

ВЫНУЖДЕННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ В ПРИЛОЖЕНИИ ИСТОЧНИКОВ ПОЛУТОРАМИКРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

И. В. БЕЗНОСЕНКО, Ю. П. МАЧЕХИН

Рассматривается явление вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в твёрдых телах. Излагается обзор работ по развитию ВКР-лазеров.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеяние, полуторамикронный диапазон, ВКР-самопреобразование, лазерный пассивный затвор, выходное зеркало, накачка активного элемента.

ВВЕДЕНИЕ

Известно [21], что спектральная область 1,5–1,6 мкм привлекает разработчиков различных лазерных приборов по целому ряду причин. Прежде всего это относительная безопасность излучения для зрения: допустимая в полуторамикронной области плотность энергии, облучающей роговицу глаза, на 5 порядков превышает соответствующие значения для видимой и ближней ИК областей спектра. Такая особенность связана с подходящим коэффициентом поглощения полуторамикронного излучения водой, содержащейся в прозрачных тканях глаза, и связанной с этим невозможностью поражения чувствительной сетчатой оболочки глаза. Эта же особенность делает полуторамикронные лазеры привлекательными для ряда хирургических применений, где требуется «деликатная» коагуляция малых объемов биологических тканей. В то же время земная атмосфера, несмотря на наличие в ней воды в виде паров, вполне прозрачна в полуторамикронной области, которая, таким образом, оказывается весьма удобной для работы лазерных локаторов и дальномеров. Кроме того, с указанным спектральным диапазоном совпадают области максимальной прозрачности кварцевых световодов, использующихся в волоконных линиях связи и максимальной чувствительности распространённых неохлаждаемых фотоприёмников: германиевых и InGaAs фотодиодов.

Можно выделить несколько направлений применения твердотельных активных сред для обеспечения генерации длин волн излучения в диапазоне 1,5–1,6 мкм:

– *генерация на стёклах и кристаллах в диапазоне 1,5–1,6 мкм.* В настоящее время существуют производители и распространители Yb-Er стёкол (Украина, Россия, Германия), выпускающие активные элементы для диодной и ламповой накачки. Готовые промышленные образцы дальномеров выпускаются на стёклах [62, 63, 66–68]. Возможности таких дальномеров ограничены низкой теплопроводностью лазерных стёкол, что не позволяет увеличивать мощность и частоту генерации импульсов. Расширение лазерного пучка линзами для снижения тепловой нагрузки приводит к нарушению одноименного режима работы. Применение систем

охлаждения и термостабилизации значительно повышает стоимость изделий. Одним из путей совершенствования твердотельных лазерных излучателей является использование кристаллических активных элементов. У кристаллов лучше теплопроводность, они могут работать при больших мощностях генерации лазеров. Существует целый ряд кристаллических материалов для активных элементов полуторамикронного диапазона: YAG, Y₂SiO₅, Ca₂Al₂SiO₇, YVO₄. Однако использование кристаллов приводит к трудностям иного характера. КПД генерации всех перечисленных материалов не превышает нескольких процентов и на порядок меньше аналогичных лазеров на стекле, кроме того, у кристаллов выше порог генерации и кристаллы дороги [21]. В результате промышленные образцы дальномеров на кристаллах с непосредственной генерацией в полуторамикронной области практически отсутствуют. Совершенствование излучателей связано с использованием в составе лазера светодиодной накачки, что позволяет поднять КПД излучателя с нескольких процентов до 15–20 %. Существующие дальномеры с применением светодиодной накачки работают в ограниченном температурном диапазоне либо используют сложные системы термостабилизации. Кроме того, мощные диоды накачки с длиной волны излучения 980 нм пока ещё дороги и уступают лампам по стоимости. Лампы накачки имеют меньший ресурс работы по сравнению со светодиодами, поэтому при выборе вида накачки необходимо принять во внимание условия эксплуатации излучателя. Если излучатель эксплуатируется в составе мобильного объекта в сложных погодных условиях с большими перепадами температур и используется сравнительно редко, то предпочтение часто отдаётся ламповой накачке. В то же время, если излучатель работает в помещении и используется постоянно, то лампы с ограниченным сроком службы приходится часто менять, поэтому более предпочтительной оказывается светодиодная накачка;

– *генерация в полуторамикронном диапазоне с использованием ВКР.* Применение вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР-преобразования) для преобразования длины волны генерации (например, 1,06 и 1,31 мкм) в

длину волны 1,54 мкм, обеспечивает самый эффективный способ генерации импульсного лазерного излучения в указанном диапазоне длин волн. Технически реализация такого подхода обеспечивается за счет того, что в конструкцию твердотельного импульсного лазера вносятся изменения, которые обеспечивают генерацию на длине волны 1,31 мкм, которая участвует во внутривибрационном комбинационном рассеянии. Известно, что наиболее эффективно ВКР-преобразование на 1,54 мкм происходит в кристаллах $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ при их накачке излучением 1,319 и 1,351 мкм соответственно (переход иона неодима ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$). Интенсивность линий излучения этого перехода будет более слабой, чем интенсивность излучения основного перехода с длиной волны 1,06 мкм при прочих равных условиях. Использование в качестве активного элемента материала, обладающего помимо осуществления генерации лазерного излучения на выбранном рабочем переходе свойствами ВКР-преобразования позволяет существенно уменьшить пороги ВКР-преобразования до 0,15–0,25 ГВт/см², увеличить КПД генерации на длине волны первой стоксовой компоненты за счет уменьшения потерь и увеличения эффективной длины преобразования [18]. Существуют различные схемы размещения ВКР-кристалла, при этом предпочтение отдается многопроходным и внутривибрационным схемам. В целом ВКР-лазеры позволяют использовать все преимущества кристаллических активных элементов и эффективную диодную накачку, что способствует расширению их номенклатуры. В то же время применение дополнительных резонаторов на 1,54 мкм и ВКР-кристаллов приводит к увеличению потерь и снижению мощности генерации на 1,54 мкм. Поэтому ВКР-лазер на 1,54 мкм проигрывает аналогичному лазеру на 1,06 мкм по мощности и массогабаритным характеристикам. На оптические элементы наносятся соответствующие просветляющие покрытия с достаточной лучевой прочностью. Система накачки и большая часть механических элементов конструкции ВКР-лазера на 1,54 полностью повторяет конструкцию соответствующего лазера на 1,06 мкм;

– *пикосекундные и фемтосекундные излучатели для генерации в полуторамикронном диапазоне.* Перспективным направлением создания новых источников лазерного излучения в диапазоне 1,5 мкм является применение пикосекундных и фемтосекундных лазерных излучателей [22]. Обеспечение снижения опасности лазерного излучения и повышения эксплуатационных характеристик излучателей может быть достигнуто за счет сокращения длительности импульса излучения и его энергии при сохранении дальности распространения. Такой подход стал возможен благодаря появлению современных пикосекундных и фемтосекундных

лазерных излучателей, применение которых в лазерной локации сейчас активно исследуется. Наносекундные излучатели мобильных дальномеров генерируют импульсы мегаваттной мощности. Филаментация в атмосфере с интенсивным поглощением излучения начинается при гигаваттных мощностях [58]. Таким образом, существует возможность построения дальномеров с новыми видами излучателей, генерирующих более короткие и мощные импульсы, чем применяемые сейчас наносекундные импульсы мегаваттной мощности. Несмотря на большое количество публикаций, промышленные образцы таких дальномеров пока отсутствуют. Это связано с высокой чувствительностью пикосекундных и фемтосекундных импульсов к метеословиям. Сокращение длительности импульса приводит к расширению его спектра, поэтому при создании лазерного излучателя необходимо, чтобы спектр излучения попадал в окно прозрачности атмосферы (имеющего поглощение менее 0,2 дБ/км) 1520–1600 нм [12]. Такой ширине спектра соответствует фемтосекундная длительность импульса. Повышение мощности импульса приводит к увеличению опасности для глаз, поэтому при распространении импульса в атмосфере желательно, чтобы его интенсивность была как можно меньше, поскольку это снижает вероятности поражения глаз и обнаружения факта облучения на объекте локации. Также желательно, чтобы интенсивность вернувшегося импульса от объекта локации и его длительность были в пределах динамического диапазона регистрирующих фотоприёмных устройств. Для реализации описанного принципа можно использовать аналогичный подход, успешно применяемый для усиления чирпированных импульсов [69]. Фемтосекундный импульс перед излучением в атмосферу пропускается через линию задержки с большой дисперсией групповой скорости, в которой он становится чирпированным, а его длительность сильно увеличивается (на 4 порядка). Соответственно снижается пиковая мощность. После возврата от объекта локации импульс снова пропускается через линию задержки, имеющую ту же дисперсию групповых скоростей, но противоположного знака. В результате чирп компенсируется и импульс приобретает первоначальную ультракороткую длительность. Актуальность применения в дальнометрии фемтосекундных импульсов с применением волоконных излучателей подтверждается развернувшимися исследованиями в исследовательских институтах и университетах [2, 5, 9, 10, 11, 13, 16, 19, 27, 61, 65, 70].

В настоящее время наиболее удобными в производстве и эксплуатации являются дальнометры на 1,54 с ВКР-лазерами, поскольку они позволяют сохранить технологическую базу и легко встраиваются в изделия, для которых они предназначены. В связи с этим являются актуаль-

ными проблемы совершенствования оптических элементов ВКР-лазеров. Целью настоящей статьи было изучение принципов модернизации лазерного излучателя для генерации импульсов в безопасном для глаза диапазоне длин волн (1,52–1,6 мкм). Для достижения поставленной цели был проведен тщательный анализ соответствующей научной литературы.

1. ПОНЯТИЕ ВКР

Комбинационное рассеяние (КР) света (эффект Рамана) – неупругое рассеяние оптического излучения на молекулах вещества (твёрдого, жидкого или газообразного), сопровождающееся заметным изменением частоты излучения [64]. В отличие от рэлеевского рассеяния, в случае комбинационного рассеяния света в спектре рассеянного излучения появляются спектральные линии, которых нет в спектре первичного (возбуждающего) света. Число и расположение появившихся линий определяется молекулярным строением вещества.

Происхождение данного эффекта удобнее всего объяснить в рамках квантовой теории излучения. Согласно ей, излучение частоты ν рассматривается как поток фотонов с энергией $h \cdot \nu$, где h – постоянная Планка. При столкновениях с молекулами фотоны рассеиваются. В случае упругого рассеяния, они будут отклоняться от направления своего движения, не изменяя своей энергии (рэлеевское рассеяние). Но может быть и так, что при столкновении произойдет обмен энергией между фотоном и молекулой. Молекула при этом может как приобрести, так и потерять часть своей энергии в соответствии с правилами квантования – её энергия может измениться на величину ΔE , соответствующую разности энергий двух разрешенных её состояний. Иначе говоря, величина ΔE должна быть равна изменению колебательной и/или вращательной энергий молекулы. Если молекула приобретает энергию ΔE , то после рассеяния фотон будет иметь энергию $h\nu - \Delta E$ и соответственно частоту излучения $\nu - \Delta E/h$. А если молекула потеряет энергию ΔE , частота рассеяния излучения будет равна $\nu + \Delta E/h$. Излучение, рассеянное с частотой меньшей, чем у падающего света, называется стоксовым излучением, а излучение с большей частотой называется антистоксовым. При не очень высоких температурах населенность первого колебательного уровня невелика, при комнатной температуре при колебательной частоте 1000 см⁻¹ на первом колебательном уровне находится всего 0,7 % молекул, поэтому интенсивность антистоксова рассеяния мала. С повышением температуры населенность возбужденного колебательного уровня возрастает и интенсивность антистоксова рассеяния растет (рис. 1).

В отличие от спонтанного комбинационного рассеяния света, результатом которого является некогерентное излучение с интенсивностью на

несколько порядков величины меньше интенсивности накачки, при вынужденном комбинационном рассеянии стоксова волна является когерентной и её интенсивность сравнима по величине с интенсивностью возбуждающего света.

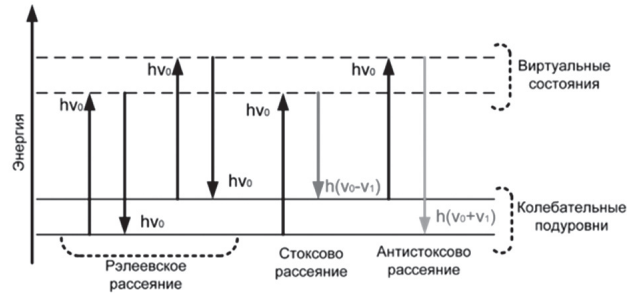


Рис. 1. Комбинационное рассеяние света

2. ОСОБЕННОСТИ ВКР В ТВЁРДЫХ ТЕЛАХ

В зависимости от параметров излучения и характеристик среды возможны различные виды или режимы ВКР. Когда длительность импульса накачки значительно превосходит время релаксации макроскопического дипольного момента, то реализуется так называемое стационарное ВКР, свойства которого в значительной степени установлены [28]. Так называемое переходное или нестационарное ВКР имеет место, если взаимодействие излучения со средой происходит за очень малый промежуток времени, так что наведенная макроскопическая поляризованность отстает по времени от пиковых значений полей возбуждающего излучения. В работе [14] решена задача математического моделирования нестационарного вынужденного комбинационного рассеяния света. Разработанные вычислительные алгоритмы и созданный на их основе программный комплекс можно использовать для компьютерного моделирования линейного и нелинейного вынужденного комбинационного рассеяния стоксовой, антистоксовой и волны накачки в условиях как фазового согласования, так и фазового рассогласования. Использование программного комплекса позволяет заменять непосредственные измерения высокочастотных электромагнитных полей и световых импульсов (физический эксперимент) компьютерным моделированием без потери точности и достоверности результата.

Из представленных результатов работы [29] можно сделать следующие выводы.

1. Во всех случаях с кристаллическими или жидкостными ВКР-преобразователями имеет место понижение пороговой мощности и увеличение эффективности ВКР для стоксовых компонент, попадающих в контур полосы усиления широкополосной среды (центры окраски, красители). Стоксовы компоненты высшего порядка подавляются.

2. Наблюдается понижение пороговой мощности возбуждения ВКР в антистоксовой области.

3. Происходит захват и полная или частичная конденсация спектра генерации широкополосной среды в одну или несколько линий КР.

4. За счет подбора ВКР среды становится возможной генерация многих лазерных частот, которые определяются частотой колебаний молекул в ВКР среде.

5. Использование ВКР для генерации в резонаторе осложняется каскадным преобразованием излучения на стоксовой частоте в высшие стоксовы компоненты. Кроме того, для осуществления усиления при ВКР требуется значительная мощность накачки. Она должна достигать тех же значений, которые необходимы для получения основного излучения, а это требует пространственного формирования и фокусировки пучков. В результате осложняется схемное решение источников излучения и уменьшается надежность лазеров.

6. С увеличением мощности накачки твердотельный лазер излучает от одного до нескольких пиков в импульсе в зависимости от плотности пассивного затвора, что необходимо учитывать при построении некоторых устройств, например, дальномеров, на базе такого лазера (под пиками следует понимать короткие импульсы с малой скважностью; интенсивность каждого последующего пика сначала постепенно возрастает, а потом постепенно спадает в огибающем контуре импульса, который включает в себя эти пики). Пиковая мощность лазера монотонно возрастает с уменьшением пропускания пассивного затвора, что связано с изменением числа пиков в импульсе при изменении плотности затвора.

7. В системах, состоящих из широкополосных усиливающих сред на основе щелочногалогидных кристаллов с центрами окраски и сред с кубическими и квадратичными нелинейностями, взаимодействующих через поле резонатора, возникают кооперативные оптические явления, заключающиеся в конденсации спектра широкополосной среды на определенной стоксовой или антистоксовой частоте при ВКР, либо на частоте параметрической генерации. Конденсация спектра приводит к увеличению затравочного излучения нелинейной среды на несколько порядков, за счет чего понижается пороговая мощность ВКР или параметрической генерации света (ПГС) и увеличивается эффективность преобразования энергии накачки.

На основе проведенных экспериментальных исследований в работе [30] выявлены основные нелинейные эффекты, ограничивающие мощность и яркость излучения в мощных твердотельных лазерных системах: оптический пробой, самофокусировка и вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ). Определены примерные границы по длительности импульса, когда влияние одного из этих эффектов является доминирующим: для длительностей меньше 1 нс наиболее существенное

влияние оказывает самофокусировка, для длительностей 5–30 нс – оптический пробой, а для длительностей больше 30 нс – ВРМБ и насыщенные усиления.

Среди оптических покрытий, наносимых методом электронно-лучевого напыления, наибольшей стойкостью обладают высокоотражающие зеркала. Просветляющие покрытия, нанесенные этим же методом, обладают существенно меньшим порогом пробоя. Так называемые «градиентные» просветляющие слои, получаемые методом выщелачивания поверхности стекла, имеют более высокие пороги разрушения, что, по-видимому, связано с улучшением поверхностной микроструктуры активного элемента в процессе обработки. Для обеспечения долговечности лазерных элементов рабочая плотность энергии должна быть в 2–3 раза ниже пороговой.

Дифракционные возмущения, попадая в полосу самофокусировочной неустойчивости, начинают нарастать экспоненциальным образом, приводя к появлению оптического пробоя в виде концентрических треков самофокусировки в объеме активного элемента. Для подавления эффекта самофокусировки рекомендуется использовать «жесткую» диафрагму вблизи от усилителя либо аподизирующую, например, зубчатую, диафрагму. При очень мощном излучении диафрагма может перекрываться плазмой.

В работе [24] показано, что при уменьшении угловой расходимости накачки происходит рост коэффициента усиления ВКР, если яркость накачки превышает критическую. Установлено, что при пространственно-когерентной накачке коэффициент усиления ВКР значительно больше, чем при пространственно-некогерентной. Показано, что в режимах обращения и воспроизведения волнового фронта пространственно-неоднородной накачки временные флуктуации структуры импульсов ВКР совершаются синхронно по всему сечению пучка, а поле стоксовой волны при монохроматической и пространственно-когерентной широкополосной накачке является пространственно-когерентным.

В работе [17] отмечено, что, если оптическая среда является комбинационно-активной, то при взаимодействии с ней интенсивного лазерного излучения эффективно протекает резонансный двухфотонный комбинационный процесс. Этот процесс приводит к появлению световых волн на частотах компонент ВКР. При этом резонансные процессы, протекающие в комбинационно-активной среде и примесных ионах активатора, могут существенным образом влиять и на спектральные параметры излучения (появление волн с новыми частотами при ВКР, генерация суммарных или разностных частот и др.), и на пространственные характеристики излучения (вклад резонансных процессов в нелинейный показатель преломления, обуславливающий самофокусировку и др.

Вклад резонансного взаимодействия в величину нелинейного показателя преломления твердотельных полифункциональных лазерных сред при ВКР-самопреобразовании лазерного излучения или в процессе электронного двухфотонного поглощения может значительно превышать величину нерезонансной составляющей нелинейного показателя преломления кристаллической матрицы, при этом по знаку он может быть как положительным и приводить к усилению нелинейных свойств, ответственных за управление параметрами лазерного излучения, так и отрицательным, и осуществлять самодефокусировку лазерного излучения, повышая тем самым эффективную лучевую прочность полифункциональных лазерных сред. В частности, резонансный вклад двухфотонного поглощения ионов Nd^{3+} в эффективный коэффициент нелинейного показателя преломления кристаллов $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ при концентрации ~ 6 ат. % на длине волны 1,064 мкм обеспечивает полную компенсацию нерезонансной составляющей коэффициента нелинейного показателя преломления, значение которой становится равным нулю.

Экспериментально продемонстрирована возможность увеличения (для повышения эффективности записи фазовых динамических решеток) или уменьшения (для ослабления эффектов самофокусировки) коэффициента нелинейного показателя преломления вплоть до его полной компенсации (до нулевого значения) путем изменения концентрации примеси в твердотельных средах с соответствующим расположением электронных уровней в ионах примеси или путем возбуждения ВКР в диэлектрической матрице, при отстройке от резонанса в пределах ширины линии.

В результате проведенных в работе [7] исследований были получены следующие основные результаты.

1. Экспериментально обнаружена и теоретически обоснована взаимосвязь коэффициентов ВКР усиления в кристаллах со спектральными и временными параметрами ВКР активных мод (под ВКР активными модами следует понимать наиболее интенсивные колебания катионов, анионных групп как единое целое (внешние или решеточные колебания (фононы)) или колебания внутрианионных групп (внутренние колебания (виброны)) ВКР-среды, при взаимодействии с которыми происходит сдвиг частоты лазерного излучения). Разработана методика поиска и создания новых перспективных ВКР кристаллов с рекордными параметрами. В широком классе исследованных кристаллов экспериментально подтверждена зависимость стационарного коэффициента ВКР усиления от величины пикового сечения комбинационного рассеяния ВКР активной моды. Время дефазировки и величина интегрального сечения рассеяния ВКР активной моды являются основными параметрами, опре-

деляющими коэффициент ВКР усиления в нестационарном случае.

2. С использованием методов спектроскопии двухфотонного КР усиления, пикосекундного антистоксова КР и спонтанной спектроскопии КР выявлено влияние однородного уширения, фазовой релаксации и температуры на величину пикового сечения КР для ВКР-активных мод. Установлено, что процессы релаксации высокочастотных колебательных мод в кристаллах с анионными комплексами определяются их взаимодействием с оптическими и решеточными фононами. В кристалле BaWO_4 сильная изоляция внутренних колебательных мод, большой энергетический зазор между ними приводит к запрету на 3-фононный механизм распада ВКР активного колебания на два низкочастотных, обуславливая низкую вероятность релаксации моды, аномально малое однородное уширение, высокое пиковое сечение КР и рекордный стационарный коэффициент ВКР усиления. В ряду кристаллов кальциевых, стронциевых и бариевых вольфраматов и молибдатов с шеелитовой структурой установлено, что совмещение тяжелого катиона Ba^{2+} и большого межионного расстояния в решетке приводят к большому энергетическому зазору между внутренними КР модами в кристаллах BaWO_4 и BaMoO_4 , уменьшению вероятности релаксационных процессов в них, узким ВКР-активным модам и высокому значению стационарного коэффициента ВКР-усиления при комнатной температуре.

3. Исходя из спектров спонтанного КР, предложен универсальный кристалл BaWO_4 для эффективного ВКР при возбуждении пико-, нано- и субмикросекундными лазерными импульсами. Проведенные экспериментальные исследования продемонстрировали высокий коэффициент ВКР-усиления, хорошие теплофизические свойства, технологичность кристалла, что подтверждает перспективность кристалла BaWO_4 для создания эффективных твердотельных ВКР преобразователей.

4. На основе кристаллов BaWO_4 и BaMoO_4 предложены и реализованы высокоэффективные ВКР преобразователи для видимого и ближнего ИК спектральных диапазонов. Создан компактный твердотельный лазер, работающий на длине волны 1536 нм в безопасном для глаз спектральном диапазоне с накачкой лазерным диодом, акусто-оптическим затвором и внутрирезонаторным ВКР преобразователем на кристалле BaWO_4 с выходной энергией до 0,6 Вт и дифференциальным КПД преобразования излучения диода в стоксово равным 44 %.

5. Предложены и реализованы твердотельные ВКР лазеры на полифункциональных кристаллах, активированных ионами Nd^{3+} , для ближнего ИК спектрального диапазона, работающие с ВКР самопреобразованием лазерного излучения в активной лазерной среде. Получена

генерация на длинах волн первой и второй стоксовых компонент в ВКР лазере на кристалле $BaWO_4:Nd^{3+}$ с пассивным лазерным затвором и накачкой непрерывным лазерным диодом.

6. Установлено, что наибольшими коэффициентами ВКР усиления и, следовательно, наименьшими порогами ВКР обладают кристаллы $PbMoO_4$, $PbWO_4$ и $BaWO_4$. При этом лучшее ВКР наблюдается в $PbMoO_4$, но $PbMoO_4$ и $PbWO_4$ имеют меньший порог оптического пробоя, чем $BaWO_4$. В табл. 1 приведены параметры наиболее интенсивных КР мод в некоторых кристаллах.

Таблица 1

Параметры наиболее интенсивных КР мод в некоторых кристаллах

Кристалл	Симметрия решетки	Геометрия возбуждения	Частота, ν_R , см ⁻¹	Ширина моды (FWHM), см ⁻¹	Интегральное сечение Σ_{int} , отн. ед.	Пиковое сечение Σ_{peak} , отн. ед.
Алмаз	O_h^7	$\perp C_3$	1332,9	2,7	100,00	100,00
Простые оксиды						
TeO_2	D_4^4	$\perp C_4$	648,0	9,0	150,00	32,00
TiO_2	D_{4h}	—	612,0	49,0	159,00	10,00
SiO_2	D_{3d}^6	$\parallel C_3$	464,0	7,0	2,20	1,20
Al_2O_3	D_{3d}^6	—	419,0	2,0	0,05	0,07
ZnO	C_{6v}	—	438,0	6,0	7,14	2,70
Y_2O_3	T_h^7	—	378,6	4,0	3,30	2,16
Нитраты и карбонаты						
$Ba(NO_3)_2$	T_h^6	$\parallel C_4$	1048,5	0,4	21,00	63,00
$Pb(NO_3)_2$	T_h^6	$\parallel C_4$	1046,0	1,0	10,00	62,00
$NaNO_3$	T_h^6	$\perp C_3$	1069,2	1,0	23,00	44,00
$CaCO_3$	D_{3d}^6	$\perp C_3$	1086,4	1,2	6,00	10,60
Вольфраматы						
$CaWO_4$	C_{4h}^6	$\perp C_4$ $\parallel C_4$	911,0	6,9	40,00 50,00	15,00 18,60
$SrWO_4$	C_{4h}^6	$\perp C_4$ $\parallel C_4$	921,0	3,0	40,00 50,00	33,00 41,00
$BaWO_4$	C_{4h}^6	$\perp C_4$ $\parallel C_4$	925,6	1,6	42,00 52,00	52,00 64,00
$PbWO_4$	C_{4h}^6	$\perp C_4$ $\parallel C_4$	904,7	4,7	171,00 120,00	97,00 65,00
$KGd(WO_4)_2$	C_{2h}^6	$\perp C_2$ $\parallel C_2$	901,0 767,0	5,4 5,4	50,00 59,00	35,00 37,00
$KY(WO_4)_2$	C_{2h}^6	$\perp C_2$	905,6	7,0	46,00	35,00
$KYb(WO_4)_2$	C_{2h}^6	$\perp C_2$	908,0	7,4	48,00	34,00
Молибдаты						
$CaMoO_4$	C_{4h}^6	$\parallel C_4$	879,0	6,5	65,00	34,00
$SrMoO_4$	C_{4h}^6	$\parallel C_4$	888,0	2,8	63,00	51,00
$BaMoO_4$	C_{4h}^6	$\parallel C_4$	892,0	2,1	55,00	64,00
$PbMoO_4$	C_{4h}^6	$\perp C_4$ $\parallel C_4$	871,0	8,0	390,00 203,00	120,00 64,00
Ванадаты						
$GdVO_4$	C_{4h}^{19}	$\parallel C_4$	885,0	3,0	92,00	66,00
YVO_4	C_{4h}^{19}	$\parallel C_4$	892,0	3,8	92,00	76,00
Иодаты и ниобаты						
$LiIO_3$	C_6^6	$\perp C_6$	821,0	5,0	54,00	25,00
$LiNbO_3$	C_{3v}^6	$\perp C_3$ $\parallel C_3$	872,0 632,0	21,4 27,0	44,00 166,00	5,00 18,00
$LaNbO_4$	C_{2h}^3	$\parallel C_2$	805,0	9,0	22,00	7,10
Фосфаты						
$Ca_3(PO_4)_3F$	C_{6h}^2	$\parallel C_6$	964,0	2,8	3,40	3,80
$Sr_3(PO_4)_3F$	C_{6h}^2	$\parallel C_6$	950,0	2,8	3,40	3,80
Другие						
$Ba_3(B_3O_6)_2$	C_{3v}^6	$\perp C_3$	636,0	4,5	1,00	0,60
$Y_3Al_5O_{12}$	O_h^{10}	$\perp C_3$	783,0	8,0	3,00	1,00
$Lu_3Al_5O_{12}$	O_h^{10}	$\perp C_3$	796,0	11,0	2,80	0,70
CaF_2	O_h^5	$\perp C_3$	323,0	8,4	0,07	0,21
CdF_2	O_h^5	$\perp C_3$	318,0	21,0	0,16	0,20

7. При увеличении температуры ВКР среды наблюдается слабый сдвиг частоты ВКР активной моды в область меньшей частоты. Величина этого сдвига важна при разработке ВКР лазеров, чтобы знать точный частотный сдвиг и, соответственно, точную частоту ВКР преобразованного излучения. Также при увеличении температуры ВКР среды КР моды уширяются, что ведёт к уменьшению пикового сечения КР и, следовательно, к уменьшению стационарного коэффициента ВКР усиления и повышению порога ВКР.

8. В кристаллах $PbMoO_4$ и $PbWO_4$ практически отсутствует температурный сдвиг частоты ВКР активных мод и коэффициент ВКР усиления в них мало зависит от температуры.

9. За счет нелинейного характера ВКР приводит к укорочению лазерных импульсов, что приводит к увеличению пиковой мощности лазерных импульсов (длительность стоксовых импульсов меньше импульсов накачки).

10. При прочих равных условиях при выборе усилительной среды преимущество имеют среды с более высоким показателем преломления.

11. Чтобы повысить плотность внутррезонаторной мощности, используют пассивный или активный лазерный затвор.

В работе [55] рассчитано и экспериментально проверено, что чем выше коэффициент ВКР усиления среды, тем ниже пороговая энергия накачки, необходимая для получения стоксовых компонент.

3. ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ ВКР-ЛАЗЕРА

В работе [26] исследована возможность получения ВКР-преобразования с большой средней мощностью и энергией по схеме многопроходного ВКР-лазера с внешней накачкой нелинейного кристалла.

В работе [6] получено внутррезонаторное ВКР преобразование излучения $1,3 \rightarrow 1,5$ мкм в кристалле $BaWO_4$ при пассивной модуляции добротности лазера накачки кристаллом $YAG:V^{3+}$.

В работе [51] получены математические выражения, позволяющие оптимизировать выходное зеркало и пассивный лазерный затвор для получения максимальной энергии импульса излучения и вычислить пороговую мощность накачки для данного лазера с пассивной модуляцией добротности и торцевой накачкой лазерным диодом. Также отмечено, что энергия импульса уменьшается при увеличении отношения сечения поглощения возбужденного состояния к сечению поглощения основного состояния пассивного лазерного затвора. Пороговая мощность накачки основного излучения определяется выражением (1):

$$P_{pump} = \eta \cdot (\omega_p^2 + \omega_L^2) \times \ln\left(\frac{1}{R}\right) + \ln\left(\frac{1}{T_0^2}\right) + L + 2 \cdot \sigma \cdot n_{a0} \cdot l \times \frac{1}{2 \cdot \sigma \cdot l}, \quad (1)$$

где η – параметр, относящийся к эффективности накачки; ω_p – средний радиус луча накачки в усиливающей среде; ω_L – радиус лазерной моды основного излучения; R – коэффициент отражения выходного зеркала для основного излучения; T_0 – начальное пропускание пассивного лазерного затвора для основного излучения; L – однопроходные диссипативные оптические потери основного излучения в резонаторе; σ – сечение вынужденного излучения усиливающей среды; n_{a0} – начальная плотность населённости на нижнем лазерном уровне; l – длина усиливающей среды.

В работе [31] отмечено, что по сравнению с ВКР-лазером с торцевой накачкой ВКР-лазер с поперечной накачкой имеет меньшую эффективность преобразования, но может генерировать с большей выходной мощностью. По сравнению с выпукло-плоским резонатором [38] плоско-параллельный резонатор легко юстируется и может обладать эффектом тепловой линзы, что делает работу лазера более эффективной при высокой мощности накачки по сравнению с вогнуто-плоским резонатором [56]. С повышением частоты импульсов диодной накачки с 5 кГц до непрерывной возростала выходная мощность излучения основной длины волны 1064 нм. При низкой мощности накачки энергия одиночного импульса первой (1180 нм) и второй (1325 нм) стоксовых компонент, а значит и средняя выходная мощность, выше при низкой частоте (5 кГц) импульсов диодной накачки, чем при высокой (10 и 15 кГц). Однако, экспериментально подтверждено, что фракционная термическая загрузка легированного неодимом лазера с модуляцией добротности существенно возрастает при уменьшении частоты импульсов накачки в диапазоне 1 – 10 кГц [48]. В соответствии с [35] более высокая фракционная загрузка в ВКР-кристалле влияет на работу ВКР-лазера вследствие термически наведённого подавления ВКР-усиления, возникающего после температурного уширения ВКР-линии. Кроме того, Nd:YAG-модуль претерпевает из-за значительного эффекта деполяризации, что может повлиять на работу ВКР-лазера при высоких мощностях накачки. Поэтому при высокой мощности накачки мощность ВКР-лазера при частоте импульсов накачки 5 кГц ниже, чем при 10 и 15 кГц. Пороговая мощность накачки повышается при повышении частоты импульсов накачки в диапазоне 5–15 кГц. Когда мощность первой стоксовой компоненты достаточно высока, генерируется вторая стоксовая компонента. Дальнейшее повышение мощности первой стоксовой компоненты ведёт к повышению эффективности преобразования первой стоксовой компоненты во вторую и понижению выходной мощности первой стоксовой компоненты. К тому же, значительный термический эффект при высокой мощности накачки ограничивает выходную мощность первой стоксо-

вой компоненты. При высоком коэффициенте пропускания (85,32–92,49 %) выходного зеркала на длине волны второй стоксовой компоненты вторая стоксовая компонента не наблюдалась вследствие высоких потерь.

В работе [45] отмечено, что по сравнению с внешнерезонаторной внутрирезонаторная конфигурация ВКР-лазера имеет преимущество в высокой интенсивности внутри лазерного резонатора и использует многопроходность основной длины волны лазера внутри ВКР-резонатора для повышения эффективной длины взаимодействия, что ведёт к низкороговой работе и высокой общей эффективности преобразования. При частоте импульсов диодной накачки 10 кГц мощность первой стоксовой компоненты ВКР-лазера насыщалась при достижении определённой мощности диодной накачки, но при частоте импульсов диодной накачки 15 и 20 кГц насыщение мощности стоксовой компоненты не наблюдалось, что может быть следствием самофокусировки, рассмотренной в работе [59]. Наибольшая средняя выходная мощность была получена при частоте импульсов диодной накачки 20 кГц, а наибольшая эффективность диодно-стоксового оптического преобразования была получена при частоте диодной накачки 15 кГц. Ширина импульса стоксовой компоненты увеличивалась при увеличении частоты диодной накачки в диапазоне 10–20 кГц и уменьшалась при повышении мощности диодной накачки. Длительность импульса основной длины волны была примерно в два раза больше длительности импульса первого стоксового компонента.

В работе [49] произведено численное моделирование внутрирезонаторных ВКР-лазеров с пассивной модуляцией добротности и торцевой накачкой лазерным диодом. Отмечено, что чем выше ВКР-усиление среды, тем ниже ВКР-порог и тем раньше начинает уменьшаться темп возрастания внутрирезонаторной плотности фотонов стоксовых лучей с ростом начальной плотности инверсной населённости. Чем выше ВКР-усиление среды и выше начальная плотность инверсной населённости, тем короче стоксовый импульс. Обычно, временной профиль стоксового импульса ассиметричный: нарастающий край круче спадающего, и это отличие более заметно при большем уровне накачки. Меньшее сечение вынужденного излучения активного элемента даёт большее ВКР-усиление и ведёт к меньшему ВКР-порогу, а также в случае пассивной модуляции добротности обеспечивает генерацию основных импульсов меньшей длительности и большей пиковой интенсивности, что желательно для эффективного ВКР-преобразования. Поэтому лазерная среда со сравнительно малым сечением вынужденного излучения предпочтительна для внутрирезонаторных ВКР-лазеров с пассивной модуляцией добротности. Также отмечено, что уменьшение длины резонатора

уменьшает ВКР-порог. Чем уже луч основного излучения, тем ниже ВКР-порог. Существует оптимальное ВКР-усиление среды, при котором интегрированная внутрирезонаторная плотность фотонов стоксовых лучей максимальна. При дальнейшем повышении ВКР-усиления интегрированная внутрирезонаторная плотность фотонов стоксовых лучей понемногу спадает из-за перекачки основного излучения в стоксовое раньше достижения пиковой интенсивности. Чем больше параметр насыщающегося поглотителя, тем короче импульсы основного излучения и выше их пиковая интенсивность, что ведёт к генерации более коротких стоксовых импульсов с большей энергией и пиковой интенсивностью. Чем больше параметр насыщающегося поглотителя, тем выше внутрирезонаторная плотность фотонов стоксовых лучей и ниже ВКР-порог. Поэтому большой параметр насыщающегося поглотителя желательный для внутрирезонаторных ВКР-лазеров с пассивной модуляцией добротности. Нормализованная начальная плотность инверсной населённости зависит от параметров пассивного лазерного затвора и резонатора (2):

$$N = \frac{1 + \frac{\ln\left(\frac{1}{T_0^2}\right)}{\ln\left(\frac{1}{R}\right) + L}}{1 + \left(\frac{\sigma_{esa}}{\sigma_{gsa}}\right) \cdot \frac{\ln\left(\frac{1}{T_0^2}\right)}{\ln\left(\frac{1}{R}\right) + L}}, \quad (2)$$

где σ_{esa} — сечение поглощения возбужденного состояния пассивного лазерного затвора; σ_{gsa} — сечение поглощения основного состояния пассивного лазерного затвора.

В работе [60] произведено численное моделирование внутрирезонаторных ВКР-лазеров с пассивной модуляцией добротности и диодной накачкой. Произведён расчёт оптимального коэффициента отражения выходного зеркала для стоксового излучения. Этот оптимальный коэффициент, при котором наблюдались максимальная пиковая мощность и минимальная ширина импульса, находился в диапазоне 0,4–0,7. Также отмечено, что при пассивной модуляции добротности пиковая интенсивность и ширина импульса слабо зависят от уровня накачки. Длительность импульса накачки составляла 200 мкс. При достижении порога накачки генерировался один стоксовый импульс в момент времени 189 мкс. При дальнейшем повышении интенсивности накачки до определённого значения (в два раза больше порогового) генерировалась последовательность импульсов (три импульса) с первым импульсом в момент времени 58 мкс. Ширина основного импульса в отсутствие ВКР-преобразования была равна 20 нс, при ВКР-преобразовании она была равна 7,4 нс, в то время как ширина стоксового импульса была равна примерно 1 нс.

В работе [50] проведены расчёты, позволяющие оптимизировать насыщающийся поглотитель в лазерах с пассивной модуляцией добротности. Отмечено, что наибольшая выходная энергия, наибольшая пиковая мощность и наименьшая ширина импульса излучения достижимы при большем сечении поглощения пассивного лазерного затвора при переходе с основного на возбужденный уровень, с которого происходит переход на метастабильный уровень, и достижимы при меньшем сечении лазерного вынужденного излучения и меньшем факторе понижения инверсии активного элемента. Также в этой ситуации требуется меньшая интенсивность накачки для просветления пассивного лазерного затвора. При этом данная тенденция актуальна до достижения отношения первого параметра к произведению второго и третьего значения 10, после чего дальнейшее увеличение энергии и пиковой мощности лазерного импульса и уменьшение его длительности становятся незначительными. Также рассчитан интервал между лазерными импульсами и частота их генерации при непрерывной накачке лазерными диодами лазера с пассивной модуляцией добротности. Для Nd:YAG лазера с Cr⁴⁺:YAG пассивным затвором при превышении мощности накачки в два раза над пороговой в соответствии с расчётами должно генерироваться излучение с частотой 10,7 кГц и частота излучения должна зависеть от мощности накачки приблизительно линейно. Постоянные значения энергии, пиковой мощности и ширины импульса излучения с повышением мощности непрерывной накачки и соответственно ростом частоты сохраняются до тех пор, пока интервал между импульсами значительно превышает время жизни возбужденного уровня насыщаемого поглотителя. При дальнейшем повышении мощности накачки энергия и пиковая мощность импульса лазерного излучения уменьшаются, а ширина — увеличивается.

В работе [47] отмечено, что с повышением падающей мощности накачки лазера активная среда не может полностью поглотить мощность накачки и оставшаяся мощность накачки, в некоторой степени, может просветить насыщающийся поглотитель, ведя к значительному понижению энергии импульса. С повышением падающей мощности накачки возникает эффект термической линзы в лазерной среде, что также немного понижает энергию импульса. Однако мощность излучения в многоимпульсном режиме возрастает с повышением мощности накачки до определённого значения (например, 8,8 Вт), после чего падает вследствие неустойчивости резонатора, вызванной сильным эффектом термической линзы в активном элементе. С повышением мощности накачки возрастает частота лазерных стоксовых импульсов (например, с 8,9 кГц до 46,4 кГц). Частота лазерных импульсов при пассивном затворе с большим ко-

эффицентом начального пропускания больше, чем с меньшим, и мало зависит от коэффициента отражения выходного зеркала. В экспериментах активный элемент из Nd:YVO₄ и пассивный затвор из Cr⁴⁺:YAG были обмотаны индиевой фольгой и помещены в медные блоки с водным охлаждением. Температура воды на протяжении экспериментов поддерживалась равной 23 °С.

В работе [39] отмечено, что мощность стоксового излучения твердотельного ВКР-лазера с пассивной модуляцией добротности возрастает с увеличением мощности накачки, а порог накачки понижается с увеличением начального пропускания пассивного лазерного затвора. Также отмечено, что значительный нагрев пассивного лазерного затвора при увеличении мощности накачки сильно воздействует на устойчивость резонатора и затрудняет увеличение мощности стоксового излучения. Результаты экспериментов показали, что чем больше начальное пропускание затвора, тем больше ширина импульса и больше частота стоксового излучения. Чем больше коэффициент отражения выходного зеркала, тем больше ширина импульса и совсем немного больше частота стоксового излучения. Частота стоксового излучения увеличивается, а ширина импульсов незначительно уменьшается при увеличении мощности накачки. Следовательно, при большом начальном пропускании затвора при увеличении мощности накачки до определённого значения частота прохождения стоксового излучения через пассивный лазерный затвор возрастает настолько, что устойчивость резонатора снижается из-за разогрева пассивного лазерного затвора, что ведёт к насыщению выходной мощности стоксового излучения.

В работе [23] даны свойства нелинейного поглотителя V³⁺:YAG, перспективного для применения в ВКР-лазере, дающего относительно безопасное для зрения излучение. Для длины волны излучения 1,34 мкм его показатель преломления $n = 1,82$, сечение поглощения из основного уровня $\sigma_{gsa} = 72 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$, сечение поглощения из возбуждённого уровня $\sigma_{esa} = 7,4 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$.

В работе [15] отмечено, что характеристики лазера зависят от ориентации кристаллографических осей затвора V³⁺:YAG по отношению к ориентации кристаллографических осей активного элемента KGd(WO₄)₂. Первый тип затворов был изготовлен из кристалла V³⁺:YAG, выращенного в направлении [100], и вырезанного так, что оптическая ось затвора была перпендикулярна кристаллографической плоскости (100). Второй тип затворов был изготовлен из кристалла V³⁺:YAG, выращенного в направлении [111], и вырезанного так, что оптическая ось затвора была перпендикулярна кристаллографической плоскости (111). Пороговая энергия накачки составляла 4,5 Дж, порог генерации лазера не зависел от кристаллографической ориентации затвора. Энергия генерации на длине волны из-

лучения 1,54 мкм изменялась в зависимости от угла поворота затвора вокруг оптической оси от 3,5 до 8,5 мДж для затворов первого типа и от 0,2 до 2,3 мДж для затворов второго типа.

4. ВЫБОР АКТИВНОЙ СРЕДЫ ЛАЗЕРА С ВКР-САМОПРЕОБРАЗОВАНИЕМ

В работе [57] выведены и численно решены пространственно зависимые временные уравнения внутррезонаторного ВКР-лазера с диодной накачкой и активной модуляцией добротности. Также отмечено, что некоторые лазерные кристаллы, легированные ионами редкоземельных металлов, могут использоваться для реализации лазеров с ВКР-самопреобразованием, в которых лазерный кристалл служит одновременно и ВКР-средой, например, Nd:KGd(WO₄)₂, Yb:KLu(WO₄)₂, Nd:PbWO₄, Nd:YVO₄, Nd:GdVO₄ [32, 34, 36, 40–44]. В особенности, Nd:YVO₄ имеет большой коэффициент поглощения, большое сечение стимулированного излучения и широкую полосу поглощения, что означает, что выходная лазерная мощность менее чувствительна к сдвигу длины волны диодной накачки вследствие температурного эффекта или старения. К тому же, кристалл Nd:YVO₄ кристаллизуется в D_{4h} тетрагональной пространственной группе типа циркон, и его уникальная оптическая ось располагается по четырёхгранной оси симметрии *c*. Для α -вырезанного кристалла π -поляризованный (электрическое поле, параллельное *c*) переход имеет большее сечение стимулированного излучения, чем σ -поляризованный (электрическое поле перпендикулярное *c*), поэтому лазеры на основе α -вырезанного кристалла Nd:YVO₄ обычно генерируют π -поляризованное лазерное излучение. Линейно поляризованное излучение на основной длине волны желательнее для высокоэффективного ВКР-преобразования [46, 55]. Установлено, что чем выше коэффициент отражения выходного зеркала, тем ниже ВКР-порог при диодной накачке лазера. При высоком уровне накачки эффективность ВКР-преобразования выше при меньшем значении коэффициента отражения выходного зеркала для стоксовой компоненты (85,5 %), чем при большем (92,8 %). В диапазоне частот импульсов диодной накачки 10–30 кГц наибольшая выходная мощность ВКР-лазера на основе кристалла Nd:YVO₄ наблюдалась при 20 кГц, наименьшая – при 30 кГц. Энергия импульса стоксовой компоненты понижалась при повышении частоты импульсов диодной накачки в диапазоне 10–30 кГц. Длительность импульса линейно уменьшалась при повышении мощности накачки и линейно увеличивалась при повышении частоты в диапазоне 10–30 кГц. Установлено, что чем выше коэффициент отражения выходного зеркала, тем больше длительность импульса.

В работе [20] рассмотрено практическое использование затвора на основе YAG:V³⁺ в ла-

зере с длиной волны 1,54 мкм на кристаллах KGW:Nd^{3+} с ВКР-самопреобразованием и пассивной модуляцией добротности.

На основе спектральной характеристики атомов неодима в работе [1] рассчитано содержание активной примеси Nd^{3+} в кристаллах КГВ, исследовано количественное соотношение концентрации примеси неодима в кристаллах и в расплаве.

Для получения максимальной мощности излучения концентрация атомов неодима Nd^{3+} в кристалле КГВ должна составлять 4,5% [25], тогда выходная энергия будет наибольшей, а пороговая наименьшей по сравнению с другими концентрациями неодима в диапазоне возможных концентраций 3 – 10 %.

В работе [8] представлены результаты экспериментального исследования лазера на кристалле KGW:Nd^{3+} диаметром 3 и 4 мм с поперечной накачкой квазинепрерывными линейками лазерных диодов (ЛЛД) 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. При накачке использовались от восьми до шестнадцати ЛЛД, каждая из которых имела импульсную мощность излучения не менее 60 Вт. С целью снижения длительности моноимпульса лазера и увеличения его мощности длина резонатора была уменьшена до минимально возможного значения 12 см. Для получения генерации KGW:Nd^{3+} -лазера в безопасной для зрения области спектра было использовано преобразование в процессе ВКР волны с $\lambda = 1,351$ мкм (соответствующей переходу ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ ионов неодима) в первую стоксовую компоненту с $\lambda = 1,538$ мкм. В связи с разогревом активного элемента при импульсной накачке с энергией импульса 220 мДж энергия импульса излучения ВКР-лазера уменьшалась на 25 % при увеличении частоты следования импульсов накачки в диапазоне 5 – 20 Гц. Время жизни возбужденного состояния ионов неодима в кристалле KGW:Nd^{3+} составляет примерно 100 мкс. Длительность импульса ЛЛД составляла 200 мкс, однако её уменьшение нецелесообразно, поскольку мощность излучения ЛЛД ограничена предельным током через р-п-переход и не может быть увеличена при уменьшении длительности импульса. 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 [4] несомненным преимуществом ВКР-лазера на кристалле KGW: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.

В работе [53] для поперечной накачки кристалла Nd:KGW с ВКР-самопреобразованием излучения с длиной волны 1,351 мкм в излучение с длиной волны 1,538 мкм использовались планки лазерных диодов с выходной мощностью импульса не менее 100 Вт каждая. Модуль накачки был составлен из 32 планок лазерных диодов, которые были объединены в четыре секции и накачивали активную среду симметрично с восьми направлений. Максимальная мощность накачки была 3200 Вт. Стержень из кристалла Nd:KGW , установленный в кварцевую камеру, охлаждался водой. Частота повторения импульсов накачки была 10 Гц. Все поверхности зеркал и кристаллов были покрыты просветляющими покрытиями для 1067 нм. Эффективность активного стержня из кристалла Nd:KGW с радиусом 3,5 мм, с длиной 61 мм и атомной долей неодима 3 % была выше, чем у стержней такого же диаметра, с длинами 63 мм, 61 мм, 64 мм, 63 мм и атомными долями неодима 1,6 %, 2 %, 3 %, 5 %, соответственно. Но стержень с атомной долей неодима 5 % был плохого оптического качества. Хотя время жизни флюорисценции кристалла Nd:KGW только 110 мкс, выходная энергия импульса излучения на длине волны 1,538 мкм возрастала заметно при увеличении длительности импульсов накачки с 115 мкс до 385 мкс при одинаковом токе и при увеличении тока диодов с 50 до 100 А и была максимальной (31,8 мДж) при энергии импульса накачки 1,23 Дж. Длительность выходного импульса была 2 нс при резонаторе длиной 7 см для излучения 1,538 мкм. Выходное зеркало имело высокий коэффициент отражения для 1,351 мкм, а его коэффициент отражения для 1,538 мкм равнялся 10 %.

В работе [54] для ВКР-самопреобразования использовался кристалл $\text{Nd}^{3+}:\text{KGW}$, ориентированный вдоль (010) кристаллографической оси, при которой согласно [3] минимальный порог ВКР и присутствует только частотный сдвиг $901,5 \text{ см}^{-1}$.

В работе [37] описаны кристаллы $\text{PbWO}_4:\text{Nd}^{3+}$ и $\text{PbMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$, которые могут использоваться для реализации лазеров с ВКР-самопреобразованием. При накачке лазерными диодами кристалла $\text{PbMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$ была получена наивысшая эффективность (21 %) среди кристаллов с шеелитовой структурой. Кристаллы с таким типом структуры характеризуются более высокими пиковыми сечениями ВКР, более низкими ВКР порогами, более высоким ВКР усилением и большей эффективностью ВКР-преобразования по сравнению с коммерческим кристаллом $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2:\text{Nd}^{3+}$. Также был найден новый кристалл $\text{PbNd}_4(\text{MoO}_4)_7$.

В работе [52] были получены первые результаты непрерывного лазерного излучения Nd^{3+} в $\text{NaLa}(\text{WO}_4)_2$, который может использоваться

в лазерах с ВКР-самопреобразованием, при комнатной температуре и при накачке излучением AlGaAs лазерного диода. Вынужденное излучение на $\lambda = 1056$ нм было получено в широком спектральном диапазоне накачки ($\lambda = 790\text{--}820$ нм), что позволяет легко работать при сдвиге длины волны излучения лазерных диодов. ВКР-преобразование было получено в пикосекундном режиме с эффективностью, подобной моноклинному $KY(WO_4)_2$ эталону. Установлено присутствие в NaLaW ВКР-сдвигов 923 см^{-1} , 912 см^{-1} , $326,5\text{ см}^{-1}$ с ширинами полосы на полувысоте $\Delta\Omega_R = 7,5\text{ см}^{-1}$, $6,4\text{ см}^{-1}$, 12 см^{-1} , соответственно. Показано отсутствие термального ухудшения лазерной активной среды до 700 мВт поглощаемой мощности света. Подтверждена лучшая эффективность работы лазера и ВКР-преобразования при π -конфигурации и определена оптимальная концентрация Nd для этой цели в диапазоне 3–5 атомных %. Nd^{3+} в тетрагональных DT матрицах обладает лучшей способностью накопления энергии, чем в изоморфных DM кристаллических матрицах, и NaLaW матрица показывает относительно низкие безизлучательные потери посредством ион-матричного взаимодействия. В работе [33] была продемонстрирована работа лазера на $NaLa(WO_4)_2:Nd^{3+}$ на длинах волн 1063 нм и 1335 нм в импульсном режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлены преимущества твердотельных лазеров с ВКР-самопреобразованием, пассивной модуляцией добротности кристаллом $YAG:V^{3+}$, поперечной диодной накачкой и плоско-параллельным резонатором относительно других источников монохроматического излучения в относительно безопасной для зрения спектральной области излучения. Рассмотрены различные активные среды для лазеров с ВКР-самопреобразованием и отмечена перспективность кристаллов $PbMoO_4:Nd^{3+}$ и $PbWO_4:Nd^{3+}$.

В силу большого объёма фактического материала не все вопросы удалось изложить с исчерпывающей полнотой. Внимание уделено основополагающим положениям, в связи с чем для желающих ознакомиться подробнее ниже приводится достаточно широкий список соответствующей литературы.

Литература

- [1] *Акимова В.М.* Дефектная структура и влияние примеси неодима на оптические свойства кристаллов калий-гадолиниевого вольфрамата: диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук: 02.00.04. / Вера Михайловна Акимова. – Челябинск, 2011. – 102 с.
- [2] *Булыгин А.Д.* Взаимодействие мощного фемтосекундного лазерного импульса с воздушной и капельной средами. Эффективные характеристики оптических полей: диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук: 01.04.05 / Андрей Дмитриевич Булыгин. – Томск, 2010. – 128 с.
- [3] Вынужденное комбинационное рассеяние пикосекундных световых импульсов в кристаллах $KGd(WO_4)_2$ и $Ba(NO_3)_2$. / В.Н. Войцеховский, А.В. Любимов, А.В. Михайлов и др. // Оптика и спектроскопия. – 1988. – Том 64, № 3. – С. 521–524.
- [4] Высокоэффективный мини-лазер с импульсной поперечной полупроводниковой накачкой для безопасной лазерной дальнометрии. / А.Ю. Абазадзе, В.Н. Быков, Г.М. Зверев и др. // Квантовая электроника. – 2002. – Том 32, № 3 – С. 210.
- [5] *Григорьевский В. И.* О влиянии турбулентности атмосферы на протяженных трассах на точностные характеристики субпикосекундного дисперсионного дальномера. / В. И. Григорьевский // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – N 8. – С. 55–59.
- [6] *Дорошенко М.Е.* Активные среды спектрально позиционированных лазеров ИК диапазона: диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук: 01.04.21. / Максим Евгеньевич Дорошенко. – Москва, 2005. – 189 с.
- [7] *Зверев П.Г.* ВКР активные кристаллы и разработка ВКР преобразователей на их основе: диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук: 01.04.21. / Петр Георгиевич Зверев. – Москва, 2012. – 328 с.
- [8] Исследование лазера на кристалле $KGW:Nd^{3+}$ с поперечной накачкой линейками лазерных диодов. / А.Ю. Абазадзе, Г.М. Зверев, Ю.М. Колбацков, Н.С. Устименко // Квантовая электроника. – 2004. – Том 34, № 1. – С. 20–22.
- [9] *Кошелев А.В.* Определение скорости распространения фемтосекундных импульсов в лазерной дальнометрии. / А.В. Кошелев, Ю.В. Скипа // Известия вузов. Горный журнал. – 2007. – № 1. – С. 37–40.
- [10] *Кошелев А.В.* Скорость распространения периодической последовательности фемтосекундных лазерных импульсов в атмосфере. / А.В. Кошелев, Ю.В. Скипа // Известия вузов. Горный журнал. – 2007. – № 5. – С. 56 – 59
- [11] *Кошелев А.В.* Теоретические основы работы импульсного фемтосекундного лазерного дальномера. / А.В. Кошелев // Известия вузов. Горный журнал. – 2007. – № 6. – С. 26–29.
- [12] *Крюков П.Г.* Лазеры ультракоротких импульсов. / П.Г. Крюков // Квантовая электроника. – 2001. – № 2. – С. 95–119.
- [13] *Курков А.С.* Волоконные источники излучения в диапазоне 1 – 2 мкм: диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук: 01.04.21 / Андрей Семенович Курков. – Москва, 2003. – 195 с.
- [14] *Логинов Д.В.* Математическое моделирование нестационарного вынужденного комбинационного рассеяния света: диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук: 05.13.18. / Дмитрий Викторович Логинов. – Саранск, 2009. – 128 с.
- [15] Механизм просветления пассивных затворов $YAG:V^{3+}$ при ВКР преобразовании в кристаллах $KGW:Nd^{3+}$. / А.Н. Титов, В.Н. Иванов, В.Н. Ветров и др. // Оптический журнал. – 2008. – Т 75, № 1. – С. 49–52.

- [16] Милицин В.О. Стратифицированная модель рассеяния лазерного излучения в дисперсной среде и филаментация фемтосекундного импульса в атмосферном аэрозоле: диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук: 01.04.21 / Владимир Олегович Милицин. — Москва, 2006. — 148 с.
- [17] Мочалов И.В. Полифункциональные твердотельные лазерные среды: диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук: 01.04.05. / Игорь Валентинович Мочалов. — СПб, 2001. — 322 с.
- [18] Перспективы развития излучателей для импульсной дальнометрии в безопасном для глаз диапазоне длин волн. / Ю.П. Мачехин, Ю.Л. Старчевский, П.А. Цимкаленко, Ю.Г. Колесникова // Сборник научных трудов IV Международной научной конференции «Функциональная база нанoeлектроники». — Харьков-Кацивели (Украина). — 2011. — С. 89–91.
- [19] Рудь Е.Л. Импульсные высотометры на основе твердотельных и полупроводниковых лазеров для контроля окружающей среды и характеристик объектов подстилающей поверхности: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.11.13 / Евгений Леонидович Рудь. — Казань, 2009. — 152 с.
- [20] Сандуленко А.В. Механизмы образования фототропных активаторных центров хрома и ванадия в кристаллах гранатов: диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук: 01.04.05. / Александр Витальевич Сандуленко. — СПб, 2008. — 132 с.
- [21] Сверчков С.Е. 1,5 мкм иттербий-эрбиевые лазеры с диодной накачкой — элементная база и генерационные возможности: диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук: 01.04.21. / Сергей Евгеньевич Сверчков. — Москва, 2005. — 238 с.
- [22] Силаева Е.П. Филаментация фемтосекундного лазерного импульса в атмосфере в условиях когерентного рассеяния в водном аэрозоле: диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук: 01.04.21 / Елена Петровна Силаева. — Москва, 2010. — 130 с.
- [23] Сироткин А.А. Управление спектральными и временными параметрами лазеров на кристаллах ванадатов: диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук: 01.04.21. / Анатолий Андреевич Сироткин. — Москва, 2014. — 282 с.
- [24] Тренева Е.Г. Исследование усиления и пространственно-временных флуктуаций стоксовой волны при вынужденном рассеянии света с пространственно-неоднородной накачкой: диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук: 01.04.05. / Елена Георгиевна Тренева. — Москва, 1983. — 185 с.
- [25] Устименко Н.С. Влияние концентрации ионов Nd^{3+} в кристаллах на характеристики лазера. / Н.С. Устименко, А.В. Гулин, А.А. Павлюк // Приборы и техника эксперимента. — 2001. — № 3. — С. 120–121.
- [26] Федин А.В. Управление временной и пространственной структурой излучения Nd-лазеров с помощью насыщающихся элементов на основе кристаллов $LiF:F^{2-}$: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук: 01.04.21. / Александр Викторович Федин. — Москва, 2004. — 429 с.
- [27] Фемтосекундный лазерный дальномер. / И.В. Лесных, В.А. Середович, А.К. Синякин, А.В. Кочелев // Вестн. СГГА. — 2000. — N5. — С. 135–137.
- [28] Фихтенгольц Г.М. Основы математического анализа. В 2 ч. 4.2. / Г.М. Фихтенгольц. — СПб: Лань, 2006. — 440 с.
- [29] Хулугуров В.М. Закономерности образования, структура и лазерные свойства центров окраски в активированных фторидных кристаллах: диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук: 01.04.07. / Виталий Михайлович Хулугуров. — Иркутск, 2003. — 305 с.
- [30] Яшин В.Е. Формирование пространственно-временной структуры излучения в мощных твердотельных лазерных системах: диссертация на соискание учёной степени доктора математических наук: 01.04.21. / Владимир Евгеньевич Яшин. — СПб, 2001. — 362 с.
- [31] 1st-Stokes and 2nd-Stokes dual-wavelength operation and mode-locking modulation in diode-side-pumped Nd:YAG/BaWO₄ Raman laser. / Hongbin Shen, Qingpu Wang, Xingyu Zhang et al. // OPTICS EXPRESS. — 2012. — Vol. 20, No. 16. — P. 17823–17832.
- [32] All solid-state diode-pumped Raman laser with self-frequency conversion. / A.S. Grabtchikov, A.N. Kuzmin, V.A. Lisinetskii et al. // Appl. Phys. Lett. — 1999. — Vol. 75. — P. — 3742–3744.
- [33] Belousov N.D. Spectra of a laser with a $CaWO_4:Nd^{3+}$ – $LaNa(VO_4)_2:Nd^{3+}$ composite active medium. / N.D. Belousov, V.A. Kobzar-Zlenko and B.S. Skorobogatov // Opt. Spectrosc. — 1972. — Vol. 33. — P. 1002–1003.
- [34] Chen Y.F. Compact efficient all-solid-state eye-safe laser with self-frequency Raman conversion in a Nd:YVO₄ crystal. / Y.F. Chen // Opt. Lett. — 2004. — Vol. 29. — P. 2172–2174.
- [35] Chen Y.F. High-power diode-pumped actively Q-switched Nd:YVO₄ self-Raman laser: influence of dopant concentration. / Y.F. Chen // Opt. Lett. — 2004. — No. 29(16). — P. 1915–1917.
- [36] Compact efficient self-frequency Raman conversion in diode-pumped passively Q-switched Nd:GdVO₄ laser. // Appl. Phys. B — 2004. — Vol. 78. — P. 685–687.
- [37] Development of Growth Technologies for the Photonic Single Crystals by the Czochralski Method at Institute for Single Crystals, NAS of Ukraine. / M.B. Kosmyna, B.P. Nazarenko, V.M. Puzikov and A.N. Shekhovtsov // ACTA PHYSICA POLONICA A. — 2013. — Vol. 124, No. 2. — P. 305–313.
- [38] Diode side-pumped actively Q-switched Nd:YAG/SrWO₄ Raman laser with high average output power of over 10 W at 1180 nm. / X.H. Chen, X.Y. Zhang, Q.P. Wang et al. // Laser Phys. Lett. — 2009. — No. 6(5). — P. 363–366.
- [39] Diode-pumped passively Q-switched Nd:YAG/SrWO₄ intracavity Raman laser with high pulse energy and average output power. / H. Xu, X. Zhang, Q. Wang et al. // Appl Phys B. — 2012. — No. 107. — P. 343–348.
- [40] Diode-pumped, self-stimulating, passively Q-switched $Nd^{3+}:PbWO_4$ Raman laser. / W. Chen, Y. Inagawa, T. Omatsu et al. // Opt. Commun. — 2001. — Vol. 194. — P. 401–407.

- [41] Efficient 1181 nm self-stimulating Raman output from transversely diode-pumped Nd³⁺:KGd(WO₄)₂ laser. / T. Omatsu, Y. Ojima, H.M. Pask et al. // Opt. Commun. – 2004. – Vol. 232. – P. 327–331.
- [42] Efficient 1521-nm Nd:GdVO₄ Raman laser. // Opt. Lett. – 2004. – Vol. 29. – P. 2632–2634.
- [43] Efficient continuous-wave and Q-switched operation of a diode-pumped Yb:KLu(WO₄)₂ laser with self-Raman conversion. / J. Liu, U. Griebner, V. Petrov et al. // Opt. Lett. – 2005. – Vol. 30. – P. 2427 – 2429
- [44] Efficient subnanosecond diode-pumped passively Q-switched Nd:YVO₄ self-stimulated Raman laser. // Opt. Lett. – 2004. – Vol. 29. – P. 1251–1253.
- [45] Highly efficient diode-pumped actively Q-switched Nd:YAG-SrWO₄ intracavity Raman laser. / Xiaohan Chen, Xingyu Zhang, Qingpu Wang et al. // OPTICS LETTERS. – 2008. – Vol. 33, No. 7. – P. 705–707.
- [46] Highly efficient Raman frequency converter with strontium tungstate crystal. / S. Ding, X. Zhang, Q. Wang et al. // IEEE J. Quantum Electron. – 2006. – Vol. 42, No. 1. – P. 78–84.
- [47] Investigation on LD end-pumped passively Q-switched c-cut Nd:YVO₄ self-Raman laser. / Shuanghong Ding, Meiqin Wang, Shiwu Wang and Wenhui Zhang // OPTICS EXPRESS. – 2013. – Vol. 21, No. 11. – P. 13052–13061.
- [48] Lan Y.P. Repetition-rate dependence of thermal loading in diode-end-pumped Q-switched laser: influence of energy-transfer upconversion. / Y.P. Lan, Y.F. Chen, S.C. Wang // Appl. Phys. – 2000. – No. B 71 (1). – P. 27–31.
- [49] Numerical modelling of passively Q-switched intracavity Raman lasers. / Shuanghong Ding, Xingyu Zhang, Qingpu Wang et al. // Appl. Phys. – 2007. – Vol. 40. – P. 2736–2747.
- [50] Optimization of Cr⁴⁺-Doped Saturable-Absorber Q-Switched Lasers. / Xingyu Zhang, Shengzhi Zhao, Qingpu Wang et al. // IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS. – 1997. – Vol. 33, No. 12. – P. 2286–2294.
- [51] Passive Q-switching characteristics of Yb³⁺:Gd₃Ga₅O₁₂ crystal. / Xingyu Zhang, Alain Brenier, Qingpu Wang et al. // OPTICS EXPRESS. – 2005. – Vol. 13, No. 19. – P. 7708 – 7719
- [52] Raman Scattering and Nd³⁺ Laser Operation in NaLa(WO₄)₂. / Alberto Garcia-Cortes, Concepcion Cascales, Alicia de Andres et al. // IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS. – 2007. – Vol. 43, No. 2. – P. 157–167.
- [53] Short pulse eye-safe laser with a stimulated Raman scattering self-conversion based on a Nd:KGW crystal. / Huang Jianhong, Lin Jipeng, Su Rongbing et al. // OPTICS LETTERS. – 2007. – Vol. 32, No. 9. – P. 1096–1098.
- [54] Stimulated Raman scattering in Nd:KGW laser with diode pumping. / A.S. Grabtchikov, A.N. Kuzmin, V.A. Lisinetskii et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2000. – P. 300–302.
- [55] Theoretical and experimental research on the multi-frequency Raman converter with KGd(WO₄)₂ crystal. / Shuanghong Ding, Xingyu Zhang, Qingpu Wang et al. // OPTICS EXPRESS. – 2005. – Vol. 13, No. 25. – P. 10120–10128.
- [56] Theoretical and experimental study on the Nd:YAG/BaWO₄/KTP yellow laser generating 8.3 W output power. / Z.H. Cong, X.Y. Zhang, Q.P. Wang et al. // Opt. Express. – 2010. – No. 18(12). – P. 12111–12118.
- [57] Theoretical and Experimental Study on the Self-Raman Laser With Nd:YVO₄ Crystal. / Shuanghong Ding, Xingyu Zhang, Qingpu Wang et al. // IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS. – 2006. – Vol. 42, No. 9. – P. 927–933.
- [58] Understanding the performance of free-space optics. / S. Bloom, E. Korevaar, J. Schuster, H. Willebrand // Journal of Optical Networking. – 2003. – Vol. 2, No. 6. – P. 178–200.
- [59] Y.F. Chen, K.W. Su, H.J. Zhang et al. // Opt. Lett. – 2005. – No. 30. – P. 3335.
- [60] Yashkir Yuri M. Numerical modeling of the intracavity stimulated Raman scattering as a source of subnanosecond optical pulses. / Yuri M. Yashkir, Yuriy Yu. Yashkir // University of Toronto Optical Technologies Centre. – 9 p.
- [61] АО «ГД ИРБИС». – г. Харьков, Украина [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://217.116.51.179/cgi-bin/irbis64r_01/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=NEWST_PRINT&P21DBN=NEWST&S21STN=1&S21REF=&S21FMT=fullw_print&C21COM=S&S21CNR=&S21P01=0&S21P02=0&S21LOG=1&S21P03=K=&S21STR=%D1%84%D0%B5%D0%BC%D1%82%D0%BE%D1%81%D0%B5%D0%BA%D1%83%D0%BD%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B5%20%D0%B8%D0%BC%D0%BF%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%81%D1%8B – Загл. с экрана.
- [62] Изюмский казенный приборостроительный завод. – г. Изюм, Украина [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.ipz.com.ua/glasses/os_gls.htm – Загл. с экрана.
- [63] Институт лазерной физики ФГУП «НПК «Государственный оптический институт им. С.И.Вавилова». – г. Санкт-Петербург, Россия [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.ilph.ru/index.php?page=p3> – Загл. с экрана
- [64] Комбинационное рассеяние света [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/%CA%EE%EC%E1%E8%ED%E0%F6%E8%EE%ED%ED%EE%E5_%F0%E0%F1%F1%E5%FF%ED%E8%E5_%F1%E2%E5%F2%E0 – Загл. с экрана.
- [65] О влиянии турбулентности атмосферы на протяженных трассах на точностные характеристики субмикросекундного дисперсионного дальномера [Электронный ресурс] / В.И. Григорьевский, М.В. Григорьевская, М.Т. Прилепин и др. – Режим доступа: <http://pribor.tgizd.ru/ru/arhiv/689>.
- [66] ООО «Электростекло». – г. Москва, Россия [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.elektrosteklo.ru/Yb-Er_rus.htm – Загл. с экрана.
- [67] Carl Zeiss Optronics [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.zeiss.de/c1257088004a21ca/Contents-Frame/12b1b713bf41d81ec125738000427136> – Загл. с экрана.
- [68] Er:Glass Laser Literature [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.kigre.com/pub_er.html – Загл. с экрана.
- [69] Fiber Amplifiers and Fiber Lasers solutions [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.keopsys.com/spip.php?rubrique116> – Загл. с экрана.
- [70] RPMC Lasers, Inc. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://optics.org/buyers/company/C000019697> – Загл. с экрана.

Поступила в редколлегию 05.12.2014



Безносенко Игорь Валерьевич, магистр, аспирант и ассистент кафедры физических основ электронной техники Харьковского национального университета радиоэлектроники. Научные интересы: математическое моделирование интерференционных оптических покрытий, теория и техника оптико-электронных приборов, применение лазерных технологий.



Мачехин Юрий Павлович, доктор технических наук, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, заслуженный метролог Украины, академик Академии наук прикладной радиоэлектроники, заведующий кафедрой физических основ электронной техники Харьковского национального университета радиоэлектроники. Научные интересы: лазерная измерительная техника и оптоэлектронные приборы.

УДК 621.373.826; 621.375.826

Вимушене комбінаційне розсіяння в застосуванні джерел півторамакронного випромінювання / І.В. Безносенко, Ю.П. Мачехін // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2014. — Т. 13. — № 4. — С. 406–419.

У статті розглядається явище вимушеного комбінаційного розсіяння (ВКР) у твердих тілах. Викладається огляд робіт з розвитку ВКР-лазерів. Встановлені перспективні конструкції і активні середовища ВКР-лазерів.

Ключові слова: вимушене комбінаційне розсіяння, півторамакронний діапазон, ВКР-самоперетворення, лазерний пасивний затвор, вихідне дзеркало, накачування активного елемента.

Табл.: 01. Іл.: 01. Бібліогр.: 70 найм.

UDC 621.373.826; 621.375.826

Stimulated Raman scattering in the application of sources of one and a half micron range radiation / I.V. Beznosenko, Y.P. Machehin // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2014. — Vol. 13. — № 4. — P. 406–419.

The paper deals with the phenomenon of stimulated Raman scattering (SRS) in solids. An overview of the works on the development of Raman lasers is presented. Promising designs and active media of Raman lasers have been established.

Keywords: stimulated Raman scattering, one and a half micron range, SRS self-conversion, passive Q-switch, exit mirror, pumping of an active element.

Tab.: 01. Fig.: 01. Ref.: 70 items.