

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-105-110>

УДК 373.1



Оригинальная статья

С. А. Гурецкий, Д. В. Карпинский, Е. Л. Труханова*, Н. Н. Новицкий

*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь*

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ
 $KY_{1-x}Yb_x(WO_4)_2$ МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО**

Аннотация. Представлены результаты по выращиванию кристаллов $KY_{1-x}Yb_x(WO_4)_2$ (KYW:Yb) из раствора-расплава модифицированным методом Чохральского. Разработана и изготовлена термоустановка для полуватоматического выращивания, определены методические особенности и температурные условия выращивания кристаллов на ней. Установлены основные параметры выращивания: температурный диапазон 985–900 °С, диапазон скоростей вращения 85–15 об/мин, скорость снижения температуры 0,5–6,0 °С/сут, температура переохлаждения 0,5–2,0 °С. Исследованы условия эффективного тепломассопереноса для выращивания кристаллов высокого качества. Разработана методика наплавления шихты для выращивания кристаллов с постоянным весовым контролем. Изучены температурно-концентрационные поля кристаллизации для осуществления управляемого выращивания кристаллов KYW:Yb модифицированным методом Чохральского. Установлено, что осевой градиент температур над поверхностью раствора-расплава должен быть 5–7 °С/см. Результаты исследования могут быть использованы для разработки технологии выращивания монокристаллов KYW и создания на их основе элементной базы для лазерных систем, излучающих на длине волны около 1,0 мкм.

Ключевые слова: монокристаллы двойных калиевых вольфраматов, модифицированный метод Чохральского, раствор-расплав, управляемый рост, температурно-концентрационное поле кристаллизации, схема термоустановки

Благодарности: работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф23МЭ-015).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Гурецкий Сергей Арсеньевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. E-mail: crystal2@physics.by; Карпинский Дмитрий Владимирович – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией, заместитель генерального директора Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. <https://orcid.org/0000-0002-1046-543X>. E-mail: dmitry.karpinsky@gmail.com; Труханова Екатерина Леонидовна – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. <https://orcid.org/0000-0002-9218-8826>. E-mail: trukhanava@physics.by; Новицкий Николай Николаевич – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. <https://orcid.org/0000-0002-6607-4681>. E-mail: novitski@physics.by

Вклад авторов: Гурецкий Сергей Арсеньевич – обоснование концепции исследования, разработка дизайна экспериментального исследования, планирование исследования, проведение эксперимента; Карпинский Дмитрий Владимирович – проведение эксперимента, интерпретация результатов исследования, критический пересмотр текста рукописи; Труханова Екатерина Леонидовна – проведение инструментальных исследований, написание текста рукописи; Новицкий Николай Николаевич – разработка дизайна экспериментального исследования, интерпретация результатов исследования, анализ и обобщение данных литературы.

Для цитирования: Технологические параметры выращивания монокристаллов $KY_{1-x}Yb_x(WO_4)_2$ модифицированным методом Чохральского / С. А. Гурецкий, Д. В. Карпинский, Е. Л. Труханова, Н. Н. Новицкий // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 2. – С. 105–110. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-105-110>

Поступила в редакцию: 12.12.2024

Доработанный вариант: 13.02.2025

Утверждена к публикации: 12.06.2025

Подписана в печать: 19.06.2025

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original article

Sergei A. Guretskii, Dmitry V. Karpinsky, Katsiaryna L. Trukhanova*, Nickolaj N. Novitskii

*Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus,
19, P. Brovka St., 220072, Minsk, Republic of Belarus***TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF GROWING $KY_{1-x}Yb_x(WO_4)_2$
SINGLE CRYSTALS BY THE MODIFIED CZOCHRALSKI METHOD**

Abstract. The results of growing $KY_{1-x}Yb_x(WO_4)_2$ (KYW:Yb) crystals from a melt solution by the modified Czochralski method are presented. A thermal setup for semi-automatic growth has been developed and manufactured. The methodological features and temperature conditions for growing crystals on this setup have been worked out. The conditions for efficient heat and mass transfer for growing high-quality crystals have been studied. A method for fusing the charge for growing crystals with constant weight control has been determined. The temperature-concentration fields of crystallization were studied for the controlled growth of KYW:Yb crystals using the modified Czochralski method. It has been found that the axial temperature gradient above the melt solution surface should be 5–7 °C/cm. The results of the study can be used to develop a technology for growing KYW single crystals and to create, on their basis, an element base for laser systems emitting at a wavelength of about 1.0 μm.

Keywords: single crystals of double potassium tungstates, modified Czochralski method, solution-melt, controlled growth, temperature-concentration field of crystallization, scheme of a thermal installation

Acknowledgements: this research was funded by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (grant no. F23ME-015).

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Sergei A. Guretskii* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher at Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: crystal2@physics.by; *Dmitry V. Karpinsky* – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Head of the Laboratory, Deputy Director at Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-1046-543X>. E-mail: dmitry.karpinsky@gmail.com; *Katsiaryna L. Trukhanava* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Senior Researcher at Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-9218-8826>. E-mail: trukhanava@physics.by; *Nickolaj N. Novitskii* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Senior Researcher at Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-6607-4681>. E-mail: novitski@physics.by

Contribution of the authors: *Sergei A. Guretskii* – justification of the concept, development of the design of an experimental study, planning of the investigations, conducting an experiment; *Dmitry V. Karpinsky* – conducting of the experiment, interpretation of the research results, critically revising the manuscript text; *Katsiaryna L. Trukhanava* – carrying out instrumental research, writing the text of the manuscript; *Nickolaj N. Novitskii* – development of experimental research design, interpretation of research results, analysis and synthesis of literature data.

For citation: Guretskii S. A., Karpinsky D. V., Trukhanova K. L., Novitskii N. N. Technological parameters of growing $KY_{1-x}Yb_x(WO_4)_2$ single crystals by the modified Czochralski method. *Vestsi Natsyyanal'nei akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 2, pp. 105–110 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-105-110>

Received: 12.12.2024

Modified: 13.02.2025

Approved for publication: 12.06.2025

Signed to the press: 19.06.2025

Введение. Кристаллы калий-иттриевого вольфрамата вызывают большой интерес как активные среды для создания лазеров с диодной накачкой, излучающих в спектральном диапазоне около 1 мкм. Данные кристаллы нашли применение в лазерных системах с пассивной синхронизацией мод для генерации импульсов ультракороткой длительности. Достоинствами этих материалов являются: интенсивная полоса поглощения около 980 нм, позволяющая использовать для накачки промышленно выпускаемые InGaAs лазерные диоды; широкая полоса усиления, что необходимо для создания перестраиваемых лазеров и получения ультракоротких импульсов; высокие сечения стимулированного излучения; а также малый стоксов сдвиг порядка 4–5 %, что снижает уровень тепловых потерь. Кристаллы двойных вольфрамов относятся к одним из самых востребованных и перспективных активных лазерных материалов [1–3]. Они применяются в качестве лазерных элементов в электронной технике. Однако широкое использование этих материалов сдерживается трудностями получения больших монокристаллов высокого оптического качества, которые плавятся инконгруэнтно, что делает невозможным их выращивание традиционными методами из расплава.

Высокотемпературные растворы-расплавы заслуживают более детального рассмотрения, потому что позволяют осуществить процесс выращивания монокристаллов почти всех извест-

ных оксидных соединений в условиях, когда не требуются сложная аппаратура, высокое давление или температура, а следовательно, снижаются производственные затраты. Они также дают возможность глубже познать особое состояние жидких растворов в области высоких температур, выявить параметры этого состояния и тем самым получить возможность практического использования и управления процессом раствор-расплавного выращивания [4].

Следует отметить, что перспективы получения совершенных кристаллов семейства двойных вольфраматов из растворов-расплавов в обязательном порядке должны быть связаны с развитием метода управляемой кристаллизации для данного типа материалов [5, 6]. Лишь в этом случае целесообразно ставить вопрос о программировании и автоматизации всех этапов ростового процесса. Разработка массовой технологии изготовления высокоэффективных активных однородных элементов требует использования модифицированного метода Чохральского.

Таким образом, проблема выращивания высококачественных кристаллов из растворов-расплавов неразрывно связана, с одной стороны, с углубленным изучением процесса кристаллизации, с другой – с разработкой технологических устройств для обеспечения надежной управляемой кристаллизации. Также следует отметить, что из-за высоких требований к структурному составу кристаллов для лазерной техники необходимо классифицировать дефекты структуры, выяснить причины возникновения и разработать методы их устранения на качественно новой основе.

Цель данной работы – определить методические особенности и температурные условия выращивания кристаллов на изготовленной термоустановке для полуавтоматического выращивания кристаллов KYW из раствора-расплава модифицированным методом Чохральского; исследовать условия эффективного тепломассопереноса для выращивания кристаллов высокого качества и изучить температурно-концентрационные поля кристаллизации для осуществления управляемого роста кристаллов.

Методика проведения эксперимента. Для получения массивных монокристаллических булей KYW:Yb использовался модифицированный метод Чохральского, который заключался в вытягивании кристаллов из раствора-расплава при постоянном снижении температуры [1].

На рис. 1 изображена схема термоустановки для выращивания монокристаллов двойных вольфраматов в полуавтоматическом режиме. Тигель с расплавом (5) был вывешен в термоустановке на пружинном амортизаторе, перемещение которого фиксировалось электронным микрометром (8) в зависимости от массы тигля при вытягивании кристалла. Раствор-расплав находился в платиновом тигле диаметром 80 или 100 мм. Высота раствора-расплава изменялась в пределах 50–70 мм. В качестве растворителя использовался бивольфрамат калия ($K_2W_2O_7$).

Выращивание проводилось в температурном диапазоне ниже температуры фазового перехода (900–985 °C) на вытягиваемую ориентированную кристаллическую затравку при медленном охлаждении раствора-расплава. Температура роста сохранялась на уровне 0,5–2,0 °C ниже температуры ликвидуса. Скорости вращения и вытягивания кристаллов поддерживались в высоко стабильном состоянии на всем протяжении выращивания.

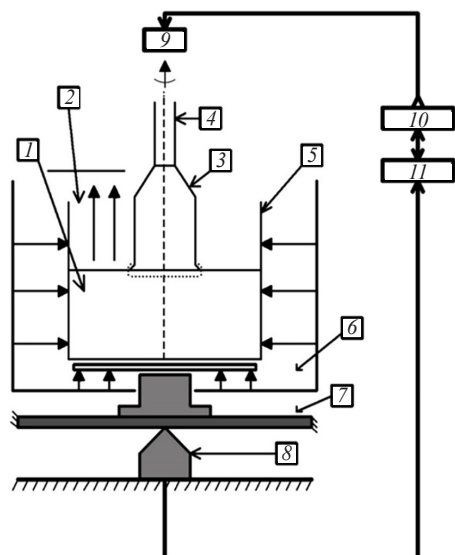


Рис. 1. Схема термоустановки для полуавтоматического выращивания монокристаллов KYW:Yb с использованием модифицированного метода Чохральского: 1 – раствор-расплав, 2 – теплоотвод в контур охлаждения, 3 – кристалл, 4 – вращающийся шток, 5 – тигель, 6 – поток тепла от контура нагрева, 7 – пружинное основание, 8 – микрометр, 9 – шаговый двигатель, 10 – блок управления шаговым двигателем, 11 – мобильная связь

Fig. 1. Scheme of a thermal installation for semi-automatic growth of KYW:Yb single crystals using the modified Czochralski method: 1 – solution-melt, 2 – heat removal into the cooling circuit, 3 – crystal, 4 – rotating rod, 5 – crucible, 6 – heat flow from heating circuit, 7 – spring basis, 8 – micrometer, 9 – stepper motor, 10 – control block of stepper motor, 11 – mobile communication

Предназначенный для кристаллизации раствор-расплав нагревался в тигле до температуры 1010–1030 °С и проводилась его гомогенизация в течение 12 ч. Далее температура опускалась до значения на 3–5 °С выше температуры насыщения (970–985 °С). При обеспечении корректных значений критических параметров полученные кристаллы характеризовались высокой степенью структурного совершенства.

Критическими факторами, определяющими качество кристаллов, являются следующие параметры: величина переохлаждения (должна быть в диапазоне 0,5–2,0 °С); скорость роста кристаллов (оптимальное значение в пределах 1,5–4,0 мм/сут); скорость вращения штока (должна быть в диапазоне от 85 об/мин в начале синтеза до 15 об/мин в конце синтеза). Распределение температур оказывает существенное влияние на массообмен и, как следствие, на оптическое качество выращенных кристаллов. Распределение температур в объеме раствора-расплава и над поверхностью представлено в таблице.

Аксиальный градиент температуры в растворе-расплаве при выращивании монокристаллов KYW
Axial temperature gradient in the solution-melt during the growth of KYW single crystals

Температура на дне тигля Temperature at the bottom of the crucible	– 20 мм – 20 mm	– 10 мм – 10 mm	– 5 мм – 5 mm	Температура на поверхности раствора-расплава Temperature at the surface of the solution-melt	+ 5 мм + 5 mm	+ 10 мм + 10 mm
7,5–8,3 °С	4,6–5,3 °С	3,7–4,2 °С	3,2–3,6 °С	0 °С	4,0–4,6 °С	4,8–5,5 °С

Рост монокристаллов KYW:Yb модифицированным методом Чохральского представляет собой сложный физико-химический процесс, в котором важную, зачастую определяющую, роль играет тепло- и массоперенос. При выращивании монокристаллов должен строго соблюдаться заданный температурный режим.

Основопологающим условием выращивания из раствора-расплава модифицированным методом Чохральского является создание градиента концентрации, обеспечивающего диффузию растворенного вещества в направлении поверхности роста на внесенном в раствор-расплав затравочном кристалле. Градиент концентрации создается с помощью температурного перепада между зоной перегретого раствора-расплава и зоной кристаллизации. Указанные условия в полной мере обеспечивают необходимый процесс питания кристалла на различных стадиях роста.

Для создания необходимых температурных градиентов термоустановка для выращивания кристаллов модифицированным методом Чохральского (см. рис. 1) была оснащена двухзонной шахтной печью-кристаллизатором с каркасными нагревателями. Во время проведения эксперимента при помощи двухзонных нагревателей изменялся вертикальный температурный градиент для повышения эффективности механического перемешивания и предотвращения «запараживания» придонной области раствора-расплава. Температурный осевой градиент над поверхностью раствора-расплава формировался за счет изменения толщины и профиля верхней части кристаллизатора. Затравочный элемент в форме цилиндра диаметром 8 мм и длиной 8–12 мм ориентировался с точностью $\leq 5'$ вдоль оси [010].

Высота кристалла определялась высотой вытяжки и размером части кристалла, выросшего под поверхностью раствора-расплава. За это время температура раствора-расплава снизилась на 80–90 °С. После достижения нижней границы температурного уровня диапазона выращивания кристалл KYW:Yb отрывали от поверхности раствора-расплава, вытягивание и вращение при этом было остановлено. Затем проводилось охлаждение термоустановки до комнатной температуры со скоростью 25–30 °С/ч.

Определение температурно-концентрационных характеристик при выращивании монокристаллов $KY_{1-x}Yb_x(WO_4)_2$. Для осуществления управляемого выращивания легированных редкоземельным элементом кристаллов KYW модифицированным методом Чохральского необходимо определение температурно-концентрационных полей кристаллизации. Решение поставленной задачи важно для определения режимов кристаллизации, фиксирующих состояние раствора-расплава на особо ответственных стадиях выращивания: начальной и последующей, определяющей качественный рост призматической части кристалла.

Используемый нами вариант проведения поисковых работ по определению температурно-концентрационных характеристик раствора-расплава для выращивания кристаллов KYW модифицированным методом Чохральского из $K_2W_2O_7$ состоял из нескольких этапов:

- 1) определение температурного диапазона выращивания;
- 2) установление температуры насыщения в зависимости от концентрации кристаллообразующих компонент;
- 3) определение массы выбираемых кристаллов при снижении температуры на 1 °С в пересчете на условную единицу раствора-расплава;
- 4) оптимизация распределения температур в объеме раствора-расплава.

С учетом специфики выращивания из раствора в расплаве, когда не существует способов прямого контроля за степенью растворения исходных веществ, вышеперечисленные пункты исследования становятся крайне необходимы, особенно при выращивании кристаллов на затравках модифицированным методом Чохральского.

Все поисковые работы велись в условиях, аналогичных условиям длительного синтеза, то есть при интенсивном перемешивании раствора-расплава платиновым кристаллоносцем с пробными кристаллами. Некоторое усложнение методики окупается высокой точностью определения температурно-концентрационных характеристик раствора-расплава.

Эксперимент сводился к следующему: после предварительной гомогенизации, начиная с температуры на 20–30 °С выше насыщения, охладили раствор со скоростью 5–10 °С/ч до окончательного нахождения температуры насыщения, которую определили, периодически внося пробные затравки в раствор с последующим визуальным контролем их состояния. Известно, что если среда ненасыщенная – затравка растворяется, если пересыщена – ограняется. Использование пробных затравок позволяет оперативно находить состояние равновесия системы для заданного состава, причем при переходе от одной концентрации раствора к другой не требуется остановки эксперимента, поскольку при наличии открытой поверхности тигля создается возможность без выключения печи производить изменение в составе раствора путем добавления недостающих порций растворяемого вещества или растворителя.

После определения оптимального состава раствора-расплава в зависимости от требуемых размеров массы кристалла рассчитывались масса раствора-расплава и температурный диапазон выращивания. Далее на основании полученных данных рассчитывался режим снижения температуры на всем протяжении эксперимента. При этом соблюдалось необходимое условие: скорость роста каждой грани не должна превышать оптимальную и не изменяется на всем протяжении выращивания.

Отметим, что скорость роста зависит от температуры снижения, находящейся в пределах от 0,5 °С/сут в начале синтеза до 6,0 °С/сут в конце синтеза. Невыполнение этого условия приводит к росту в виде параллельных сростков, двойникованию, блочному росту либо к появлению внутренних механических напряжений, приводящих к растрескиванию кристалла при остывании до комнатной температуры и при механической обработке.

Следует считать оптимальным увеличение скорости вращения с 15 по 85 об/мин в процессе выращивания кристалла, что оказывает положительное влияние на качество выращиваемых кристаллов. При увеличении скорости вращения (более 90 об/мин) не обеспечивается надежность механического крепления кристаллодержателя, что приводит к колебаниям положения фронта кристаллизации и, как следствие, к искажению формы растущего кристалла и увеличению суммарного угла разориентировки блоков. При уменьшении скорости вращения менее 15 об/мин из-за недостаточного перемешивания раствор-расплава в кристаллах образуются субмикронные включения растворителя.

Представляется целесообразным выращивать кристаллы по направлению (010) с минимальным коэффициентом теплопроводности. При этом большая теплопроводность кристалла в радиальном направлении обеспечивает минимальные радиальные градиенты температуры в кристалле, что способствует созданию плоского фронта кристаллизации в процессе роста кристаллов. Низкий коэффициент линейного расширения по оси кристалла в данном случае позволяет обеспечить минимальные остаточные напряжения в выращиваемом кристалле.

Проведенные исследования показали необходимость строгого согласования скорости роста, скорости охлаждения раствор-расплава и осевого градиента температуры над поверхностью

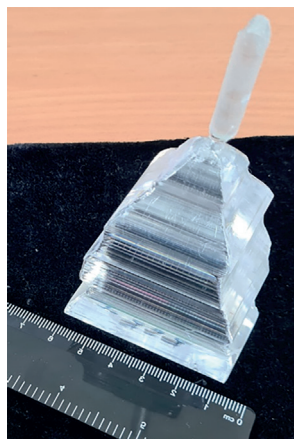


Рис. 2. Кристалл $KY_{1-x}Yb_x(WO_4)_2$, выращенный модифицированным методом Чохральского
Fig. 2. $KY_{1-x}Yb_x(WO_4)_2$ crystal grown by the modified Czochralski method

раствор-расплава. В результате определен режим выращивания, обеспечивающий получение кристаллов массой до 0,5 кг с воспроизводимыми характеристиками (рис. 2).

Заключение. Разработана и изготовлена термическая камера для лабораторного макета ростовой установки. Проведены испытания температурных параметров установки для выращивания кристаллов. Разработана методика наплавления шихты для выращивания кристаллов с постоянным весовым контролем. Исследованы температурно-концентрационные характеристики кристаллизации. Установлено, что осевой градиент температур над поверхностью раствора-расплава должен быть 5–7 °С/см. Скорость роста вдоль оси [В] составляет 3,5 мм в сутки, скорость вращения изменяется от 85 об/мин в начале синтеза до 15 об/мин в конце синтеза. Процесс выращивания осуществляется в температурном диапазоне 915–985 °С, при этом исходная концентрация кристаллообразующих оксидов равна 40 мас.%. Длительность выращивания составляет 20–25 сут.

Результаты исследования могут быть использованы для получения кристаллов калий-редкоземельных вольфраматов, легированных ионами иттербия, которые найдут применение в лазерной оптике как лазерные системы, работающие по принципу тонкого диска, где необходимо обеспечить эффективное поглощение излучения накачки на малой толщине активного элемента (около 100 мкм). Такие системы позволяют получать выходные мощности излучения в десятки и сотни ватт и поэтому востребованы при обработке материалов.

Список использованных источников

1. Generation of 150-fs pulses from a diode-pumped Yb:KYW nonlinear regenerative amplifier / J. Pouysegur, M. Delaigue, C. Hönninger [et al.] // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22, Iss. 8. – P. 9414–9419. <https://doi.org/10.1364/OE.22.009414>
2. Efficient high-power femtosecond Yb³⁺:KY(WO₄)₂ laser / A. A. Kovalyov, V. V. Preobrazhenskii, M. A. Putyato [et al.] // *Laser Physics Letters*. – 2015. – Vol. 12, № 7. – P. 075801. <https://doi.org/10.1088/1612-2011/12/7/075801>
3. Growth, optical characterization, and laser operation of a stoichiometric crystal KYb(WO₄)₂ / M. Pujol, M. Bursukova, F. Güell [et al.] // *Physical Review B*. – 2002. – Vol. 65, Iss. 16. – Art. ID 165121. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.165121>
4. Features of the KGd(WO₄)₂:Nd³⁺ single-crystal growth control / S. A. Guretskii, A. M. Luginets, I. M. Kolesova [et al.] // *Journal of Crystal Growth*. – 2009. – Vol. 311, Iss. 6. – P. 1529–1532. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2009.01.085>
5. Tm³⁺:KY(WO₄)₂ single crystals: Controlled growth and spectroscopic assessment / S. A. Guretskii, E. L. Trukhanova, A. V. Kravtsov [et al.] // *Optical Materials*. – 2021. – Vol. 120. – Art. ID 111451. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111451>
6. Crystal growth, optical and spectroscopic characterisation of monoclinic KY(WO₄)₂ co-doped with Er³⁺ and Yb³⁺ / X. Mateos, R. Solé, Jna. Gavalda [et al.] // *Optical Materials*. – 2006. – Vol. 28, Iss. 4. – P. 423–431. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2004.12.024>

References

1. Pouysegur J., Delaigue M., Hönninger C., Georges P., Druon F., Mottay E. Generation of 150-fs pulses from a diode-pumped Yb:KYW nonlinear regenerative amplifier. *Optics Express*, 2014, vol. 22, iss. 8, pp. 9414–9419. <https://doi.org/10.1364/OE.22.009414>
2. Kovalyov A. A., Preobrazhenskii V. V., Putyato M. A., Rubtsova N. N., Semyagin B. R., Kisel V. E., Rudenkov A. S. [et al.]. Efficient high-power femtosecond Yb³⁺:KY(WO₄)₂ laser. *Laser Physics Letters*, 2015, vol. 12, no. 7, pp. 075801. <https://doi.org/10.1088/1612-2011/12/7/075801>
3. Pujol M. C., Bursukova M. A., Güell F., Mateos X., Solé R., Gavalda J., Aguiló M. [et al.]. Growth, optical characterization, and laser operation of a stoichiometric crystal KYb(WO₄)₂. *Physical Review B*, 2002, vol. 65, iss. 16, art. ID 165121. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.165121>
4. Guretskii S. A., Luginets A. M., Kolesova I. M., Kravtsov A. V., Malyutin V. B., Ermolaev A. A., Karpenko S. A. Features of the KGd(WO₄)₂:Nd³⁺ single-crystal growth control. *Journal of Crystal Growth*, 2009, vol. 311, iss. 6, pp. 1529–1532. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2009.01.085>
5. Guretskii S. A., Trukhanova E. L., Kravtsov A. V., Gusakova N. V., Gorbachenya K. N., Kisel V. E., Yasukevich A. S. [et al.]. Tm³⁺:KY(WO₄)₂ single crystals: Controlled growth and spectroscopic assessment. *Optical Materials*, 2021, vol. 120, art. ID 111451. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111451>
6. Mateos X., Solé R., Gavalda Jna., Aguiló M., Massons J., Díaz F. Crystal growth, optical and spectroscopic characterization of monoclinic KY(WO₄)₂ co-doped with Er³⁺ and Yb³⁺. *Optical Materials*, 2006, vol. 28, iss. 4, pp. 423–431. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2004.12.024>