

06

## Измерение коэффициента ВКР-усиления различных кристаллов методом резонатора

© Ю.А. Кочуков<sup>1,3</sup>, П.Д. Харитонов<sup>1</sup>, Д.Н. Селезнев<sup>1</sup>, К.А. Губина<sup>1,3</sup>, Д.П. Терещенко<sup>1</sup>, Н.А. Хохлов<sup>2</sup>,  
Е.С. Барканова<sup>2</sup>, А.Г. Папашвили<sup>1</sup>, В.Е. Шукшин<sup>1</sup>, И.С. Воронина<sup>1</sup>, С.Н. Сметанин<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,  
Москва, Россия

<sup>2</sup> Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,  
Москва, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“,  
Москва, Россия

e-mail: ko4ukovura@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.09.2024 г.

В окончательной редакции 15.01.2025 г.

Принята к публикации 16.01.2025 г.

Развит метод резонатора для обеспечения простого измерения коэффициента ВКР-усиления различных кристаллов. В формулах обработки экспериментальных результатов учтены длительность импульса накачки и гауссов профиль пучка. Под действием наносекундного лазера с длиной волны 1064 нм проведены измерения коэффициента ВКР-усиления для ряда кристаллов: SrMoO<sub>4</sub>, Sr(MoO<sub>4</sub>)<sub>0.8</sub>(WO<sub>4</sub>)<sub>0.2</sub>, Sr<sub>0.86</sub>Ba<sub>0.14</sub>MoO<sub>4</sub>, Sr<sub>0.9</sub>Ba<sub>0.1</sub>MoO<sub>4</sub> и LiNa<sub>5</sub>Mo<sub>9</sub>O<sub>30</sub>. Для известного ВКР-кристалла SrMoO<sub>4</sub> полученный результат согласуется с литературными данными (5.6 см/GW). Для твердых растворов на основе SrMoO<sub>4</sub> снижение коэффициента ВКР-усиления по сравнению с таковым для SrMoO<sub>4</sub> коррелирует с увеличением ширины линии колебательной моды. Впервые получено ВКР в кристаллах Sr<sub>0.86</sub>Ba<sub>0.14</sub>MoO<sub>4</sub>, Sr<sub>0.9</sub>Ba<sub>0.1</sub>MoO<sub>4</sub> и LiNa<sub>5</sub>Mo<sub>9</sub>O<sub>30</sub> при сравнимом коэффициенте их ВКР-усиления 2.4–2.5 см/GW под действием накачки с длиной волны 1064 нм.

**Ключевые слова:** вынужденное комбинационное рассеяние, коэффициент ВКР-усиления, оптический резонатор, порог генерации.

DOI: 10.61011/OS.2025.01.59879.7060-24

### 1. Введение

Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) в кристаллах является простым и доступным способом преобразования частоты лазерного излучения, не требующим поддержания фазового синхронизма [1]. Выбор ВКР-кристаллов с различными комбинационными частотами позволяет подобрать требуемый сдвиг частоты лазерного излучения для конкретного применения, например, для задач флуоресцентной микроскопии живых тканей [2]. Другой важной характеристикой, определяющей успешное применение ВКР-кристалла, является коэффициент ВКР-усиления, но известные данные его измерения для различных кристаллов, полученные различными методами, ограничены или имеют высокую погрешность. Например, прямой метод измерения — метод однопроходного усилителя [3,4] — является технически наиболее сложным, требующим учета пространственного, временного и спектрального перекрытия излучения накачки и стока ВКР-излучения, поэтому он редко используется на практике. В большинстве случаев измерения проводят технически более простым методом — методом однопроходного генератора [5–10]. Здесь для получения ВКР-генерации за один проход ВКР-кристалла интенсивность накачки приходится сильно увеличивать, а для предотвращения лучевого

пробоя ВКР-кристалла при этом приходится укорачивать импульсы возбуждающего лазерного излучения, используя пикосекундные лазеры накачки. Однако при этом режим ВКР в кристаллах, имеющих пикосекундные времена фазовой релаксации, становится нестационарным, что приводит к необходимости использования сложных косвенных оценок, приводящих к высокой погрешности измерения стационарного коэффициента ВКР-усиления [9,10]. В работе [11] для определения коэффициента ВКР-усиления кристалла CaCO<sub>3</sub> был использован оригинальный экспресс-метод измерения — метод резонатора, заключающийся в помещении ВКР-кристалла в резонатор, что позволило снизить порог ВКР-генерации по сравнению с порогом лучевого пробоя ВКР-кристалла под действием наносекундных импульсов накачки.

Настоящая работа посвящена развитию метода резонатора для обеспечения более точного измерения коэффициента ВКР-усиления различных кристаллов. В формулах обработки экспериментальных результатов произведен учет длительности импульса накачки и гауссова профиля пучка. Проведены измерения коэффициента ВКР-усиления как для известного ВКР-кристалла SrMoO<sub>4</sub>, так и для новых ВКР-кристаллов Sr(MoO<sub>4</sub>)<sub>0.8</sub>(WO<sub>4</sub>)<sub>0.2</sub>, Sr<sub>0.86</sub>Ba<sub>0.14</sub>MoO<sub>4</sub>, Sr<sub>0.9</sub>Ba<sub>0.1</sub>MoO<sub>4</sub> и LiNa<sub>5</sub>Mo<sub>9</sub>O<sub>30</sub>.

## 2. Теоретическое обоснование метода резонатора

Как это было отмечено еще в обзоре Н. Бломбергена [12], усиление ВКР-лазера, как и любого другого лазера, на пороге генерации должно быть равно потерям резонатора, что лежит в основе метода резонатора для измерения коэффициента ВКР-усиления. Однако таким образом ранее были получены лишь относительные значения коэффициента ВКР-усиления в зависимости от длины волны накачки для кристалла алмаза [13]. Абсолютные измерения требуют учета длительности импульса накачки, так как в ВКР-лазерах в отличие от лазеров с инверсией населенности усиление прекращается в конце действия импульса накачки. При этом для измерения целесообразно использовать наносекундные импульсы излучения накачки, простые в реализации, обеспечивающие стационарный режим ВКР в кристаллах и являющиеся более длинными по сравнению со временем обхода резонатора ВКР-лазера при длине резонатора менее 10 см.

Метод резонатора для измерения коэффициента ВКР-усиления, учитывающий длительность импульса накачки, предложенный в работе [11], основан на плосковолновой модели ВКР в резонаторе, изложенной в работе [14]. Существует также более точная модель, использующая приближение сфокусированного гауссова пучка [15], которая обосновывает определение эффективной интенсивности накачки.

Для теоретического обоснования метода резонатора приведем здесь вывод формулы определения коэффициента ВКР-усиления в приближении коллимированного гауссова пучка, достаточном для описания ВКР в резонаторе. Основываемся на известной модели стационарного ВКР-усиления [16]:

$$\frac{dI_S(z, r)}{dz} = g_R I_p(z, r) I_S(z, r) - k_S I_S(z, r),$$

$$\frac{dI_p(z, r)}{dz} = -g_R \frac{\lambda_p}{\lambda_S} I_p(z, r) I_S(z, r) - k_p I_p(z, r), \quad (1)$$

где  $g_R$  — искомый коэффициент ВКР-усиления активной среды ВКР-лазера;  $I_p(z, r)$  и  $I_S(z, r)$  — интенсивности излучения накачки и стока ВКР-излучения, зависящие от продольной ( $z$ ) и поперечной ( $r$ ) координат;  $k_p$  и  $k_S$  — коэффициенты потерь излучения накачки и ВКР-излучения,  $\lambda_p$  и  $\lambda_S$  — длины волн излучения накачки и ВКР-излучения.

В приближении коллимированного гауссова пучка пучки излучения накачки и ВКР-излучения имеют гауссов профиль с неизменным радиусом пучка, а зависимостью интенсивности излучения накачки от продольной координаты на пороге ВКР можно пренебречь:

$$I_S(z, r) = P_S(z) \frac{2}{\pi \cdot r_S^2} \exp\left(-2 \frac{r^2}{r_S^2}\right),$$

$$I_p(z, r) \approx P_p \frac{2}{\pi \cdot r_p^2} \exp\left(-2 \frac{r^2}{r_p^2}\right), \quad (2)$$

где  $P_{p,S} = \int_0^\infty I_{p,S} 2\pi r dr$  — мощность излучения накачки и ВКР-излучения;  $r_{p,S}$  — радиус пучка излучения накачки и ВКР-излучения по уровню  $1/e^2$ .

Интегрирование первого уравнения системы уравнений (1) по поперечной координате  $\left(\int_0^\infty 2\pi r dr\right)$  с учетом выражений (2) дает уравнение для мощности ВКР-излучения:

$$\frac{dP_S(z)}{dz} = g_R P_p P_S(z) \frac{2}{\pi r_p^2 + \pi r_S^2} - k_S P_S(z). \quad (3)$$

Для описания многопроходного ВКР во внешнем (относительно лазера накачки) двухзеркальном резонаторе перейдем к кинетическому рассмотрению, которое может быть использовано при длительности импульса накачки, многократно превышающей время обхода резонатора:

$$\frac{n_R P_S(t)}{\mu c} \frac{dP_S(t)}{dt} = g_R P_p P_S(t) \frac{2}{\pi r_p^2 + \pi r_S^2} - k_S P_S(t), \quad (4)$$

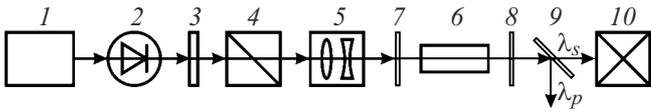
где  $\mu = n_R L_R / L_c$  — коэффициент заполнения лазера активной средой (отношение оптической длины активной среды к оптической длине резонатора) [17],  $n_R$  — показатель преломления активной среды ВКР-лазера,  $L_R$  — длина активной среды ВКР-лазера,  $L_c = L_g - L_R + L_R n_R$  — оптическая длина резонатора ВКР-лазера,  $L_g$  — геометрическая длина резонатора ВКР-лазера,  $c$  — скорость света в вакууме,

$$k_S = \frac{1}{L_R} \ln \frac{1}{\sqrt{T_R^2 R_S^{in} R_S^{out}}} \quad (5)$$

— коэффициент потерь резонатора ВКР-лазера,  $T_R$  — коэффициент пропускания среды ВКР-лазера за проход на длине волны ВКР-излучения,  $R_S^{in, out}$  — коэффициент отражения входного (in) и выходного (out) зеркала резонатора ВКР-лазера на длине волны ВКР-излучения. Мощность излучения накачки внутри активной среды ВКР-лазера с внешним двухзеркальным резонатором можно определить как

$$P_p = \frac{E_p}{\tau_p} (1 - R_p^{in}) \sum_{i=1}^N \left[ (R_p^{in} R_p^{out})^{i-1} + (R_p^{in})^{i-1} (R_p^{out})^i \right], \quad (6)$$

где  $E_p$  — энергия импульса излучения накачки на входе ВКР-лазера,  $\tau_p$  — длительность импульса излучения накачки,  $R_p^{in, out}$  — коэффициент отражения входного (in) и выходного (out) зеркала резонатора ВКР-лазера на длине волны накачки,  $N \approx \tau_p / \tau_c$  — число обходов резонатора за время действия накачки,  $\tau_c = 2L_c / c$  — время обхода резонатора. При  $R_p^{in} \approx 0$  формула (6) упрощается до  $P_p \approx (1 + R_p^{out}) E_p / \tau_p$ , как в работе [15].



**Рис. 1.** Оптическая схема эксперимента: 1 — лазер накачки; 2 — изолятор Фарадея; 3 — полуволновая пластина; 4 — поляризатор; 5 — фокусирующая система; 6 — ВКР-кристалл; 7 — входное зеркало резонатора; 8 — выходное зеркало резонатора; 9 — зеркальный фильтр; 10 — регистратор.

Решение уравнения (4) в конце действия импульса накачки можно записать в виде

$$P_S(\tau_p) = P_S(0)e^G, \quad (7)$$

где инкремент экспоненциального ВКР-усиления определяется как

$$G = \left( g_R I_p L_R - \ln \frac{1}{\sqrt{T_R^2 R_S^{in} R_S^{out}}} \right) \frac{c \tau_p}{L_c}. \quad (8)$$

Здесь  $I_p = P_p/S$  — эффективная интенсивность накачки,  $S = (\pi r_p^2 + \pi r_s^2)/2$  — эффективное сечение пучка. Получаем выражение для эффективной интенсивности накачки  $I_p = 2P_p/(\pi r_p^2 + \pi r_s^2)$ .

Условие порога ВКР можно определить как [18]  $G = 25$ , тогда, приравняв выражение (8) этому значению, получаем искомую формулу для коэффициента ВКР-усиления

$$g_R = \frac{1}{L_p^{\text{th}} L_R} \left( \frac{25 L_c}{\tau_p c} + \ln \frac{1}{\sqrt{T_R^2 R_S^{in} R_S^{out}}} \right), \quad (9)$$

которая совпадает с полученной в плосковолновом приближении [11]. Здесь пороговое значение эффективной интенсивности накачки внутри ВКР-среды определяется по формуле

$$I_p^{\text{th}} = \frac{E_p^{\text{th}}}{\tau_p S} (1 - R_p^{\text{in}}) \sum_{i=1}^N \left[ (R_p^{\text{in}} P_p^{\text{out}})^{i-1} + (R_p^{\text{in}})^{i-1} (R_p^{\text{out}})^i \right], \quad (10)$$

где  $E_p^{\text{th}}$  — измеряемое пороговое значение энергии импульса излучения накачки на входе ВКР-лазера. В случае очень длинного импульса накачки первым слагаемым в скобках выражения (9) можно пренебречь, тогда приходим к исходной формуле из обзора Н. Бломбергера [12], справедливой в случае непрерывной накачки [15].

### 3. Проведение измерений

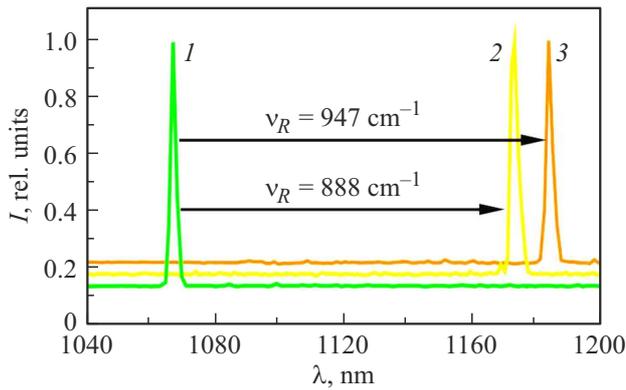
Оптическая схема эксперимента показана на рис. 1. Излучение лазера накачки 1 проходило через изолятор Фарадея 2 для развязки лазера накачки и ВКР-лазера. Далее были установлены полуволновая пластина 3 и

поляризатор 4 для плавного регулирования энергии импульса излучения накачки  $E_p$  на входе ВКР-лазера при повороте полуволновой пластины 3. Далее фокусирующая система 5 на основе пары линз, в фокусе которой установлен исследуемый ВКР-кристалл 6. ВКР-лазер состоял из ВКР-кристалла 6, помещенного в оптический резонатор на основе плоских зеркал 7 и 8, расстояние между которыми составляло  $L_g = 9.5$  см. Входное зеркало 7 имело коэффициенты отражения  $R_{1064} = 3.5\%$ ,  $R_{1175} = 99.8\%$  и  $R_{1183} = 99.9\%$  на длинах волн 1064, 1175 и 1183 нм соответственно, а выходное зеркало 8 —  $R_{1064} = 83.7\%$ ,  $R_{1175} = 80.2\%$  и  $R_{1183} = 79.6\%$ . На выходе ВКР-лазера устанавливался зеркальный фильтр 9, отражающий излучение накачки (1064 нм) и пропускающий ВКР-излучение (1175–1183 нм). ВКР-излучение, пропущенное фильтром 9, направлялось на регистратор 10, в качестве которого использовался спектрометр видимого диапазона с удвоителем частоты, либо измеритель энергии излучения.

Измерения проводились для ВКР-кристаллов  $\text{SrMoO}_4$  ( $L_R = 5.7$  см,  $n_R = 1.9$ ),  $\text{Sr}(\text{MoO}_4)_{0.8}(\text{WO}_4)_{0.2}$  ( $L_R = 7.0$  см,  $n_R = 1.9$ ),  $\text{Sr}_{0.86}\text{Ba}_{0.14}\text{MoO}_4$  ( $L_R = 4.4$  см,  $n_R = 1.9$ ),  $\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1}\text{MoO}_4$  ( $L_R = 6.5$  см,  $n_R = 1.9$ ) и  $\text{LiNa}_5\text{Mo}_9\text{O}_{30}$  ( $L_R = 5.7$  см,  $n_R = 1.8$ ). Кристалл  $\text{SrMoO}_4$  является широко известной и эффективной ВКР-средой [19–22], кристалл  $\text{Sr}(\text{MoO}_4)_{0.8}(\text{WO}_4)_{0.2}$  был лишь однократно использован ранее для ВКР [23], а оставшиеся три кристалла —  $\text{Sr}_{0.86}\text{Ba}_{0.14}\text{MoO}_4$ ,  $\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1}\text{MoO}_4$  и  $\text{LiNa}_5\text{Mo}_9\text{O}_{30}$  — являются новыми ВКР-средами, в которых ВКР в настоящей работе получено впервые. Первые три кристалла имели антиотражающие покрытия на плоскопараллельных торцах, последние два — не имели. Все кристаллы были вырезаны вдоль кристаллооптической оси  $Y$ .

Как показала проведенная нами поляризованная спектроскопия комбинационного рассеяния света, твердые растворы  $\text{Sr}(\text{MoO}_4)_{0.8}(\text{WO}_4)_{0.2}$ ,  $\text{Sr}_{0.86}\text{Ba}_{0.14}\text{MoO}_4$  и  $\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1}\text{MoO}_4$ , как и исходный кристалл  $\text{SrMoO}_4$  [21], должны накачиваться в конфигурации  $Y(ZZ)Y$ , отличающейся более высокой интенсивностью моды симметричных валентных колебаний анионной группы, чем для  $Y(XX)Y$ . Нужно отметить, что в анионном твердом растворе  $\text{Sr}(\text{MoO}_4)_{0.8}(\text{WO}_4)_{0.2}$  эта мода ( $\nu_R = 887 \text{ cm}^{-1}$ ) имеет спектральную ширину  $\Delta\nu_R = 4.3 \text{ cm}^{-1}$ , что в 1.7 раза больше, чем в  $\text{SrMoO}_4$ . В катионных твердых растворах  $\text{Sr}_{0.86}\text{Ba}_{0.14}\text{MoO}_4$  и  $\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1}\text{MoO}_4$  уширение этой моды ( $\nu_R = 888 \text{ cm}^{-1}$ ) еще больше — до  $\Delta\nu_R = 6.5 \text{ cm}^{-1}$  (в 2.6 раза), что объясняется комбинацией валентных колебаний с близкими частотами в  $\text{SrMoO}_4$  ( $\nu_R = 887 \text{ cm}^{-1}$ ) и  $\text{BaMoO}_4$  ( $\nu_R = 892 \text{ cm}^{-1}$ ) [24]. Последний кристалл —  $\text{LiNa}_5\text{Mo}_9\text{O}_{30}$  — нужно наоборот накачивать в конфигурации  $Y(XX)Y$ , для которой интенсивность моды симметричных валентных колебаний анионной группы  $\nu_R = 947 \text{ cm}^{-1}$  более высока, чем для  $Y(ZZ)Y$ .

В качестве лазера накачки использовался одномодовый ИАГ: $\text{Nd}^{3+}$ -лазер с электрооптической модуляцией

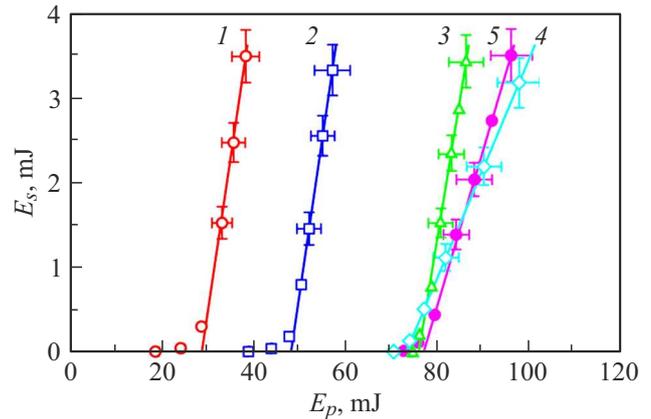


**Рис. 2.** Спектры излучения накачки (кривая 1) и ВКР-излучения для новых ВКР-кристаллов  $\text{Sr}_{0.86}\text{Ba}_{0.14}\text{MoO}_4$  (кривая 2) и  $\text{LiNa}_5\text{Mo}_9\text{O}_{30}$  (кривая 3).

добротности резонатора, генерирующий на длине волны 1064 nm импульсы излучения длительностью 15 ns с энергией импульса 130 mJ. С помощью фокусирующей системы радиус пучка излучения накачки в ВКР-кристалле устанавливался как можно большим, равным  $r_p = 1.9$  mm по уровню  $1/e^2$ , ограниченным апертурой ВКР-кристалла, чтобы можно было считать его неизменным на всей длине ВКР-кристалла и минимизировать дифракционные потери на плоских зеркалах резонатора ВКР-лазера (рэлеевская длина перетяжки пучка накачки в воздухе  $z_R \approx 1$  m на порядок превышала длину резонатора ВКР-лазера). В настоящей работе мы реализовали экспресс-метод, в котором использовали плоские зеркала резонатора, чтобы радиус ВКР-пучка был наибольшим и приближенным к радиусу пучка накачки ( $r_p \approx r_s$ ), тогда можно считать  $S \approx \pi r_p^2$ , как в плосковолновом приближении [11]. Действительно, измеренное значение  $r_s$  было лишь на 9% меньше, чем  $r_p$  (в пределах погрешности измерения).

Сначала с помощью лазера накачки для каждого из ВКР-кристаллов измерили величину их пропускания  $T_R$ , убрав зеркала 7 и 8 из схемы рис. 1. Она составила  $T_R = 93, 92, 95, 77$  и  $79\%$  для кристаллов  $\text{SrMoO}_4$ ,  $\text{Sr}(\text{MoO}_4)_{0.8}(\text{WO}_4)_{0.2}$ ,  $\text{Sr}_{0.86}\text{Ba}_{0.14}\text{MoO}_4$ ,  $\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1}\text{MoO}_4$  и  $\text{LiNa}_5\text{Mo}_9\text{O}_{30}$  соответственно. Малое пропускание последних двух кристаллов обусловлено отсутствием на них антиотражающих покрытий. Далее установили и съюстировали зеркала 7 и 8. При получении ВКР-генерации торцы каждого ВКР-кристалла слегка разъюстировали так, чтобы они не давали вклада в генерацию.

На рис. 2 приведены измеренные спектры излучения накачки (кривая 1) и ВКР-излучения для новых ВКР-кристаллов  $\text{Sr}_{0.86}\text{Ba}_{0.14}\text{MoO}_4$  (кривая 2) и  $\text{LiNa}_5\text{Mo}_9\text{O}_{30}$  (кривая 3). Длины волн ВКР-излучения составили  $\lambda_S = 1175$  и  $1183$  nm для кристаллов  $\text{Sr}_{0.86}\text{Ba}_{0.14}\text{MoO}_4$  и  $\text{LiNa}_5\text{Mo}_9\text{O}_{30}$  соответственно. Для оставшихся кристаллов ( $\text{SrMoO}_4$ ,  $\text{Sr}(\text{MoO}_4)_{0.8}(\text{WO}_4)_{0.2}$  и  $\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1}\text{MoO}_4$ ) спектры и длины волн ВКР-излучения были аналогичны



**Рис. 3.** Зависимости энергии импульса ВКР-излучения от энергии импульса накачки для кристаллов  $\text{SrMoO}_4$  (зависимость 1),  $\text{Sr}(\text{MoO}_4)_{0.8}(\text{WO}_4)_{0.2}$  (зависимость 2),  $\text{Sr}_{0.86}\text{Ba}_{0.14}\text{MoO}_4$  (зависимость 3),  $\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1}\text{MoO}_4$  (зависимость 4) и  $\text{LiNa}_5\text{Mo}_9\text{O}_{30}$  (зависимость 5).

Результаты измерения характеристик ВКР-кристаллов:  $\nu_R$  — частота моды валентных колебаний анионного комплекса,  $\Delta\nu_R$  — ее спектральная ширина,  $g_R$  — коэффициент ВКР-усиления при  $\lambda_p = 1064$  nm

ВКР-кристалл	$\nu_R, \text{cm}^{-1}$	$\Delta\nu_R, \text{cm}^{-1}$	$g_R, \text{cm/GW}$
$\text{SrMoO}_4$	887	2.5	$5.6 \pm 0.2$
$\text{Sr}(\text{MoO}_4)_{0.8}(\text{WO}_4)_{0.2}$	887	4.3	$2.9 \pm 0.1$
$\text{Sr}_{0.86}\text{Ba}_{0.14}\text{MoO}_4$	888	6.5	$2.5 \pm 0.1$
$\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1}\text{MoO}_4$	888	6.5	$2.4 \pm 0.1$
$\text{LiNa}_5\text{Mo}_9\text{O}_{30}$	947	4.0	$2.4 \pm 0.1$

представленным для  $\text{Sr}_{0.86}\text{Ba}_{0.14}\text{MoO}_4$ , т.е. имели примерно одинаковый сдвиг частоты  $\nu_R = 887\text{--}888 \text{ cm}^{-1}$ , характерный для симметричного валентного колебания тетраэдрического анионного комплекса  $\text{MoO}_4$  исходного кристалла  $\text{SrMoO}_4$  [9]. Кристалл  $\text{LiNa}_5\text{Mo}_9\text{O}_{30}$  обеспечил большой сдвиг частоты  $\nu_R = 947 \text{ cm}^{-1}$ , соответствующий симметричному валентному колебанию октаэдрического анионного комплекса  $\text{MoO}_6$  данного кристалла [25].

На рис. 3 показаны полученные экспериментальные зависимости энергии импульса ВКР-излучения от энергии импульса накачки для всех исследуемых кристаллов. Линейная аппроксимация результатов измерений в пересечении с осью абсцисс дала искомые пороговые значения энергии накачки  $E_p^{\text{th}}$ :  $29 \pm 1$  mJ для  $\text{SrMoO}_4$ ,  $49 \pm 2$  mJ для  $\text{Sr}(\text{MoO}_4)_{0.8}(\text{WO}_4)_{0.2}$ ,  $76 \pm 3$  mJ для  $\text{Sr}_{0.86}\text{Ba}_{0.14}\text{MoO}_4$ ,  $74 \pm 3$  mJ для  $\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1}\text{MoO}_4$ ,  $77 \pm 3$  mJ для  $\text{LiNa}_5\text{Mo}_9\text{O}_{30}$ . При подстановке данных значений в формулы (9) и (10) получены значения коэффициента ВКР-усиления для всех исследуемых кристаллов, которые занесены в таблицу.

Из таблицы видно, что полученное значение ( $g_R = 5.6 \pm 0.2 \text{ cm/GW}$ ) для известного кристалла  $\text{SrMoO}_4$  согласуется с ранее проведенным измерением методом генератора ( $g_R = 5.6 \text{ cm/GW}$ ) [9]. В анионном твердом растворе  $\text{Sr}(\text{MoO}_4)_{0.8}(\text{WO}_4)_{0.2}$  коэффициент ВКР-усиления ( $g_R = 2.9 \pm 0.1 \text{ cm/GW}$ ) оказался в 1.9 раза ниже, а в катионных твердых растворах  $\text{Sr}_{0.86}\text{Ba}_{0.14}\text{MoO}_4$  ( $g_R = 2.5 \pm 0.1 \text{ cm/GW}$ ) и  $\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1}\text{MoO}_4$  ( $g_R = 2.4 \pm 0.1 \text{ cm/GW}$ ) — примерно в 2.3 раза ниже, чем для  $\text{SrMoO}_4$ . Это коррелирует с увеличением спектральной ширины колебательной моды ( $\Delta\nu_R$ ) в твердых растворах по сравнению с  $\text{SrMoO}_4$ , что описано выше (см. также таблицу). Благодаря относительно узкой линии колебательной моды ( $\Delta\nu_R = 4 \text{ cm}^{-1}$ ) коэффициент ВКР-усиления в новом ВКР-кристалле  $\text{LiNa}_5\text{Mo}_9\text{O}_{30}$  оказался довольно высоким ( $g_R = 2.4 \pm 0.1 \text{ cm/GW}$ ) и сравнимым с таковым для представленных твердых растворов на основе  $\text{SrMoO}_4$ . Нужно отметить, что полученные значения  $g_R$  относятся к длине волны накачки 1064 nm. При увеличении длины волны накачки коэффициент ВКР-усиления уменьшается [3,4,13].

#### 4. Заключение

Таким образом, развит метод резонатора для обеспечения простого измерения коэффициента ВКР-усиления различных кристаллов. В формулах обработки экспериментальных результатов учтены длительность импульса накачки и гауссов профиль пучка. Проведены измерения коэффициента ВКР-усиления для ряда ВКР-кристаллов при накачке наносекундным лазером с длиной волны 1064 nm. Для известного ВКР-кристалла  $\text{SrMoO}_4$  полученный результат согласуется с литературными данными (5.6 cm/GW). Для твердых растворов на основе  $\text{SrMoO}_4$  снижение коэффициента ВКР-усиления по сравнению с таковым для  $\text{SrMoO}_4$  коррелирует с увеличением ширины линии колебательной моды. Впервые получено ВКР в кристаллах  $\text{Sr}_{0.86}\text{Ba}_{0.14}\text{MoO}_4$ ,  $\text{Sr}_{0.9}\text{Ba}_{0.1}\text{MoO}_4$  и  $\text{LiNa}_5\text{Mo}_9\text{O}_{30}$  при сравнимом коэффициенте их ВКР-усиления 2.4–2.5 cm/GW под действием накачки с длиной волны 1064 nm.

#### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке грантом РНФ № 24-12-00448.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] Т.Т. Басиев, В.В. Осико. Усп. химии, **75** (10), 939 (2006). [Т.Т. Basiev, V.V. Osiko. Rus. Chem. Rev., **75** (10), 847 (2006). DOI: 10.1070/RC2006v075n10ABEH003626].

- [2] E.P. Perillo, J.W. Jarrett, Y.-L. Liu, A. Hassan, D.C. Fernee, J.R. Goldak, A. Bonteanu, D.J. Spence, H.-C. Yeh, A.K. Dunn. Light: Science & Appl., **6**, e17095 (2017). DOI: 10.1038/lsa.2017.95
- [3] V.A. Lisinetskii, S.V. Rozhok, D.N. Bus'ko, R.V. Chulkov, A.S. Grabtchikov, V.A. Orlovich, T.T. Basiev, P.G. Zverev. Laser Phys. Lett., **2** (8), 396 (2005). DOI: 10.1002/lapl.200510007
- [4] A. Sabella, D.J. Spence, R.P. Mildren. IEEE J. Quantum Electron., **51** (12), 1000108 (2015). DOI: 10.1109/JQE.2015.2503404
- [5] А.З. Грасюк, С.В. Курбасов, Л.Л. Лосев, А.П. Луценко, А.А. Каминский, В.Б. Семенов. Квант. электрон., **25** (2), 170 (1998). [A.Z. Grasyuk, S.V. Kurbasov, L.L. Losev, A.P. Lutsenko, A.A. Kaminskii, V.B. Semenov. Quantum Electron., **28** (2), 162 (1998). DOI: 10.1070/QE1998v028n02ABEH001162].
- [6] A.A. Kaminskii, H.J. Eichler, K. Ueda, N.V. Klassen, B.S. Redkin, L.E. Li, J. Findeisen, D. Jaque, J. Garcia-Sole, J. Fernandez, R. Balda. Appl. Opt., **38** (21), 4533 (1999). DOI: 10.1364/AO.38.004533
- [7] A.A. Kaminskii, K. Ueda, H.J. Eichler, Y. Kuwano, H. Kouta, S.N. Bagaev, Th.H. Chyba, J.C. Barnes, G.M.A. Gad, T. Murai, J. Lu. Opt. Commun., **194**, 201 (2001). DOI: 10.1016/S0030-4018(01)01274-3
- [8] H.-L. Zhou, Q.-H. Zhang, B. Wang, X.-G. Xu, Zh.-P. Wang, X. Sun, F. Zhang, L.-S. Zhang, B.-A. Liu, X.-X. Chai. Chin. Phys. B, **24** (4), 044206 (2016). DOI: 10.1088/1674-1056/24/4/044206
- [9] Т.Т. Басиев, П.Г. Зверев, А.Я. Карасик, В.В. Осико, А.А. Соболев, Д.С. Чунаев. ЖЭТФ, 126 (5), 1073 (2004). [Т.Т. Basiev, P.G. Zverev, A.Ya. Karasik, V.V. Osiko, A.A. Sobol', D.S. Chinaev. J. Exp. Theor. Phys., **99**, 934 (2004). DOI: 10.1134/1.1842874].
- [10] С.Н. Сметанин. Опт. и спектр., **121** (3), 430 (2016). DOI: 10.7868/S0030403416080213 [S.N. Smetanin, Opt. Spectrosc., **121** (3), 395 (2016). DOI: 10.1134/S0030400X1608021X].
- [11] S.N. Smetanin, M. Jelínek, D.P. Tereshchenko, V. Kubeček. Optics Express, **26** (18), 22637 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.022637
- [12] N. Bloembergen. Amer. J. Phys., **35** (11), 989 (1967). DOI: 10.1119/1.1973774
- [13] V.G. Savitski, S. Reilly, A.J. Kemp. IEEE J. Quantum Electron., **49** (2), 218 (2013). DOI: 10.1109/JQE.2012.2237505
- [14] Т.Т. Басиев, М.Н. Басиева, А.В. Гаврилов, М.Н. Ершков, Л.И. Ивлева, В.В. Осико, С.Н. Сметанин, А.В. Федин. Квант. электрон., **40** (8), 710 (2010). [Т.Т. Basiev, M.N. Basieva, A.V. Gavrilov, M.N. Ershkov, L.I. Ivleva, V.V. Osiko, S.N. Smetanin, A.V. Fedin. Quantum Electron., **40** (8), 710 (2010). DOI: 10.1070/QE2010v040n08ABEH014376].
- [15] V.A. Lisinetskii, A.S. Grabtchikov, P.A. Apanasevich, M. Schmitt, B. Kuschner, S. Schlücker, V.A. Orlovich. J. Raman Spectrosc., **37** (1-3), 421 (2006). DOI: 10.1002/jrs.1447
- [16] O. Kitzler, A. McKay, D.J. Spence, R.P. Mildren. Optics Express, **23** (7), 8590 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.008590
- [17] Л.В. Тарасов. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения (Радио и связь, М., 1981), с. 354.

- [18] A. Penzkofer, A. Laubereau, W. Kaiser. *Prog. Quantum Electron.*, **6** (2), 55 (1979).  
DOI: 10.1016/0079-6727(79)90011-9
- [19] А.А. Каминский, С.Н. Багаев, К. Ueda, К. Takaichi, Н.И. Eichler. *Кристаллография*, **47** (4), 711 (2002).  
[A.A. Kaminskii, S.N. Bagaev, K. Ueda, K. Takaichi, H.I. Eichler. *Crystallography Reports*, **47** (4), 653 (2002).  
DOI: 10.1134/1.1496066].
- [20] H. Yu, Zh. Li, A.J. Lee, J. Li, H. Zhang, J. Wang, H.M. Pask, J.A. Piper, M. Jiang. *Opt. Lett.*, **36** (4), 579 (2011).  
DOI: 10.1364/OL.36.000579
- [21] M. Frank, S.N. Smetanin, M. Jelínek, D. Vyhřídál, А.А. Копалкин, V.E. Shukshin, L.I. Ivleva, P.G. Zverev, V. Kubeček. *Opt. Laser Technol.*, **111**, 129 (2019).  
DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.09.045
- [22] С.Н. Сметанин, Д.П. Терещенко, А.Г. Папашвили, Е.В. Шашков, Е.А. Пеганов, К.А. Губина, В.Е. Шукшин, С.А. Солохин, М.Н. Ершков, Е.Э. Дунаева, И.С. Воронина, Л.И. Ивлева. *Квант. электрон.*, **53** (5), 379 (2023). [S.N. Smetanin, D. P. Tereshchenko, A.G. Papashvili, E.V. Shashkov, E.A. Peganov, K.A. Gubina, V.E. Shukshin, S.A. Solokhin, M.N. Ershkov, E.E. Dunaeva, I.S. Voronina, L.I. Ivleva. *Bull. Lebedev Physics Institute*, **50** (suppl. 9), S984 (2023). DOI: 10.3103/S1068335623210108].
- [23] Д.П. Терещенко, С.Н. Сметанин, А.Г. Папашвили, К.А. Губина, Ю.А. Кочуков, С.А. Солохин, М.Н. Ершков, Е.В. Шашков, В.Е. Шукшин, Л.И. Ивлева, Е.Э. Дунаева, И.С. Воронина. *ЖТФ*, **93** (4), 488 (2023).  
DOI: 10.61011/OS.2025.01.59879.7060-24  
[D.P. Tereshchenko, S.N. Smetanin, A.G. Papashvili, K.A. Gubina, Yu.A. Kochukov, S.A. Solokhin, M.N. Ershkov, E.V. Shashkov, V.E. Shukshin, L.I. Ivleva, E.E. Dunaeva, I.S. Voronina. *Technical Physics*, **69** (5), 1427 (2024).  
DOI: 10.1134/S1063784224040431].
- [24] T.T. Basiev, A.A. Sobol, Yu.K. Voronko, P.G. Zverev. *Opt. Mater.*, **15**, 205 (2000).  
DOI: 10.1016/S0925-3467(00)00037-9
- [25] X. Du, Z. Gao, F. Liu, X. Guo, X. Wang, Y. Sun, X. Tao. *CrystEngComm.*, **22**, 7716 (2020).  
DOI: 10.1039/D0CE01129K