

MERILNIK TEMPERATURE NA OSNOVI FLUORESCENCE OKSIDNIH SINTENTIČNIH MONOKRISTALOV

J. Križan¹, I. Bajsić² in J. Možina²

¹AMI d. o. o., Ptuj, Slovenija

²Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, Slovenija

Ključne besede: optična temperaturna zaznavala, fluorescenca, sintetični oksidni monokristali,

Izvilleček: V prispevku so prikazani rezultati razvoja nove generacije temperaturnih merilnih zaznaval, ki delujejo na osnovi fluorescence sintetičnih oksidnih monokristalov. Raziskane so nekatere termo-optične lastnosti sintetičnih oksidnih monokristalov na osnovi Al_2O_3 , kakor so $\text{Cr}^{3+}\text{MgAl}_2\text{O}_4$ (Cr:špinel) in $\text{Cr}^{3+}\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (Cr:YAG) in več inahč kristalov z dodatki oksidov redkih zemelj. V prispevku je opisan eksperimentalni sistem za merjenje temperature na osnovi razmerja vrhov fluorescenčnega spektra. V ta namen je bila razvita tudi programska oprema za obdelavo merilnih signalov. Prvi od predstavljenih prototipov merilnega sistema temelji na prenosu merilnega signala po optičnem vlaknu, pri drugem pa se določa temperatura na površini merjenca brezdotikalno. Nakazane so tudi nekatere možnosti praktične uporabe tovrstnega merjenja temperature.

Thermometer Based on Syntetic Oxide Monocrystals Fluorescence

Key words: optical temperature sensors, fluorescence, synthetic oxide monocrystals.

Abstract: The article presents some of the results of the development of new generation temperature sensors working on the basis of fluorescent synthetic oxide monocrystals. Research involved some termo-optical characteristics of synthetic oxide monocrystals with an Al_2O_3 basis such as: $\text{Cr}^{3+}\text{MgAl}_2\text{O}_4$ (Cr:Spinel), $\text{Cr}^{3+}\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (Cr:YAG) and some other variations of crystals doped with rare earth oxides. The experimental system for temperature measurement on the basis of fluorescence spectrum peaks ratios is examined. Computer hardware and software for processing measured signals is catalogued. The first of the represented measurement systems prototypes is based on the transfer of the measuring signal via the optical fibre, the second uses non-contact measuring of the object surface temperature. Some possible applications of the discussed temperature measurement are also indicated.

1. Uvod

Merjenje temperature z optičnimi brezdotikalnimi merilniki ima v nekaterih praktičnih primerih prednost pred dotikalnimi temperaturnimi merilniki ali pa je to celo edina možna rešitev za določanje temperaturnega stanja merjenca. V merilni praksi obstaja vrsta različnih termometrov na osnovi fluorescence oksidnih monokristalov /1 - 4/.

Obstajata dve temeljni metodi merjenja temperaturnega odziva termografskega materiala. Pri prvi metodi je uporabljen bliskovni svetlobni vir. Po vsakem svetlobnem blisku poteka eksponencialno ugašanje svetlobe, ki jo oddaja kristal. Časovna konstanta eksponencialnega ugašanja je temperaturno odvisna. Višja ko je temperatura, hitreje kristal ugaša. Časi ugašanja pri povišani temperaturi so tipično pod 1 ms.

Druga metoda temelji na temperaturni odvisnosti razmerja dveh spektralnih vrhov fluorescenčnega spektra in smo jo v tem prispevku preizkusili na kristalu špinela MgAl_2O_4 in kristalu $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ oba dopirana s kromom /11 - 14/.

Brezdotikalna metoda je občutljiva na stransko svetlobo v spektralnem območju od 600 do 700 nm in jo je zato treba pred izračunom razmerja izločiti. Uporaba fosforjev z moдро svetlobo zmanjša občutljivost na stransko svetlobo /5/. Merilno načelo, ki temelji na razmerju emisije dveh spektralnih črt, znatno zmanjša negotovost meritve.

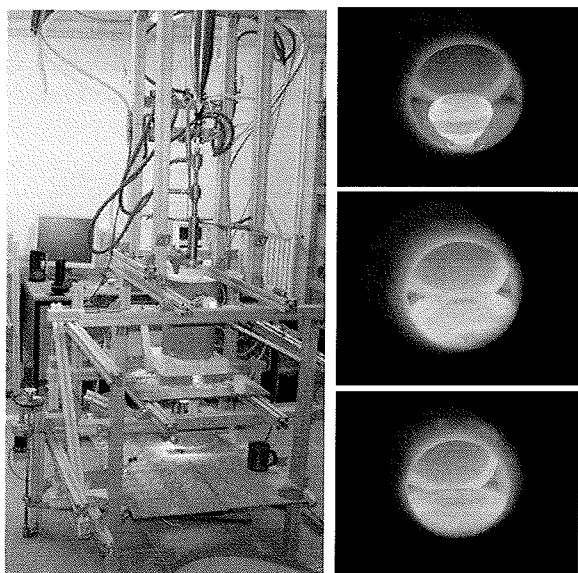
2. Eksperimentalni sistem

2.1 Sinteza fluorescentnih monokristalov

V raziskavah uporabljeni kristali so bili izdelani po Verneuilovem postopku. V ta namen je bila zgrajena posodobljena verzija laboratorijske peči za rast monokristalov, ki je posebno primerna predvsem za safirje, rubine in špinele /6/.

Posodobljena verzija Verneuilove peči za rast monokristalov, ki je prikazana na sliki 1, zagotavlja široke možnosti izdelave sintetičnih monokristalov /7/. Na sliki je prikazan tudi potek rasti kristala safirja pri 2050 °C od začetnega kristala do končnega premera, tako kakor se vidi skozi kontrolno odprtino. Sintetizirali smo različne kristale, ki so primerni za temperaturne meritve. Izdelali smo tudi kristale YAG in YAP dopirane z redkimi zemljami in več aluminatnih kristalov /13,15, 16, 17/. Med njimi so – poleg v prispevku prikazanih – še: $\text{Cr}^{3+}:\text{YAlO}_3$ – Cr:YAP, $\text{Tb}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ – Tb:YAG, $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ – Pr:YAG, $\text{Tb}^{3+}:\text{YAlO}_3$ – Tb:YAP, $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ – Yb:YAG, $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ – Eu:YAG, $\text{Dy}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ – Dy:YAG, SrAl_2O_4 : Eu^{2+} : Dy^{3+} , CaAl_2O_4 : Eu^{2+} : Nd^{3+} .

Za meritve temperature je mogoče uporabiti tudi kristale v praškasti obliki. V nekaterih primerih je praškasti material potreben zaradi nanosa na merjeni objekt.



Slika 1: Laboratorijska peč in potek rasti kristala

2.2 Merilna oprema

Osnovni instrument je bil spektrometer OceanOptics USB4000, ki omogoča priključitev na prenosni računalnik brez dodatnega napajanja. Uporabili smo različne svetlobne vire, kakor so cenene LED diode različnih valovnih dolžin za osvetljevanje prek optičnega vlakna in diodni laser valovnih dolžin 405 nm in 532 nm za osvetljevanje pri brezdotikalnem merjenju. Za določanje značilnic kristalov na osnovi fosforjev /8/ smo izdelali grelni blok s primerjalno temperaturno meritvijo z uporovnim temperaturnim zaznavalom Pt100. Vključili smo tudi optične komponente različnih izdelovalcev in profesionalni optični sistem firme Hamamatsu A10043 z zrcalom 455 nm. Za snemanje poteka temperaturnih značilnic je bila oprema podprta z National Instruments LabView platformo in z DAQ merilno opremo NI-USB-6221. Za merjenje teh sprememb potrebujemo detektorje s hitrim frekvenčnim odzivom in fotopomoževalko za šibke vire svetlobe /8/. Pri drugem dvobarvnem merilnem načelu imamo stalno ali bliskovno osvetljevanje. Merimo odziv v obliki temperaturno odvisnega razmerja vrhov dveh spektralnih črt, ki ju oddaja osvetljeni kristal /9/.

V tem prispevku je opisan sistem za merjenje temperature s Cr dopiranimi kristali in USB spektrometrom. Isto merilno načelo je mogoče uporabiti tudi na drugih termografskih materialih, ki imajo lastnost, da je več spektralnih črt bolj ali manj temperaturno občutljivih. Idealno bi bilo, če bi bila ena spektralna črta neobčutljiva na temperaturo. Fluorescenčni materiali s temi lastnostmi lahko delujejo kot dvobarvni premazi. Pomembno je, da osvetljujemo z enim virom svetlobe in da je možno preprosto ločiti svetlobo dveh emitiranih črt /10/.

2.3 Programska oprema

Eksperimentalni sistem upravlja prenosni računalnik, ki je s spektrometrom povezan prek Omni gonilnika. Razvili smo lastno programsko opremo v okolju SpectraSuite za komu-

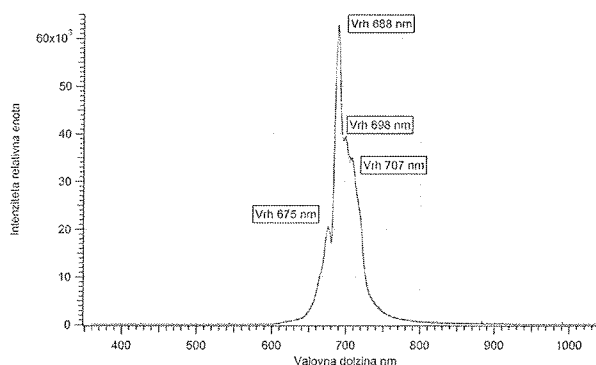
nikacijo merilnega sistema s spektrometrom in linearizacijo, za vrednotenje spektra in za prikaz temperature pa v programskem okolju Visual Basic. Merilni sistem je univerzalen in omogoča obdelavo in vpis kalibracijske krivulje za različne tipe kristalov.

Programska oprema je tudi podlaga za izvedbo samostojnega merilnega sistema. Iz priloženih vezalnih shem je razvidna končna verzija temperaturne merilne sonde na načelu fluorescence. Večina merilnih funkcij poteka neposredno v spektrometru, vključno z obdelavo merilnih signalov. Prilaganje poteka prek izračuna parametrov, ki je del aplikacijske programske opreme. Gonilnik spektrometra omogoča uporabo teh funkcij iz različnih programskih okolij, zato smo lahko preizkusili tudi okolje LabView in programsko okolje Visual Basic. V aplikacijski programski opremi sta izdelana tudi grafični vmesnik in linearizacija izmerjenih vrednosti z uporabo polinomske funkcije, katere parametri so potrebni za izvedbo kalibracijskega postopka.

3. Rezultati

3.1 Fluorescenčni spekter izdelanih monokristalov

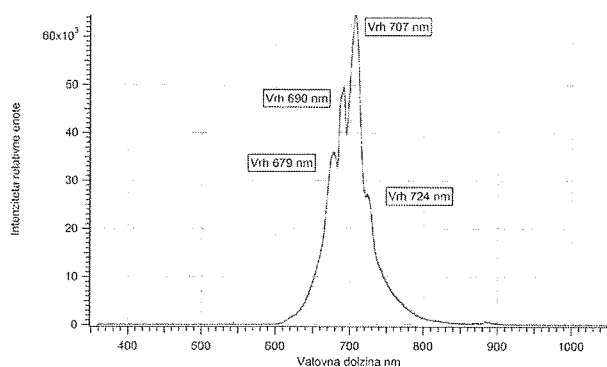
Na slikah 2 in 3 sta prikazana fluorescenčna spektra dveh od večjega števila izdelanih monokristalov pri 25 °C. Kot vzbujevalni vir pri brezdotikalnem merjenju smo uporabili lasersko diodo, ki oddaja stalno modro svetlobo moči 5 mW in z valovno dolžino 405 nm, pri merilnem sistemu z optičnim vlaknom pa je uporabljena šibkejša 400 nm LED dioda. Oba kristala imata 4 izrazite vrhove, ki so različno občutljivi na temperaturo.



Slika 2: Spekter Cr:špinel ($Cr:MgAl_2O_4$), vzbujen s 400 nm LED pri 25 °C

3.2 Temperaturna odvisnost

Iz izmerjenega fluorescenčnega spektra je razvidno, da ima špinel štiri spektralne vrhove (slika 2). Vsi intenzitetni vrhovi so odvisni od temperature. Da se izognemo merjenju in računanju z absolutnimi vrednostmi, je smotrno uporabiti razmerja vršnih intenzitet za različne kombinacije vrhov. Za naš merilni sistem smo uporabili razmerje intenzitetnih vrhov pri valovnih dolžinah 675 nm in 688 nm, ki je se je pokazal

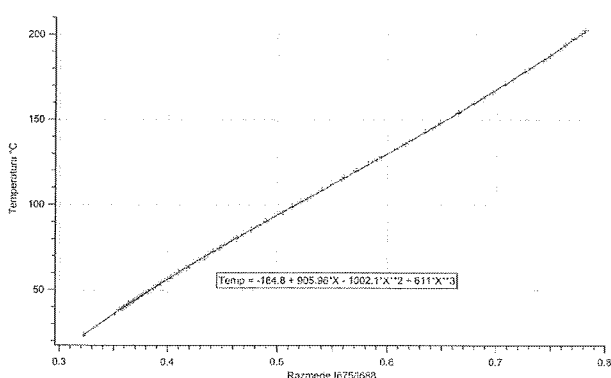


Slika 3: Spekter Cr:YAG ($Cr^{3+} Y_3Al_5O_{12}$), vzbujen s 400 nm LED pri 25 °C

lo kot najbolj občutljivo na temperaturne spremembe. Z LabView razvojnim sistemom smo posneli zvezo med temperaturo kristala in razmerjem intenzivnosti, ki je prikazana v obliki točk na diagramu na sliki 4. Odvisnost razmerja fluorescence od temperature je aproksimirana s polinomom tretje stopnje, kakor je prikazano na sliki 4 z modro krivuljo, ki se zelo dobro prilega izmerjenim točkam. Vzbujanje kristala špinela je prav tako kakor pri rubinu možno z zeleno svetlobo ali UV svetlobo. Povezavo odvisnosti razmerja intenzitete fluorescence od temperature predstavlja splošna polinomska funkcija,

$$T\text{ }^{\circ}\text{C} = K_0 + K_1 \cdot x + K_2 \cdot x^2 + K_3 \cdot x^3 \quad (1)$$

K_0 do K_3 so koeficienti polinoma, x je razmerje intenzitet izbranega para spektralnih vrhov.



Slika 4: Zveza med temperaturo in razmerjem fluorescenčnih vrhov za špinel

Za vsak tip kristala smo posneli odvisnost razmerja vrhov od temperature in jo po metodi najmanjših kvadratov aproksimirali s polinomsko funkcijo, katere aproksimacijske koeficiente smo vnesli kot parametre v aplikacijsko programsko opremo.

Za kristal špinela, ki je dopiran z 0,5 wt % Cr_2O_3 , in za razmerje vrhov pri 675 nm in 688 nm smo dobili naslednjo polinomsko povezavo:

$$T\text{ }^{\circ}\text{C} = -184,8 + (905,96) \cdot x + (-1002,1) \cdot x^2 + (611) \cdot x^3 \quad (2)$$

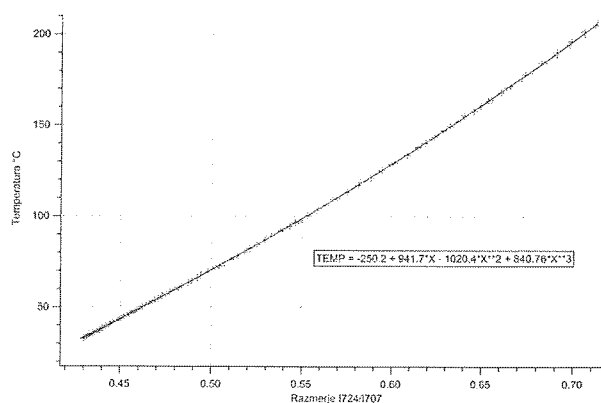
Kristal špinela je primeren za uporabo v meritvi temperature po dvobarvnem merilnem načelu. Pri njem je primereno vzbujanje s svetlobo valovne dolžine blizu 400 nm ali s cenejšim virom svetlobe 530 nm.

Tudi kristal YAG dopiran z 0,5 wt % Cr_2O_3 ima štiri spektralne vrhove (slika 3).

V tem primeru smo za razmerje vrhov pri 724 nm in 707 nm dobili naslednji polinom:

$$T\text{ }^{\circ}\text{C} = -250,2 + (941,7) \cdot x + (-1020,4) \cdot x^2 + (840,76) \cdot x^3 \quad (3)$$

Povezava med razmerjem fluorescenčnih vrhov in temperaturo je prikazana na sliki 5. in je bila posneta na enak način kot pri špinelu.



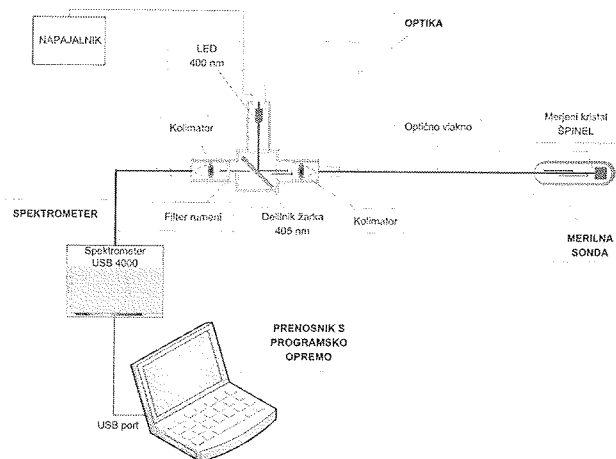
Slika 5: Zveza med temperaturo in razmerjem fluorescenčnih vrhov za YAG

S kromom dopirani YAG kristal je primeren za uporabo v meritvi temperature po dvobarvnem merilnem načelu. Pri njem je primerno vzbujanje s svetlobo valovne dolžine blizu 400 nm. Sprememba razmerja intenzitete fluorescence je dovolj velika, da omogoča občutljivost meritve 0,1 K na območju od 20 °C do 200 °C.

3.3 Prototipa merilnega sistema

Izdelana sta dva prototipa merilnega sistema, ki imata zelo podobno merilno opremo (sliki 6 in 7). Pri prvi merilni verigi je vzbujevalni žarek usmerjen prek kolimatorske leče v optično vlakno. Na drugem koncu vlakna je merilni kristal v obliki merilnega zaznavala /4/. Med kristalom in optičnim vlaknom mora biti optična in mehanska povezava, to pa je mogoče zagotoviti z lepljenjem kristala ali dopiranjem konice vlakna. Ker so optična vlakna navadno iz silicijevega oksida SiO_2 , je dopiranje mogoče le pri silikatnem kristalu. Lepljenje je mogoče le s transparentnimi lepili, ki so tudi temperaturno in UV obstojna. Zaradi različnih termičnih raztezkov SiO_2 vlakna in keramičnega kristala so takšni spoji težko izvedljivi in zahtevajo posebna lepila. Tedaj je svetlobni vir lahko tudi LED dioda, saj zadošča manjša jakost svetlobe. Vsako merilno zaznavalo je treba umeriti. Koeficienti polinoma in fluorescenčni vrhovi karakterizirajo merilni kristal. Valovna dolžina osvetljevanja je odvisna od tipa kristala in od njegovega področja največje absorpcije vz-

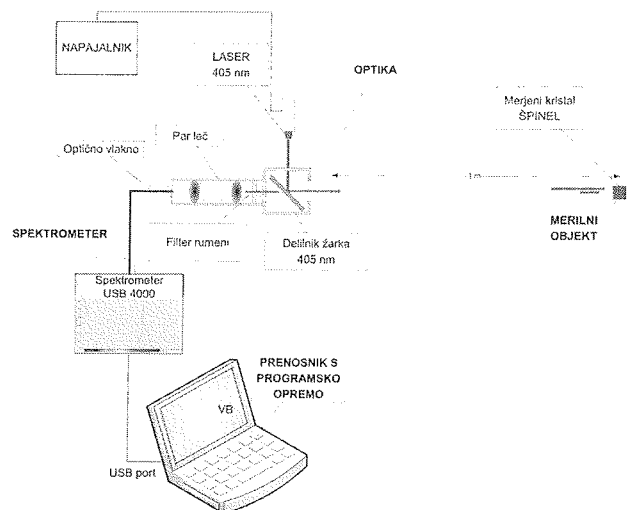
bujalne svetlobe. Optična povezava med kristalom in vlaknom /4/ je bila izvedena s povezavo kristala in enega optičnega vlakna, po katerem se prenaša vzbujanje in istočasno odziv.



Slika 6: Merilni sistem z optičnim vlaknom

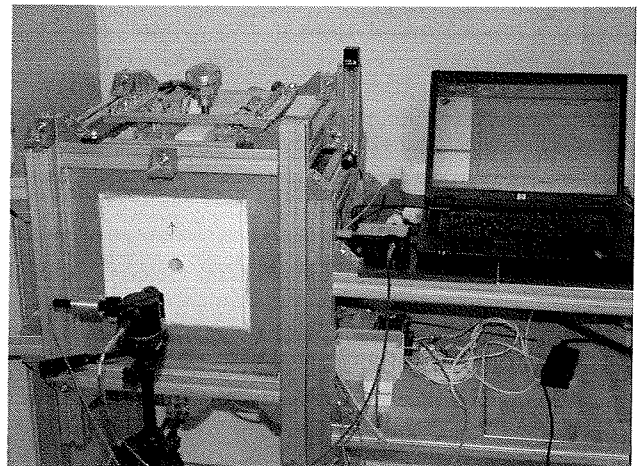
V drugi merilni verigi za brezdotikalno meritev je kontinuirni laserski vir, ki omogoča vzbujanje iz razdalje nekaj metrov. Svetloba, ki jo fluorescira kristal, se zbira s sistemom leč in usmerja prek kolimatorja v optično vlakno spektrometra. S to merilno opremo je mogoče brezdotikalno meriti temperaturo in je kot takšna uporabna za meritve fluorescenčnih ognjevarnih premazov, pri katerih se skušamo izogniti direktnemu kontaktu ali pa ta sploh ni mogoč. Pri izbiri filtrov je treba upoštevati spektralni profil ozadja v različnih merilnih situacijah. Vsekakor je ugodneje, če je spekter emisije kristala pomaknjen proti modremu področju, kjer infrardeči spekter ozadja lahko preprosto izločimo. V našem primeru so spektralne črte v rdečem področju, to pa je bilo dovolj dobro za razvoj merilne metode. Kristali, kakor je BAM BaMgAl₁₀O₁₇:Eu ali YAG:Dy (ima emisijo pri 455 nm in 497 nm), so zelo primerni tudi s tega stališča /5/. Programska oprema omogoča preprosto prilagoditev na različne fluorescenčne materiale. Parametri so valovne dolžine vrhov fluorescence, katerih razmerje se izračunava, in polinomski koeficienti ter nekateri parametri, povezani z delovanjem in občutljivostjo spektrometra. Programska oprema omogoča tudi hkratno zapisovanje merjenih vrednosti v spremenljivem rastru v datoteko, ki jo je možno obdelovati s klasično programsko opremo ali prikazati v grafikonu.

Na sliki 8 je prikazan merilni sistem za brezdotikalno merjenje temperature. Vidni so optični blok z diodnim laserskim modulom na stojalu pred električno pečjo, spektrometer in prenosni računalnik z grafičnim vmesnikom. Spektrometer ima dovolj veliko optično občutljivost, tako da smo v večini primerov lahko izvajali meritve s časom vzorčenja 100 ms in krajše. Merilni sistem s pečjo je pripravljen za brezdotikalno merjenje v temperaturnem območju do 1400 °C – z njim bomo v nadaljnjih raziskavah testirali uporabo tudi drugih kristalov. Zato je konstrukcija peči prilagojena potrebam testnega merilnega sistema. Tako je



Slika 7: Brezdotikalna meritev temperature

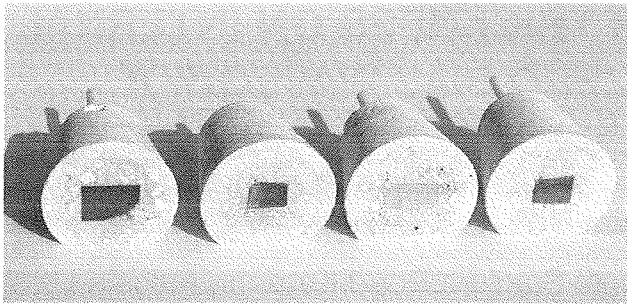
vgrajen primerjalni termopar PtRh-Pt, ki se dotika merilnega kristala, zalitega v keramičnem nosilcu, in programska oprema za snemanje in prikaz merilnih podatkov in za njihovo analizo. Pri meritvah do 400 °C pa je predvidena primerjalna meritev s Pt100 uporovnim zaznavalom in s pripadajočim merilnim pretvornikom.



Slika 8: Sistem za brezdotikalno merjenje temperature

V območju do 400 °C je mogoče uporabljati s kromom dopirane kristale. Na sliki 9 so prikazani različni kristali, zaliti v keramičnem nosilcu in pripravljeni za testiranje.

V temperaturnem razponu od 25 °C do 200 °C je točnost merilnega sistema boljša od ± 0,4 °C. Pri tem je največji del izmerjenega odstopanja zaradi zakasnitve pri primerjalni meritvi temperature oksidnega kristala s Pt100 zaznavalom, ki ima tudi svojo termično vztrajnost. Za višje temperature so primerni kristali, dopirani z redkimi zemljami, na primer z Dy dopirani YAG. Do nedavnega je bil disprozij edini poznani aktivator iz družine redkih zemelj, ki kaže odziv v obliki razmerja intenzivnosti fluorescence pri visokih temperaturah /10/. Merilni sistem omogoča uporabo različnih merilnih oksidnih kristalov – z lastnostjo temperaturno odvis-



Slika 9: Različni kristali v keramičnem nosilcu

nega razmerja vrhov fluorescence – za različna temperaturna območja. Nadaljnji koraki začelih raziskav bodo usmerjeni v razvoj nanofluorescenčnih materialov, ki se potencialno lahko uporabljajo kot temperaturni fluorescenčni premazi ali kot inteligentni ognjevarni premazi /10/, /18/ in pri razvoju merilne opreme za določanje temperaturnega stanja v različnih industrijskih aplikacijah .

4. Sklepi

Rezultati opravljenih raziskav so pomembni za nadaljnji razvoj merilne opreme za merjenje temperature na temelju fluorescence oksidnih monokristalov. Načrtovana in izdelana je univerzalna cenovno ugodna prenosna merilna oprema, ki omogoča preprosto prilagoditev na različne tipe dvo-barvnih merilnih fosforjev. S tem lahko optimalno prilagodimo merilni sistem na zahtevano aplikacijo in merilno področje temperatur od kriogenskega do visokih temperatur. Pri iskanju primernih fluorescenčnih materialov je bil obdelan širok spekter dosegljive novejšje strokovne literature s področja lastnosti oksidnih kristalov in spremljajoče patentne dokumentacije. Izdelani so bili eksperimentalni oksidni monokristali na lastni tehnološki opremi, in to po Verneuilovem postopku. Pri izdelavi merilne opreme je potekalo razvojno delo načrtno od izbire najbolj temeljnih sestavnih elementov do konfiguriranja končnega merilnega sistema, ki omogoča snemanje temperaturnih karakteristik oksidnega monokristala, določanje korekcijskih funkcij ter shranjevanje in obdelavo izmerjenih signalov. Merilna oprema je primerna tudi za uporabo na fluorescenčnih temperaturnih premazih, na primer v nanotermometriji /19/.

5. Literatura

- /1/ K. T. V. Grattan in Z. Y. Zhang: Fiber Optic Fluorescence Thermometry, Chapman and Hall, London, 1995
- /2/ V. C. Ferricola, T. Sun, Z. Y. Zhang in K. T. V. Grattan: Investigations on exponential lifetime measurements for fluorescence thermometry. *Review of Scientific Instruments*, zv. 71, št. 7, julij 2000
- /3/ De Huang in Hui Hu: Molecular tagging thermometry for transient temperature mapping within a water droplet. *Optics Letters*, zv. 32, št. 24/15. december 2007
- /4/ Babnik, A., Kobe, A., Kuzman, D., Bajsić, I., Možina, J.: Improved probe geometry for fluorescence-based fibre-optic temperature sensor. *Sensors and Actuators, A. Physical*, zv. A 57, pp. 203–207, 1996

- /5/ Gustaf Sarner, Mattias Richter in Marcus Alden: Investigations of blue emitting phosphors for thermometry. *Meas. Sci. Technol.* 19, 125304 (10pp), 2008
- /6/ Verneuil, Auguste Victor Luise, *Process for producing synthetic sapphires*, Patent US 988, 230, 28. mar. 1911
- /7/ Križan, Janez: Sinteza in fluorescence oksidnih monokristalov : 1. podiplomski seminar. Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2008
- /8/ A. L. Heyes, S. Seefeldt, J. P. Feist: Two-colour phosphor thermometry for surface temperature measurement, *Optics & Laser Technology*, 38 pp. 257–265, 2006
- /9/ Maria Cristina Vergara: Window Glass Temperature With a Fluorescence Intensity Ratio Optical Fibre Sensor, A thesis for degree of Master of Science, Optical Technology Research Laboratory/School of Electrical Engineering, Victoria University, 2003
- /10/ Ashiq Hussain Khalid in Konstantinos Kontis: Thermographic Phosphors for High Temperature Measurements: Principles, Current State of the Art and Recent Applications. *Sensors* 8, 5673–5744, 2008
- /11/ J. Someya, C. Nojiri, H. Aizawa, T. Katsumata, S. Komuro in T. Morikawa: Fluorescence Thermometer Application of Cr Doped Spinel Crystals, SICE-ICASE International Joint Conference 2006, 18.–21. okt. 2006, in Bexco, Busan, Korea
- /12/ M. Kaneda, K. Orihara, H. Aizawa, T. Katsumata, S. Komuro in T. Morikawa: Thermo-Sensor Based on Peak Intensity Ratio of Photoluminescence from Cr Doped YAG Crystals, SICE-ICASE International Joint Conference 2006, 18.–21. okt. 2006, in Bexco, Busan, Korea
- /13/ J. Someya, C. Nojiri, H. Aizawa, T. Katsumata, S. Komuro in T. Morikawa: Fluorescence Thermo-Sensor Sheet Using Cr Doped YA103 Crystals, SICE-ICASE International Joint Conference 2006, 18.–21. okt. 2006, in Bexco, Busan, Korea
- /14/ T. L. Phan in S. C. Yu, M. H. Phan, T. P. J. Han.: Photoluminescence Properties of Cr³⁺-Doped MgAl₂O₄ Natural Spinel. *Journal of the Korean Physical Society*, zv. 45, št. 1, julij 2004, pp. 63–66
- /15/ Kokta, M., Stone - Sundberg, Jennifer: Spinel Articles and Methods for Forming Same. WO 2005/031048 A1, Patent
- /16/ Falckenberg, R.: Verneuil Apparatus for Growing Spinel-Type Oxide, United States Patent US 3,876.382, 8. apr. 1975
- /17/ William M. Yen, Shigeo Shionoya, Hajime Yamamoto: Phosphor Handbook, Second Edition, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, 2006
- /18/ S. W. Allison, D. L. Beshears, M. R. Cates, M. Paranthaman: LED-induced fluorescence diagnostics for turbine and combustion engine thermometry, <http://www.ornl.gov/phosphors>
- /19/ Jaebeom Lee and Nicholas A. Kotov: Thermometer design at the nanoscale. *Nanotoday*, zv. 2, št. 1, pp. 48–51, 2007

J. Križan,
AMI d. o. o., Trstenjakova 5, SI-2250 Ptuj

I. Bajsić; J. Možina
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo,
Aškerčeva 6, SI-1000 Ljubljana