения показывает, что по совокупности необходимых для создания лазерных систем факторов, таких как эффективность, надёжность, работоспособность при различных внешних воздействиях и стоимость, лазеры с самопреобразованием на кристаллах КГВ являются весьма перспективными.

В заключение авторы выражают благодарность В.Г.Дмитриеву за полезное обсуждение данной работы.

1. Грасюк А.З. *Квантовая электроника*, **1**, 485 (1974).
2. Андрионас К., Вищакас Ю., Кабелка В., Мочалов И.В., Павлюк А.А., Петровский Г.Т., Сырус В. *Письма в ЖЭТФ*, **42**, 333 (1985).
3. Иванюк А.М., Тер-Погосян М.А., Шахвердов Т.А., Беляев В.Д., Ермолаев В.Л., Тихонова Н.П. *Оптика и спектроскопия*, **59**, 950 (1985).
4. Устименко Н.С., Гулин А.В. Патент РФ № 2115983. Приоритет от 18.09.97; *БИ*, № 20, 28 (1998).
5. Каминский А.А., Устименко Н.С., Гулин А.В., Багаев С.Н., Павлюк А.А. *ДАН*, **359**, 179 (1998).
6. Гулин А.В., Нархова Г.И., Устименко Н.С. *Квантовая электроника*, **25**, 825 (1998).
7. Басиев Т.Т., Войцеховский В.Н., Зверев П.Г., Карпушко Ф.В., Любимов А.В., Мирон С.Б., Морозов В.П., Мочалов И.В., Павлюк А.А., Сеницын Г.В., Якобсон В.Э. *Квантовая электроника*, **14**, 2452 (1987).
8. Дмитриев В.Г., Конвисар П.Г., Михайлов В.Ю. *Квантовая электроника*, **13**, 1063 (1986).
9. Ананьева Г.В., Афанасьев И.И., Васильева В.И., Глазов А.И., Мамонтов И.Я., Меркуляева Т.И. *Опт.-мех. пром.*, **8**, 35 (1983).
10. Мочалов И.В. *Оптич. ж.*, **11**, 4 (1995).
11. Шубников А.В. *Основы оптической кристаллографии* (М.: Изд-во АН СССР, 1958).
12. Устименко Н.С., Гулин А.В., Павлюк А.А. *ПТЭ*, № 3, 120 (2001).