

УДК 621.373.826

Лазеры на кристаллах $Tm:KLu(WO_4)_2$ и $Tm:KY(WO_4)_2$ в микрочип-конфигурации для дистанционного зондирования атмосферы

Дернович О.П., Курильчик С.В., Гусакова Н.В., Кулешов Н.В.

Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

Поступила 17.05.2016

Принята к печати 03.08.2016

Твердотельные лазеры с диодной накачкой находят все более широкое практическое применение во многих областях человеческой деятельности благодаря их высокой эффективности, компактности и длительному сроку службы. Для использования в качестве излучателей при дистанционном зондировании атмосферы требуются лазеры, излучающие в спектральной области около 2 мкм. Перспективными активными средами, излучающими в этой области, являются материалы, активированные трехвалентными ионами тулия. Среди легируемых ионами тулия материалов по своим характеристикам выделяются кристаллы двойных калий-редкоземельных вольфраматов, которые характеризуются большими величинами поперечных сечений поглощения и стимулированного испускания, незначительным концентрационным тушением люминесценции, отработанными технологиями роста образцов высокого качества. Целью настоящей работы являлось сравнение генерационных характеристик лазеров на основе кристаллов калий-лютециевого и калий-иттриевого вольфраматов, активированных ионами тулия, в непрерывном режиме. Эксперименты проводились при диодной накачке активного элемента в конфигурации микрочип-резонатора. Максимальная мощность лазерного излучения на длине волны 1947 нм получена с кристаллом $Tm:KY(WO_4)_2$ и составила 1010 мВт при дифференциальной эффективности генерации 51 %. При использовании кристалла $Tm:KLu(WO_4)_2$ достигнута выходная мощность лазера 910 мВт на длине волны 1968 нм при дифференциальной эффективности 38 %. При установке внутри резонатора призмы в лазере на кристалле $Tm:KY(WO_4)_2$ реализована перестройка длины волны генерации в спектральном диапазоне шириной свыше 160 нм.

Ключевые слова: непрерывный лазер, микрочип-резонатор, ионы тулия, калий-редкоземельные вольфраматы.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-122-128

Адрес для переписки:

Дернович О.П.
Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: pochta.dop@gmail.com

Address for correspondence:

Dernovich O.P.
Research Center for Optical Materials and Technologies
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: pochta.dop@gmail.com

Для цитирования:

Дернович О.П., Курильчик С.В., Гусакова Н.В., Кулешов Н.В.
Лазеры на кристаллах $Tm:KLu(WO_4)_2$ и $Tm:KY(WO_4)_2$ в микрочип-конфигурации для дистанционного зондирования атмосферы.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 2. – С. 122–128.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-122-128

For citation:

Dernovich O.P., Kurilchik S.V., Gusakova N.V., Kuleshov N.V.
[Continuous-wave microchip laser generation of $Tm:KLu(WO_4)_2$ and $Tm:KY(WO_4)_2$ crystals].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 2, pp. 122–128 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-122-128

Continuous-wave microchip laser generation of Tm:KLu(WO₄)₂ and Tm:KY(WO₄)₂ crystals

Dernovich O.P., Kurilchik S.V., Gusakova N.V., Kuleshov N.V.

Research Center for Optical Materials and Technologies
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus

Received 17.05.2015

Accepted for publication 03.08.2016

Abstract. Diode-pumped solid-state lasers are attractive for a variety of practical applications in many fields of human activity due to their high efficiency, compactness, and long durability. For applications in remote sensing lasers emitting in the spectral range of about 2 microns are required. Materials doped with trivalent thulium ions are promising active media emitting in this spectral range. Potassium rare-earth tungstates are attractive materials among Tm-doped crystals due to their suitable characteristics, such as high values of absorption and stimulated emission cross sections, insignificant concentration quenching of luminescence, well-proven technology of the high quality crystals growth. The purpose of this paper was to compare lasing properties of lasers based on potassium lutetium and potassium yttrium tungstate crystals doped with thulium ions in continuous-wave regime. Experiments were carried out with a diode pumping in microchip cavity configuration. The maximum power of laser radiation at 1947 nm of 1010 mW was obtained with Tm:KY(WO₄)₂ crystal with the slope efficiency with respect to the absorbed pump power of 51 %. When Tm:KLu(WO₄)₂ crystal was utilized an output power of 910 mW at 1968 nm wavelength with the slope efficiency of 38 % was obtained. With Tm:KLu(WO₄)₂ laser a tuning range over 160 nm range was realized with a prism inserted into the laser cavity.

Keywords: continuous-wave laser, microchip cavity, thulium, potassium rare-earth tungstates.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-122-128

Адрес для переписки:

Дернович О.П.
Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: pochta.dop@gmail.com

Address for correspondence:

Dernovich O.P.
Research Center for Optical Materials and Technologies
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: pochta.dop@gmail.com

Для цитирования:

Дернович О.П., Курильчик С.В., Гусакова Н.В., Кулешов Н.В.
Лазеры на кристаллах Tm:KLu(WO₄)₂ и Tm:KY(WO₄)₂ в микрочип-конфигурации для дистанционного зондирования атмосферы.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 2. – С. 122–128.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-122-128

For citation:

Dernovich O.P., Kurilchik S.V., Gusakova N.V., Kuleshov N.V.
[Continuous-wave microchip laser generation of Tm:KLu(WO₄)₂ and Tm:KY(WO₄)₂ crystals].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 2, pp. 122–128 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-122-128

Введение

В последнее время динамично развиваются и исследуются лазеры, в которых в качестве активного элемента используются кристаллические материалы, легированные трехвалентными ионами тулия [1–3]. Такие материалы испускают излучение на длинах волн около 2 мкм, которое востребовано для практических применений в прецизионной обработке материалов [4], биомедицине [5], дальнометрии [6] и др. Это обусловлено его относительной безопасностью для глаз [4], малым поглощением в атмосфере [7] и попаданием в полосы поглощения ряда атмосферных газов, таких как H_2O , CO_2 , N_2O , NH_3 [8]. Одним из важных направлений использования такого излучения является дистанционное зондирование атмосферы [6]. Лидары на основе тулиевых лазеров позволяют производить дистанционные измерения скорости и направления воздушных потоков. Дифференциальные лидары, использующие два лазерных пучка с различными длинами волн, одна из которых близка к частоте молекулярного перехода исследуемого газа, а вторая находится вне полосы поглощения [9], характеризуются высокой чувствительностью при измерении концентрации газов в атмосфере [10].

Лазерные материалы, активированные ионами тулия, обладают развитой структурой энергетических уровней, упрощенная схема которой представлена на рисунке 1, и характеризуются наличием сильной полосы поглощения в спектральной области около 800 нм, которой соответствует энергетический переход ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_4$, что позволяет использовать в качестве источника накачки таких сред коммерчески доступные мощные лазерные диоды на основе соединения AlGaAs . Кроме того, благодаря эффективному процессу кросс-релаксации ${}^3\text{H}_6, {}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4, {}^3\text{F}_4$ квантовая эффективность накачки, представляющая собой отношение изменения числа частиц на верхнем лазерном уровне к числу поглощенных квантов накачки, близка к двум [11].

По совокупности спектроскопических и термомеханических свойств среди легируемых ионами тулия материалов выделяются кристаллы двойных калий-редкоземельных вольфраматов, характеризующиеся высокими величинами сечений поглощения и испускания [12, 13]. Кроме того, данные кристаллы имеют незначительное концентрационное тушение люминесценции. Это позволяет вводить активирующие ионы с

высокой концентрацией, что привлекательно для использования микрочип-конфигурации резонатора. Достаточно широкие полосы поглощения на длине волны излучения накачки не требуют точной стабилизации длины волны лазерных диодов. Широкие полосы испускания позволяют осуществлять плавную перестройку длины волны генерации в широком спектральном диапазоне и получать ультракороткие лазерные импульсы в режиме синхронизации мод [14].

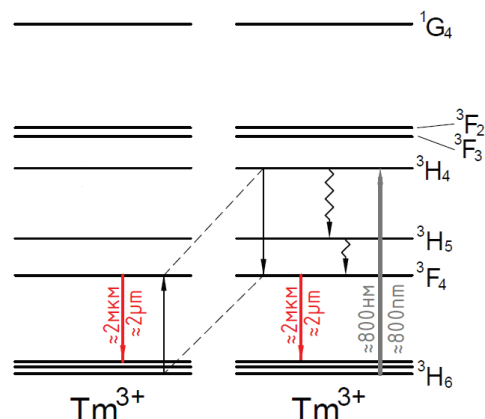


Рисунок 1 – Схема энергетических уровней иона Tm^{3+}

Figure 1 – Energy level scheme of Tm^{3+} ion

Интенсивные исследования генерационных характеристик кристаллов калий-редкоземельных вольфраматов с ионами тулия в последнее время активно проводятся одновременно в нескольких научных группах из Беларуси [15], Испании [3] и Швейцарии [16]. Целью настоящей работы являлось сравнение генерационных характеристик кристаллов $\text{Tm:KLu}(\text{WO}_4)_2$ (Tm:KLuW) и $\text{Tm:KY}(\text{WO}_4)_2$ (Tm:KYW) в непрерывном режиме в конфигурации микрочип-резонатора.

Характеристика образцов и описание эксперимента

Образцы для исследований выращены в Институте неорганической химии Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск, Россия) из раствор-расплава в платиновом тигле с использованием состава $\text{K}_2\text{W}_2\text{O}_7$ в качестве растворителя. Рост кристаллов производился в условиях низкотемпературного градиента. По шихте концентрация ионов тулия в обоих кристаллах Tm:KLuW и Tm:KYW составляла 5 ат. %. Тем не менее объемная концентрация ионов тулия в ука-

занных кристаллах, измеренная методом рентгеноспектрального микроанализа на основе электронного микроскопа *Vega II LMU* с микроанализатором *Inca Energy 35*, отличалась от расчетной и составила $4,04 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и $2,95 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ соответственно.

В качестве источника накачки активного элемента в лазерных экспериментах использовался непрерывный лазерный диод *Focuslight FL-FCSB04-30-808* с волоконным выходом, излучающий при температуре 16°C на длине волны 802 нм . Выходная мощность диода была ограничена используемым блоком питания на уровне 3 Вт . Диаметр волокна составлял 200 мкм , числовая апертура $NA = 0,22$, параметр качества излучения $M^2 = 86$. Фокусирующая система, состоящая из двух сферических линз с фокусными расстояниями $f_1 = 80 \text{ мм}$ и $f_2 = 50 \text{ мм}$, обеспечивала диаметр перетяжки излучения накачки 125 мкм .

Резонатор лазера, схема которого представлена на рисунке 2, образован плоским входным зеркалом, обеспечивающим высокий коэффициент отражения ($> 99,5\%$) излучения на длине волны генерации ($\sim 1950 \text{ нм}$) и максимальное пропускание излучения на длине волны накачки ($\sim 800 \text{ нм}$), и плоским выходным зеркалом с коэффициентом пропускания на длине волны генерации $1,5\%$.

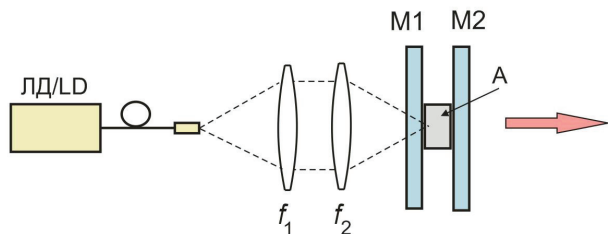


Рисунок 2 – Схема микрочип-лазера: ЛД – лазерный диод; M1 – входное зеркало; M2 – выходное зеркало; A – активный элемент

Figure 2 – Setup of the microchip laser: LD – laser diod; M1 – input mirror; M2 – output mirror; A – active element

Кристаллы Tm:KLuW и Tm:KYW , используемые в качестве активных сред, были вырезаны таким образом, чтобы излучение распространялось вдоль направления оптической индикатрисы N_g , т.к. данная ориентация характеризуется положительной термической линзой, позволяющей реализовать генерацию в микрочип-резонаторе [15], и обеспечивалась возможность работы с N_m и N_p поляризациями излучения, для

которых характерны высокие сечения поглощения и стимулированного испускания. Толщина активных элементов составляла $2,5 \text{ мм}$. На торцы наносились просветляющие покрытия для длин волн накачки и генерации. В процессе экспериментов кристаллы устанавливались на алюминиевом держателе, температура которого поддерживалась на уровне 16°C для эффективного отвода тепла.

Для оценки возможности использования кристаллов двойных вольфрамов с ионами тулия для перестройки длины волны генерации был собран трехзеркальный резонатор (рисунок 3), который состоял из плоских входного и выходного зеркал и вогнутого зеркала с радиусом кривизны 100 мм . Пропускание выходного зеркала на длине волны генерации составляло $1,8\%$. В качестве диспергирующего элемента в резонатор помещалась призма из стекла BK7 . Перестройка осуществлялась путем поворота выходного зеркала. Эксперимент проводился с кристаллом Tm:KLuW .

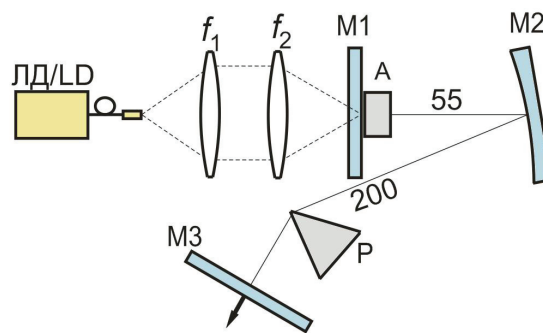


Рисунок 3 – Схема лазера с перестройкой длины волны генерации: ЛД – лазерный диод; A – активный элемент; M1 – входное зеркало; M2 – поворотное зеркало; M3 – выходное зеркало; P – дисперсионная призма

Figure 3 – Setup of laser with wavelength tuning: LD – laser diod; A – active element; M1 – input mirror; M2 – folding mirror; M3 – output mirror; P – dispersing prism

Результаты

Полученные экспериментально зависимости выходной мощности лазера от поглощенной мощности накачки при использовании обоих кристаллов в качестве активного элемента приведены на рисунке 4. Максимальная мощность лазерного излучения была получена на кристалле Tm:KYW и составила 1010 мВт при дифференциальной эффективности генерации 51% . Порог лазерной генерации наблюдался на уровне

670 мВт поглощенной мощности накачки. Для кристалла Tm:KLuW выходная мощность достигала 910 мВт при дифференциальной эффективности 38 % при пороге генерации по поглощенной мощности на уровне 450 мВт.

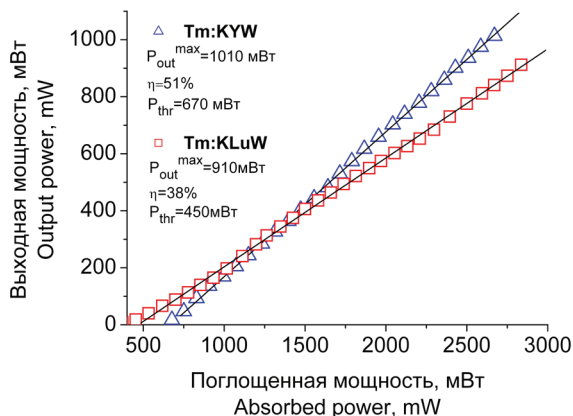


Рисунок 4 – Выходные характеристики лазера для кристаллов Tm:KLuW и Tm:KYW

Figure 4 – Input-output characteristics of lasers on Tm:KLuW and Tm:KYW crystals

Спектры генерации лазеров при максимальном уровне накачки представлены на рисунке 5. Центральная длина волны излучения для лазера на кристалле Tm:KLuW была около 1968 нм, а на кристалле Tm:KYW – 1947 нм. В обоих случаях излучение было линейно поляризовано в плоскости, параллельной оси оптической индикатрисы N_m кристаллов.

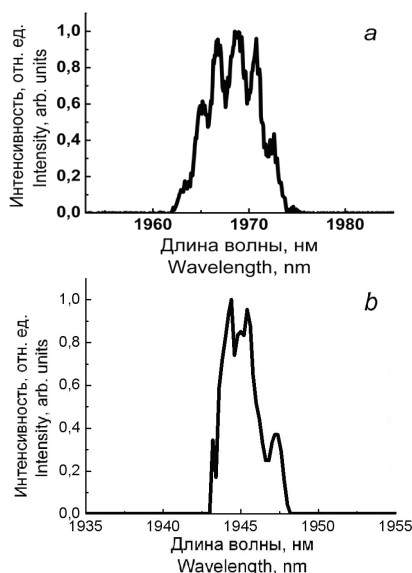


Рисунок 5 – Спектры генерируемого излучения лазера на основе кристаллов Tm:KLuW (a) и Tm:KYW (b)

Figure 5 – Output spectrum of the Tm:KLuW (a) and Tm:KYW (b) laser

Пространственные характеристики излучения приведены на рисунке 6. Распределение интенсивности излучения в поперечном сечении пучка для двух исследуемых кристаллов хорошо аппроксимировалось функцией Гаусса. В случае лазера на кристалле Tm:KLuW параметр качества лазерного пучка (M^2 фактор) составил 1,6 (рисунок 6a). Параметр качества лазерного пучка на кристалле Tm:KYW равен 1,0 (рисунок 6b), что соответствует одномодовому излучению.

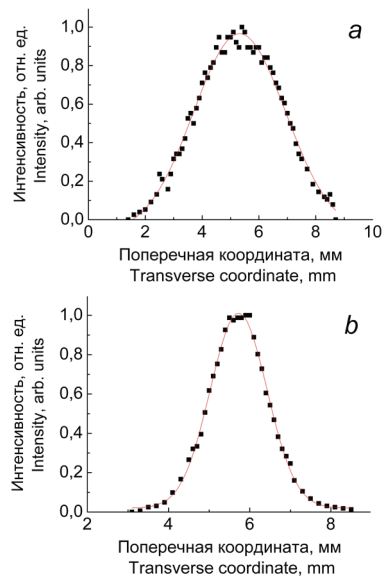


Рисунок 6 – Поперечный профиль излучения лазеров на кристаллах Tm:KLuW (a) и Tm:KYW (b): точки – экспериментальные данные; линия – аппроксимация функцией Гаусса

Figure 6 – Spatial profile of Tm:KLuW (a) and Tm:KYW (b) laser beam: points – experimental data; line – approximation by Gaussian function

В трехзеркальном резонаторе, схема которого представлена на рисунке 3, на кристалле Tm:KLuW получена перестройка длины волны в спектральном диапазоне 1826–1992 нм. Перестроечная кривая показана на рисунке 7.



Рисунок 7 – Перестроечная кривая лазера на кристалле Tm:KLuW

Figure 7 – Tuning curve of the Tm:KLuW laser

Возможность непрерывной перестройки длины волны генерации лазера в широком спектральном диапазоне является весьма важной характеристикой для ряда практических применений, в том числе для использования в дифференциальных лидарах для газового анализа [10].

Заключение

В работе экспериментально реализованы лазеры на кристаллах Tm:KLuW и Tm:KYW в непрерывном режиме генерации в микрочип-конфигурации резонатора. Максимальные выходные характеристики получены на кристалле Tm:KYW. Достигнута выходная мощность 1010 мВт при дифференциальной эффективности 51 % на длине волны 1947 нм. При этом на кристалле Tm:KLuW в тех же условиях эксперимента максимальная выходная мощность лазера составила 910 мВт при дифференциальной эффективности 38 % на длине волны 1968 нм. При помощи призмы, установленной внутри резонатора, на кристалле Tm:KLuW реализована перестройка длины волны генерации в спектральном диапазоне 1826–1992 нм. Таким образом, в работе показана перспективность использования кристаллов калий-иттриевого и калий-лютециевого вольфраматов, активированных ионами Tm^{3+} , для создания лазеров, применяемых в лидарных комплексах.

Список использованных источников

1. Spectroscopy and diode pumped laser emission in $(Lu_xGd_{1-x})_3Ga_5O_{12}:Tm^{3+}$ single crystal / S. Veronesi [et al.] // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2015. – Vol. 48, no. 38. – P. 385302.
2. On the efficiency of Tm-doped 2- μ m lasers / K. van Daltsen [et al.] // *Solid State Lasers XXIV: Technology and Devices, Proc. of SPIE.* – 2015. – Vol. 9342. – P. 93421U-1–93421U-6.
3. Diode-pumped microchip Tm:KLu(WO₄)₂ laser with more than 3 W of output power / J.M. Serres [et al.] // *Optics Letters* – 2014. – Vol. 39, no. 14. – P. 4247–4250.
4. 2 μ m laser sources and their possible applications / K. Scholle [et al.] // *Frontiers in guided wave optics and optoelectronics* / edited by B. Pal. – Croatia : Intech, 2010. – P. 471–500.
5. Laser Coagulation of Tissues by 1.6 μ m and 2 μ m Laser Radiation / L. Batay [et al.] // *Proc. of SPIE.* – 2007. – Vol. 6734. – P. 67341M-1–67341M-5.
6. Tm: fiber lasers for remote sensing / N.P. Barnes [et al.] // *Optical Materials.* – 2009. – Vol. 31. – P. 1061 – 1064.

7. Twenty years of Tm:Ho:YLF and LuLiF laser development for global wind and carbon dioxide active remote sensing / U.N. Singh [et al.] // *Optical Materials Express.* – 2015. – Vol. 5, no. 4. – P. 827–837.

8. Sorokina, I.T. Crystalline Mid-Infrared Lasers / I.T. Sorokina // *Solid-State Mid-Infrared Laser Sources* / edited by I.T. Sorokina, K.L. Vodopyanov. – Berlin-Heidelberg : Springer-Verlag, 2003. – P. 255–351.

9. Walsh, B.M. Review of Tm and Ho Materials: Spectroscopy and Lasers / B.M. Walsh // *Laser Physics.* – 2009. – Vol. 19, no. 4. – P. 855–866.

10. Coherent Laser Radar at 2 μ m Using Solid-State Lasers / S.W. Henderson [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing.* – 1993. – Vol. 31, no. 1. – P. 4–15.

11. Miller, A. Laser sources and Applications / A. Miller, D.M. Finlayson. – CRC Press, 1997. – 492 p.

12. 0.5W efficient continuous wave Tm:KY(WO₄)₂ laser / V.E. Kisel [et al.] // *Conference on Laser and Electro-Optics CLEO/QELS: Technical Digest, San Francisco, May 16, 2004 / Optical Society of America.* – San Francisco, 2004. – CThT61.

13. Crystal growth, crystal field evaluation and spectroscopy for thulium in monoclinic KGd(WO₄)₂ and KLu(WO₄)₂ laser crystals / M.C. Pujol [et al.] // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 2008. – Vol. 20, no. 34. – P. 345219.

14. Femtosecond Pulses near 2 μ m from a Tm:KLuW Laser Mode-Locked by a Single-Walled Carbon Nanotube Saturable Absorber / A. Schmidt [et al.] // *Appl. Phys. Express.* – 2012. – Vol. 5, no. 9. – P. 092704.

15. Thermal lensing and microchip laser performance of Ng-cut Tm³⁺:KY(WO₄)₂ crystal / M.S. Gaponenko [et al.] // *Appl. Phys. B.* – 2012. – Vol. 108. – P. 603–607.

16. Gaponenko, M. Microchip Tm:KYW Laser with 2.5 W of Output Power / M. Gaponenko, N. Kuleshov, T. Südmeyer // *CLEO: Science and Innovations: Technical Digest, San Jose, May 10–15, 2015 / Optical Society of America.* – San Jose, 2015. – SF1F.6.

References

1. Veronesi S., Jia Z., Parisi D., Damiano E., Mu W., Yin Y., Tonelli M., Tao X. Spectroscopy and diode pumped laser emission in $(Lu_xGd_{1-x})_3Ga_5O_{12}:Tm^{3+}$ single crystal. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2015, vol. 48, no. 38, pp. 385302.
2. Daltsen K., Aravazhi S., Grivas C., García-Blanco S.M., Pollnau M. On the efficiency of Tm-doped 2- μ m lasers. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9342, pp. 93421U-1–93421U-6.
3. Serres J.M., Mateos X., Loiko P., Yumashev K., Kuleshov N., Petrov V., Griebner U., Aguiló M., Díaz F. Diode-pumped microchip Tm:KLu(WO₄)₂ laser with more than 3 W of output power. *Opt. Lett.*, 2014, vol. 39, no. 14, pp. 4247–4250.

4. Scholle K., Lamrini S., Koopmann P., Fuhrberg P. 2 μm Laser Sources and Their Possible Applications. *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics*. B. Pal, ed., Intech, Croatia, 2010, pp. 471–500.
5. Batay, L.E., Busko D.N., Vodchits A.I., Voitkov S.V., Orlovich V.A., Ulastchik V.S., Gorbunova N.B., Kulchitskii V.A. Laser Coagulation of Tissues by 1.6 μm and 2 μm Laser Radiation. *Proc. SPIE*, 2007, vol. 6734, pp. 67341M-1–67341M-5.
6. Barnes N.P., Walsh B.M., Reichle D.J., DeYoung R.J. Tm: fiber lasers for remote sensing. *Opt. Mater.*, 2009, vol. 31, pp. 1061–1064.
7. Singh U.N., Walsh B.M., Yu J., Petros M., Kavya M., Refaat T.F., Barnes N.P. Twenty years of Tm:Ho:YLF and LuLiF laser development for global wind and carbon dioxide active remote sensing. *Opt. Mater. Exp.*, 2015, vol. 5, no. 4, pp. 827–837.
8. Sorokina, I.T., Vodopyanov K.L. eds. Crystal-line Mid-Infrared Lasers. *Solid-State Mid-Infrared Laser Sources*, vol. 89, Springer Topics in Applied Physics, Springer-Verlag, Berlin, 2003, pp. 255–351.
9. Walsh B.M. Review of Tm and Ho Materials: Spectroscopy and Lasers. *Laser Phys.*, 2009, vol. 19, no. 4, pp. 855–866.
10. Henderson S.M., Suni P.J.M., Hale C.P., Hanon S.M., Magee J.R., Bruns D.L., Yuen E.H. Coherent Laser Radar at 2 μm Using Solid-State Lasers. *IEEE Transactions on Geo-science and remote sensing*, 1993, vol. 31, no. 1. pp. 4–15.
11. Miller, A. and Finlayson D.M. eds. Laser Sources and Applications, vol. 47, Scottish Graduate Series, CRC Press, 1997, p. 492.
12. Kisel V.E., Troshin A.E., Shcherbitsky, V.G., Kuleshov N.V. and Pavlyuk A.A. 0.5W efficient continuous wave Tm:KY(WO₄)₂ laser. *CLEO: 2004*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2004), paper CThT61.
13. Pujol M.C., Cascales C., Aguiló M., Díaz F. Crystal growth, crystal field evaluation and spectroscopy for thulium in monoclinic KGd(WO₄)₂ and KLu(WO₄)₂ laser crystals. *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2008, vol. 20, no. 34, p. 345219.
14. Schmidt A., Choi S.Y., Yeim D., Rotermund F., Mateos X., Segura M., Diaz. F., Petrov V. and Griebner U. Femtosecond Pulses near 2 μm from a Tm:KLuW Laser Mode-Locked by a Single-Walled Carbon Nanotube Saturable Absorber. *Appl. Phys. Exp.*, 2012, vol. 5, no. 9, p. 092704.
15. Gaponenko M.S., Loiko P.A., Gusakova N.V., Yumashev K.V., Kuleshov N.V., Pavlyuk A.A. Thermal lensing and microchip laser performance of N_g-cut Tm³⁺:KY(WO₄)₂ crystal. *Appl. Phys. B*, 2012, vol. 108, pp. 603–607.
16. Gaponenko M.S., Kuleshov N., Südmeyer T. Microchip Tm:KYW Laser with 2.5 W of Output Power. *CLEO: 2015*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2015), paper SF1F.6.