

Новые кристаллы для лазеров на вынужденном комбинационном рассеянии

© Т.Т. Басиев

Научный центр лазерных материалов и технологий Института общей физики Российской академии наук,
119991 Москва, Россия

E-mail: basiev@lst.gpi.ru

Проведен анализ процессов стационарного и нестационарного вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в кристаллах. Выявлены основные закономерности повышения эффективности ВКР в кристаллах и разработаны методы поиска и создания новых ВКР лазерных материалов. Предложены, изготовлены и охарактеризованы новые кристаллы для пикосекундных и наносекундных ВКР лазеров, обладающие рекордным сечением усиления ВКР, низким порогом процесса и широкой спектральной областью использования.

Работа была частично финансирована проектом МНТЦ 2022р.

Комбинационное (рамановское) рассеяние было открыто почти 80 лет назад, в 1928 г., одновременно и независимо выдающимися индийскими (С.В. Raman, K.S. Krishnan) учеными для жидкостей [1] и выдающимися российскими учеными (Л.И. Мандельштам, Г.С. Ландсберг) для кристаллов (на примере кварца) [2]. Этот процесс представляет собой неупругое рассеяние света на молекулярных колебаниях или фононах среды, при этом частота рассеянного света становится меньше частоты падающего света на частоту молекулярных колебаний (например, на частоту колебаний тетраэдра SiO_4 в кварце), обычно лежащую в диапазоне от 100 до 3000 cm^{-1} для конденсированных сред. Квантовый выход этого двухфотонного процесса очень мал ($10^{-10}\%$), поэтому, чтобы обнаружить это свечение, даже сейчас при лазерном возбуждении нужно считать фотоны в течение десятков минут, а в долазерную эру для этого требовались десятки часов.

Спонтанное комбинационное (рамановское) рассеяние (СКР) нашло сегодня широчайшее распространение при исследовании и идентификации структуры новых оптических кристаллов и стекол.

С созданием мощных лазерных источников света 40 лет назад ситуация с низким квантовым выходом комбинационного рассеяния в корне изменилась. Оказалось, что при увеличении интенсивности накачки до $10\text{--}100 \text{ MW/cm}^2$ выход рассеяния экспоненциально (лавинообразно) растет и может достигать $50\text{--}80\%$. Этот процесс вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) был случайно обнаружен в 1962 г. [3] (E.J. Woodbury, W.K. Ng) внутри рубинового лазера с ячейкой, заполненной нитробензолом, в виде мощного когерентного излучения на частоте, сдвинутой в красную область длин волн.

Первоначально (в 60-х годах) процесс ВКР был исследован в природных кристаллах алмаза, кальцита (CaCO_3) и искусственно выращенных кристаллах вольфрамата кальция, ниобата лития и иодата лития. Однако низкое оптическое качество, большое количество включений инородной фазы и пузырей приводило к быстрому лазерному повреждению (пробою) — разру-

шению поверхности и объема кристалла. После нескольких десятков вспышек кристалл становился непригодным, и в связи с высокой стоимостью кристаллов ($\sim 1000 \text{ \$/кристалл}$) исследования требовали очень высоких затрат (см. обзоры [4–10]).

Новая волна интереса к кристаллическим рамановским материалам возникла в восьмидесятых годах, когда были разработаны синтетические кристаллы $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ (KGW). Их отличали высокая частота и оптическое качество, низкие потери и высокий порог лазерного повреждения, а также высокие коэффициенты рамановского усиления в наносекундной ($\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$) и пикосекундной (KGW) областях длительности [11–14].

Рамановский лазер представляет собой достаточно простое устройство, в котором ВКР-активный кристалл помещен между двумя параллельными диэлектрическими зеркалами, образующими так называемый оптический резонатор. Входное зеркало хорошо пропускает излучение накачки, например с $\lambda = 532 \text{ nm}$, и отражает излучение ВКР. Выходное зеркало, напротив, отражает накачку и частично пропускает частоту ВКР. Тем самым за счет многократного отражения на зеркалах и многократного прохождения через резонатор и кристалл удается увеличить длину взаимодействия света с кристаллом и значительно снизить порог возникновения вынужденного комбинационного рассеяния (фотонной лавины). В результате на выходе можно получить одну, две, три и более стоксовы спектральные компоненты излучения различного цветового диапазона (желтую, оранжевую, красную). А при определенных условиях синхронизации и антистоксовы компоненты (синюю и фиолетовую). При этом доминирующий цвет и КПД определяются накачкой и оптимизацией спектра отражения зеркал ВКР лазера.

В 80-е годы при поиске кристаллов для широкодиапазонных лазерных спектрометров [15–18] возник вопрос, почему именно эти материалы ($\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и KGW) являются наилучшими для создания ВКР лазеров и как можно создать еще более совершенные кристаллы для этих лазеров. Пришлось провести сравнительные исследования многих десятков различных монокристаллов.

Мы изучили спектры рассеяния кристаллов, формируемых катионами щелочных и редкоземельных металлов и сложными квазимолекулярными анионами типа (CO_3) , (NO_3) , (PO_4) , (ClO_3) , (SiO_4) , (NbO_3) , (IO_3) , (BrO_3) , (SO_4) , WO_4 , MoO_4 [19–27].

Как известно, за наиболее интенсивные линии комбинационного рассеяния отвечают внутренние полносимметричные колебания кислородного треугольника или тетраэдра в сложном анионном комплексе. В разных кристаллах частоты и ширина пиков интенсивности рассеяния могут иметь различную величину. Была поставлена задача установить, чем определяется пригодность оптического материала для ВКР лазеров и усилителей, почему одни кристаллы хороши для наносекундных длительностей накачки (например, $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$) и плохи для пикосекундных [28], а для $(\text{KGd}(\text{WO}_4)_2)$ наоборот, и найти способы повышения эффективности ВКР кристаллов.

При этом необходимо рассмотреть два режима.

1) Стационарный режим длинных импульсов, когда длительность лазерной накачки t_{pump} много больше времени потери когерентности (дефазировки) молекулярного колебания T_2 , пропорционального обратной ширине спектра спонтанного КР ($t_{\text{pump}} \gg T_2$).

2) Нестационарный, когда импульс накачки короче времени дефазировки, $t_{\text{pump}} < T_2$.

В первом случае показатель экспоненциального роста рассеяния, или инкремент, линейно пропорционален интенсивности накачки, длине кристалла и пиковому коэффициенту ВКР усиления σ_R (первый важнейший параметр нелинейной среды), а во втором — квадратному корню от этих же параметров, домноженному на корень из длительности накачки и спектральной ширины линии СКР $\Delta\nu$ (второй параметр).

Произведение пикового сечения усиления σ_R на его спектральную ширину $\Delta\nu_R$ есть интегральное сечение рассеяния (третий важнейший параметр).

Мы определили и проанализировали эти важнейшие параметры для многих десятков кристаллов с ионной, ковалентной и квазимолекулярной связями и обнаружили, что максимальную интегральную интенсивность демонстрируют кристаллы с максимальным размером квазимолекулярного комплекса (большим термодинамическим радиусом), а также кристаллы с максимальной внутренней ковалентностью анионного комплекса и с минимальной связью комплекса с решеткой. К ним относятся иодаты, молибдаты и вольфраматы. Нитраты и карбонаты обладают меньшими размерами квазимолекулярного аниона и соответственно меньшей интегральной интенсивностью комбинационного рассеяния. Силикаты и бораты в свою очередь обладают малой изолированностью тетраэдрических и треугольных комплексов, легко формируя каркасные или сетчатые структуры (кристаллические или стеклообразные), и имеют малую интенсивность рассеяния.

В результате этого анализа удалось установить, что класс молибдатов и вольфраматов является наиболее

перспективным (отметим также их высокую твердость, теплопроводность и влагостойкость по сравнению с иодатами и нитратами [24–27]). Однако следует отметить, что и в классе молибдатов и вольфраматов существуют десятки различных соединений с различной структурой спектров рассеяния. Если сравнить спектры рассеяния кристаллов натрия — лантан и калий — лантан молибдатов и стронций молибдата, видно, что для низкочастотной линии рассеяния в области 330 cm^{-1} все спектры имеют однородное уширение. Однако наиболее высокочастотная линия полносимметричного колебания на 880 cm^{-1} однородно уширена только в кристалле SrMoO_4 со структурой шеелита, а в двух других кристаллах спектральная разупорядоченность столь велика, что резко уменьшает пиковое значение сечения рассеяния.

Чтобы создать кристалл с наилучшими для ВКР лазеров характеристиками, мы в первую очередь выбрали среди вольфраматов и молибдатов класс материалов с шеелитной структурой, в которых неоднородное уширение КР при комнатной температуре отсутствует. Поскольку, интегральная интенсивность в этом классе примерно постоянна, а пиковое сечение обратно пропорционально однородной ширине линии рассеяния, мы постарались уменьшить ширину линии КРС, увеличив время (уменьшив скорость) фазовой релаксации колебательного возбуждения.

Один из очевидных путей достижения этой цели — применить более тяжелые щелочно-земельные катионы, которым будут соответствовать более низкие частоты решеточных колебаний. Это потребует большего числа решеточных фононов для релаксации высокочастотной ВКР-активной колебательной моды и приведет к меньшей скорости фазовой релаксации, что отразится в свою очередь в меньшем уширении спектра.

Действительно, применив в кристаллах шеелитов в 2 раза более тяжелые катионы Sr^{2+} и в 3 раза более тяжелые катионы Ba^{2+} по сравнению с ионами Ca^{2+} , удалось добиться резкого (в 3–4 раза) сужения спектральных линий КР при одновременном увеличении пикового значения сечения рассеяния во столько же раз. При этом сдвиг ВКР-активного колебания в высокочастотную область вследствие роста параметра кристаллической решетки для катионов большого радиуса также способствует сужению спектра и росту пиковых значений усиления. Разработанные таким образом кристаллы вольфрамата бария и стронция были запатентованы как новые высокоэффективные материалы для ВКР лазеров [29].

В нашем Научном центре была разработана технология синтеза и выращивания крупных кристаллов BaWO_4 и SrWO_4 высокого оптического качества [29,30]. Она основана на методе Чохральского с высокочастотным нагревом в платиновом тигле и вытягиванием на затравку. Скорость вытягивания составила 2–6 mm/h, скорость вращения — 30 revol/min, скорость объемной кристаллизации — менее $1 \text{ cm}^3/\text{h}$. Применялась шихта с избытком WO_3 в 1–1.5 w.%. Из кристаллических буль

Сравнительные ВКР и термомеханические характеристики кристаллов $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$, SrWO_4 и BaWO_4

Характеристика	Кристалл			
	$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	$\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$	SrWO_4	BaWO_4
Частота КР колебания ν_R, cm^{-1}	1047	901; 767	922	924
Ширина линии КР $\Delta\nu_R, \text{cm}^{-1}$	0.4	5.4; 6.4	2.74	1.6
Время дефазировки T_R, ps	28	2.0	4	6.6
Коэффициент усиления:				
$g(0.53 \mu\text{m})$ стационарный (ns)	47	11		36–40
$g(0.53 \mu\text{m})$ нестационарный (20 ps)	4.7	11		14.4
$g(1.06 \mu\text{m})$ стационарный (ns)	11	4	5	8.5
$g(1.06 \mu\text{m})$ нестационарный (30–50 ps)	1.1	3		3.8
$g(1.3 \mu\text{m})$ стационарный (ns)				5.8
Область пропускания, μm	0.33–1.8	0.3–5	0.25–5	0.255–5
Влагостойкость	низкая	высокая	высокая	высокая
Теплопроводность при 25°C , $\text{W}/\text{K} \cdot \text{m}$	1.17	2.5–3.4	3	3.0
Коэффициент термического расширения α , $1/^\circ\text{C}$	$13 \cdot 10^{-6}$	$(1.6–8.5)10^{-6}$		$6 \cdot 10^{-6}$
Твердость	19.2 (NaNO_3 Кнуп)	4–4.5 (Моос)	4 (Моос)	4 (Моос) 400 (Кнуп)

вырезались ориентированные экспериментальные образцы прямоугольной формы и с брестерским срезом.

Образцы новых кристаллов BaWO_4 и SrWO_4 [29–36] проходили лазерные испытания при наносекундной и пикосекундной накачке вместе с известными кристаллами $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$. При наносекундной накачке даже для более коротких кристаллов BaWO_4 и SrWO_4 порог возникновения мощного излучения ВКР ниже, чем для кристалла KGW , и приближается к рекордно низкому порогу для кристалла $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$. Это связано с более высокими, чем в KGW , пиковыми сечениями ВКР усиления.

Пикосекундные исследования также показали близкое к рекордному (как у кристаллов KGW) ВКР усиление в кристаллах BaWO_4 и SrWO_4 , в то время как усиление в $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ для пикосекунд упало в 10 раз. Таким образом, впервые разработаны новые универсальные рамановские кристаллы, одинаково хорошо работающие как в стационарном режиме наносекундных и более длинных импульсов, так и в переходном нестационарном режиме пикосекундной накачки (см. таблицу).

Кроме указанных уникальных свойств, как видно из таблицы, эти кристаллы обладают значительно более широкой областью оптической прозрачности ($0.25–5 \mu\text{m}$), более высокой влагостойкостью, большей теплопроводностью и твердостью и меньшим коэффициентом термического расширения, чем у кристаллов $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$. Все эти характеристики определяют предельно достижимые выходные параметры при разработке твердотельных ВКР лазеров.

Применение инфракрасных наносекундных лазеров накачки с длиной волны $1.34 \mu\text{m}$ позволило впервые, используя ВКР кристаллов BaWO_4 , продвинуться глубоко в ИК диапазон спектра [37].

Так, получено когерентное излучение первой стоксовой компоненты с длиной волны $\lambda_1 = 1.54 \mu\text{m}$, второй стоксовой компоненты с $\lambda_2 = 1.78 \mu\text{m}$ и третьей стоксовой компоненты с $\lambda_3 = 2.13 \mu\text{m}$. Выходная энергия составила несколько миллиджоулей при КПД = 15–20%. Интересно, что один такой рамановский лазер по спектральному составу излучения может заменить три различных лазера: на ионах Er^{3+} в стекле и на ионах Tm^{3+} и Ho^{3+} в кристаллах.

Важным достоинством разработанных новых рамановских кристаллов является то, что их структура допускает легирование лазерно-активными редкоземельными ионами, например ионами Nd^{3+} , при гетеровалентном замещении ионов Ba^{2+} и Sr^{2+} в катионной подрешетке.

Такие кристаллы успешно работают, выполняя одновременно две функции: во-первых, позволяют осуществлять лазерное усиление и генерацию на лазерных ионах Nd^{3+} (функция лазерной среды), во-вторых — обеспечивать высокоэффективную ВКР конверсию лазерного излучения с частотным сдвигом $\sim 920 \text{cm}^{-1}$ на колебаниях $[\text{WO}_4]^{2-}$ комплекса (функция ВКР среды). Такие новые многофункциональные лазерно-рамановские среды позволяют генерировать мощное когерентное излучение на многих новых длинах волн и осуществлять дискретную перестройку частоты излучения.

ВКР лазерные преобразователи очень хорошо сочетаются с твердотельными лазерными комплексами плавно перестраиваемой частоты. Так, лучшие твердотельные комплексы на базе кристаллов с центрами окраски имеют длинноволновый предел перестройки частоты $1.3–1.4 \mu\text{m}$, а рамановские лазерные преобразователи расширяют его до $1.5–1.7 \mu\text{m}$ на первой и второй стоксовых частотах и до $2.2 \mu\text{m}$ на третьей стоксовой компоненте [15–18].

Разработанные новые рамановские кристаллы и рамановские лазеры наилучшим образом сочетаются с современными мощными твердотельными неодимовыми лазерами накачки, обладающими одномодовым и одночастотным характером излучения при высокой пиковой и средней мощности [38,39]. Применение петлевых схем резонаторов с пересечением пучков внутриактивных элементов позволяют кроме усиления излучения обеспечить четырехволновое обращение волнового фронта в активной среде неодимового лазера и тем самым скомпенсировать термические искажения и неоднородности, вызванные накачкой. В результате путем применения одномодовой одночастотной накачки при средней мощности до 34 W получена выходная мощность ВКР генерации на кристалле BaWO_4 около 5 W при пиковой мощности свыше 1 MW [38]. Применение в петлевом лазере накачки высокоэффективных кристаллов Nd:GGG большого размера позволило впервые реализовать ВКР лазер на кристалле BaWO_4 размером $6 \times 8 \times 95$ mm с энергией цуга до 2 J и числом импульсов в цуге свыше 50 [39].

Последние два типа твердотельных ВКР лазерных систем могут служить хорошей базой (прототипом) для разработки проекта „натриевой звезды“ для прикладной астрономии и контроля быстро движущихся космических объектов. Этот амбициозный проект, пришедший из арсенала звездных войн, заключается в создании мощного лазера с длиной волны 588.9 μm , точно попадающей в резонанс ионов Na^+ . Лазер должен быть установлен и двигаться вместе с адаптивным телескопом. Излучение лазера с длиной волны $\lambda = 588.9$ nm на высоте 100 km над землей резонансно возбуждает ионы Na^+ , находящиеся в слое толщиной 10 km. При резонансном переизлучении лазерной мощности ионами Na^+ возникает изображение искусственной звезды. Отличие изображения этой звезды от круглого указывает на оптические искажения, которые претерпевает лазерный луч, проходя сто-километровый атмосферный слой. Эти искажения затем могут быть скомпенсированы адаптивным телескопом, повышая разрешение системы в десятки раз.

Наш анализ показал, что сочетание высокоэффективных лазерных кристаллов GGG:Nd и ВКР кристаллов BaWO_4 дает лучшую комбинацию для точного попадания в резонанс ионов Na^+ [40,41]. ВКР преобразование 1062.1 nm излучения лазера на GGG:Nd дает длину волны излучения 1177.9 nm, которая после удвоения частоты в нелинейном кристалле, например LBO, превращается в желтое излучение с $\lambda = 588.9$ nm. В работе [40] показано хорошее соответствие спектров излучения лазера и резонанса Na^+ ионов. Достигнутая пиковая мощность прототипа такого лазера уже сейчас составляет десятки–сотни мегаватт, а эффективность оптического преобразования — многие десятки процентов.

Интересные особенности ВКР обнаружены у кристаллов ванадата гадолиния и иттрия. При правильной выборке ориентации кристаллов относительно направления распространения света накачки и его поляризации коэффициент ВКР усиления в кристаллах GdVO_3 и YVO_3

оказался на редкость высоким [42], близким к кристаллу BaWO_4 . При этом интегральное сечение КР даже превосходит значения для ряда кристаллов вольфраматов. Сочетание высокого ВКР усиления с рекордно высоким сечением генерации ионов Nd^{3+} в кристаллах ванадатов позволило впервые реализовать микролазер на кристалле $\text{GdVO}_4:\text{Nd}$ с пассивной модуляцией добротности на кристалле LiF:F_2^- , генерирующий на первой стоксовой компоненте $\lambda_1 = 1174.4$ nm само-ВКР импульсы с длительностью менее 400 ps и пиковой мощностью до 10 kW при частоте повторения до 20 kHz [43]. Такой метод получения одиночных сверхкоротких импульсов с высокой частотой повторения в микролазерах с размером резонатора в несколько миллиметров без применения сложных, громоздких и дорогостоящих устройств синхронизации мод и выделения одного пика из цуга представляется очень перспективным для многих лидарных приложений.

Поиск наиболее подходящего ВКР кристалла для пикосекундных лазеров с предельно короткой длительностью потребовал детального исследования свойств нескольких десятков кристаллов при накачке импульсами с длительностью менее 10 ps. Анализ пороговых значений ВКР, приведенных на единичную длину кристалла, времен дефазировки колебательных возбуждений и уширения спектральных линий интегральных и пиковых сечений рассеяния для разных ориентаций кристалла выявил ряд аномалий. Наиболее яркой аномалией, обнаруженной нами, оказалось то, что кристаллы молибдата и вольфрамата свинца обладают порогами ВКР, значительно меньшими, а интегральными и пиковыми значениями сечения рассеяния, значительно большими, чем у всех остальных кристаллов этих классов. При этом максимальные сечения и минимальные пороги обнаружены для поляризации и вектора распространения пучка накачки, ортогональных оптимальным для всех остальных вольфраматов и молибдатов [44]. Это требует разработки технологии роста кристаллов с ортогональной поляризацией относительно традиционной. К сожалению, уникальные свойства молибдатов и вольфраматов свинца пока не могут быть полностью реализованы из-за невысокого оптического качества кристаллов и низкого порога лазерного разрушения, особенно для наносекундных импульсов.

В заключение приведем основные достигнутые результаты представленного цикла работ:

— разработаны оригинальные методы поиска и создания новых ВКР лазерных материалов;

— установлены микромеханизмы квазимолекулярной колебательной релаксации (дефазировка, распад), ответственной за уникальность ВКР свойств кристаллов нитратов, вольфраматов и молибдатов;

— на базе анализа микросвойств предложены новые кристаллические вещества, обладающие рекордным сечением усиления ВКР, низким порогом процесса и широкой спектральной областью использования;

— создана технология выращивания ВКР монокристаллов для нового поколения твердотельных ВКР лазеров и оптических усилителей;

— разработаны новые ВКР лазерные приборы для лазерного зондирования, локации, микроэлементного контроля, адаптивной оптики, дальнометрии и медицины.

Список литературы

- [1] C.V. Raman, K.S. Krishnan. *Nature (London)* **121**, 501 (1928).
- [2] С.Г. Ландсберг, Л.И. Мандельштам. *ЖРФХО* **60**, 335 (1928).
- [3] E.J. Woodbury, W.K. Ng. *IRE* **50**, 2367 (1962).
- [4] В.А. Зубов, М.М. Сушинский, И.К. Шувалов. *УФН* **83**, 2, 197 (1964).
- [5] G. Eckhart. *IEEE J. Quant. Electron.* QE-2, 1, 1 (1966).
- [6] N. Bloembergen. *Am. J. Phys.* **35** (II), 989 (1967).
- [7] Т.Т. Басиев. *УФН* **169**, 10, 1149 (1999).
- [8] R.C. Powell, T.T. Basiev. In: *Advances in Laser Physics* / Eds. V.S. Letokhov and P. Meystre. Harwood Academic Publisher. Amsterdam, Netherlands (2000). P. 55.
- [9] Т.Т. Басиев, В.В. Осико, А.М. Прокhorov, Е.М. Дианов. *Topics Appl. Phys.* **89**, 351 (2003).
- [10] Т.Т. Басиев, R.C. Powell. In: *Handbook of Laser Technology and Applications* (2003). Ch. B 1.7. P. 1–29.
- [11] Т.Т. Басиев, R.C. Powell. *Opt. Mater.* **11**, 4, 301 (1999).
- [12] P.G. Zverev, T.T. Basiev, A.M. Prokhorov. *Opt. Mater.* **11**, 4, 335 (1999).
- [13] P.G. Zverev, T.T. Basiev, V.V. Osiko, A.M. Kulkov, V.N. Voitsekhovskii, V.E. Yakobson. *Opt. Mater.* **11**, 4, 315 (1999).
- [14] И.В. Мочалов. *Оптический журнал* **11**, 4 (1995).
- [15] Т.Т. Басиев, В.В. Осико, С.В. Миров. *IEEE J. Quantum Electron.* **24**, 6, 1052 (1988).
- [16] Т.Т. Басиев, С.В. Миров. *Room Temperature Tunable Color Center Lasers*. Laser Science and Technology Books Series. Gordon and Breach Science Publishers. Harwood Academic Publishers (1994). P. 33.
- [17] Т.Т. Басиев, В.Н. Войцеховский, П.Г. Зверев, Ф.В. Карпушко, А.В. Любимов, С.Б. Миров, В.П. Морозов, И.В. Мочалов, А.А. Павлюк, Г.В. Синицын, В.Э. Якобсон. *Квантовая электроника* **14**, 12, 2452 (1987).
- [18] Т.Т. Басиев, П.Г. Зверев, Ф.В. Карпушко, В.А. Коношкин, С.М. Кулашик, С.Б. Миров, В.П. Морозов, В.С. Моткин, А.Г. Папашвили, Н.А. Саскевич, Г.В. Синицын, В.В. Федоров. *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **54**, 8, 1450 (1990).
- [19] Т.Т. Басиев, Е.М. Дианов, Э.А. Захидов, А.Я. Карасик, С.Б. Миров, А.М. Прохоров. *Письма в ЖЭТФ* **37**, 4, 192 (1983).
- [20] P.G. Zverev, T.T. Basiev. In: *Advanced Solid State Lasers* / Eds. B.H.T. Chai, S.A. Pain. OSA Proc. Washington, DC: OSA (1995). Vol. 24. P. 288.
- [21] P.G. Zverev, T.T. Basiev, V. Jia, H. Liu. In: *Advanced Solid State Lasers* / Eds. S.A. Pain, C. Pollok. Washington, DC: OSA TOPS (1996). Vol. 1. P. 554.
- [22] Т.Т. Басиев, П.Г. Зверев. *Квантовая электроника* **22**, 12, 1241 (1995).
- [23] P.G. Zverev, W. Jia, H. Liu, T.T. Basiev. *Opt. Lett.* **20**, 2378 (1995).
- [24] Т.Т. Басиев, А.А. Sobol, P.G. Zverev, V.V. Osiko, R.C. Powell. *Appl. Opt.* **38**, 594 (1999).
- [25] Т.Т. Басиев, А.А. Sobol, P.G. Zverev, L.I. Ivleva, V.V. Osiko, R.C. Powell. *Opt. Mater.* **11**, 4, 307 (1999).
- [26] Т.Т. Басиев, А.А. Sobol, Yu.K. Voron'ko, P.G. Zverev. *Opt. Mater.* **15**, 205 (2000).
- [27] Т.Т. Басиев, P.G. Zverev, А.А. Sobol, V.V. Osiko. *Advanced Solid State Lasers* (2002). MB10-1.
- [28] P.G. Zverev, J.T. Murray, R.C. Powell, R.J. Reeves, T.T. Basiev. *Opt. Commun.* **97**, 59 (1993).
- [29] Т.Т. Басиев, А.А. Sobol, P.G. Zverev, L.I. Ivleva, V.V. Osiko. *Laser material for stimulated Raman scattering*. Patent RU 2178938 C1. (27.01.2002 Бюл. № 3).
- [30] П.Г. Зверев, Т.Т. Басиев, А.А. Соболев, В.В. Скорняков, Л.И. Ивлева, Н.М. Полозков, В.В. Осико. *Квантовая электроника* **30**, 1, 55 (2000).
- [31] Т.Т. Басиев, А.А. Sobol, P.G. Zverev, V.V. Fedorov, M.E. Doroshenko, L.I. Ivleva, N.M. Polozkov, V.V. Osiko, A.M. Prokhorov, G. Hager. In: *Laser '98* / Eds. V.J. Corcoran, T.A. Goldman. Proc. Int. Conf. at Tucson (1998). SRS PRESS, McLEAN, VA (1999). P. 712.
- [32] P. Černý, H. Jelínková, T.T. Basiev, P.G. Zverev. *Growth, Fabrication, Devices and Applications of Laser and Nonlinear SPIE* **4268**, 101 (2001).
- [33] P. Černý, H. Jelínková, J. Šulc, P.G. Zverev, T.T. Basiev. *Advanced Solid State Lasers*. OSA TOPS, Seattle, WA (2001). Vol. 50.
- [34] P. Černý, P.G. Zverev, H. Jelínková, T.T. Basiev. *Optics Commun.* **177**, 397 (2000).
- [35] P. Černý, P.G. Zverev, H. Jelínková, T.T. Basiev, L.I. Ivleva, V.V. Osiko. *Nonlinear Materials, Devices, and Applications* / Ed. Jeffrey W. Pierce. Proc. of SPIE (2000). Vol. 3928. P. 124.
- [36] P. Černý, H. Jelínková, J. Šulc, P.G. Zverev, T.T. Basiev. *Progress in Quantum Electronics* **28**, 2, 113 (2004).
- [37] Т.Т. Басиев, М.Е. Doroshenko, В.В. Осико, В.М. Пушиков, В.К. Комар, В. Гриньов, М.В. Космына. *CAOL 2003*. Alushta, Crimea, Ukraine (2003). P. 122.
- [38] Т.Т. Басиев, А.В. Гаврилов, В.В. Осико, С.Н. Сметанин, А.Ф. Федин. *Квантовая электроника* **34**, 7, 1 (2004).
- [39] Т.Т. Басиев, Yu.K. Danilenko, M.E. Doroshenko, A.V. Fedin, A.V. Gavrilov, V.V. Osiko, S.N. Smetanin. In: *Wavefront Transformation and Laser Beam Control* / Eds. V.E. Sherstobitov and L.N. Soms. Proc. SPIE, (Bellingham, WA) **5481**, 23 (2004).
- [40] P.G. Zverev, T.T. Basiev, M.E. Doroshenko, V.V. Osiko. *OSA Trends in Optics and Photonic Series* **34**, 348 (2000).
- [41] Т.Т. Басиев, N.E. Doroshenko, P.G. Zverev, A.M. Prokhorov. *Solid-state laser of yellow spectral region*. Russian Patent. RU 2178938 C1. (27.01.2002 Бюл. № 3).
- [42] P.G. Zverev, A.Ya. Karasik, А.А. Sobol, D.S. Chunaev, T.T. Basiev, A.I. Zagumennyi, Yu.D. Zavartsev, S.A. Kutovoi, V.V. Osiko, I.A. Shcherbakov. *Advanced Solid State Photonics Conf. Technical digest* (2004). Santa Fe, USA, TuB10. P. 25–27.
- [43] Т.Т. Басиев, S.V. Vassiliev, V.A. Konyushkin, V.V. Osiko, A.I. Zagumennyi, Y.D. Zavartsev, S.A. Kutovoi, L.A. Shsherbakov. *Laser Phys. Lett.* **1**, 5, 237 (2004).
- [44] Т.Т. Басиев, П.Г. Зверев, А.Я. Карасик, В.В. Осико, А.А. Соболев, Д.С. Чунаев. *ЖЭТФ* **126**, 5, 11 (2004).