

PACS 42.55.Rz; 42.55.Xi; 42.60.Fc; 42.65.Re

# Мощные и эффективные лазеры на объемных кристаллах $\text{Yb:KYW}$ с продольной лазерной диодной накачкой, работающие в непрерывном и импульсных режимах

Г.Х.Ким, Ч.Янг, Д.С.Ли, А.В.Кулик, Е.Г.Салль, С.А.Чижов, В.Е.Яшин, У.Канг

*Представлены результаты исследования лазеров на основе одного и двух кристаллов  $\text{Yb:KYW}$  с продольной лазерной диодной накачкой при работе в непрерывном и моноимпульсном режимах и режиме самосинхронизации продольных мод. В однокристалльном лазере получена генерация стабильных сверхкоротких импульсов (менее 100 фс) со средней мощностью излучения более 1 Вт на длинах волн 1035 и 1043 нм. Двухкристалльный лазер обеспечивал генерацию излучения со средней мощностью более 18 Вт в непрерывном режиме и более 16 Вт – в квазипериодическом при дифференциальной эффективности свыше 30 %.*

**Ключевые слова:** твердотельные лазеры, диодная накачка, фемтосекундные импульсы.

## 1. Введение

В последнее время легированные ионами иттербия кристаллы вольфрамов  $\text{Y}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$  ( $\text{Yb:KYW}$ ) и  $\text{Y}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  ( $\text{Yb:KGW}$ ) широко используются для создания лазеров с полупроводниковой накачкой, работающих в диапазоне длин волн вблизи 1000 нм. Хорошие оптические и спектрально-люминесцентные характеристики этих материалов [1, 2] позволяют создавать эффективные лазеры, работающие в непрерывном режиме или в режиме генерации импульсов наносекундной длительности [1, 3, 4], а широкая полоса люминесценции дает дополнительную возможность генерации и усиления импульсов длительностью 100–300 фс (см., напр., [2, 5–8]). Эти кристаллы обладают также различными оптическими и спектрально-люминесцентными параметрами вдоль разных кристаллографических ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) и оптических ( $N_m$ ,  $N_p$ ,  $N_g$ ) осей [9], что дает возможность управлять поглощением излучения накачки, а также поляризацией и шириной спектра (а значит, и длительностью) генерируемых или усиливаемых сверхкоротких импульсов [10]. По теплопроводности ( $\sim 3.3$  Вт/м·К) вольфраматы [9, 11] занимают промежуточное положение между гранатами и стеклом, что позволяет получать излучение с достаточно большими средними мощностями.

Настоящая статья посвящена экспериментальному исследованию генераторов на кристаллах  $\text{Yb:KYW}$  с продольной лазерной диодной накачкой, работающих как в непрерывном режиме, так и в режиме генерации нано- и фемтосекундных импульсов. Основное внимание уделено эффективности преобразования излучения лазерных диодов в генерируемое излучение, а также получению минимально коротких фемтосекундных импульсов. Достиже-

ние этих целей требует оптимизации и параметров накачки, и условий генерации сверхкоротких импульсов.

При использовании объемных активных элементов, выполненных в виде стержней или пластин (слэбов), единственной возможностью увеличения средней мощности излучения является увеличение длины активной среды или количества активных элементов. В связи с этим нами были исследованы возможности увеличения средней мощности при переходе от однокристалльной схемы лазера к двухкристалльной.

## 2. Однокристалльный генератор

Оптическая схема однокристалльного генератора показана на рис.1. В качестве активной среды в этой схеме применялся кристалл  $\text{Yb:KYW}$  размером  $3 \times 3 \times 3$  мм, содержащий 5 ат.% ионов  $\text{Yb}^{3+}$ . Использовались кристаллы двух типов: с оптическими поверхностями, перпендикулярными оси  $N_p$  (так называемые  $N_p$ -cut кристаллы) и перпендикулярными оптической оси  $N_g$  ( $N_g$ -cut кристаллы). Кристаллы с такими ориентациями оптических осей обеспечивают генерацию на длинах волн 1035 и 1043 нм при соответствующем выборе поляризации излучения относительно осей  $N_m$  и  $N_p$  и имеют разные термооптиче-

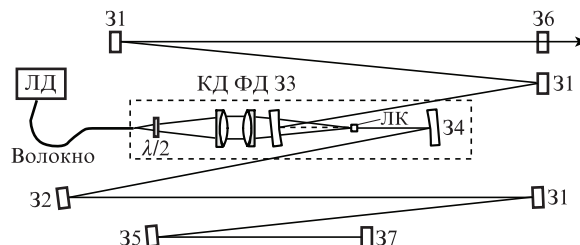


Рис.1. Оптическая схема однокристалльного лазера: ЛК – лазерный кристалл  $\text{Yb:KYW}$ ; КД, ФД – ахроматические дублеты, коллимирующие и фокусирующие накачку; 31 – плоские chirpированные зеркала; 32 – плоское диэлектрическое зеркало; 33 – вогнутое дихроичное зеркало; 34 – вогнутое диэлектрическое зеркало; 35 – вогнутое диэлектрическое зеркало; 36 – выходное зеркало; 37 – полупроводниковое насыщающееся зеркало (SAM); ЛД – лазерный полупроводниковый диод.

G.H.Kim, J.H.Yang, D.S.Lee, A.V.Kulik, E.G.Sall, S.A.Chizhov, U.Kang, KERI, Russia Science Seoul, 612, DMC, Hi-Tech Industry Center, 1580 Sangam-dong, Mapo-gu, Seoul, 121-835, Korea  
В.Е.Яшин, ФГУП «НПК "ГОИ им. С.И.Вавилова"», Россия, 192288 С.-Петербург, Биржевая линия, 12; e-mail: vyashin@yandex.ru

Поступила в редакцию 8 декабря 2011 г.

кие характеристики [12, 13], что может сказываться на угловой расходимости лазерного излучения. Лазерный кристалл крепился через индиевую фольгу на медный теплоотвод, охлаждаемый проточной водой. Оптические поверхности кристаллов были просветлены как для излучения накачки ( $\lambda = 981$  нм), так и для излучения генерации ( $\lambda = 1035\text{--}1043$  нм), а торцы элементов были скошены на угол  $30^\circ$  для устранения возможной модуляции спектра.

Для накачки лазерного кристалла использовалось излучение 10-ваттного лазерного диода с волоконным выходом диаметром 100 мкм и числовой апертурой  $NA = 0.11$ . Для сохранения линейной выходной поляризации, что необходимо для эффективной накачки Yb:KYW, первоначальная длина волокна (100 см) укорачивалась примерно до 10 см. Для точного согласования направления поляризации падающего излучения накачки с осью  $N_m$  максимального поглощения кристалла в схему вводилась полуволновая пластинка.

Лазерный диод размещался на термоэлектрическом элементе Пельтье, который, в свою очередь, охлаждался водой. Такая конструкция позволяла осуществлять подстройку длины волны излучения лазерного диода с целью ее смещения в максимум поглощения лазерного кристалла ( $\sim 981$  нм). Излучение накачки с выхода волокна коллимировалось ахроматическим дублетом с фокусным расстоянием  $F_1 = 60$  мм и через дихроичное зеркало с пропусканием  $90\%\text{--}95\%$  фокусировалось в объем лазерного кристалла другим ахроматическим дублетом с таким же фокусным расстоянием. Диаметр пятна накачки составлял 100 мкм, что позволяло уверенно преодолевать порог «просветления», равный для кристаллов Yb:KYW примерно  $3$  кВт/см<sup>2</sup>. Общие потери мощности накачки на дихроичном зеркале и элементах формирующей оптической системы составляли около 14%.

Согласование поперечного размера зоны накачки и размера моды резонатора, необходимое для эффективной генерации, осуществлялось подбором фокусного расстояния сферических зеркал резонатора, фокусирующих генерируемое излучение в лазерный кристалл, и небольшим смещением активного элемента вдоль продольной оси резонатора относительно каустики. Расчеты с помощью программы «LASCAD» [14] показали, что для резонатора данной конфигурации точность установки кристалла в нем должна быть около 0.5 мм.

Выходное зеркало с пропусканием 8% размещалось в левом плече резонатора. Из расчетов, проведенных с помощью этой программы, следует, что для зеркал с пропусканием  $4\%\text{--}10\%$  выходная мощность лазера практически постоянна. Во втором плече резонатора излучение генерации фокусировалось вогнутым зеркалом с радиусом кривизны  $R = 300$  мм на зеркало. При работе лазера в непрерывном режиме в качестве такого зеркала использовалось обычное высокоотражающее диэлектрическое зеркало, а в режиме самосинхронизации продольных мод – зеркало, содержащее насыщающийся полупроводниковый поглотитель (SESAM или SAM) [15] с начальным поглощением  $A_0 = 1\%\text{--}4\%$ . Радиус кривизны фокусирующего зеркала подбирался таким образом, чтобы обеспечить на SAM интенсивность излучения, превышающую интенсивность насыщения поглотителя.

Как хорошо известно [16], для генерации импульсов длительностью менее 1 пс в резонаторе фемтосекундных лазеров необходимо компенсировать дисперсию в лазерном активном элементе. Наиболее удобно это делать с

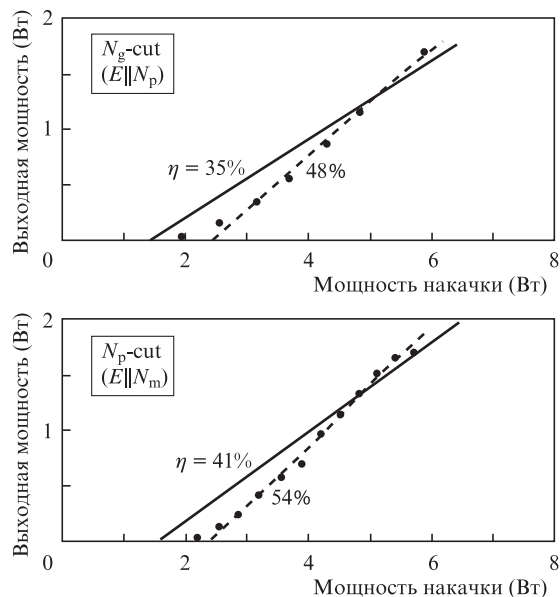


Рис.2. Зависимости выходной мощности лазера в непрерывном режиме от мощности излучения накачки, падающего на кристалл, для кристаллов Yb:KYW разной ориентации. Сплошная линия – расчет по программе «LASCAD», штриховая – линейное приближение экспериментальных точек.

помощью chirпированных зеркал [17]. При их использовании схема становится более компактной, чем в случае призмной линии задержки, поскольку величина компенсации дисперсии не зависит от расстояния между зеркалами, а определяется только вносимой ими дисперсией. Поэтому в генераторе мы использовали три chirпированных зеркала с общей дисперсией групповых скоростей на один проход  $GVD = -1350$  фс<sup>2</sup>, примерно равной положительной дисперсии, вносимой активным элементом.

Зависимости выходной мощности лазера от мощности падающего на кристалл излучения накачки в режиме свободной генерации приведены на рис.2. Максимальная выходная мощность составила более 1,6 Вт для обеих ориентаций кристалла. Дифференциальный и оптический КПД при этом были равны 44% и 30% соответственно по отношению к мощности излучения накачки, падающего на кристалл. Отметим, что для квазичетырехуровневых лазерных сред трудно экспериментально оценить поглощенную мощность излучения накачки из-за проявляющегося в таких средах эффекта насыщения поглощения. Поэтому нами для оценки лазерной эффективности учитывалась мощность падающего излучения накачки, хотя использование этого параметра вместо мощности поглощенного излучения приводит к занижению оценки реальной эффективности генерации.

Для перехода в режим генерации сверхкоротких импульсов в качестве «глухого» зеркала использовались зеркала с нанесенным на них полупроводниковым насыщающимся поглотителем (SAM). Как показали эксперименты, наиболее стабильная работа лазера (с исключением нестабильности, связанной с паразитной модуляцией добротности [18]) наблюдалась с модулятором, имеющим начальное поглощение  $A_0 > 2\%$ .

При средней мощности излучения в этом режиме 700–1100 мВт и частоте следования импульсов 78.7 МГц энергия одиночного фемтосекундного импульса превышала 10 нДж. На рис.3 показаны автокорреляционная функция импульса и спектр фемтосекундных лазерных им-

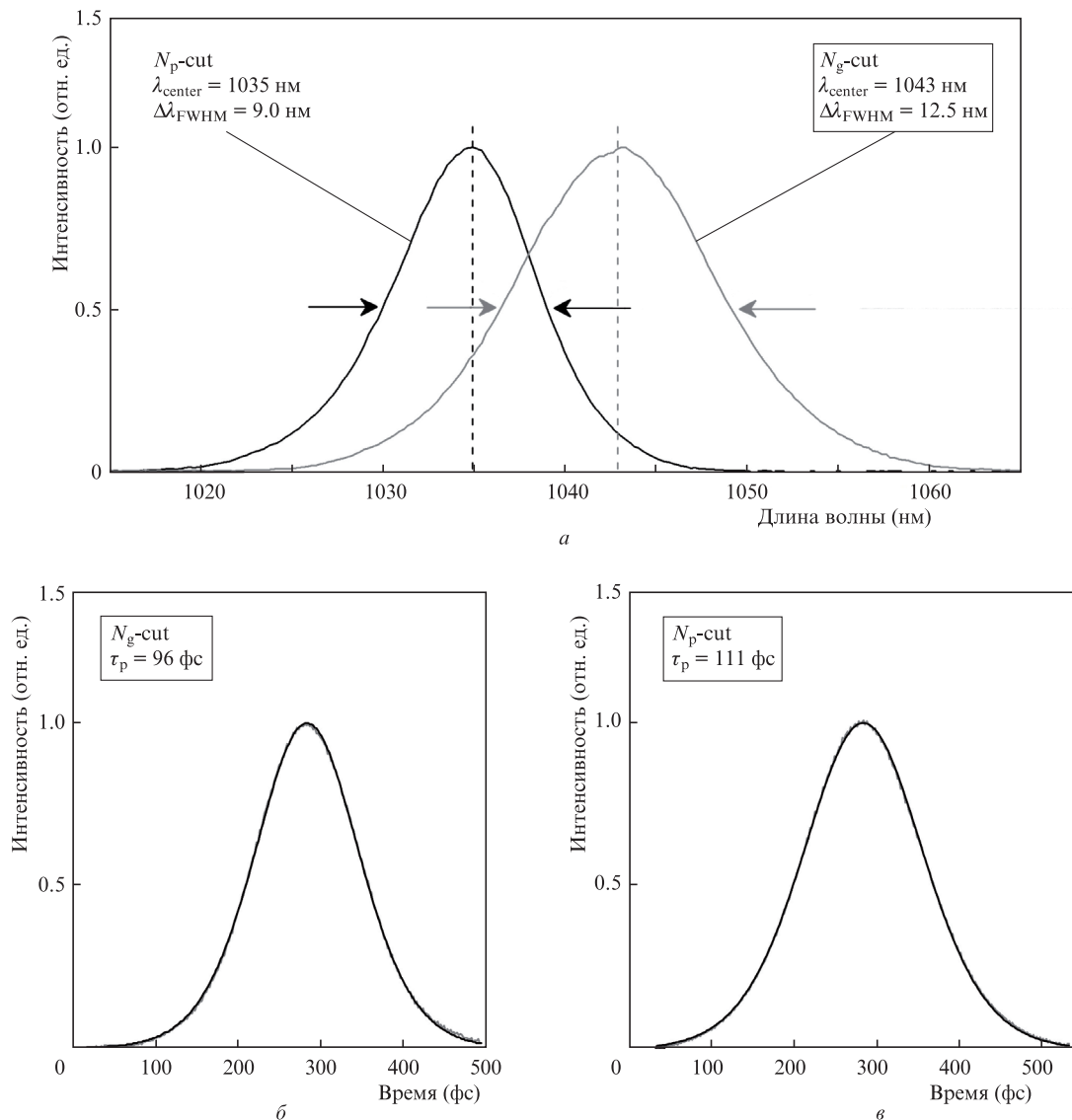


Рис.3. Автокорреляционная функция (а) и спектры генерации (б, в) фемтосекундного лазера на кристалле с ориентациями  $N_g$  и  $N_p$ .

пульсов для  $N_g$ - и  $N_p$ -ориентаций кристалла. Видно, что генерация для этих ориентаций происходит на центральной длине волны 1043 или 1035 нм, ширины частотной полосы равны 12.5 и 9.0 нм по уровню половины интенсивности, а длительности импульсов составляют 90 и 110 фс соответственно. Произведение ширины спектра и длительности импульса примерно в 1.1 раза больше, чем для импульсов с профилем интенсивности, описываемой  $sech^2$ -функцией [16]. Эти данные, а также данные FROG [19] показывают, что в генерируемых фемтосекундных импульсах практически отсутствует частотная модуляция (чирп), а достаточно малые длительности импульсов обусловлены, на наш взгляд, совместным действием керровской нелинейности и насыщающегося поглотителя и формированием так называемого солитонного режима генерации [20].

Поперечный профиль интенсивности выходных пучков на расстоянии 20 см от выходного зеркала, зарегистрированный ПЗС-камерой, показывает, что пучки имеют хорошую аксиальную симметрию с колоколообразным распределением интенсивности. Было также измерено пространственно-угловое качество выходного пучка, характеризуемое параметром  $M^2$  [16, 21]. Этот параметр рассчитывался по результатам измерения эволюции диаметра

лазерного пучка при его распространении; для двух взаимно перпендикулярных направлений  $M_x^2 = 1.07$  и  $M_y^2 = 1.1$ , что достаточно близко к  $M^2 = 1$  для идеального гауссова пучка. Небольшая астигматичность пучка с отношением осей эллипса около 1.03 связана с наклоном сферических дихроичных зеркал. Параметр качества пучка был практически одинаковым в случае как режима генерации фемтосекундных импульсов, так и непрерывного режима генерации во всем диапазоне выходных мощностей. Различия возможных термооптических искажений, связанных с ориентациями кристалла ( $N_g$  и  $N_p$ ) [12], также не сказывалось на качестве пучка, что может быть обусловлено относительно низкой мощностью накачки. Так, например, оценки с использованием известных литературных данных [22, 23] и наши расчеты по программе «LASCAD» дали фокусное расстояние термооптической линзы 180–200 см.

Мы провели также измерения стабильности выходной мощности лазера при его непрерывной работе. Эти измерения показали, что мощность лазера была стабильна в пределах 0.3% на протяжении более 2 ч после выхода на режим в течение примерно 30 мин. Стабильность направления генерации, измеренная с помощью CCD-каме-

ры, находилась в пределах 0.3%–0.5% и 1.2%–1.9% соответственно для горизонтального и вертикального направлений по отношению к дифракционной расходимости выходного пучка лазера.

Мы также исследовали однокристалльный лазер, имеющий немного видоизмененную оптическую схему, при большей мощности накачки [24]. В этой схеме излучение накачки мощностью до 25 Вт коллимировалось и фокусировалось в объем лазерного кристалла через плоское дихроичное зеркало в пятно диаметром около 160 мкм. Максимальная средняя мощность этого лазера в непрерывном режиме достигала 4.1 Вт при мощности падающего излучения накачки 20 Вт и дифференциальном КПД 40%. Выходная мощность в режиме самосинхронизации мод составляла 3.5 Вт при частоте следования импульсов 85.5 МГц, что дает энергию одиночного импульса более 30 нДж. Длительность импульсов в пуге была равна 200 фс, что свидетельствует о режиме самосинхронизации мод только за счет действия насыщающегося поглотителя и слабого воздействия самомодуляции и керровской линзы на этот процесс. Это, по всей видимости, было связано с большим размером моды, чем у генерируемой менее мощным лазером. Несмотря на более высокую среднюю мощность, этот лазер генерировал пучки высокого качества без заметного влияния термооптических эффектов.

Полученные параметры делают возможным использование разработанных лазеров в качестве самостоятельных источников излучения, например для генерации терагерцевого излучения или для микромодификации вещества, так и задающих генераторов мощных лазерных систем.

### 3. Двухкристалльный лазер

Как уже отмечалось, максимальная средняя мощность твердотельных лазеров ограничивается либо терморазрушением активной среды, либо термооптическими aberrациями [25]. Поэтому один из немногих способов ее увеличения в случае объемных лазерных сред – увеличение длины активной среды или использование в резонаторе нескольких активных элементов. Для увеличения средней мощности лазера при сохранении высокого пространственного качества выходного пучка мы использовали схему с двумя активными элементами (см. также [10, 26]).

Оптическая схема генератора с двумя активными элементами из кристаллов Yb:KYW с разными ориентациями оптических осей представлена на рис.4. Использование ориентаций  $N_p$  и  $N_g$ , имеющих разные спектрально-люминесцентные характеристики при соответствующей ориентации вектора поляризации генерируемого или усиленного излучения, позволяет расширить полосу усиления и тем самым генерировать или усиливать более широкополосные chirпированные или фемтосекундные импульсы [10]. Кристаллы имели длину 5 мм и содержали 3% ионов иттербия, что обеспечивало хорошее (более 80%) поглощение излучения накачки. Согласование размеров пучка накачки и моды резонатора осуществлялось, как и в случае однокристалльного генератора, продольным сдвигом активных элементов. Для устранения возможной модуляции спектра торцы активных элементов просветлялись и были наклонены на угол  $\sim 30^\circ$ . Источниками накачки служили две лазерные диодные линейки с волоконными выходами мощностью 50 Вт каждая. Для минимизации деполяризации излучения накачки применялось

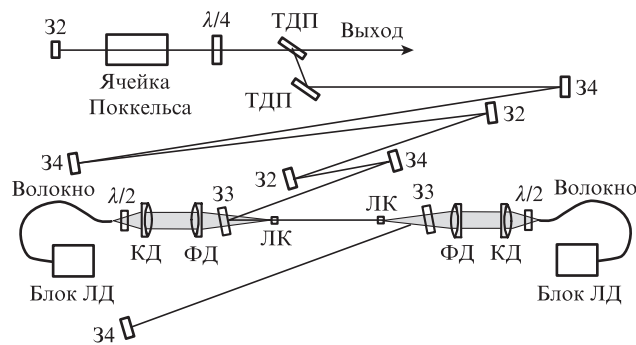


Рис.4. Оптическая схема двухкристалльного лазера: ТДП – тонкопленочные диэлектрические поляризаторы; остальные обозначения те же, что и на рис.1.

короткое (30 см) оптическое волокно диаметром 200 мкм с числовой апертурой  $NA = 0.22$ . Пучки накачки с выхода волокна коллимировались и фокусировались через дихроичные зеркала в объем активной среды в пятно диаметром около 320 мкм, близким к диаметру  $TEM_{00}$ -моды резонатора. Расчет этой моды проводился с помощью хорошо известного матричного метода с учетом астигматических тепловых линз, наводимых в активных элементах излучением накачки. Их фокусное расстояние рассчитывалось с помощью программы «LASCAD» и составляло 480–550 мм для ориентации кристалла  $N_p$  при мощности падающего излучения 30 Вт. Эти величины находятся в разумном согласии с литературными данными [22, 23].

В качестве выходного зеркала лазера в данной конструкции использовался тонкопленочный поляризатор в комбинации с четвертьволновой фазовой пластинкой, вращая которую можно было получать максимальную выходную мощность излучения при конкретной мощности накачки. Для электрооптической модуляции добротности резонатора применялась ячейка Поккельса на кристалле ВВО, контролируемая соответствующим блоком управления. Частота следования импульсов могла плавно изменяться от одиночных импульсов до 500 кГц.

Выходная мощность лазера в непрерывном режиме генерации при использовании как одиночных активных элементов, так и двух кристаллов одновременно в зависимости от мощности излучения накачки, падающего на кристаллы, показана на рис.5. Максимальная выходная мощность составила 12.5 и 9 Вт при дифференциальном КПД 47% и 37% для одиночных кристаллов с ориентаци-

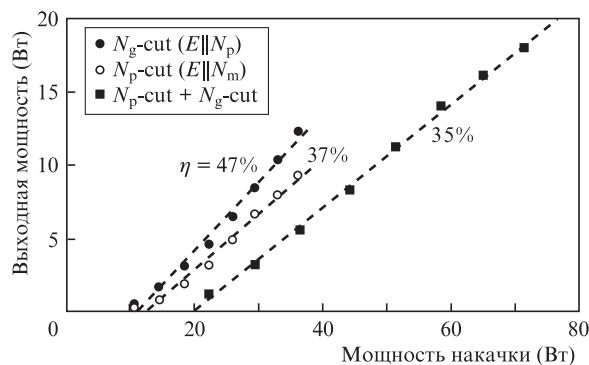


Рис.5. Средняя мощность генерации двухкристалльного лазера в непрерывном режиме при работе кристаллов по отдельности и совместно в зависимости от мощности излучения накачки, падающего на кристаллы.



ями  $N_g$  и  $N_p$  соответственно. Отметим, что выходные мощности для кристалла с ориентацией вектора поляризации генерируемого излучения параллельно оси  $N_p$  ( $E \parallel N_p$ ) превышали мощности для  $E \parallel N_m$ , несмотря на меньшее поперечное сечение вынужденного излучения [9]. Такое поведение мощности можно объяснить, на наш взгляд, разными спектральными потерями резонаторов с кристаллами, генерирующими на разных длинах волн. Максимальная выходная мощность при использовании двух кристаллов в резонаторе была равна 18.5 Вт при мощности накачки 72 Вт, что дает общую и дифференциальную эффективность 25% и 35% соответственно. Спектр генерируемого излучения центрировался на длине волны 1035 нм, а его ширина не превышала 1 нм.

Отметим, что при проведении измерений выходная мощность лазера максимизировалась для каждого значения мощности накачки путем оптимальной настройки фазовой четвертьволновой пластинки. Такой метод измерений приводит, как нетрудно показать, к занижению значений дифференциальной эффективности. Именно этим можно объяснить существенное различие в дифференциальных эффективностях однокристалльного и двухкристалльного генераторов при близких значениях общей эффективности (27%–30% и 25% соответственно).

Максимальная средняя мощность, полученная при модуляции добротности резонатора, достигала 16 Вт при частоте следования импульсов 100 кГц и 14 Вт при частоте следования 500 кГц (время открытия затвора 800 нс). Такое уменьшение средней мощности по сравнению с режимом свободной генерации можно объяснить дополнительными потерями, вносимыми электрооптическим затвором. При уменьшении времени открытия затвора до 400 нс выходная мощность падала уже в три раза, что, очевидно, связано с недостаточностью этого времени для развития генерации. Длительность выходного импульса, определяемая, в основном, довольно большой длиной резонатора, была равна 20 нс. Ширина спектра составляла 16 нм, что свидетельствует о существенно многомодовом режиме генерации. Спектр имел два максимума на длинах волн 1035 и 1043 нм, соответствующих спектральным максимумам коэффициента усиления для двух используемых кристаллов.

Многочастотные лазерные резонаторы с высокой средней мощностью излучения могут использоваться как для генерации мощных фемтосекундных импульсов [27], так и для их регенеративного усиления [10]. Второй, более гибкий, подход к созданию мощных фемтосекундных лазеров в некоторых случаях имеет преимущество, поскольку позволяет получать более короткие фемтосекундные импульсы и существенно снижать частоту их следования (до сотен килогерц), что важно для ряда технических применений. Мы использовали описанный выше двухкристалльный резонатор в качестве регенеративного усилителя излучения однокристалльного задающего генератора [28]. В результате оптимизации параметров резонатора на выходе были получены параметры излучения, приведенные ниже. Средняя выходная мощность излучения достигала 14 Вт на выходе усилителя и 8.7 Вт после компрессора при длительности импульса 180 фс (в случае модификации спектра импульсов на входе), что давало пиковую мощность более 200 МВт при частоте следования импульсов 200 кГц. Лазер мог работать с частотой следования импульсов до 500 кГц при сохранении примерно той же средней мощности.

Максимальная средняя мощность на выходе регенеративного усилителя (Вт) . . . . .	14
Энергия одиночного фемтосекундного импульса (мкДж) после компрессора при частоте следования импульсов 50 кГц . . . . .	160
500 кГц . . . . .	16
Длительность импульса после регенеративного усилителя (пс) . . . . .	50
после компрессора (фс) . . . . .	180
Качество пучка . . . . .	$M^2 < 1.2$

Следует отметить, что энергия усиливаемых сверхкоротких лазерных импульсов в лазерных кристаллах может ограничиваться различными физическими процессами: оптическим пробоем, самовоздействием, вынужденным рассеянием, многофотонными процессами [25]. Спецификой кристаллов KGW/KYW является высокое значение рамановского коэффициента усиления [9, 29], что, с одной стороны, позволяет создавать эффективные рамановские лазеры, а с другой – служит препятствием для получения сверхкоротких импульсов с достаточно большой энергией [30]. Так, в нашем случае мы наблюдали первую и вторую стоксовы компоненты ВКР ( $\lambda_1 = 1145$  нм и  $\lambda_2 = 1270$  нм) со сдвигом частоты  $901 \text{ см}^{-1}$  при усилении чирпированных импульсов длительностью 50 пс, энергии 160 мкДж и частоте следования импульсов 50 кГц, что дает оценку рамановского коэффициента усиления  $g \approx 1,1 \text{ см/ГВт}$ . Это значение существенно отличается от стационарного коэффициента  $g_{st} \approx 4 \text{ см/ГВт}$  [29], что связано с большой шириной спектра чирпированных импульсов ( $\sim 10$  нм), превышающей ширину линии рамановского рассеяния ( $\sim 6 \text{ см}^{-1}$ ). В этом случае, как известно [25], эффективность возбуждения ВКР существенно падает.

Для большинства применений фемтосекундных импульсов, требующих высокой концентрации мощности, важно пространственное качество пучка. Мы провели такие измерения с помощью ПЗС-камеры. Зарегистрированные распределения интенсивности в ближней зоне показали, что при достаточно большой выходной мощности (свыше 10–12 Вт на выходе усилителя) качество пучка ухудшается – происходит астигматическое искажение формы пятна. При этом, как показали измерения, пучок сохраняет аксиальную симметрию примерно до мощности 12 Вт (частота следования импульсов 500 кГц) и примерно до 10 Вт (100 кГц). При этом измеренный параметр качества пучка составлял  $M_x^2 \times M_y^2 = 1.19 \times 1.24$ . Для частоты следования импульсов менее 50 кГц на качество пучка уже может оказывать влияние вынужденное комбинационное рассеяние.

#### 4. Заключение

В настоящей работе исследованы генераторы и усилители на кристаллах Yb:KYW/Yb:KGW, работающие как в непрерывном режиме, так и в режиме генерации и усиления наносекундных и пикосекундных импульсов. Использование нескольких активных элементов, расположенных в одном резонаторе, позволяет масштабировать среднюю мощность излучения таких лазеров при сохранении высокого качества лазерного пучка. Так, в случае двухкристалльной схемы нами были получены средние мощности 18, 16 и 14 Вт для непрерывного и моноимпульсного режимов генерации и для режима усиления чирпи-

рованных пикосекундных импульсов соответственно. Использование двухкристальной схемы со спектрально сдвинутыми максимумами коэффициента усиления кристаллов также позволило усиливать широкополосные чирпированные импульсы без существенного искажения спектра, что дало возможность сжимать импульсы на выходе усилителя до 180 фс. Энергия усиливаемых импульсов ограничивается вынужденным комбинационным рассеянием на уровне 160 мкДж.

Несмотря на то что наибольшие средние мощности фемтосекундных лазерных импульсов получены при использовании активных элементов в форме тонкого диска [11, 31] или слэба [32], лазеры с объемными активными элементами все же имеют право на существование и поддаются масштабированию по средней мощности. Это связано с их относительной простотой и более низкой стоимостью лазерных модулей, изготовление которых не требует сложных технологических приемов, крепления очень тонких активных элементов (в случае тонких дисков) или использования сложных многопроходных схем усиления для слэбов.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке правительства г.Сеула по исследовательскому контракту программы WR100001.

1. Kuleshov N.V., Lagatsky A.A., Podlipensky A.V., Mikhailov V.P., Huber G. *Opt. Lett.*, **22**, 1317 (1997).
2. Кисель В.Э., Трошин А.Е., Щербицкий В.Г., Кулешов Н.В., Павлюк А.А., Брюнер Ф., Пашотта Р., Морис-Геноуд Ф., Келлер У. *Квантовая электроника*, **36**, 319 (1999).
3. Lagatsky A.A., Kuleshov N.V., Mikhailov V.P. *Opt. Commun.*, **165**, 71 (1999).
4. Грабчиков А.С., Кузьмин А.Н., Лисинецкий В.А., Орлович В.А., Войтович А.П., Демидович А.А., Эйхлер Г.И., Титов А.Н. *Квантовая электроника*, **33**, 165 (2003).
5. Brunner F., Spuhler G.J., Aus der Au J., Krainer L., Morier-Genoud F., Paschotta R., Lichtenstein N., Weiss S., Harder C., Lagatsky A.A., Abdolvand A., Kuleshov N.V., Keller U. *Opt. Lett.*, **25**, 1119 (2000).
6. Brunner F., Sudmeyer T., Innerhofer E., Morier-Genoud F., Paschotta R., Kisel V. E., Shcherbitsky V.G., Kuleshov N.V., Gao J., Contag K., Giesen A., Keller U. *Opt. Lett.*, **27**, 1162 (2002).
7. Major A., Cisek R., Barzda V. *Opt. Express*, **14**, 12163 (2006).
8. Kim G.H., Kang U., Heo D., Яшин В.Е., Кулик А.В., Салль Е.Г., Чижов С.А. *Оптич. журн.*, **77** (4), 3 (2010).
9. EKSPLA, www.ekspla.com.
10. Buettner A., Buenting U., Wandt D., Neumann J., Kracht D. *Opt. Express*, **18**, 21973 (2010).
11. Sudmeyer T., Krankel C., Baer C.R.E., Heckl O.H., Saraceno C.J., Golling M., Peters R., Petermann K., Huber G., Keller U. *Appl. Phys. B*, **97**, 281 (2009).
12. Loiko P.A., Yumashev K.V., Kuleshov N.V., Savitski V.G., Calvez S., Burns D., Pavlyuk A.A. *Opt. Express*, **17**, 23536 (2009).
13. Chenais S., Balembois Druon F., Lucas-Leclin G., Georges P. *IEEE J. Quantum Electron.*, **40**, 1217 (2004).
14. LAS-CAD GmbH, www.las-cad.com.
15. Keller U., Miller D A B, Boyd G.D., Chiu T.H., Ferguson J.F., Asom M.T. *Opt. Lett.*, **17**, 505 (1992).
16. Diels J.-C., Rudolph W. *Ultrashort Laser Pulse Phenomena: Fundamentals, Techniques, and Applications on Femtosecond Time Scale* (Boston: Acad. Press, 2006).
17. Szipocs R., Ferencz K., Spielmann C., Krausz F. *Opt. Lett.*, **19**, 201 (1994).
18. Honninger C., Paschotta R., Morier-Genoud F., Moser M., Keller U. *J. Opt. Soc. Am. B*, **16**, 46 (1999).
19. Swamp Optics, www.swampoptics.com.
20. Kartner F.X., Keller U. *Opt. Lett.*, **20**, 16 (1995).
21. Потемкин А.К., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **35**, 1042 (2005).
22. Biswal S., O'Connor S.P., Bowman S.R. *Appl. Opt.*, **44**, 3093 (2005).
23. Chenais S., Druon F., Forget S., Balembois F., Georges P. *Progr. Quantum Electron.*, **30**, 89 (2006).
24. Kim G.H., Kang U., Heo D., Яшин В.Е., Кулик А.В., Салль Е.Г., Чижов С.А. *Оптика и спектроскопия*, **108**, 861 (2010).
25. Мак А.А., Сомс Л.Н., Фромзель В.А., Яшин В.Е. *Лазеры на неодимовом стекле* (М.: Наука, 1990, с. 242).
26. Stučinskas D., Antipenkov R., Varanavičius A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6731**, 67312Y-1 (2007).
27. Palmer G., Schultze M., Emons M., Lindemann A.L., Pospiech M., Steingrube D., Max Lederer D., Morgner U. *Opt. Express*, **18**, 19095 (2010).
28. Kim G.H., Yang J., Chizhov S.A., Sall E.G., Kulik A.V., Yashin V.E., Lee D.S., Kang U. *Opt. Express*, **20**, 3434 (2012).
29. Баснев Т.Т. *ФТТ*, **47**, 1354 (2005).
30. Liu H., Nees J., Mourou G., Biswal S., Spuhler G.J., Keller U., Kuleshov N.V. *Opt. Commun.*, **203**, 315 (2002).
31. Baer C.R.E., Krankel C., Saraceno C.J., Heckl O.H., Golling M., Peters R., Petermann K., Südmeyer T., Huber G., Keller U. *Opt. Lett.*, **35**, 2302 (2010).
32. Russbuedt P., Mans T., Weitenberg J., Hoffmann H.D., Poprawe R. *Opt. Lett.*, **35**, 4169 (2010).