



Badania generacji impulsowej monokryształów KGW domieszkowanych Er^{3+} i Yb^{3+} do mikrolaserów „bezpiecznych dla wzroku”

ZYGMUNT MIERCZYK, JAROSŁAW MŁYŃCZAK,
KRZYSZTOF KOPCZYŃSKI, ANDRZEJ MAJCHROWSKI*

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki, *Instytut Fizyki Technicznej,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Przeprowadzono badania generacji impulsowej nowych ośrodków czynnych w układach wzbudzanych laserami półprzewodnikowymi. Badania charakterystyk laserowych opracowanych ośrodków aktywnych i nieliniowych absorberów przeprowadzono w układzie lasera pompowanego wzdłużnie diodą laserową FC 1167 z wyjściem światłowodowym. W układzie tym promieniowanie z diody laserowej kształtowane było przez układ optyczny skupiający wiązkę pompującą w ośrodku aktywnym. Badano akcję laserową w ośrodku aktywnym: KGW: Er^{3+} , Yb^{3+} (5% Yb^{3+} , 1% Er^{3+}) z wykorzystaniem $\text{ZnSe}:\text{Co}^{2+}$ jako modulatora dobroci rezonatora. Uzyskano generację ciągu impulsów promieniowania o długości fali 1,53 μm .

Słowa kluczowe: promieniowanie „bezpieczne dla wzroku”, technika laserowa, ośrodki aktywne, monokryształy

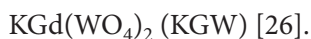
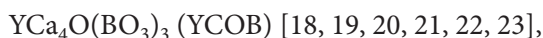
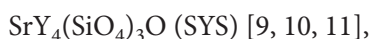
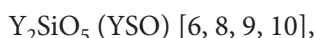
Symbole UKD: 621.375.826

1. Wprowadzenie

Promieniowanie „bezpieczne dla wzroku” znajduje się w kręgu coraz większych zainteresowań praktycznych. W znacznej mierze jest to spowodowane bezpieczeństwem stosowania tego typu laserów wynikającym z charakterystyk optycznych oka [1-3]. Długość fali 1,5 μm jest uważana za bezpieczną dla bezpośredniego patrzenia w wiązkę przy gęstościach energii 100 razy większych niż dla 10,6 μm (laser CO_2) oraz $2 \cdot 10^5$ razy większych niż dla długości fali 1,06 μm (laser $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$) [4].

Zainteresowanie laserami „bezpiecznymi dla wzroku” wynika również z korzystnych charakterystyk propagacyjnych promieniowania z zakresu powyżej 1,5 μm w różnych ośrodkach. Dla długości fali 1,55 μm występuje minimum absorpcji kwarcowych włókien światłowodowych, w zakresie 1,5÷2 μm transmisja atmosfery jest najwyższa, natomiast pochłanianie niektórych zanieczyszczeń atmosfery, w tym ośrodków biologicznych, bardzo silne. W związku z tym potencjalne zastosowania laserów generujących promieniowanie „bezpieczne dla wzroku” obejmują takie obszary, jak telekomunikacja, radary optyczne, pomiary odległości, zdalna detekcja zanieczyszczeń i medycyna [5].

Prace naukowo-badawcze związane z opracowaniem laserów z „bezpieczną długością fali” prowadzone są między innymi w kierunku zastosowania nowych krystalicznych ośrodków aktywnych domieszkowanych Er^{3+} i Yb^{3+} w laserach na ciele stałym pompowanych diodami laserowymi lub lampami wyładowczymi. Znalezienie efektywnego ośrodka stało się dość dużym problemem ze względów technologicznych. Do chwili obecnej przeprowadzono wiele prób uzyskania takiego ośrodka na całym świecie i uzyskano generację promieniowania w obszarze 1,5 μm w następujących kryształach domieszkowanych jonami Er^{3+} i Yb^{3+} :



Generację impulsów nanosekundowych w krystalicznych ośrodkach aktywnych domieszkowanych Er^{3+} i Yb^{3+} poprzez modulację dobroci rezonatora za pomocą nieliniowego absorbera, udało się uzyskać na kryształ GdCOB, wykorzystując kryształ $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ jako modulator dobroci [27]. Do wzdłużnego pompowania tego lasera zastosowano linijkę diod laserowych bez wyjścia światłowodowego. Pompa pracowała w reżimie quasi-cw, tzn. z impulsami o czasie trwania 1-2 ns i zmiennej częstotliwości od kilku do 100 Hz. W laserze tym udało się uzyskać sprawność różniczkową równą 11,6%, czas trwania impulsu równy 5-6 ns, oraz

maksymalną generowaną moc średnią wynoszącą 88 mW [27]. Są to parametry porównywalne z laserami na szkle erbowym.

Głównym celem prowadzonych prac, których wyniki przedstawiono w artykule, było przeprowadzenie badań charakterystyk generacji impulsowej nowych, krystalicznych ośrodków aktywnych generujących w zakresie długości fal „bezpiecznych dla wzroku”. Takimi ośrodkami są kryształy wolframianu potasowo-gadolinowego $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ domieszkowane jonami Er^{3+} i Yb^{3+} . Wykazują one bardzo dobre właściwości optyczne i spektroskopowe. Technologię monokrysztalizacji tych ośrodków opracowano w Instytucie Fizyki Technicznej WAT [28]. Dzięki stosowaniu tych kryształów udało się uzyskać generację cw w obszarze $1,5 \mu\text{m}$ [26].

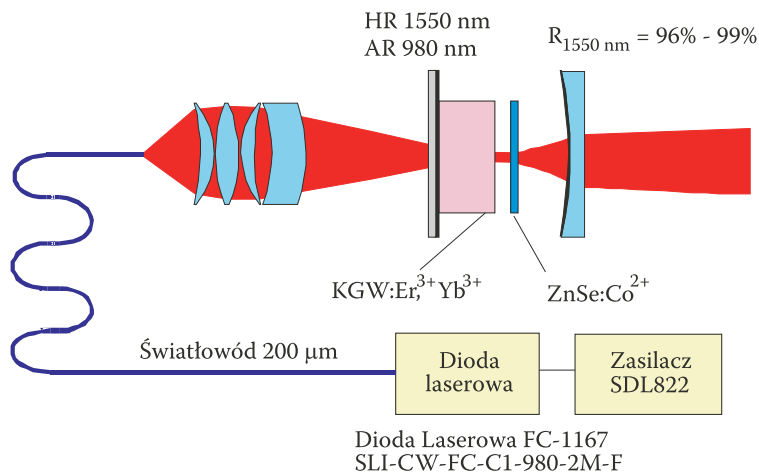
W celu uzyskania generacji impulsowej wykorzystano nowe nieliniowe absorbery, jakimi są monokryształy selenku cynku domieszkowane jonami Co^{2+} , przeznaczone do systemów laserowych generujących promieniowanie „bezpieczne dla wzroku” [29, 30, 31, 32]. Materiały te charakteryzują się długimi czasami relaksacji i dużymi absorpcyjnymi przekrojami czynnymi, dzięki czemu energia nasycenia jest bardzo mała. Wówczas nie ma potrzeby ogniskowania promieniowania na nieliniowym absorberze [29, 30]. Absorpcja ze stanów wzbudzonych jest znikoma, a przekrój czynny dla ESA jest o rząd wielkości mniejszy od przekroju dla GSA [30, 32]. Dla przykładu w układzie laserowym pompowanym lampą wyładowczą uzyskano impulsy promieniowania o czasie trwania 50 ns i energii 5 mJ [30]. W tej samej matrycy zamiast Co^{2+} zastosowano również dwuwartościowe jony chromu Cr^{2+} i okazało się, że takie modulatory są trochę szybsze od modulatorów z kobaltem, a impulsy promieniowania uzyskane przy ich pomocy posiadają podobne parametry [30].

Główne obszary zastosowań opracowanych mikrolaserów to nowa generacja dalmierzy laserowych z odbiorem bezpośrednim i podsumowym, systemy laserowe do układów wskazywania celów oraz urządzenia detekcji koherentnej stosowane m.in. w radarach laserowych. Opracowanie nowych mikrolaserów generujących impulsowe promieniowanie „bezpieczne dla wzroku”, wynika z potrzeb aparaturowego rozwoju techniki laserowej i jej aplikacji w zastosowaniach militarnych oraz w metrologii, automatyce, medycynie i ochronie środowiska.

2. Impulsowy mikrolaser $\text{KGW}:\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$

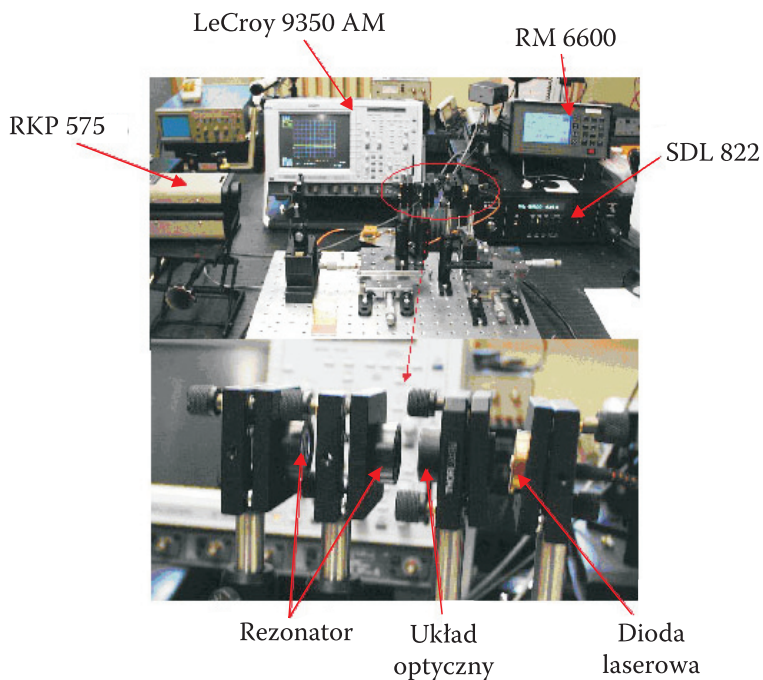
Schemat ideowy układu rezonatora do badań generacyjnych kryształów KGW: $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ w układzie mikrolasera monoimpulsowego przedstawiono na rysunku 1.

Układ formowania wiązki promieniowania pompującego wykonano w postaci czteroelementowego układu optycznego z korekcją aberracji. Ośrodki czynne wykonano w postaci płasko-równoległych płytek. Rezonator tworzyły zewnętrzne zwierciadła — płasko-płaskie, dichroiczne zwierciadło wejściowe o wysokiej transmisji promieniowania w zakresie 980 nm i całkowitym odbiciu dla 1550 nm oraz



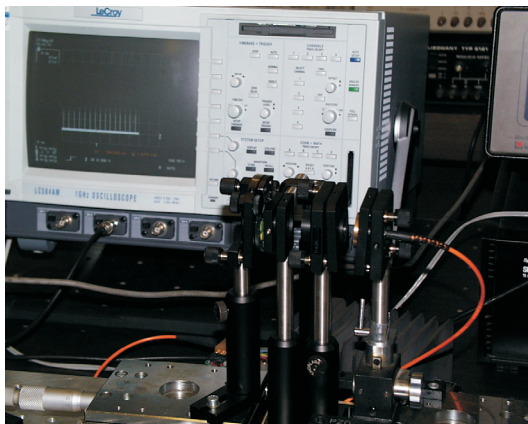
Rys. 1. Schemat ideowy układu pomiarowego do badań mikrolaserów

sferyczne ($r = 100 \text{ mm}$) zwierciadło wyjściowe o transmisji 1-4% dla długości fali generacji. Do badań generacji impulsowej zastosowano pasywny modulator dobroci rezonatora ZnSe:Co²⁺ wykonany w postaci płytki o grubości 0,5 mm.



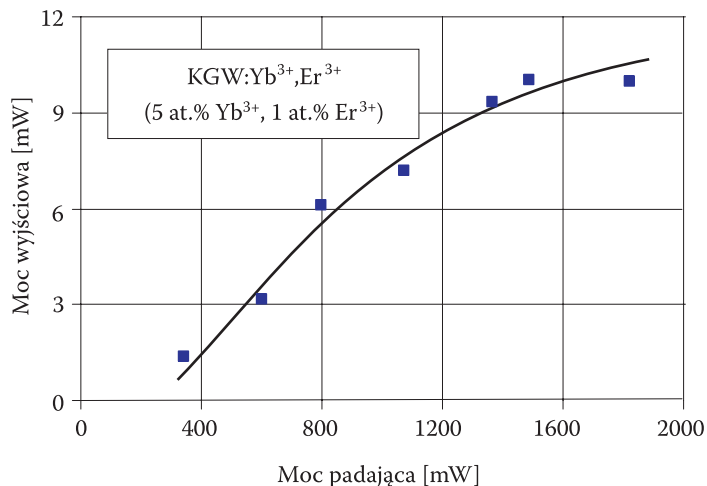
Fot. 1. Zdjęcie układu pomiarowego

Stanowisko pomiarowe do badań generacyjnych zawierało również detektor promieniowania $1,5 \mu\text{m}$, oscyloskop cyfrowy typu 9350 AM firmy LeCROY z pasmem przenoszenia 500 MHz oraz miernik mocy i energii promieniowania RM 6600 z sondą pomiarową Rkp 575 oraz RkT 10 firmy Laser Precision Corp. Zdjęcie układu pomiarowego przedstawiono na fotografiach 1 i 2.



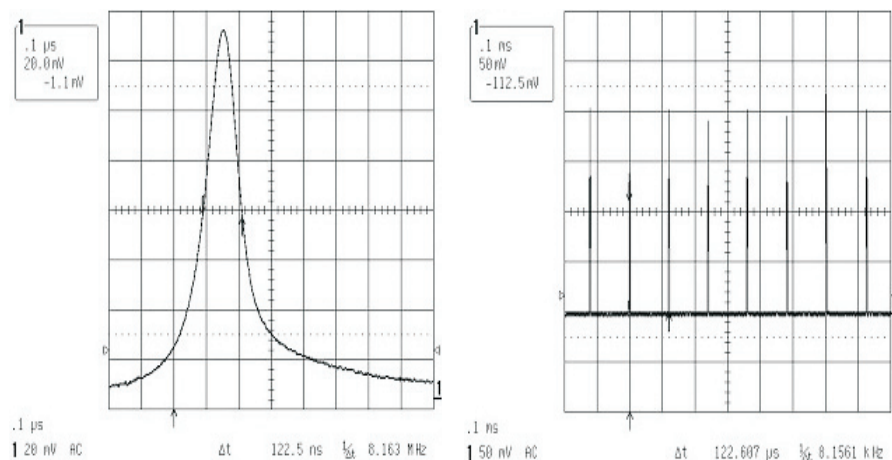
Fot. 2. Zdjęcie rejestrowanej generacji impulsowej (widok w oscyloskopie)

W przedstawionym układzie pomiarowym uzyskano najpierw generację ciągłą. Zależność mocy wyjściowej generowanego promieniowania od mocy padającej pompy przedstawiono na rysunku 2.



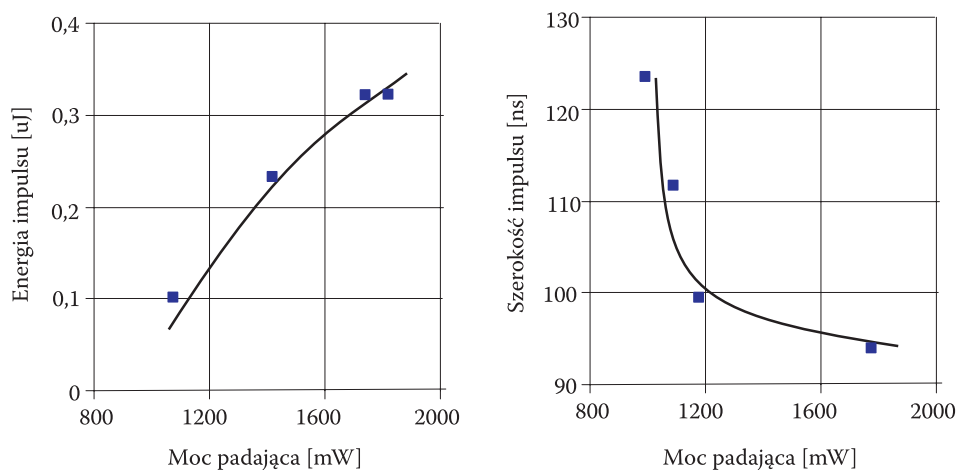
Rys. 2. Moc wyjściowa generacji ciągłej $1,5 \mu\text{m}$ w funkcji mocy padającej pompy diodowej dla badanych kryształów $\text{KGW:Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$

Stosując pasywny modulator dobroci rezonatora ZnSe:Co²⁺ o transmisji początkowej 92%, uzyskano generację impulsową. Przykładowe oscylogramy generacji impulsowej przedstawiono na rysunku 3.

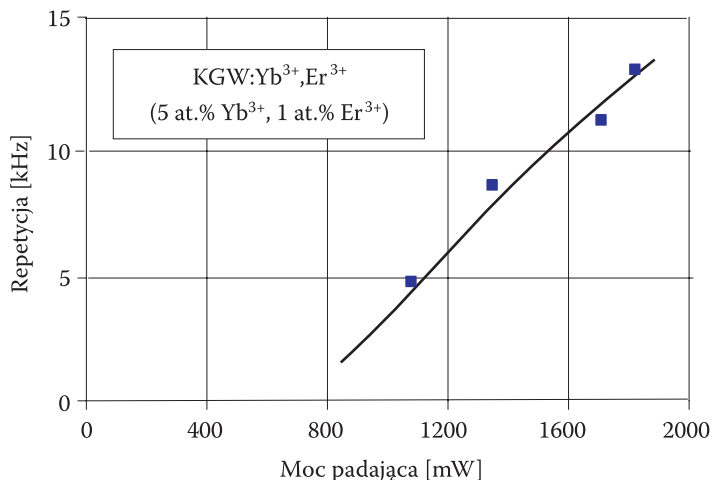


Rys. 3. Przykładowe oscylogramy generacji impulsowej kryształów KGW:Er³⁺,Yb³⁺ z modulatorem ZnSe:Co²⁺

Zależności energii wyjściowej i czasu trwania generowanych impulsów od mocy promieniowania pompującego 980 nm przedstawiono na rysunku 4. Na rysunku 5 pokazano zależność częstotliwości repetycji od mocy pompy.

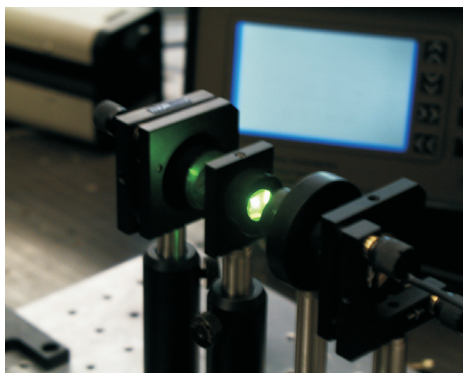


Rys. 4. Zależności energii wyjściowej i czasu trwania generowanych impulsów od mocy padającej promieniowania pompującego 980 nm



Rys. 5. Zależność częstotliwości repetycji od mocy pompy

W badaniach generacyjnych obserwowano silną zieloną luminescencję kryształów KGW:Er³⁺,Yb³⁺. Luminescencja ta związana jest z nieliniowymi mechanizmami transferu energii (ESA $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$) i odpowiada prawdopodobnie przejściom $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ w jonach Er³⁺. Zjawiska te mogą być powodem występowania w układzie generacyjnym dużych strat i wysokiego progu generacji. Na fotografii 3 przedstawiono obserwowaną w badaniach zieloną luminescencję kryształów KGW:Er³⁺,Yb³⁺.

Fot. 3. Zielona luminescencja kryształów KGW:Er³⁺,Yb³⁺ pompowanych diodą laserową 980 nm

Niskie sprawności generacji uzyskane w badaniach kryształów KGW:Yb³⁺,Er³⁺ wynikają głównie z jakości zastosowanych diod pompujących, których szerokość połówkowa widma generacji powinna być mniejsza oraz występowania w procesie

generacji silnych efektów nieliniowych. Procesy nieliniowego transferu energii w kryształach KGW domieszkowanych jonami Er^{3+} i Yb^{3+} nie zostały jeszcze w pełni wyjaśnione i wymagają podjęcia odrębnych badań.

3. Wnioski końcowe

Badania charakterystyk generacji impulsowej ośrodków aktywnych i nieliniowych absorberów przeprowadzono w układzie lasera pompowanego wzdłużnie diodą laserową FC 1167 z wyjściem światłowodowym. W układzie tym promieniowanie z diody laserowej kształtowane było odpowiednio przez układ optyczny skupiający wiązkę pompującą w ośrodku aktywnym. Badano akcję laserową w ośrodku aktywnym: KGW: Er^{3+} , Yb^{3+} (5% Yb^{3+} , 1% Er^{3+}). Uzyskano generację ciągu impulsów promieniowania o długości fali 1,53 μm .

Pompowanie wzdłużne dzięki możliwości pompowania jedynie fragmentu ośrodka wykorzystywanego w generacji cechuje wysoka sprawność i efektywność wykorzystania promieniowania pompy oraz łatwość uzyskania generacji w modzie podstawowym. Wymaga jednak skupienia całego promieniowania pompy na małej powierzchni, co może wywołać niepożądane efekty nieliniowe, ponadto utrudnia sprzęganie wielu diod laserowych i ogranicza osiąganą moc. Ceną zaletą stosowania diod laserowych są znacznie prostsze układy zasilania i ominięcie problemu wysokich napięć, co pozwala uprościć konstrukcje głowic laserowych i zwiększyć bezpieczeństwo pracy.

Opracowane nowe konstrukcje laserowe wykorzystujące wolframiany, jako ośrodki czynne, stanowią ważną grupę laserów generujących promieniowanie „bezpieczne dla wzroku” o potencjalnych możliwościach aplikacyjnych w urządzeniach wojskowej techniki laserowej oraz systemach monitorowania środowiska.

Artykuł wpłynął do redakcji 26.07.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano we wrześniu 2006 r.

LITERATURA

- [1] W. J. GEERAETS, E. R. BERRY, *Ocular spectral characteristics as related to hazards from lasers and other light sources*, American Journal of Ophthalmology, vol. 61(1), 1968, pp. 15-20.
- [2] D. H. SLINEY, *Selected papers on laser safety*, SPIE Milestone Series, vol. MS-117, Bellingham, Washington, 1995.
- [3] IEC Standard EN 825-1, *Safety of laser product. Equipment classification, requirements and user's guide*, 1993.
- [4] *American National Standard for the Safe Use of Lasers*, ANSI Z-136.1-1993, 1993.
- [5] R. FLUCK, U. KELLER, E. GINI, H. MELCHIOR, *Eyesafe pulsed microchip laser*, OSA TOPS Advanced Solid State Lasers, vol. 19, 1998, pp. 146-149.

- [6] T. SCHWEIZER, T. JENSEN, E. HEUMANN, G. HUBER, *Spectroscopic properties and diode pumped 1.6 μm laser performance in Yb-codoped Er:Y₃Al₅O₁₂ and Er:Y₂SiO₅*, Optics Communications, vol. 118, 1995, 557-561.
- [7] T. S. KUBO, T. J. KANE, *Diode-pumped lasers at five eye-safe wavelengths*, IEEE Journal of Quantum Electronics 28 (4), 1992, pp. 1033-1040.
- [8] C. LI, R. MONCORGE, J. C. SOURIAU, C. BOREL, CH. WYON, *Room temperature cw laser action of Y₂SiO₅:Yb³⁺, Er³⁺ at 1.57 μm* , Optics Communications, 107 (1-2), 1994, pp. 61-64.
- [9] C. BOREL, J. C. SOURIAU, CH. WYON, C. LI, R. MONCORGE, *Room temperature CW laser efficiency Yb³⁺, Er³⁺ and Tm³⁺ doped silicates in the infrared region*, Materials Research Society Symposium Proceedings 329, 1994, pp. 253-259.
- [10] J. C. SOURIAU, R. ROMERO, C. BOREL, CH. WYON, C. LI, R. MONCORGE, *Optical properties and laser performance of some Yb³⁺, Er³⁺ and Tm³⁺-doped silicates*, Optical Materials, vol. 4, 1994, pp. 133.
- [11] J. C. SOURIAU, R. ROMERO, C. BOREL, CH. WYON, C. LI, R. MONCORGE, *Room-temperature diode-pumped continuous-wave SrY₄(SiO₄)₃O: Yb³⁺, Er³⁺ crystal laser at 1554 nm*, Applied Physics Letters, vol. 64, no. 10, 1994, 1189-1191.
- [12] N. V. KULESHOV, A. A. LAGATSKY, V. G. SHCHERBITSKY, V. P. MIKHAILOV, E. HEUMANN, T. JENSEN, A. DIENING, G. HUBER, *CW laser performance of Yb and Er, Yb doped tungstates*, Applied Physics B: Lasers and Optics, vol. 64 (4), 1998, pp. 409-413.
- [13] V. P. MIKHAILOV, N. V. KULESHOV, A. A. LAGATSKY, V. G. SHCHERBITSKY, E. HEUMANN, T. JENSEN, A. DIENING, G. HUBER, *Spectroscopy and CW laser emission at 1.54 μm from Yb-codoped Er:KY(WO₄)₂*, Conference on Lasers and Electro-Optics Europe — Technical Digest, 1996, pp. 259.
- [14] I. SOKÓLSKA, E. HEUMANN, S. KÜCK, T. ŁUKASIEWICZ, *Laser oscillation of Er³⁺:YVO₄ and Er³⁺, Yb³⁺:YVO₄ crystals in the spectral range around 1.6 μm* , Applied Physics B: Lasers and Optics, vol. 71 (1-6), 2000, pp. 893-896.
- [15] B. SIMONDI-TEISSEIRE, B. VIANA, A. M. LEJUS, J. M. BENITEZ, D. VIVIEN, C. BOREL, R. TEMPLIER, C. WYON, *Room-temperature CW laser operation at 1.55 μm (eye-safe range) of Yb:Er and Yb:Er:Ce:Ca₂Al₂SiO₇ crystals*, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 32 (11), 1996, pp. 2004-2009.
- [16] B. SIMONDI-TEISSEIRE, B. VIANA, A. M. LEJUS, D. VIVIEN, C. BOREL, R. TEMPLIER, C. WYON, *Spectroscopic properties and laser oscillation of Yb:Er:Ca₂Al₂SiO₇ in the 1.55 μm eye-safe range*, OSA TOPS on Advanced Solide-State Lasers, vol. 1, 1996, 301.
- [17] B. SIMONDI-TEISSEIRE, B. VIANA, D. VIVIEN, A. M. LEJUS, *Yb³⁺ to Er³⁺ energy transfer and rate-equations formalism in the eye safe laser material Yb:Er:Ca₂Al₂SiO₇*, Optical Materials, vol. 6, 1996, pp. 267-274.
- [18] P. WANG, J. M. DAWES, P. BURNS, J. A. PIPER, H. ZHANG, L. ZHU, X. MENG, *Diode-pumped cw tunable Er³⁺:Yb³⁺:YCOB laser at 1.5-1.6 μm* , Optical Materials, vol. 19, 2002, pp. 383-387.
- [19] P. BURNS, J. M. DAWES, P. WANG, J. A. PIPER, H. ZHANG, L. ZHU, X. MENG, *Energy transfer and investigations into laser performance in Er³⁺:Yb³⁺:YCOB crystals at 1.5-1.6 μm* , OSA TOPS on Advanced Solide-State Lasers, vol. 50, 2001, 218.
- [20] P. BURNS, J. M. DAWES, P. DEKKER, J. A. PIPER, H. ZHANG, J. WANG, *CW diode-pumped microlaser operation at 1.5-1.6 μm in Er, Yb: YCOB*, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 14, 2002, pp. 1677-1679.
- [21] P. BURNS, J. M. DAWES, P. DEKKER, J. A. PIPER, H. JIANG, H. JIANG, J. WANG, *Energy-transfer studies and efficient cw laser operation of a cw Er,Yb: YCOB laser at 1.55 μm* , Proc. SPIE — The International Society for Optical Engineering, vol. 4968, 2003, pp. 79-86.

- [22] B. H. GE, H. J. ZHANG, X. G. XU, J. Y. WANG, M. H. JIANG, P. BURNS, J. M. DAWES, J. A. PIPER, *Preparation and LD-pumped laser performance of Er:Yb:YCOB crystal*, Rengong Jingti Xuebao/ Journal of Synthetic Crystals, vol. 32, 2003, pp. 420.
- [23] P. A. BURNS, J. M. DAWES, P. DEKKER, J. A. PIPER, H. JIANG, J. WANG, *Optimization of Er, Yb:YCOB for CW laser operation*, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 40, 2004, pp. 1575-1582.
- [24] B. DENKER, B. GALAGAN, L. IVLEVA, V. OSIKO, S. SVERCHKOV, I. VORONINA, J. E. HELLSTROM, F. LAURELL, *New crystalline material for 1.5 μm lasers: Yb, Er-Activated GdCa₄O(BO₃)₃*, OSA Trends in Optics and Photonics Series, vol. 94, 2004, pp. 430-434.
- [25] B. DENKER, B. GALAGAN, L. IVLEVA, V. OSIKO, S. SVERCHKOV, I. VORONINA, J. E. HELLSTROM, F. LAURELL, *Luminescent and laser properties of Yb-Er:GdCa₄O(BO₃)₃: A new crystal for eye-safe 1.5- μm lasers*, Applied Physics B: Lasers and Optics, vol. 79, 2004, pp. 577-581.
- [26] Z. MIERCZYK, J. MŁYŃCZAK, K. KOPCZYŃSKI, A. MAJCHROWSKI, *Badanie generacji cw monokryształów KGW:Yb oraz KGW:Er,Yb — nowych ośrodków aktywnych do mikrolaserów „bezpiecznych dla wzroku”*, Biul. WAT, (w druku).
- [27] J. E. HELLSTROM, G. KARLSSON, V. PASISKEVICIUS, F. LAURELL, B. DENKER, S. SVERCHKOV, B. GALAGAN, L. IVLEVA, *Passive Q-switching at 1.54 μm of an Er-Yb:GdCa₄O(BO₃)₃ laser with Co²⁺:MgAl₂O₄ saturable absorber*, Applied Physics B: Lasers and Optics, vol. 81, 2005, pp. 49-52.
- [28] Z. MIERCZYK, J. MŁYŃCZAK, K. KOPCZYŃSKI, A. MAJCHROWSKI, *Badanie własności optycznych i spektroskopowych monokryształów wolframianów domieszkowanych jonami Er i Yb — nowych ośrodków aktywnych do mikrolaserów „bezpiecznych dla oka”*, Biul. WAT, 54, 12, 2005.
- [29] M. BIRNBAUM, M. B. CAMARGO, S. LEE, F. UNLU, AND R. D. STULTZ, *Co²⁺:ZnSe Saturable Absorber Q-switch for the 1.54 μm Er³⁺:Yb³⁺:Glass Laser*, OSA TOPS Advanced Solid-State Lasers, vol. 10, 1997, pp. 148-151.
- [30] A. V. PODLIPENSKY, V. G. SHCHERBITSKY, N. V. KULESHOV, V. P. MIKHAILOV, *Cr²⁺:ZnSe and Co²⁺:ZnSe saturable-absorber Q-switches for 1.54 μm Er:glass lasers*, Opt. Lett., vol. 24, no. 14, 1999, pp. 960.
- [31] Z. MIERCZYK, A. MAJCHROWSKI, K. OŻGA, A. SLEZAK, I. V. KITYK, *Simulation of nonlinear optical absorption in ZnSe:Co²⁺ crystals*, Optics & Laser Technology, vol. 38, 2006, pp. 558-564.
- [32] Z. MIERCZYK, A. MAJCHROWSKI, I. V. KITYK, W. GRUHN, *ZnSe:Co²⁺ — nonlinear optical absorber for giant-pulse eye-safe lasers*, Optics & Laser Technology, vol. 35, 2003, 169-172.

Z. MIERCZYK, J. MŁYŃCZAK, K. KOPCZYŃSKI, A. MAJCHROWSKI

Investigation of pulsed generation of Er³⁺ and Yb³⁺ doped KGW single crystals used as active media for eye-safe microlasers

Abstract. Pulse generation of new active media with the use of laser diode as a pump was carried out. Investigations of laser characteristics of the new active media and nonlinear absorbers were performed. The laser was longitudinally pumped using fiber-coupled laser diode FC 1167. In this system, the pump radiation was shaped by optics focusing it onto the active media. KGW:Er³⁺, Yb³⁺ (5% Yb³⁺, 1% Er³⁺) as an active media and ZnSe:Co²⁺ as a modulator were used.

Keywords: eye-safe radiation, laser technology, active media, single crystals

Universal Decimal Classification: 621.375.826