



Badania generacyjne monokryształów KGW domieszkowanych Er^{3+} i Yb^{3+} do mikrolaserów cw „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 cw mikrolaserów z nowymi ośrodkami czynnymi w układach wzbudzanych laserami półprzewodnikowymi. Opracowano technologię powłok cienko-warstwowych, w tym warstw antyrefleksyjnych, zwierciadeł całkowicie odbijających i zwierciadeł transmisyjnych (dichroicznych). Badania charakterystyk laserowych opracowanych ośrodków aktywnych 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 cw promieniowania o długości fali 1,53 μm . W układzie laserowym z ośrodkiem aktywnym KGW: Yb^{3+} uzyskano generację promieniowania cw o długości fali 1,03 μm .

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

Symbole UKD: 621.375.826

1. Wprowadzenie

Termin lasery „eye-safe”, czyli „bezpieczne dla wzroku”, pojawił się pod koniec lat osiemdziesiątych i związany był z wprowadzeniem nowej generacji dalmierzy laserowych z nadajnikami emitującymi promieniowanie o długości fali około 1,5 μm . Zakres spektralny „bezpiecznego dla wzroku” promieniowania laserowego wynika z charakterystyk optycznych oka [1].

Główne zagrożenia wzroku powodowane promieniowaniem laserowym dotyczą długości fal z zakresu 400÷1400 nm, w którym rogówka, soczewka, ciecz wodnista i ciało szkliste całkowicie przepuszczają promieniowanie. Wiązka laserowa jest skupiana przez soczewkę oka na siatkówce, gdzie osiąga znaczne gęstości mocy lub energii. Absorbowana energia powoduje lokalne nagrzewanie i oparzenie zarówno nabłonka barwnikowego siatkówki, jak i sąsiadujących z nim światłoczułych czopków i pręcików. To oparzenie lub uszkodzenie może spowodować trwałą lub nietrwałą utratę widzenia, w zależności od czasu ekspozycji. Promieniowanie z zakresu długości fal poniżej 400 nm i powyżej 1400 nm jest silnie absorbowane przez tkanki, dlatego nie wnika do wnętrza oka i nie powoduje uszkodzenia siatkówki [2].

Zgodnie z normami bezpieczeństwa, maksymalne dopuszczalne napromienienie (wyrażone w W/m^2) lub dawka energetyczna (wyrażona w J/m^2) padająca na rogówkę są określone przez złożone zależności od czasu ekspozycji i długości fali [3, 4].

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 $YAG:Nd^{3+}$) [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 ośrodków biologicznych i niektórych zanieczyszczeń atmosfery jest 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 na całym świecie przeprowadzono wiele prób uzyskania takiego ośrodka i uzyskano generację promieniowania w obszarze 1.5 μm w następujących kryształach domieszkowanych jonami Er^{3+} i Yb^{3+} : $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG) [6, 7], Y_2SiO_5 (YSO) [6, 8, 9, 10], $SrY_4(SiO_4)_3O$ (SYS) [9, 10, 11], $KY(WO_4)_2$ (KYW) [12, 13], YVO_4 (YVO) [14], $Ca_2Al_2SiO_7$ (CAS) [15, 16, 17], $YCa_4O(BO_3)_3$ (YCOB) [18, 19, 20, 21, 22, 23], $GdCa_4O(BO_3)_3$ (GdCOB) [24, 25].

Głównym celem prowadzonych prac, których wyniki przedstawiono w artykule, było przeprowadzenie badań charakterystyk generacyjnych nowych krystalicznych ośrodków aktywnych, generujących w zakresie długości fal „bezpiecznych

dla wzroku”. Takimi ośrodkami są kryształy wolframanu potasowo-gadolinowego $KGd(WO_4)_2$ domieszkowane jonami Er^{3+} i Yb^{3+} . Wykazują one bardzo dobre właściwości optyczne i spektroskopowe, umożliwiające generację w obszarze $1,5 \mu m$. Technologię monokrysztalizacji tych ośrodków opracowano w Instytucie Fizyki Technicznej WAT [26].

Główne obszary zastosowań opracowanych materiałów to nowa generacja dalmierzy laserowych z odbiorem bezpośrednim i podszumowym, systemy laserowe do układów wskazywania celów oraz urządzenia detekcji koherentnej, stosowane m.in. w radarach laserowych. Opracowanie nowych krystalicznych ośrodków aktywnych do laserów z ciałem stałym, generujących 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. Lasery $KGW:Er^{3+}, Yb^{3+}$ i $KGW:Yb^{3+}$

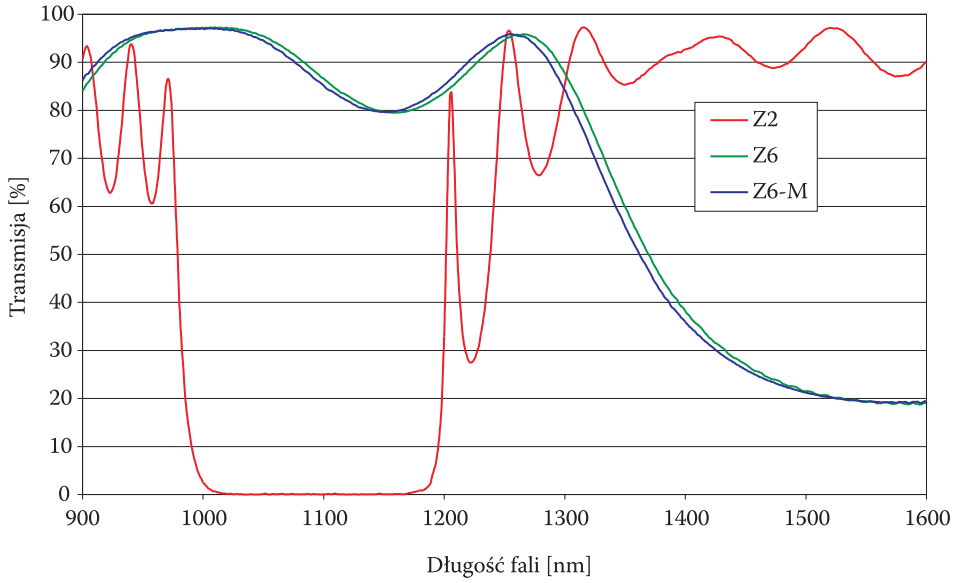
Opracowano technologię powłok cienkowarstwowych, w tym warstwy antyrefleksyjne, zwierciadła całkowicie odbijające i zwierciadła transmisyjne. Opracowano również technologię zwierciadeł dichroicznych.

Przy wzięciu pod uwagę długości fali wiązki pompującej oraz generowanej, zwierciadło wejściowe powinno charakteryzować się jak największą transmisją dla $\lambda = 980 \text{ nm}$ oraz jak największym współczynnikiem odbicia dla $\lambda = 1,53 \mu m$, natomiast zwierciadło wyjściowe powinno mieć jak największy współczynnik odbicia dla $\lambda = 980 \text{ nm}$ oraz transmisję kilku procent dla $\lambda = 1,53 \mu m$. Na rysunkach 1÷3 przedstawiono charakterystyki transmisyjne opracowanych zwierciadeł wejściowych i wyjściowych w zakresie widmowym od 900 do 1600 nm.

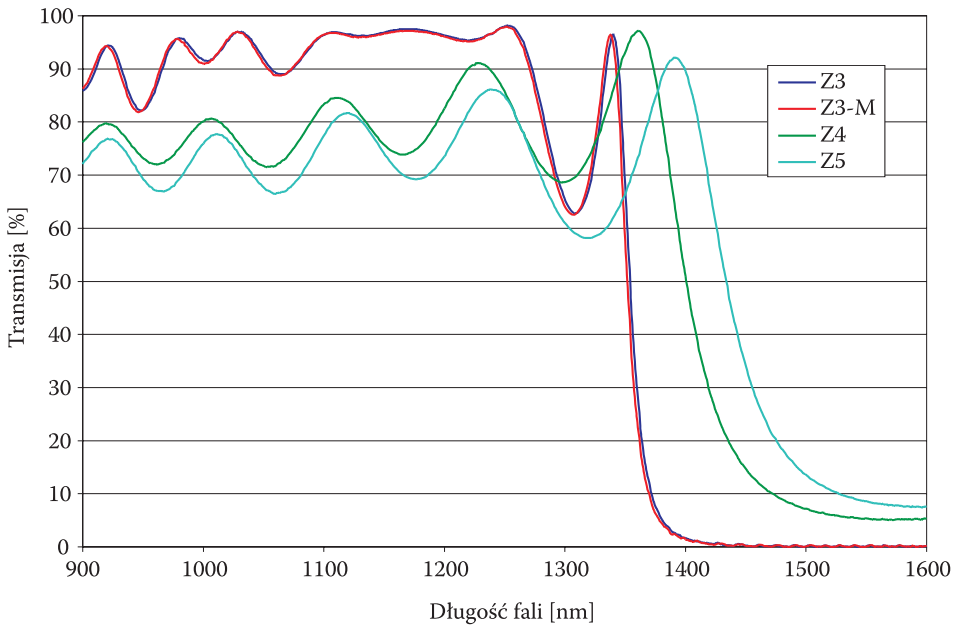
Badania charakterystyk laserowych opracowanych ośrodków aktywnych przeprowadzono w układzie lasera pompowanego wzdłużnie diodą laserową FC 1167 z wyjściem światłowodowym. W układzie tym promieniowanie z diody laserowej kształtowane było przez układ optyczny skupiający wiązkę pompującą w ośrodku aktywnym.

Opracowano układ optyczny do toru formowania wiązki laserowej pompującej 980 nm. Układ został zaprojektowany i optymalizowany za pomocą specjalizowanego oprogramowania WinSIGMA firmy Kidger Optics. Ponieważ podstawowe parametry geometryczne wiązki laserowej pompującej są bardzo korzystne (dioda laserowa z wyjściem światłowodowym; $M^2 \approx 1$), zadaniem układu optycznego było jedynie wydłużenie przewężenia wiązki, tak aby obejmowało na całej długości badany ośrodek aktywny. Pożądane efekty uzyskano za pomocą układów teleskopowych.

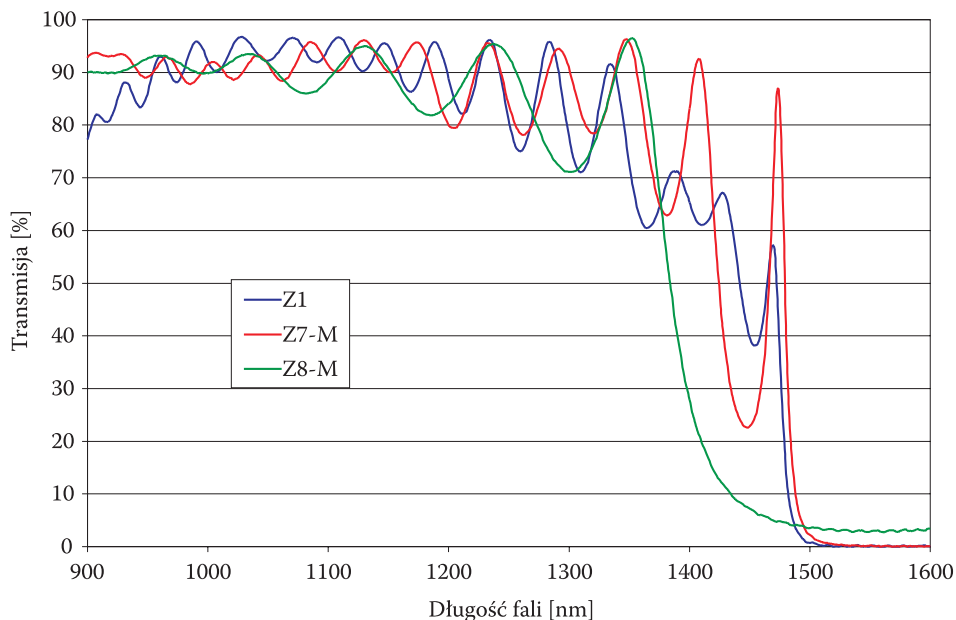
Na rysunku 4 przedstawiono schemat układu pomiarowego do badania generacji cw promieniowania o długości fali 1535 nm i 1030 nm.



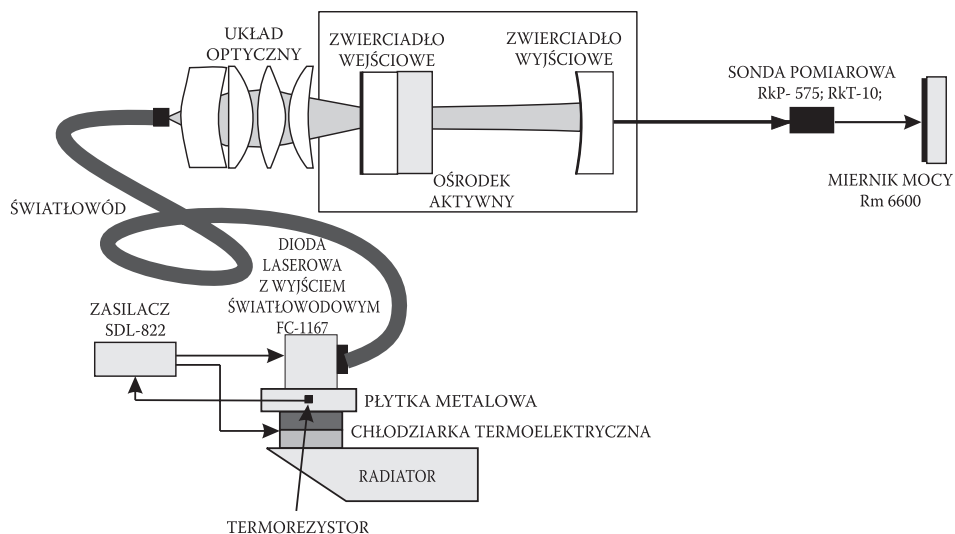
Rys. 1. Charakterystyki transmisyjne zwierciadeł całkowicie odbijających dla $\lambda = 1030$ nm (Z2) i transmisyjnych dla $\lambda = 1535$ nm (Z6 i Z6-M)



Rys. 2. Charakterystyki transmisyjne zwierciadeł całkowicie odbijających dla $\lambda = 1535$ nm (Z3 i Z3-M) i transmisyjnych dla $\lambda = 1535$ nm (Z4 i Z5)



Rys. 3. Charakterystyki transmisyjne zwierciadeł dichroicznych: całkowicie odbijających dla $\lambda = 1535$ nm i całkowicie transmisyjnych dla $\lambda = 980$ nm (Z1 i Z7-M) oraz transmisyjnych dla $\lambda = 1535$ nm i całkowicie transmisyjnych dla $\lambda = 980$ nm (Z8-M)

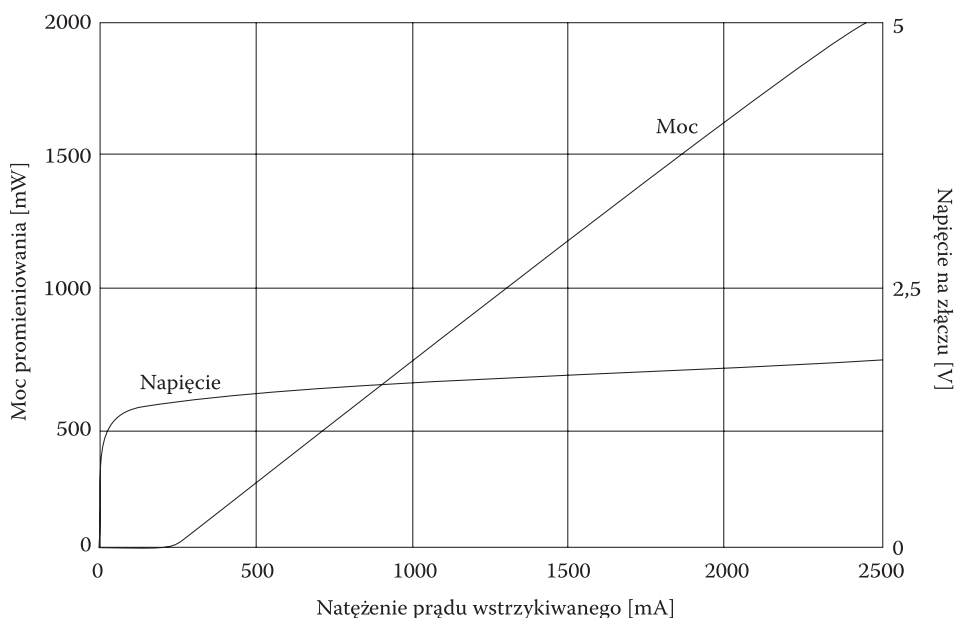


Rys. 4. Schemat układu pomiarowego do badań generacyjnych w konfiguracji z diodą laserową FC-1167 z wyjściem światłowodowym

Po przejściu przez dichroiczne zwierciadło wejściowe, promieniowanie diody laserowej wzbudzało badany ośrodek aktywny. Generowane promieniowanie laserowe po przejściu przez zwierciadło wyjściowe padało na sondę pomiarową, gdzie następował pomiar mocy przy pomocy miernika Rm 6600.

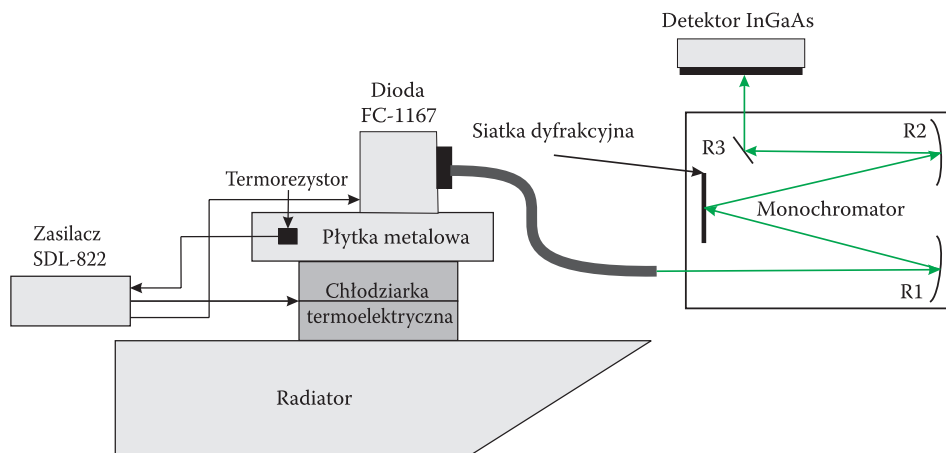
Dioda laserowa chłodzona była za pomocą chłodziarki termoelektrycznej, sterowanej sygnałem zwrotnym z termorezystora jako czujnika temperatury. Zasilanie diody i termochłodziarki odbywało się z wykorzystaniem zasilacza SDL-822.

Stosowana w układzie pompowania dioda laserowa FC-1167 firmy SEMICONDUCTOR LASER INTERNATIONAL nominalnie generowała promieniowanie o długości fali ok. 980 nm w temperaturze pokojowej. Zależności mocy wyjściowej oraz napięcia na złączu od wstrzykiwanego prądu przedstawiono na rysunku 5. Maksymalną moc równą 2 W można osiągnąć dla prądu 2.5 A.



Rys. 5. Zależności generowanej mocy oraz napięcia na złączu od wstrzykiwanego prądu dla diody FC-1167

Widmo generacji diody silnie zależy od temperatury pracy oraz od prądu zasilania (ze wzrostem prądu wzrasta temperatura). Aby efektywność pompowania była jak największa, należy to widmo dopasować do pasma absorpcji ośrodka aktywnego. W tym celu przeprowadzono badania generacji diody dla różnych prądów zasilania i dla różnych temperatur w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 6.



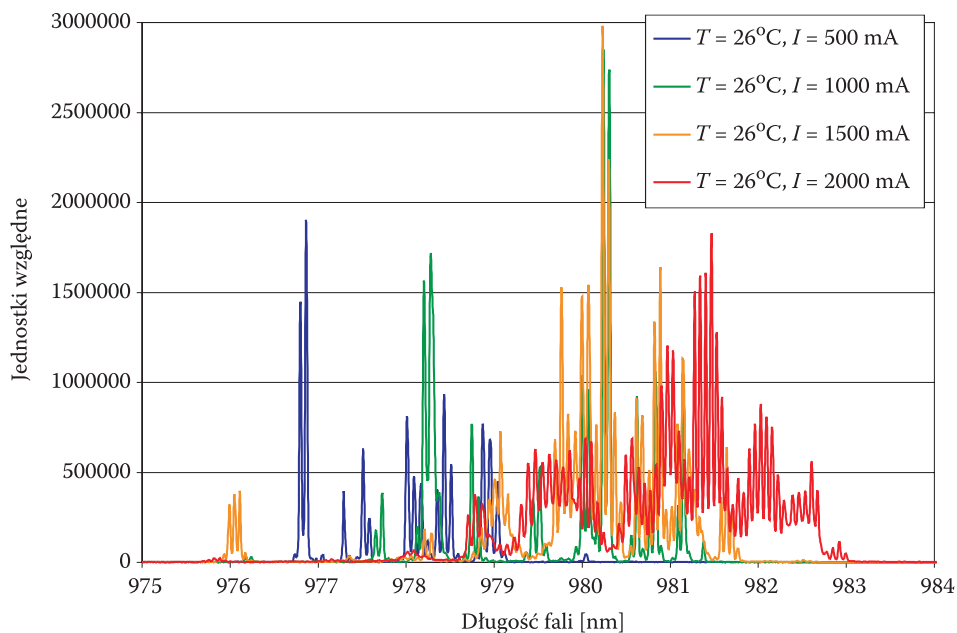
Rys. 6. Układ pomiarowy do badania widma generacji diody FC-1167

Promieniowanie emitowane przez diodę padało przez szczelinę wejściową monochromatora ARC na zwierciadło R1. Po odbiciu na tym zwierciadle padało na siatkę dyfrakcyjną, następnie po odbiciu od zwierciadła R2 oraz R3 o wyodrębnionej długości fali padało na detektor InGaAs, który pozwalał na rejestrowanie widma w zakresie 850÷1700 nm. Dioda laserowa była utrzymywana w stałej temperaturze dzięki chłodziarce termoelektrycznej.

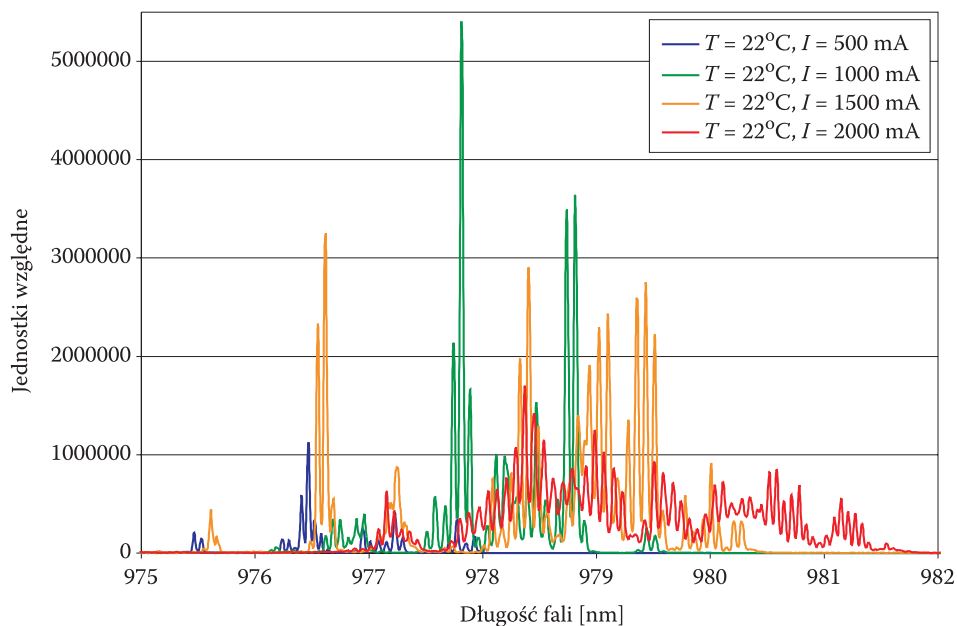
Przeprowadzono badanie widm emitowanych przez diodę dla pięciu różnych temperatur (7°C , 12°C , 17°C , 22°C i 26°C) oraz dla czterech różnych prądów zasilania (500 mA, 1000 mA, 1500 mA i 2000 mA). Dodatkowo przebadano widmo dla $T = 2^{\circ}\text{C}$, jednak tylko dla minimalnego prądu $I = 500$ mA, ponieważ w tej temperaturze (punkt rosy) skraplająca się para wodna mogłaby uszkodzić diodę.

Na rysunkach 7-9 zostały przedstawione przykładowe widma emisji diody dla $T = 26^{\circ}\text{C}$ i dla $T = 22^{\circ}\text{C}$ (generacja w obszarze 980 nm) oraz dla $T = 2^{\circ}\text{C}$ (generacja w obszarze 970 nm).

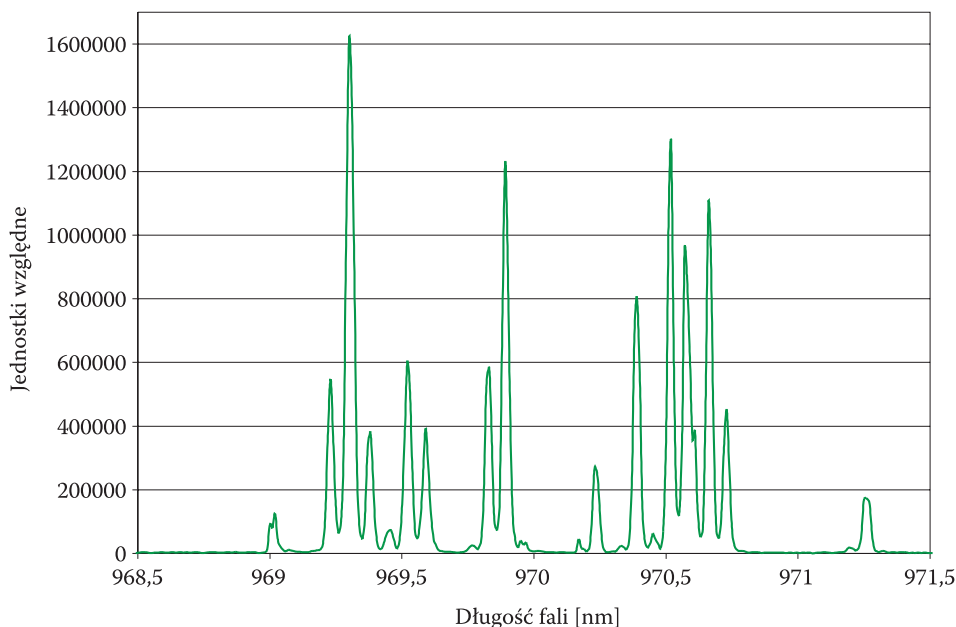
Z wykresów widać, że wraz ze wzrostem temperatury, widmo generacji diody przesuwają się w stronę fal dłuższych. Jest to następstwem zmniejszania się przerwy energetycznej między górnym a dolnym poziomem laserowym. Podobna sytuacja występuje, gdy wzrasta prąd zasilający.



Rys. 7. Widmo generacji diody FC-1167 dla stałej temperatury $T = 26^{\circ}\text{C}$ oraz dla różnych prądów zasilania



Rys. 8. Widmo generacji diody FC-1167 dla stałej temperatury $T = 22^{\circ}\text{C}$ oraz dla różnych prądów zasilania



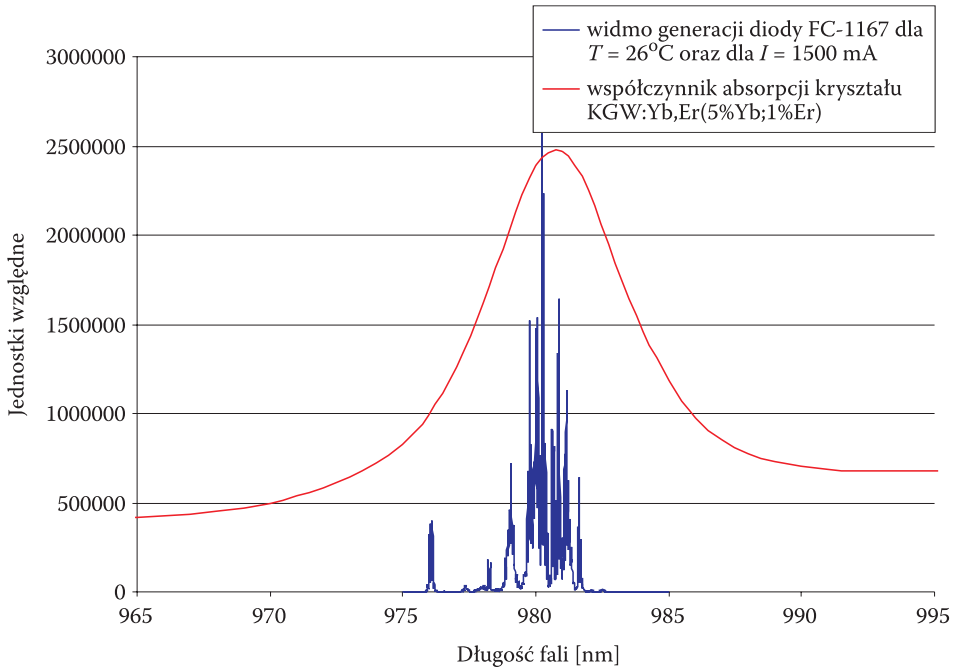
Rys. 9. Widmo generacji diody FC-1167 dla stałej temperatury $T = 2^{\circ}\text{C}$ oraz dla prądu zasilania $I = 500\text{ mA}$

Z przeprowadzonych badań widm generacji diody oraz badań widm absorpcji kryształów KGW domieszkowanych erbem i iterbem wynika, że najlepsze dopasowanie widma generacji do pasma absorpcji można uzyskać przy ok. $T = 26^{\circ}\text{C}$ i $I = 1500\text{ mA}$. Zostało to pokazane na rysunku 10, z którego widać, że pasma generacji diody całkowicie zawierają się w obszarze absorpcji analizowanych kryształów.

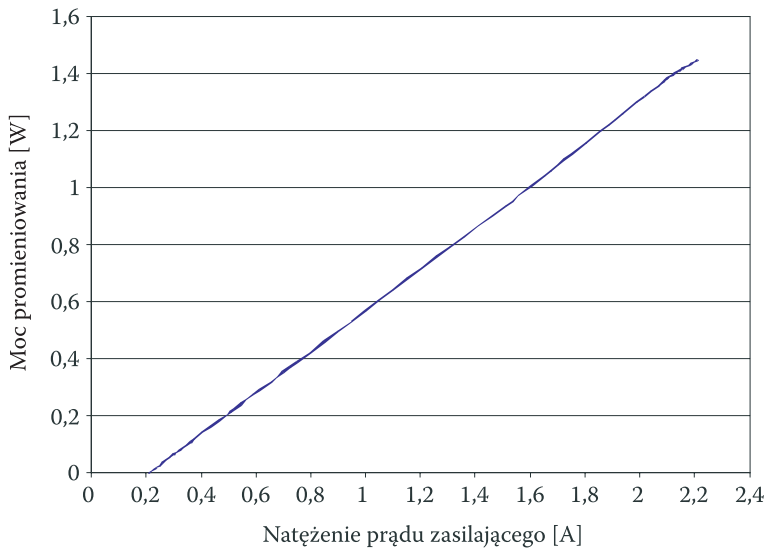
W celu wyznaczenia charakterystyk generacyjnych mikrolaserów z badanymi ośrodkami aktywnymi (zależność mocy promieniowania generowanego od mocy promieniowania pompy padającego na ośrodek) wyznaczono zależność mocy promieniowania diody po przejściu przez układ optyczny od prądu zasilającego. Zmierzona charakterystyka jest przedstawiona na rysunku 11.

W układzie pomiarowym, przedstawionym schematycznie na rysunku 4, badano generację laserową na długości fali 1030 nm w kryształach KGW: Yb^{3+} (3% Yb^{3+}). Zastosowane w tym układzie płaskie zwierciadło wejściowe miało wysoką transmisję dla 980 nm oraz wysoki współczynnik odbicia dla 1030 nm, natomiast sferyczne zwierciadło wyjściowe charakteryzowało się dużym współczynnikiem odbicia dla 980 nm oraz transmisją równą 3% dla 1030 nm. Charakterystyka generacyjna KGW: Yb^{3+} (3% Yb^{3+}) jest przedstawiona na rysunku 12.

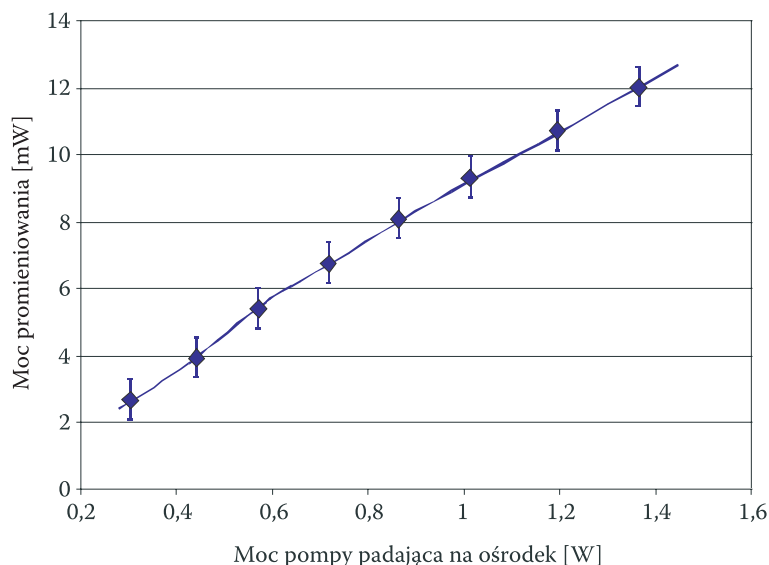
W układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 4 badano również akcję laserową w kryształach KGW: Yb^{3+} , Er^{3+} (5% Yb^{3+} , 1% Er^{3+}) na długości fali 1,53 μm .



Rys. 10. Porównanie widma generacji diody FC-1167 dla $T = 26^{\circ}\text{C}$ i $I = 1500\text{ mA}$ oraz współczynnika absorpcji kryształu KGW:Yb³⁺,Er³⁺ (5% Yb³⁺, 1% Er³⁺)

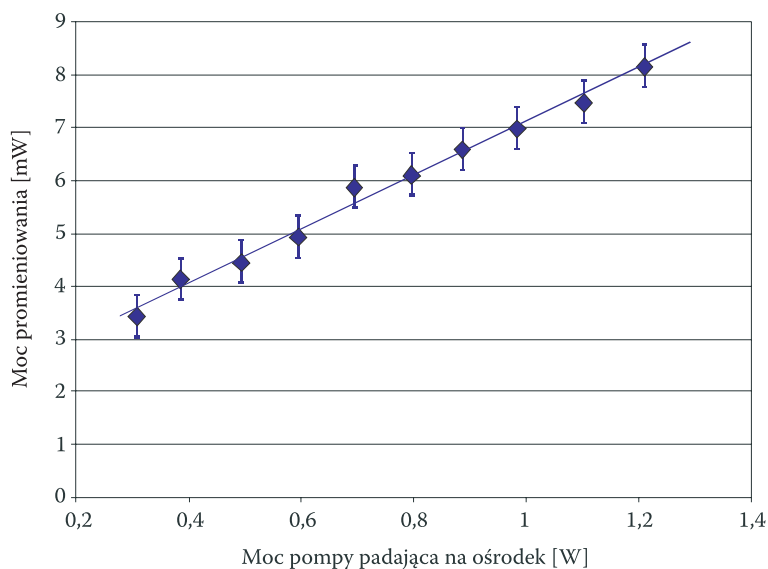


Rys. 11. Zależność mocy promieniowania diody po przejściu przez układ optyczny od prądu zasilającego



Rys. 12. Zależność mocy generowanej ($\lambda = 1030$ nm) od mocy pompy padającej na ośrodek KGW: Yb^{3+} (3% Yb^{3+})

Transmisja zwierciadła wyjściowego wynosiła 6% dla 1535 nm. Wykres przedstawiający zależność mocy promieniowania generowanego od mocy pompy padającej na ośrodek pokazano na rysunku 13.



Rys. 13. Zależność mocy generowanej ($\lambda = 1535$ nm) od mocy pompy padającej na ośrodek KGW: Yb^{3+}, Er^{3+} (5% Yb^{3+} , 1% Er^{3+})

Z przeprowadzonych badań generacji laserowej wynika, że monokryształ KGW:Er³⁺,Yb³⁺ (1% Er³⁺, 5% Yb³⁺) generujący promieniowanie o długości fali $\lambda=1535$ nm może być efektywnym ośrodkiem do laserów „bezpiecznych dla oka”. Uzyskane w pracy stosunkowo niskie sprawności generacji wynikają z dodatkowych strat, związanych z nieliniowymi efektami up-konwersji, obserwowanymi w przypadku obecności w ośrodku czynnym jonów erbu.

3. Wnioski końcowe

Badania generacyjne cw opracowanych ośrodków czynnych prowadzone były w układach wzbudzanych laserami półprzewodnikowymi. Pompowanie podłużne, dzięki możliwości pompowania jedynie partii ośrodka wykorzystywanego w generacji, cechuje wysoka sprawność i efektywne wykorzystanie promieniowania pompy oraz łatwość uzyskania generacji w modzie podstawowym. Wymaga to jednak skupienia całego promieniowania pompy na małej powierzchni, co może wywołać niepożądane efekty nieliniowe, a ponadto utrudnia sprzęganie wielu diod laserowych i ogranicza osiąganą moc wyjściową. Cenną zaletą stosowania diod laserowych są znacznie prostsze układy zasilania i ominięcie problemu wysokich napięć, co pozwala uprościć konstrukcje głowic laserowych i zwiększyć bezpieczeństwo pracy.

Opracowano technologię powłok cienkowarstwowych, w tym warstwy antyrefleksyjne, zwierciadła całkowicie odbijające i zwierciadła transmisyjne (dichroiczne). Badania charakterystyk laserowych opracowanych ośrodków aktywnych 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 ośrodkach aktywnych: KGW:Er³⁺,Yb³⁺ (5% Yb³⁺, 1% Er³⁺). Uzyskano efektywną generację cw promieniowania o długości fali 1,53 μm .

W układzie laserowym z ośrodkiem aktywnym KGW:Yb³⁺ uzyskano generację promieniowania cw o długości fali 1,03 μm .

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 13.02.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 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, 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, 146-149.
- [6] T. SCHWEIZER, T. JENSEN, E. HEUMANN, G. HUBER, *Spectroscopic properties and diode pumped 1.6 μ m 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, 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 μ m*, Optics Communications 107 (1-2), 1994, 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, 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, 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, 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 μ m from Yb-codoped Er:KY(WO₄)₂*, Conference on Lasers and Electro-Optics Europe — Technical Digest, 1996, 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 μ m*, Applied Physics B: Lasers and Optics, vol. 71 (1-6), 2000, 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 μ m (eye-safe range) of Yb:Er and Yb:Er:Ce:Ca₂Al₂SiO₇ crystals*, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 32 (11), 1996, 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 μ m 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, 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 μ m*, Optical Materials, vol. 19, 2002, 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 μ m*, 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, 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, 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, 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, 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, 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, 577-581.
- [26] 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.

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

Investigations of laser generation of Er³⁺ and Yb³⁺ doped KGW used as new active materials for eye safe microlasers

Abstract. Investigations of cw laser generation of microlasers with new active media pumped by laser diode were carried out. The technology of thin films such as antireflecting layers, reflecting mirrors and transmitting mirrors (dichroic) was developed. The laser generation of the developed active media was achieved using fiber coupled laser diode FC 1167 as a pump. The active media were pumped longitudinally. The radiation of the laser diode was shaped by a set of optical elements and focused onto the active medium. Using KGW:Er³⁺:Yb³⁺ (5% Yb³⁺, 1% Er³⁺) as an active medium, cw laser generation at 1.53 μm was obtained and using KGW:Yb³⁺ as an active medium, cw laser generation at 1.03 μm was obtained.

Keywords: eye safe radiation, laser technology, active media, monocrystal

Universal Decimal Classification: 621.375.826