

Генерационные свойства ВКР-активных кристаллов молибдатов и вольфраматов, активированных ионами Nd^{3+} при селективной оптической накачке

Т.Т.Басиев, М.Е.Дорошенко, Л.И.Ивлева, В.В.Осико,
М.Б.Космына, В.К.Комарь, Я.Шульц, Х.Елинкова

Исследована сравнительная эффективность генерации ионов неодима (Nd^{3+}) в лазерных материалах, обладающих возможностью самопреобразования частоты в процессе ВКР. Исследовались генерационные свойства кристаллов вольфраматов и молибдатов со структурой шеелита ($SrWO_4$, $BaWO_4$, $PbWO_4$, $SrMoO_4$, $PbMoO_4$), активированных ионами неодима, при продольной оптической накачке александритовым (длина волны генерации ~ 750 нм) или диодным (~ 800 нм) лазерами. Для лазера на кристалле $PbMoO_4:Nd^{3+}$, работающего на длине волны 1054 нм, получен дифференциальный КПД генерации 54.3% при полном КПД 46%, что является наилучшим результатом для всех исследованных кристаллов со структурой шеелита. Для лазеров на кристаллах $SrWO_4$, $PbWO_4$ и $BaWO_4$ с неодимом, работающих в режиме модуляции добротности резонатора, была продемонстрирована одновременная лазерная генерация и самопреобразование в процессе ВКР генерируемого излучения.

Ключевые слова: твердотельные лазеры, ВКР, вольфраматы, молибдаты, самопреобразование частоты.

1. Введение

Ионы неодима Nd^{3+} в кристалле вольфрамата кальция $CaWO_4$ были первыми редкоземельными ионами, на которых в 1961 г. была получена лазерная генерация [1] и которые по сей день остаются одними из наиболее широко используемых. Это обусловлено удобной энергетической структурой их электронных уровней и хорошими спектроскопическими свойствами, необходимыми для получения лазерной генерации. Спектральный диапазон лазерной генерации на ионах Nd^{3+} в различных матрицах составляет 1030–1085 нм для основного лазерного перехода ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ и 1310–11360 нм для перехода ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{13/2}$ [2].

Одним из способов расширения диапазона доступных длин волн лазеров на основе ионов Nd^{3+} является использование сдвига частоты генерируемого излучения в твердотельных ВКР-преобразователях [3, 4]. Сдвиг частоты в таких кристаллических преобразователях достигает 1000 см^{-1} , что позволяет получать смещение длины волны исходного излучения в ВКР-преобразователе на несколько сотен нанометров даже при однократном стоксовом сдвиге. Интересно, что нелинейно-оптические кристаллы, имеющие кубическую нелинейность и высокий коэффициент ВКР-усиления, могут быть активированы ионами Nd^{3+} и выступать одновременно в роли активной среды и самопреобразователя частоты на основе ВКР (далее – самопреобразование) [35]. В отличие от

схем с дополнительным внешним ВКР-преобразователем, такие лазеры с самопреобразованием частоты излучения обладают высокой стабильностью и обеспечивают компактность конструкции лазера.

К многофункциональным кристаллам с самопреобразованием можно отнести большинство двойных вольфраматов типа калий-гадолиниевого вольфрамата $Nd:KGd(WO_4)_2$ ($Nd:KGW$) или калий-иттриевого вольфрамата $Nd:KY(WO_4)_2$ ($Nd:KYW$), вольфраматы типа вольфрамата свинца $Nd:PbWO_4$ и ванадаты типа ванадата иттрия $Nd:YVO_4$ или ванадата гадолиния $Nd:GdVO_4$. В литературе описано применение этих материалов для создания лазеров с самопреобразованием излучения. Первыми кристаллами, в которых была получена одновременно лазерная генерация ионов неодима и самопреобразование частоты, были кристаллы $Nd:KYW$ и $Nd:KGW$ [6, 7]. В кристаллах ванадатов, активированных ионами неодима, при самопреобразовании была получена эффективная генерация на длинах волн 1.17 и 1.5 мкм [8–10].

В настоящей работе представлены результаты по лазерной генерации ионов неодима в кристаллах вольфраматов и молибдатов со структурой шеелита в сравнении с другими известными лазерными кристаллами (список исследованных кристаллов приведен в табл.1). Целью работы было определение в аналогичных условиях сравнительной эффективности лазерной генерации ионов неодима в предложенных кристаллах вольфраматов и молибдатов со структурой шеелита при селективной оптической накачке и демонстрация возможности создания на их основе лазеров с самопреобразованием лазерного излучения.

2. Материалы и методики исследования

2.1. Кристаллы вольфраматов

Исследовались кристаллы вольфраматов бария, стронция и свинца со структурой шеелита, которые, как было

В.В.Осико, Т.Т.Басиев, Л.И.Ивлева, М.Е.Дорошенко. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: osiko@lst.gpi.ru, basiev@lst.gpi.ru, ivleva@ran.gpi.ru, dorosh@lst.gpi.ru
М.Б.Космына, В.К.Комарь. НТК Институт монокристаллов, НАНУ, Украина, 61001 Харьков, просп. Ленина, 60
J.Sulc, H.Jelinkova. Czech Technical University, 11519 Prague, 1, Brehova, 7, Czech Republic

Табл.1.

| Кристалл | Стоксов сдвиг (см ⁻¹) | Длина волны (нм) | |
|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| | | генерация ионов Nd ³⁺ | ВКР-генерация |
| Nd : SrWO ₄ | 921.5 [12, 13, 17] | 1057 [14, 15, 17] | 1171 [18] |
| Nd : BaWO ₄ | 926.5 [12, 13, 20, 21] | 1055 [14, 15], данная работа | 1169, данная работа |
| Nd : PbWO ₄ | 904.0 [12, 13] | 1058 [22] | 1170 [23] |
| Nd : PbMoO ₄ | 869.0 [12, 13] | 1059 [24, 25, 27] | 1167 [24, 25, 27] |
| Nd : SrMoO ₄ | 887.7 [12, 3] | 1057 [26, 27] | 1168 [27] |

показано ранее, являются эффективными матрицами для нелинейно-оптических ВКР-преобразователей [11]. Поэтому представляет большой интерес активация этих кристаллов ионами неодима для создания полифункциональных активных лазерных материалов, используемых при внутрирезонаторном ВКР-преобразовании лазерного излучения. Наши предварительные исследования ВКР в кристаллах вольфрамов показали, что в зависимости от аниона кристаллической решетки сечение ВКР-усиления и эффективность ВКР-преобразования растут от стронция к барию и затем к свинцу [12, 13]. Однако из экспериментов по синтезу кристаллов вольфрамата бария с неодимом следует, что коэффициент вхождения для ионов Nd³⁺ в кристалле BaWO₄ очень мал из-за большого различия между радиусами ионов Ba²⁺ и Nd³⁺. Поэтому атомная концентрация ионов неодима в кристалле ограничена уровнем 0.1 %–0.2 % даже для тех кристаллов, в которые с целью компенсации избыточного заряда ионов неодима дополнительно вводятся ионы натрия и ниобия [14, 15].

Ситуация является более многообещающей для кристаллов вольфрамата стронция, где различие между радиусами ионов Sr²⁺ и Nd³⁺ менее существенно, что позволило синтезировать кристаллы высокого оптического качества с достаточно высокой (1 %–2 %) атомной концентрацией ионов неодима [15–18].

Наиболее перспективным материалом следует признать кристалл вольфрамата свинца, активированного ионами неодима, поскольку лучшие ВКР-свойства вольфрамов сочетаются в нем с возможностью синтеза кристаллов с достаточно высокой концентрацией ионов неодима (1 %) и очень хорошими спектроскопическими свойствами иона Nd³⁺ [19]. Спектры поглощения кристаллов вольфрамов приведены на рис.1. Необходимо отметить, что для кристаллов вольфрамов, вырезанных вдоль оптической оси *c* (поляризация излучения перпендикулярна этой оптической оси), поляризационная за-

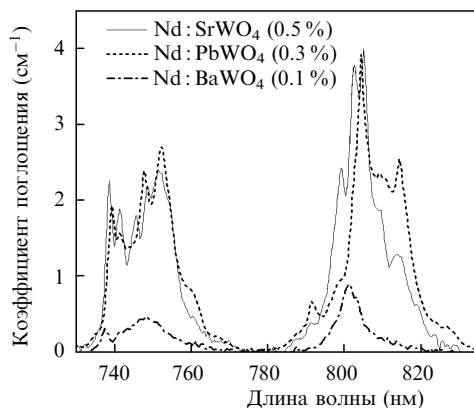


Рис.1. Спектры поглощения исследованных кристаллов вольфрамов со структурой шеелита для поляризации $E_{\perp c}$.

висимость спектров поглощения и люминесценции ионов Nd³⁺ отсутствует, что и наблюдалось в экспериментах.

2.2. Кристаллы молибдатов

В экспериментах исследовались кристаллы молибдатов стронция и свинца, активированные ионами неодима. Согласно нашим предыдущим исследованиям, ВКР-свойства кристаллов молибдатов превосходят таковые для аналогичных кристаллов вольфрамов [12, 28, 29], что выгодно сочетается в этих кристаллах с хорошими спектроскопическими свойствами иона неодима. Исследования показали, что, в отличие от кристаллов вольфрамов, в кристаллах молибдатов наилучшие спектроскопические свойства ионов неодима (наибольшие сечения поглощения и люминесценции) реализуются для излучения, поляризованного параллельно оптической оси *c*.

Спектры поглощения кристаллов Nd : SrMoO₄ и Nd : PbMoO₄ для различных поляризаций падающего света приведены на рис.2. Как видно из рисунка, чтобы реализовать максимальное поглощение в случае кристаллов молибдатов, активированных ионами неодима, оп-

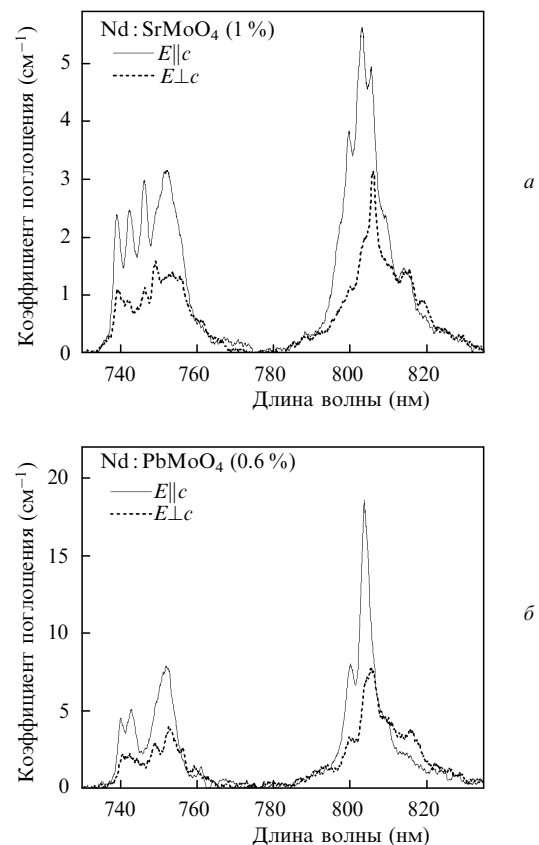


Рис.2. Поляризованные спектры поглощения исследованных кристаллов молибдата стронция (а) и молибдата свинца (б) со структурой шеелита для различных поляризаций падающего излучения.

тическая ось c должна лежать в плоскости кристалла, а поляризация излучения накачки должна быть параллельна этой оптической оси. Для излучения накачки, поляризованного параллельно оптической оси c кристалла, поглощение на длине волны 750 нм может достигать 3 см^{-1} для $\text{Nd} : \text{SrMoO}_4$ и 7 см^{-1} для $\text{Nd} : \text{PbMoO}_4$. При этом для другого направления поляризации поглощение на длине волны накачки 750 нм меньше в 1.5–2 раза. Для накачки на длине волны 805 нм при $E \parallel c$ может быть реализовано еще большее поглощение: 5.5 см^{-1} для кристалла $\text{Nd} : \text{SrMoO}_4$ и 17 см^{-1} для кристалла $\text{Nd} : \text{PbMoO}_4$.

2.3. Накачка александритовым лазером

В первой части экспериментов для накачки использовался перестраиваемый александритовый ($\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{VeO} : \text{Cr}^{3+}$) лазер с ламповой накачкой и выходной энергией импульса до 300 мДж при длительности импульса генерации 50 мкс. Этот лазер служил удобным источником возбуждения, позволяющим моделировать режим диодной накачки при достаточно высокой частоте повторения импульсов (5–10 Гц), существенно более высокой (по сравнению с диодным лазером) энергии импульса накачки и достаточно широком диапазоне перестройки длины волны выходного излучения (710–775 нм). Кроме того, александритовый лазер характеризуется малой расходимостью выходного излучения, позволяющей получать разнообразные профили пучка накачки в кристалле, в том числе с большой длиной перетяжки, что существенно при использовании кристаллов большой длины с низкой концентрацией ионов неодима.

Схема оптического резонатора исследованных лазеров на основе неодимовых кристаллов приведена на рис.3. Излучение накачки фокусировалось в кристалл линзой с фокусным расстоянием 150 мм, что позволяло получать достаточно длинную (~ 7 мм) перетяжку пучка. Оптический резонатор неодимового лазера был образован дихроичным входным сферическим зеркалом (радиус кривизны $r = 500$ мм) с высоким пропусканием на длине волны накачки (740–750 нм) и со 100 %-ным отражением на длине волны генерации в области 1 мкм. Длина оптического резонатора составляла 100 мм. Такая большая длина обусловлена необходимостью размещения зеркал достаточно далеко от перетяжки пучка накачки из-за возможности оптического пробоя их поверхности. Для накачки исследованных кристаллов длина волны александритового лазера настраивалась на 752 нм в соответствии с максимумом спектра поглощения ионов неодима.

2.4. Накачка лазерным диодом

Во второй части экспериментов в качестве источника накачки использовался диодный лазер с волоконным выходом излучения и специальной системой формирования пучка на выходе волокна, которая позволяла получать достаточно длинную ($l = 4$ мм) перетяжку пучка накачки. Диаметр пучка накачки в перетяжке составлял 400 мкм.

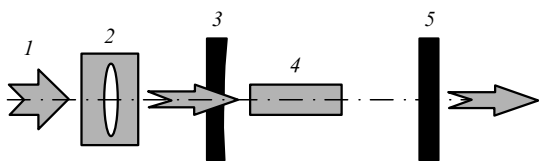


Рис.3. Оптическая схема резонатора исследованных лазеров: 1 – пучок лазера накачки; 2 – фокусирующая система; 3 – входное дихроичное зеркало; 4 – исследуемый кристалл; 5 – выходное зеркало.

Из-за волоконного вывода излучения выходной пучок накачки диодного лазера имел круговую поляризацию, поэтому в лазерных экспериментах не наблюдалось поляризационной зависимости выходных параметров генерации исследованных неодимовых кристаллов. Схема оптического резонатора неодимового лазера была аналогична показанной на рис.3 с тем отличием, что заднее дихроичное зеркало имело пропускание на длине волны 805 нм и было плоским, а в качестве выходного зеркала использовались сферические зеркала ($r = 120$ мм) с различными коэффициентами отражения (2 % и 8 %). Для лучшего совпадения длины волны накачки диодного лазера с максимумом спектра поглощения неодима в некоторых экспериментах применялась температурная перестройка длины волны генерации диодного лазера.

3. Эксперименты по ВКР-генерации

Для получения высоких плотностей мощности излучения, необходимых для достижения порога самопреобразования, лазеры на ВКР-кристаллах, активированных ионами неодима, работали в режиме пассивной модуляции добротности. В качестве пассивного модулятора использовались кристаллы $\text{LiF} : \text{F}_2^-$. Поскольку генерация неодима осуществлялась на длине волны основного лазерного перехода ${}^4\text{F}_{3/2} - {}^4\text{I}_{11/2}$, составляющей ~ 1 мкм, то ВКР-генерация на первой стоксовой компоненте возникала на длине волны ~ 1.17 мкм. При этом для получения ВКР-генерации использовался специальный оптический резонатор, образованный задним сферическим зеркалом с радиусом кривизны 0.5 м, имеющим значительное пропускание на длине волны накачки и высокое отражение в области 1000–1250 нм. Выходное плоское зеркало имело частичное пропускание на длине волны первой стоксовой компоненты и высокое отражение на длине волны генерации ионов Nd^{3+} .

Временные характеристики лазерного излучения измерялись с помощью высокоскоростного вакуумного диода (модель FNSPE) с напряжением питания 1000 В. Полоса пропускания диода превышала 2 ГГц. Для измерения энергии импульса использовался Molectron-J25 (чувствительность 8.59 В/Дж), подключенный к осциллографу Tektronix-3052B (500 МГц). Выходная средняя мощность лазерного излучения измерялась с помощью измерителя энергии и мощности Molectron-EMP 2000. Спектр излучения лазера регистрировался монохроматором Oriel 77250 (ширина щели 50 мкм) и CCD-камерой Electrim EDC-1000HR.

4. Результаты и их обсуждение

4.1. Накачка александритовым лазером

Необходимо отметить, что, несмотря на низкую пороговую энергию, эффективность лазерной генерации $\text{Nd} : \text{BaWO}_4$ была самой низкой из эффективностей всех исследованных кристаллов (дифференциальный КПД равен 12.2 %), что связано с очень малой концентрацией ионов неодима в данном кристалле и с необходимостью использовать кристалл большой длины ($l = 37.7$ мм). Это приводит к неоптимальному распределению интенсивности накачки по длине кристалла и к плохому согласованию размеров накачанной области и моды оптического резонатора. Гораздо большая эффективность генерации была получена для кристалла $\text{Nd} : \text{SrWO}_4$, диф-

ференциальный КПД которого при коэффициенте отражения выходного зеркала 60 % составил 46 %. В случае зеркала с коэффициентом отражения 50 % пороговая энергия генерации повышалась в 2.5 раза.

Для обоих кристаллов вольфрамата свинца, различающихся концентрацией ионов неодима (0.3 % и 0.6 %), при коэффициенте отражения выходного зеркала 60 % пороговые энергии генерации были практически одинаковы и примерно вдвое превышали пороговую энергию лазеров на кристаллах Nd : BaWO₄ и Nd : SrWO₄, что, видимо, связано с более низким оптическим качеством кристаллов Nd : PbWO₄ и, следовательно, с более высокими паразитными потерями на торцах и внутри кристалла. В случае выходного зеркала с коэффициентом отражения 35% пороги генерации двух кристаллов с различными концентрациями неодима были по-прежнему очень близки, но, в отличие от кристалла Nd : SrWO₄, порог генерации более прозрачного выходного зеркала увеличивался для обоих кристаллов всего в 1.4 раза.

Наибольший дифференциальный КПД генерации (53.2 %) был получен для лазера на кристалле Nd : PbWO₄ (0.6 %) с коэффициентом отражения выходного зеркала 35 %, что примерно вдвое выше дифференциального КПД лазера на кристалле Nd : PbWO₄ с вдвое меньшей концентрацией ионов неодима (0.3 %). Полученные результаты демонстрируют хорошие генерационные свойства ионов Nd³⁺ в кристалле PbWO₄. Дальнейшее улучшение оптического качества кристаллов и оптимизация концентрации ионов неодима в этих кристаллах должны привести к дальнейшему росту эффективности лазерной генерации.

Для лазера на кристалле Nd : PbMoO₄ кроме зависимости энергии генерации для различных коэффициентов отражения выходного зеркала были измерены зависимости выходной энергии для двух взаимно перпендикулярных поляризаций излучения накачки – вдоль оптической оси кристалла и перпендикулярно ей. Из-за меньшего поглощения излучения накачки в случае перпендикулярной поляризации эффективность генерации была почти вдвое меньше. Наилучшие результаты были получены для лазера на кристалле Nd : PbMoO₄ с атомной концентрацией ионов неодима 0.3 % и коэффициентом отражения выходного зеркала 60 %. Для этого лазера дифференциальный КПД генерации составил 54.3 %. Необходимо отметить, что такая высокая эффективность генерации была получена при концентрации ионов неодима в два раза меньшей, чем во втором по эффективности лазере на кристалле Nd : PbWO₄ (0.6 %).

Следует подчеркнуть, что в обоих случаях наилучшие результаты были получены для кристаллов, содержащих катионы свинца (Pb²⁺). Высокая степень ковалентности связи атома свинца в кристаллах приводит к наибольшим сечениям поглощения и люминесценции ионов неодима, что является крайне важным для достижения эффективной накачки и высокого лазерного сечения ионов неодима. Кроме того, ионы Pb²⁺ имеют радиус, близкий к радиусу ионов неодима, и допускают относительно высокий уровень активации кристаллов ионами Nd³⁺. Одновременно кристаллы, содержащие ион свинца, являются также наиболее эффективными с точки зрения низкого порога и высокого коэффициента усиления ВКР, что позволяет создавать высокоэффективные лазеры с самопреобразованием излучения генерации.

С целью оценки результаты генерации ионов неодима в новых кристаллах вольфраматов и молибдатов срав-

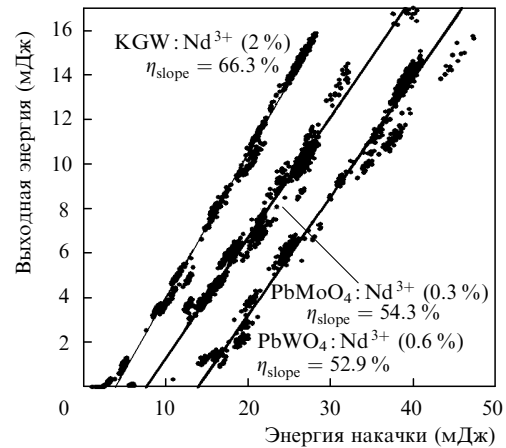


Рис.4. Зависимости выходной энергии генерации лазера на кристаллах PbWO₄ : Nd³⁺, PbMoO₄ : Nd³⁺ и KGW : Nd³⁺ от энергии накачки alexандритового лазера.

нивались в аналогичных условиях с результатами, полученными для оптимизированного коммерческого кристалла Nd : KGW с атомной концентрацией ионов неодима 2.2 % и просветляющими покрытиями, нанесенными на торцы активного элемента. Наилучшие результаты по лазерной генерации при накачке alexандритовым лазером приведены на рис.4.

4.2. Накачка диодным лазером

Следует сразу отметить, что во всех экспериментах с диодной накачкой настройка длины волны генерации диодного лазера на максимум линии поглощения ионов неодима в исследованных кристаллах не проводилась. Исключение было сделано для кристалла Nd : KGW, в котором длина волны накачки была настроена на максимум пика поглощения ионов неодима для получения максимальной выходной энергии лазерной генерации. Однако в каждом эксперименте измерялось реальное поглощение исследованного кристалла на длине волны накачки.

Для лазера на кристалле Nd : BaWO₄ из-за низкой концентрации ионов неодима и большой длины кристалла ($l = 37.7$ мм), как и в предыдущем эксперименте, был получен наиболее высокий порог генерации (1.4 мДж) и один из наиболее низких дифференциальных КПД генерации (9.2 %).

В кристалле Nd : PbWO₄ с меньшей концентрацией ионов неодима порог генерации оказался почти вдвое выше, а эффективность генерации – вдвое ниже по сравнению с кристаллом с большей концентрацией. Для лазера на кристалле Nd : PbWO₄ с атомной концентрацией ионов неодима 0.6 % и коэффициентом отражения выходного зеркала 98 % порог генерации составил 0.47 мДж, а дифференциальный КПД был равен 13.4 % (полный КПД – 12 %).

Для обоих кристаллов молибдатов (Nd : SrMoO₄ и Nd : PbMoO₄) характерен достаточно высокий (~1 мДж) порог генерации, что чуть лучше, чем для кристалла вольфрамата бария. Это свидетельствует о достаточно низком оптическом качестве исследованных кристаллов молибдатов. При этом дифференциальный КПД генерации для Nd : SrMoO₄ составил 16.4 %, а для Nd : PbMoO₄, как и в случае накачки alexандритовым лазером, был получен наибольший среди всех исследованных кристаллов дифференциальный КПД, равный 21 % (при полном

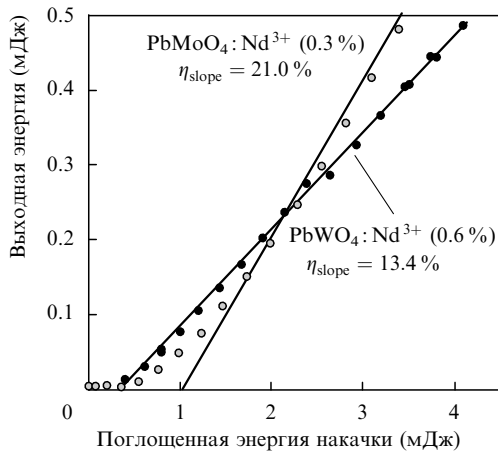


Рис.5. Зависимости выходной энергии генерации лазера на кристаллах $\text{PbWO}_4:\text{Nd}^{3+}$, $\text{PbMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$ и $\text{KGW}:\text{Nd}^{3+}$ от поглощенной энергии накачки диодного лазера.

КПД 17 %). Таким образом, при накачке неполяризованным излучением диодного лазера кристаллы молибдатов стронция и свинца характеризуются наибольшим КПД генерации по сравнению со всеми исследованными кристаллами со структурой шеелита.

На рис.5 приведены результаты измерений зависимости выходной энергии лазерной генерации от поглощенной энергии накачки диодного лазера для кристаллов вольфрамата и молибдата свинца. Для удобства сравнения результаты по генерации исследованных кристаллов сведены в табл.2. В ней приведены пороговые энергии лазерной генерации, а также максимальный дифференциальный (η_{slope}) и полный (η_{tot}) КПД лазерной генерации для накачки александритовым и диодным лазерами. Как видно из табл.1, кристаллы вольфрамов и молибдатов со структурой шеелита характеризуются достаточно высокой эффективностью генерации ионов неодима, которая близка к эффективности лазера на основе оптимизированного коммерческого кристалла $\text{Nd}:\text{KGW}$, широко используемого для создания эффективных лазерных систем. Среди исследованных кристаллов шеелитов для лазера на кристалле $\text{Nd}:\text{PbMoO}_4$ был получен дифференциальный КПД 54.3 % (полный КПД – 46%) при на-

качке александритовым лазером и дифференциальный КПД 21 % (полный КПД – 17 %) при накачке диодным лазером, что является лучшим результатом для всех исследованных кристаллов. Необходимо подчеркнуть, что кристаллы вольфрамов и молибдатов со структурой шеелита характеризуются значительно более высоким коэффициентом ВКР-усиления и более высокой эффективностью ВКР-преобразования по сравнению с известным кристаллом KGW .

4.3. Демонстрация самопреобразования излучения с помощью ВКР

Все кристаллы, в которых возможно самопреобразование излучения генерации, были исследованы в оптическом резонаторе для ВКР-генерации. Самопреобразование наблюдалось в кристаллах $\text{Nd}:\text{BaWO}_4$ и $\text{Nd}:\text{SrWO}_4$ при накачке александритовым лазером и в кристаллах $\text{Nd}:\text{PbWO}_4$ при накачке диодным лазером. Параметры ВКР-лазеров и полученные результаты сведены в табл.3.

Для кристалла $\text{Nd}:\text{BaWO}_4$ максимальная поглощенная энергия накачки при возбуждении александритовым лазером в эксперименте составила 30 мДж. При установке выходного зеркала оптического резонатора с частичным пропусканием на длине волны генерации Nd^{3+} для лазера на кристалле $\text{Nd}:\text{BaWO}_4$ наблюдалась одновременная генерация на длине волны 1055 нм и на соответствующей ей первой стоксовой компоненте с длиной волны 1169 нм. При этом энергии и длительности импульса (измерены по полуширине импульса на полувысоте) составили 0.69 мДж и 4.4 нс для $\lambda = 1055$ нм и 0.25 мДж и 2.3 нс для $\lambda = 1169$ нм. При использовании зеркала с частичным пропусканием только на длине волны ВКР-излучения ($R_{1055} > 99\%$, $R_{1169} = 60\%$) было получено самопреобразование излучения с максимальной выходной энергией импульса 0.8 мДж на длине волны первой стоксовой компоненты 1169 нм при длительности импульса 1.3 нс, что соответствует пиковой мощности 615 кВт.

Максимальная энергия импульса самогенерации $\text{Nd}:\text{SrWO}_4$ -лазера при накачке александритовым лазером составила 4.5 мДж при длительности выходного импульса 1.9 нс. На рис.6 показаны временные зависимо-

Табл.2.

| Кристалл | Длина кристалла (мм) | Атомная концентрация Nd^{3+} (%) | Поглощение (%) | Пороговая энергия (мДж) | η_{slope} (%) | η_{tot} (%) | Поляризация |
|-------------------------|----------------------|---|----------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|
| KGW : Nd | 8 | 2.2 | 92.1 | 3.7 | 32.6 | 28 | ⊥ |
| | | | 92.1 | 4 | 66.3 | 52 | |
| PbMoO ₄ : Nd | 4.9 | 0.3 | 43.9 | 7 | 21.8 | 16 | ⊥ |
| | | | 66.8 | 7.6 | 54.3 | 46.4 | |
| PbWO ₄ : Nd | 9.7 | 0.6 | 97.7 | 13.9 | 52.9 | 33.3 | ⊥ |
| SrWO ₄ : Nd | 45 | 1 | 99.5 | 8.7 | 48.5 | 42 | ⊥ |
| PbWO ₄ : Nd | 8.4 | 0.3 | 89.6 | 16.6 | 25.9 | 15 | ⊥ |
| SrMoO ₄ : Nd | 1.5 | 1 | 38.5 | 7.5 | 24.4 | 17.2 | ⊥ |
| BaWO ₄ : Nd | 37.7 | 0.1 | 50.6 | 6.9 | 12.3 | 9.4 | ⊥ |
| KGW : Nd | 8 | 2.2 | 88 | 0.69 | 44.6 | 39 | ⊕ |
| PbMoO ₄ : Nd | 4.9 | 0.3 | 69 | 1.04 | 21.0 | 17 | ⊕ |
| SrMoO ₄ : Nd | 1.5 | 1 | 32 | 1.05 | 16.4 | 12.3 | ⊕ |
| PbWO ₄ : Nd | 9.7 | 0.6 | 98 | 0.47 | 13.4 | 12 | ⊕ |
| BaWO ₄ : Nd | 37.7 | 0.1 | 80 | 1.38 | 9.2 | 7 | ⊕ |
| PbWO ₄ : Nd | 8.4 | 0.3 | 63 | 0.89 | 6.3 | 4.5 | ⊕ |

Табл.3.

| Параметры | Лазерные кристаллы | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|
| | Nd : SrWO ₄ | Nd : BaWO ₄ | Nd : PbWO ₄ |
| Атомная концентрация ионов Nd ³⁺ (%) | 0.5 | 0.1 | 0.6 |
| Длина кристалла (мм) | 45 | 37.7 | 9.7 |
| Длина волны накачки (нм) | 752 (александритовый лазер) | 752 (александритовый лазер) | 803 (диодный лазер) |
| Длина резонатора (мм) | 140 | 140 | 75 |
| Коэффициент отражения выходного зеркала (%) | | | |
| на $\lambda = 1.06$ мкм | 99.9 | 99.9 | 99.5 |
| на $\lambda = 1.17$ мкм | 47 | 47 | 99.5 |
| Начальное пропускание пассивного затвора на LiF : F ₂ ⁻ (%) | 5 | 60 | 60 |
| Пороговая энергия генерации (мДж) | 79 | 14 | 3.5 |
| Длина волны генерации (нм) | 1170 | 1169 | 1158 и 1170 |
| Длительность импульса ВКР (нс) | 2.9 | 1.3 | 4.8 |
| Энергия импульса ВКР-генерации (мДж) | 4.5 | 0.8 | – |
| Пиковая мощность ВКР-генерации (кВт) | 1550 | 620 | – |

сти импульсов генерации на сдвинутой по частоте длине волны первой стоксовой компоненты для кристалла Nd : PbWO₄ при накачке диодным лазером. К сожалению, оптическое качество кристалла Nd : PbWO₄, как уже отмечалось ранее, было невысоким, поэтому при работе в режиме модуляции добротности происходил пробой поверхности активного элемента, что не позволило изменить энергию импульса самопреобразования.

Из временных зависимостей импульсов видно, что благодаря кубической нелинейности процесса ВКР-преобразования выходной импульс в системах с самопреобразованием существенно укорачивается по сравнению с исходным импульсом накачки, что позволяет получать в компактных лазерных системах на их основе выходные импульсы наносекундной и субнаносекундной длительности. Эффективность преобразования основного излучения в лазерах с самопреобразованием на основе кристаллов вольфрамов и молибдатов может достигать 70 %–90 %, что позволяет эффективно получать короткие, сдвинутые по частоте импульсы лазерного излучения, которые могут использоваться в различных приложениях.

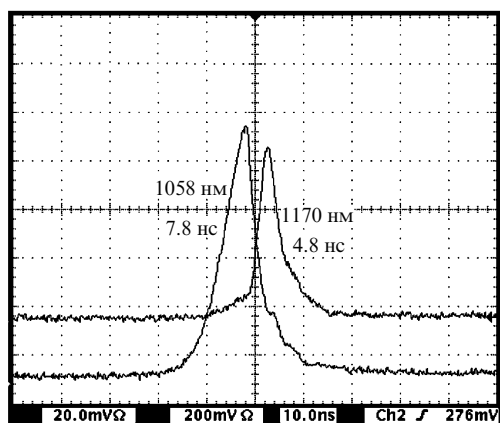


Рис.6. Оциллограммы импульсов генерации при одновременном ВКР-преобразовании излучения в кристалле Nd : PbWO₄ в случае накачки диодным лазером.

5. Выводы

Таким образом, в исследованных ВКР-кристаллах вольфрамов и молибдатов, активированных ионами неодима, получена высокая эффективность лазерной генерации, сравнимая с эффективностью генерации лазера на основе хорошо известного и широко применяемого кристалла Nd : KGW. При этом кристаллы вольфрамов и молибдатов со структурой шеелита характеризуются значительно более высоким коэффициентом ВКР-усиления и более высокой эффективностью ВКР-преобразования, чем кристалл KGW. Дифференциальный КПД лазера на кристалле Nd : PbMoO₄ составил 54.3% (полный КПД – 46 %) при накачке александритовым лазером и 21 % (полный КПД – 17 %) при накачке диодным лазером. Это – лучший результат для всех исследованных кристаллов со структурой шеелита.

В лазерах на кристаллах Nd : SrWO₄ и Nd : BaWO₄ с накачкой александритовым лазером и в лазере на кристалле Nd : PbWO₄ с накачкой диодным лазером было продемонстрировано ВКР-самопреобразование излучения генерации неодима. При этом в аналогичных условиях такое преобразование в лазере на коммерческом кристалле Nd : KGW получить не удалось.

Дальнейшее улучшение оптического качества кристаллов вольфрамов и молибдатов и оптимизация в них концентрации ионов неодима должны привести к росту эффективности лазерной генерации на длине волны вблизи 1 мкм. Самопреобразование излучения генерации ионов неодима в этих кристаллах позволяет получить существенное укорочение длительности выходного импульса, высокую пиковую мощность и новые длины волн в области 1.2–1.5 мкм.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта МНТЦ № 2022р и программы ОФН РАН «Лазерные системы».

1. Johnson L.F., Nassau K. *Proc. IRE*, **49**, 1704 (1961).
2. Kaminskii A.A. *Crystalline Lasers: Physical Processes and Operating Schemes, Laser Science & Technology Series* (Florida, USA: CRP Press Inc, 1996).
3. Powell R.C., Basiev T.T. in *Advances in Laser Physics* (Amsterdam:

- Harwood Academic, 2000, pp 55–66).
4. Basiev T.T., Powell R.C., in *Handbook of Laser Technology and Applications* (Taylor & Francis Group, CRC Press, 2003, ch. B1.7, pp 469–497).
 5. Basiev T.T., Osiko V.V., Prokhorov A.M., Dianov E.M. *Topics in Applied Physics* (Berlin: Springer-Verlag, 2003, vol. 89).
 6. Mochalov I.V. *Opt. Engng*, **36**, 1660 (1997).
 7. Андрюнас К., Вищакас Ю., Кабелка В., Мочалов И.В., Павлюк А.А., Петровский Г.Т., Сырус В. *Письма в ЖЭТФ*, **42**, 333 (1985).
 8. Basiev T.T., Vassiliev S.V., Konyushkin V.A., Osiko V.V., Zagumenyui A.I., Zavartsev Y.D., Kutovoi S.A., Sherbakov I.A. *Laser Phys. Lett.*, **1** (5), 237 (2004).
 9. Chen Y.F. *Opt. Lett.*, **29**, 2172 (2004).
 10. Chen Y.F. *Opt. Lett.*, **29**, 2632 (2004).
 11. Basiev T.T., Sobol A.A., Zverev P.G., Voron'ko Yu.K., Osiko V.V., Powell R.C., in *OSA Trends Opt. Photonics Adv. Solid-State Lasers* (Washington, D.C.: OSA, 1998, vol. 19, p. 546).
 12. Basiev T.T., Sobol A.A., Zverev P.G., Osiko V.V., Powell R.C. *Appl. Opt.*, **38**, 594 (1999).
 13. Basiev T.T., Sobol A.A., Voron'ko Yu.K., Zverev P.G. *Opt. Mater.*, **15**, 205 (2000).
 14. Voronina I.S., Ivleva L.I., Basiev T.T., Zverev P.G., Polozkov N.M. *J. Opt. Adv. Mater.*, **5**, 887 (2003).
 15. Zverev P.G., Ivleva L.I., Basiev T.T., Osiko V.V., *Conf. Program IQEC/LAT* (Moscow: Russian Academy of Sciences, 2002, p. QSuR8).
 16. Zverev P.G., Basiev T.T., Ivleva L.I., Osiko V.V., Polozkov N.M., Voronina I.S. in *Advanced Solid-State Laser* (Washington, D.C.: OSA, 2002, pp. MB10-1 – MB10-3).
 17. Zverev P.G., Nekhoroshikh A.V., Alimov O.K., Skornyakov V.V., Basiev T.T., Černý P., Jelinková H. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5582**, 88 (2004).
 18. Brenier A., G.Jia, C. Tu. *J. Phys.: Condensed Matter*, **16**, 9103 (2004).
 19. Kaminskii A.A., Eichler H.J., Ueda K., Klassen N.V., Redkin B.S., Li L.E., Findeisen J., Jaque D., Garca-Sole J., Fernandez J., Balda R. *Appl. Opt.*, **38**, 4533 (1999).
 20. Zverev P.G., Basiev T.T., Sobol A.A., Ermakov I.V., Gellerman W., in *Advanced Solid-State Laser* (Washington, D.C.: OSA, 2001, pp. 124–125).
 21. Černý P., Jelinková H., Zverev P.G., Basiev T.T. *Progr. Quantum Electron.*, **28** (2), 113 (2004).
 22. Kaminskii A.A., Bagayev S.N., Ueda K.-I., Eichler H.J., Garcia-Sole J., Jaque D., Romero J.J., Fernandez J., Balda R., Butashin A.V., Agullo-Rueda F. *Proc. Third Int. Symp. on Modern Problems of Laser Physics (MPLP-2000)* (Akademgorodok, Novosibirsk, Russia, 2000, p. 168175).
 23. Chen W., Inagawa Y., Omatsu T., Tateda M., Takeuchi N., Usuki Y. *Opt. Commun.*, **194**, 401 (2001).
 24. Kaminskii A.A., Bagayev S.N., Ueda K., Eichler H.J., Garcia-Sole J., Jaque D., Romero J.J., Fernandez J., Balda R., Butashin A.V., Agullo-Rueda F. *Laser Phys.*, **11**, 1142 (2001).
 25. Basiev T.T., Vassiliev S.V., Doroshenko M.E., Osiko V.V., Puzikov V.M., Kosmyna M.B. *Opt. Lett.*, **31**, 65 (2006).
 26. Kaminskii A.A. *Laser Crystals. Their Physics and Properties. Springer Series in Optical Sciences* (Berlin: Springer-Verlag, 1981, No. 14).
 27. Basiev T.T., Vassiliev S.V., Doroshenko M.E., Osiko V.V., in *Advanced Solid-State Photonics 2006* (Washington, D.C.: OSA, 2006, paper TuB21).
 28. Зверев П.Г., Карасик А.Я., Басиев Т.Т., Ивлева Л.И., Осико В.В. *Квантовая электроника*, **33** (4), 331 (2003).
 29. Basiev T.T., Chunaev D.S., Karasik A.Ya., Zverev P.G., Sobol A.A., Ivleva L.I., Osiko V.V., in *Advanced Solid-State Photonics* (Washington, D.C.: OSA, 2003, pp 303–305).