

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2017

Bc. Milan Munzar

Univerzita Pardubice

Fakulta chemicko-technologická

Vyšetření nestechiometrie In v CuInTe_2 a jejího vlivu na
termoelektrické vlastnosti CuInTe_2

Milan Munzar

Diplomová práce

2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Milan Munzar**
Osobní číslo: **C15543**
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**
Název tématu: **Vyšetření nestechiometrie In v CuInTe_2 a jejího vlivu na termoelektrické vlastnosti CuInTe_2**
Zadávající katedra: **Katedra obecné a anorganické chemie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte literární rešerši o vlastnostech sloučeniny CuInTe_2 zejména s ohledem na její nestechiometrii a termoelektrické vlastnosti.
2. Připravte řadu polykrystalických vzorků systému $\text{CuIn}_{1-x}\text{Te}_2$ (připravte vzorky s různou nestechiometrií In, zejména vzorky s podstechiometrií In).
3. Polykrystalické vzorky charakterizujte pomocí rentgenové difrakční analýzy, měřením teplotních závislostí elektrické vodivosti, Hallova a Seebeckova koeficientu a tepelné vodivosti, případně dalšími dostupnými metodami.
4. Diskutujte experimentální výsledky.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Dle literární rešerše vyplývající ze zadaného tématu.

Vedoucí diplomové práce:

RNDr. Petr Janíček, Ph.D.

Ústav aplikované fyziky a matematiky

Konzultant diplomové práce:

Ing. Vladimír Kucek, Ph.D.

Katedra obecné a anorganické chemie

Datum zadání diplomové práce: **28. února 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2017**



prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

L.S.



prof. Ing. Zdeněk Černošek, CSc.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 8. února 2017

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne: 12. 5. 2017

Milan Munzar

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu RNDr. Petru Janíčkovi, PhD za pomoc s tvorbou diplomové práce a jeho vstřícný přístup. Dále pak Ing. Vladimíru Kuckovi, PhD za praktickou i odbornou pomoc. Poděkování patří také doc. Ing. Ludvíku Benešovi, CSc., doc. Ing. Evě Černoškové, CSc., Ing. Milanu Vlčkovi, CSc., Ing. Tomáši Plecháčkovi, Ph.D. a Mgr. Janě Kašparové, Ph.D. za spolupráci při získávání údajů pro experimentální část práce.

Tato práce byla podpořena Centrem materiálů a nanotechnologií Fakulty chemicko-technologické a projekty LM2015082 a ED4.100/11.0251 financovanými Ministerstvem školství mládeže a tělovýchovy České Republiky, kterým bych na tomto místě rád poděkoval.

ANOTACE

Sloučenina CuInTe_2 dovoluje relativně velké odchylky od stechiometrie, díky nízkým energiím tvorby nativních defektů. Tato práce je věnována studiu vlivu nestechiometrie India na transportní a termoelektrické vlastnosti systému $\text{CuIn}_{1-x}\text{Te}_2$. Popisuje a pokouší se interpretovat, jak se se změnou nestechiometrie India ve vzorcích mění jejich elektrická vodivost, Seebeckův koeficient, tepelná vodivost a Hallův koeficient, s využitím teoretických prací, pojednávající o nativních defektech těchto systémů.

KLÍČOVÁ SLOVA

CuInTe_2 , termoelektrické vlastnosti, optimalizace, nestechiometrie

TITLE

Study of nonstoichiometry of Indium in CuInTe_2 and its influence to thermoelectric properties of CuInTe_2 .

ANNOTATION

Compound CuInTe_2 allows relatively large deviations from stoichiometry due to the low energies of formation of native defects. This paper is devoted to the study of the effect of nonstoichiometry of Indium on the transport and thermoelectric properties of the $\text{CuIn}_{1-x}\text{Te}_2$ system. It describes and attempts to interpret, how changes in Indium content affects electrical conductivity, Seebeck coefficient, thermal conductivity, and Hall coefficient, with use of theoretical works on native defects of these systems.

KEYWORDS

CuInTe_2 , Thermoelectric properties, optimalization, nonstoichiometry

OBSAH

1.	ÚVOD.....	11
2.	TEORETICKÁ ČÁST	12
2.1.	Parametr termoelektrické účinnosti	12
2.2.	Elektrické transportní vlastnosti TE materiálů	14
2.2.1.	Seebeckův koeficient	14
2.2.2.	Elektrická vodivost	15
2.2.3.	Optimalizace termoelektrických materiálů	16
2.2.3.1.	Power faktor	16
2.2.3.1.	Band engineering	18
2.2.3.1.	Manipulace s rozptylem nositelů	20
2.2.3.2.	PGEC	22
2.3.	Tepelný transport v TE	23
2.3.1.	Elektrický příspěvek k tepelné vodivosti	24
2.3.2.	Mřížkový příspěvek k tepelné vodivosti	24
2.3.3.	Optimalizace tepelné vodivosti	26
2.3.3.1.	Rozptyl fononů	26
2.4.	CuInTe ₂	27
2.4.1.	Základní vlastnosti CuInTe ₂	28
2.4.2.	Bodové poruchy v CIT	30
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	33
3.1.	Příprava vzorků	33
3.2.	Charakterizace složení a struktury	34
3.2.1.	Difrakce rentgenového záření	34
3.2.1.1.	Rentgenodifrakční analýza	34
3.2.2.	Diferenční termická analýza	35
3.2.3.	SEM A EDX	37
3.3.	Měření transportních vlastností	38
3.3.1.	Měření Seebeckova koeficientu a elektrické vodivosti	38
3.3.2.	Měření tepelné vodivosti	39
3.3.3.	Měření Hallova jevu	40
3.3.3.1.	Měření Hallovy konstanty	41
4.	VÝSLEDKY A DISKUZE	43
4.1.	Rentgenodifrakční analýza	43
4.2.	Diferenční termická analýza	46

4.3.	SEM EDX analýza	47
4.4.	Měření Hallova jevu	48
4.5.	Měření elektrické vodivosti a Seebeckova koeficientu.....	51
4.6.	Tepelná vodivost	53
4.7.	Parametr termoelektrické účinnosti	55
5.	ZÁVĚR	57
6.	REFERENCE	59

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

CIT	– CuInTe ₂
DTA	– Diferenční termická analýza
DOS	– <i>Density of states</i> – hustota stavů
EDX	– <i>Energy Dispersive X-ray</i> – energiově disperzní rentgenová analýza
PF	– „ <i>power faktor</i> “ – výkonový faktor
SEM	– <i>Scanning Electron Microscopy</i> – skenovací elektronová mikroskopie
TE	– <i>termoelektrický</i>
XRD	– <i>x-ray diffraction</i> – Rentgenová difrakce
a, c	– mřížkové parametry
S	– Seebeckův koeficient
B	– indukce magnetického pole
c _p	– specifické teplo
Θ _D	– Debyeova teplota
e	– elementární náboj
E	– intenzita elektrického pole
E _g	– šířka zakázaného pásu
E _F	– Fermiho energie
F	– síla
ħ	– redukovaná Planckova konstanta
ΔH	– změna enthalpie
I	– elektrický proud
j; J	– hustota proudu; orbitální moment hybnosti
k	– vlnový vektor
κ, κ _L , κ _{el}	– tepelná vodivost, mřížkový, elektronický příspěvek
k _B	– Boltzmannova konstanta
m*	– efektivní hmotnost
N _A	– Avogadrova konstanta
n, p	– koncentrace
g(E)	– hustota stavů

η	– chemický potenciál; redukovaná fermiho mez
μ	– pohyblivost
μ_0	– permeabilita vakua
Q	– náboj
R_H	– Hallův koeficient
ρ	– hustota; měrný elektrický odpor
τ	– relaxační čas
U_H	– Hallovo napětí
V	– objem elementární buňky
σ	– měrná elektrická vodivost

1. ÚVOD

Studie po celém světě se již řadu let zabývají hledáním alternativních zdrojů energie. Jedná se například o energii vody, vzduchu, slunečního záření, geotermální energii, spalování biomasy aj. Za jeden z alternativních zdrojů energie jsou považovány i tzv. termoelektrické generátory. Jedná se o zařízení pracující na bázi termoelektrických jevů, kterým je věnována pozornost již od 20. století ve snaze najít vhodné materiály, které budou efektivně převádět teplo na elektřinu a naopak.

Termoelektrické (TE) materiály jsou předmětem výzkumu chemie a fyziky pevných látek. Jedná se o skupinu polovodičů s malou šířkou zakázaného pásu. Ke stanovení účinnosti materiálů pro TE konverzi je třeba znát tzv. parametr termoelektrické účinnosti ZT , který je teplotně závislý. Každý TE materiál je vhodný pro určitou teplotní oblast, kde jeho parametr ZT dosahuje maxima.

V posledních letech byl studován ternární chalkopyrit CuInTe_2 jako slibný materiál pro TE aplikace v oblasti středních teplot. Z hlediska optimalizace byl studován především byl studován vliv dopantů na TE vlastnosti, kdy se ukázalo dopování podmřížky In jako účinnější. Ternárních chalkopyrity vykazují vysokou stabilitu i při relativně velkých odchylkách od stechiometrie a z tohoto hlediska byly už byly zkoumány TE vlastnosti při podstechiometrii Cu. Cílem této práce je prozkoumat vliv nestechiometrie In na TE vlastnosti CuInTe_2 .

6. REFERENCE

- [1] BELL, Lon E. Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. *Science (New York, N.Y.)* [online]. 2008, **321**(5895), 1457–61 [vid. 2017-04-14]. ISSN 1095-9203. Dostupné z: doi:10.1126/science.1158899
- [2] SNYDER, G. Jeffrey a Eric S. TOBERER. Complex thermoelectric materials. *Nature Materials* [online]. 2008, **7**(2), 105–114 [vid. 2017-04-12]. ISSN 1476-1122. Dostupné z: doi:10.1038/nmat2090
- [3] ZHANG, Xiao a Li-Dong ZHAO. Thermoelectric materials: Energy conversion between heat and electricity. *Journal of Materiomics* [online]. 2015, **1**(2), 92–105 [vid. 2017-05-01]. ISSN 23528478. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmat.2015.01.001
- [4] TRITT, Terry M. a M. A. SUBRAMANIAN. Thermoelectric Materials, Phenomena, and Applications: A Bird's Eye View. *MRS Bulletin* [online]. 2006, **31**(3), 188–198 [vid. 2017-04-12]. ISSN 0883-7694. Dostupné z: doi:10.1557/mrs2006.44
- [5] ZEIER, Wolfgang G., Alex ZEVALKINK, Zachary M. GIBBS, Geoffroy HAUTIER, Mercuri G. KANATZIDIS a G. Jeffrey SNYDER. Thinking Like a Chemist: Intuition in Thermoelectric Materials. *Angewandte Chemie International Edition* [online]. 2016, **55**(24), 6826–6841 [vid. 2017-05-02]. ISSN 14337851. Dostupné z: doi:10.1002/anie.201508381
- [6] YANG, Jiong, Lili XI, Wujie QIU, Lihua WU, Xun SHI, Lidong CHEN, Jihui YANG, Wenqing ZHANG, Ctirad UHER a David J SINGH. On the tuning of electrical and thermal transport in thermoelectrics: an integrated theory–experiment perspective. *npj Computational Materials* [online]. 2016, **2**, 15015 [vid. 2017-04-05]. ISSN 2057-3960. Dostupné z: doi:10.1038/npjcompumats.2015.15
- [7] GAYNER, Chhatrasal a Kamal K. KAR. Recent advances in thermoelectric materials. *Progress in Materials Science* [online]. 2016, **83**, 330–382 [vid. 2017-04-18]. ISSN 00796425. Dostupné z: doi:10.1016/j.pmatsci.2016.07.002
- [8] GOLDSMID, H J. *Introduction to thermoelectricity* [online]. Heidelberg; New York: Springer. 2010. ISBN 9783642007163 3642007163 9783642007156 3642007155. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-00716-3>
- [9] LIU, Wei, Xiaojian TAN, Kang YIN, Huijun LIU, Xinfeng TANG, Jing SHI, Qingjie ZHANG a Ctirad UHER. Convergence of Conduction Bands as a Means of Enhancing Thermoelectric Performance of n -Type Mg₂Si_{1-x}Sn_x Solid Solutions. *Physical Review Letters* [online]. 2012, **108**(16), 166601 [vid. 2017-04-14]. ISSN 0031-9007. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRevLett.108.166601
- [10] ZEIER, Wolfgang G. New tricks for optimizing thermoelectric materials. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* [online]. 2017, **4**, 23–28 [vid. 2017-05-01]. ISSN 24522236. Dostupné z: doi:10.1016/j.cogsc.2017.02.003
- [11] ZHANG, Jiawei, Ruiheng LIU, Nian CHENG, Yubo ZHANG, Jihui YANG, Ctirad UHER, Xun SHI, Lidong CHEN a Wenqing ZHANG. High-Performance Pseudocubic Thermoelectric Materials from Non-cubic Chalcopyrite Compounds. *Advanced Materials* [online]. 2014, **26**(23), 3848–3853 [vid. 2017-04-01]. ISSN 09359648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201400058
- [12] MEHDIZADEH DEHKORDI, Arash, Mona ZEBARJADI, Jian HE a Terry M. TRITT. Thermoelectric power factor: Enhancement mechanisms and strategies for higher performance thermoelectric materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports* [online]. 2015, **97**, 1–

- 22 [vid. 2017-05-09]. ISSN 0927796X. Dostupné z: doi:10.1016/j.mser.2015.08.001
- [13] HEREMANS, Joseph P, Vladimir JOVOVIC, Eric S TOBERER, Ali SARAMAT, Ken KUROSAKI, Anek CHAROENPHAKDEE, Shinsuke YAMANAKA a G Jeffrey SNYDER. Enhancement of thermoelectric efficiency in PbTe by distortion of the electronic density of states. *Science (New York, N.Y.)* [online]. 2008, **321**(5888), 554–7 [vid. 2017-04-14]. ISSN 1095-9203. Dostupné z: doi:10.1126/science.1159725
- [14] FOX, A M. Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties, 4th edn., by Peter Y. Yu and Manuel Cardona. *Contemporary Physics* [online]. 2012, **53**(3), 279–280. Dostupné z: doi:10.1080/00107514.2012.661781
- [15] YU, Bo, Mona ZEBARJADI, Hui WANG, Kevin LUKAS, Hengzhi WANG, Dezhi WANG, Cyril OPEIL, Mildred DRESSELHAUS, Gang CHEN a Zhifeng REN. Enhancement of Thermoelectric Properties by Modulation-Doping in Silicon Germanium Alloy Nanocomposites. *Nano Letters* [online]. 2012, **12**(4), 2077–2082 [vid. 2017-04-15]. ISSN 1530-6984. Dostupné z: doi:10.1021/nl3003045
- [16] TRITT, Terry M. *Thermal Conductivity : Theory, Properties, and Applications*. B.m.: Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2004. ISBN 9780306483271.
- [17] ORTIZ, Brenden R., Haowei PENG, Armando LOPEZ, Philip A. PARILLA, Stephan LANY, Eric S. TOBERER, D. SHIN, Y. WANG, L. Q. CHEN a Z. K. LIU. Effect of extended strain fields on point defect phonon scattering in thermoelectric materials. *Phys. Chem. Chem. Phys.* [online]. 2015, **17**(29), 19410–19423 [vid. 2017-04-16]. ISSN 1463-9076. Dostupné z: doi:10.1039/C5CP02174J
- [18] LI, Zhou, Chong XIAO, Shaojuan FAN, Yu DENG, Wenshuai ZHANG, Bangjiao YE a Yi XIE. Dual Vacancies: An Effective Strategy Realizing Synergistic Optimization of Thermoelectric Property in BiCuSeO. *Journal of the American Chemical Society* [online]. 2015, **137**(20), 6587–6593 [vid. 2017-04-16]. ISSN 0002-7863. Dostupné z: doi:10.1021/jacs.5b01863
- [19] PEIERLS, Rudolf E. (Rudolf Ernst). *Bird of passage : recollections of a physicist* [online]. B.m.: Princeton University Press, 1985 [vid. 2017-04-16]. ISBN 0691083908. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Umklaup_scattering
- [20] SHAY, J.L., J.H. WERNICK, J.L. SHAY a J.H. WERNICK. CHAPTER 1 – INTRODUCTION. In: *Ternary Chalcopyrite Semiconductors: Growth, Electronic Properties, and Applications* [online]. 1975, s. 1–2. ISBN 9780080178837. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-017883-7.50006-8
- [21] YUSUFU, Aikebaier, Ken KUROSAKI, Atsuko KOSUGA, Tohru SUGAHARA, Yuji OHISHI, Hiroaki MUTA a Shinsuke YAMANAKA. Thermoelectric properties of $\text{Ag}_{1-x}\text{GaTe}_2$ with chalcopyrite structure. *Applied Physics Letters* [online]. 2011, **99**(6), 61902 [vid. 2017-03-30]. ISSN 0003-6951. Dostupné z: doi:10.1063/1.3617458
- [22] LIU, Ruiheng, Lili XI, Huili LIU, Xun SHI, Wenqing ZHANG, Lidong CHEN, E. BUCHER, V. RIEDE, C. UHER, D. VASHAEE, X. Y. CHEN, J. M. LIU, M. S. DRESSELHAUS, G. CHEN a Z. F. REN. Ternary compound CuInTe_2 : a promising thermoelectric material with diamond-like structure. *Chemical Communications* [online]. 2012, **48**(32), 3818 [vid. 2017-03-30]. ISSN 1359-7345. Dostupné z: doi:10.1039/c2cc30318c
- [23] WEI, J, H J LIU, L CHENG, J ZHANG, J H LIANG, P H JIANG, D D FAN a J SHI. Tuning the carrier concentration to improve the thermoelectric performance of CuInTe_2 compound [online]. nedatováno [vid. 2017-05-16]. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1508/1508.06009.pdf>

- [24] LI, Yapeng, Qingsen MENG, Yuan DENG, Hong ZHOU, Yulan GAO, Yiyun LI, Jiangfeng YANG a Jiaolin CUI. High thermoelectric performance of solid solutions $\text{CuGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Te}_2$ ($x = 0-1.0$). *Applied Physics Letters* [online]. 2012, **100**(23), 231903 [vid. 2017-03-31]. ISSN 0003-6951. Dostupné z: doi:10.1063/1.4726109
- [25] KUČEK, V., C. DRASAR, J. NAVRATIL, T. PLECHACEK a L. BENES. Thermoelectric properties of Ni-doped CuInTe_2 . *Journal of Physics and Chemistry of Solids* [online]. 2015, **83**, 18–23 [vid. 2017-03-31]. ISSN 00223697. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpcs.2015.03.012
- [26] CHENG, N., R. LIU, S. BAI, X. SHI a L. CHEN. Enhanced thermoelectric performance in Cd doped CuInTe_2 compounds. *Journal of Applied Physics* [online]. 2014, **115**(16), 163705 [vid. 2017-03-31]. ISSN 0021-8979. Dostupné z: doi:10.1063/1.4872250
- [27] KUČEK, V., C. DRASAR, J. KASPAROVA, T. PLECHACEK, J. NAVRATIL, M. VLČEK a L. BENES. High-temperature thermoelectric properties of Hg-doped CuInTe_2 . *Journal of Applied Physics* [online]. 2015, **118**(12), 125105 [vid. 2017-03-31]. ISSN 0021-8979. Dostupné z: doi:10.1063/1.4931600
- [28] KOSUGA, Atsuko, Theerayuth PLIRDPRING, Ryosuke HIGASHINE, Mie MATSUZAWA, Ken KUROSAKI a Shinsuke YAMANAKA. High-temperature thermoelectric properties of $\text{Cu}_{1-x}\text{In}_x\text{Te}_2$ with a chalcopyrite structure. *Applied Physics Letters* [online]. 2012, **100**(4), 42108 [vid. 2017-03-31]. ISSN 0003-6951. Dostupné z: doi:10.1063/1.3678044
- [29] KNIGHT, K.S. The crystal structures of CuInSe_2 and CuInTe_2 . *Materials Research Bulletin* [online]. 1992, **27**(2), 161–167 [vid. 2017-04-01]. ISSN 00255408. Dostupné z: doi:10.1016/0025-5408(92)90209-1
- [30] ZEIER, Wolfgang G., Hong ZHU, Zachary M. GIBBS, Gerbrand CEDER, Wolfgang TREMEL, G. Jeffrey SNYDER, G. J. SNYDER, W. TREMEL, S. GORSSE, G. J. SNYDER, A. CABOT, J. R. MORANTE a A. CABOT. Band convergence in the non-cubic chalcopyrite compounds $\text{Cu}_2\text{MGeSe}_4$. *J. Mater. Chem. C* [online]. 2014, **2**(47), 10189–10194 [vid. 2017-05-02]. ISSN 2050-7526. Dostupné z: doi:10.1039/C4TC02218A
- [31] ŠULCOVÁ, Petra a Ludvík BENEŠ. *Experimentální metody v anorganické technologii*. 2. vyd. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2008. ISBN 978-80-7395-058-3.
- [32] STEPHAN, Christiane. Structural trends in off stoichiometric chalcopyrite type compound semiconductors [online]. 2011 [vid. 2017-04-30]. Dostupné z: http://www.diss.fu-berlin.de/diss/servlets/MCRFileNodeServlet/FUDISS_derivate_000000009948/Dissertation_C_Stephan_final.pdf
- [33] MATSUSHITA, Hiroaki, Saburo ENDO a Taizo IRIE. Thermodynamical Properties of I-III-VI₂-Group Chalcopyrite Semiconductors. *Japanese Journal of Applied Physics* [online]. 1991, **30**(Part 1, No. 6), 1181–1185 [vid. 2017-05-16]. ISSN 0021-4922. Dostupné z: doi:10.1143/JJAP.30.1181
- [34] ОЛЕКСЕЮК, І. Д., Е. М. КАДИКАЛО, Л. П. МАРУШКО, О. Ф. ЗМІЙ, О. В. ПАРАСЮК, О. Є. ЖБАНКОВ, I. D. OLEKSEYUK, E. M. KADYKALO, L. P. MARUSHKO, O. F. ZMIY, O. V. PARASYUK a O. Ye. ZHBANKOV. Фазові рівноваги у системі $\text{Cu}_2\text{Te-In}_2\text{Te}_3$ [online]. 2010 [vid. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://esnuir.eenu.edu.ua/handle/123456789/6191?mode=full>
- [35] MÁRQUEZ, R a C RINCÓN. Defect physics of ternary chalcopyrite semiconductors. *Materials Letters* [online]. 1999, **40**(2), 66–70 [vid. 2017-05-10]. ISSN 0167577X. Dostupné z: doi:10.1016/S0167-577X(99)00050-6
- [36] ZHANG, S. B., Su-Huai WEI, Alex ZUNGER a H. KATAYAMA-YOSHIDA. Defect physics of the

- CuInSe₂ chalcopyrite semiconductor. *Physical Review B* [online]. 1998, **57**(16), 9642–9656 [vid. 2017-05-11]. ISSN 0163-1829. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRevB.57.9642
- [37] ZHANG, S B, Su-Huai WEI a Alex ZUNGER. Stabilization of Ternary Compounds via Ordered Arrays of Defect Pairs [online]. 1997 [vid. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.colorado.edu/zunger-materials-by-design/sites/default/files/attached-files/306.pdf>
- [38] RINCÓN, C., S. M. WASIM, G. MARÍN, J. M. DELGADO a J. CONTRERAS. Effect of ordered arrays of native defects on the crystal structure of In- and Ga-rich Cu-ternaries. *Applied Physics Letters* [online]. 2003, **83**(7), 1328–1330 [vid. 2017-05-10]. ISSN 0003-6951. Dostupné z: doi:10.1063/1.1600516
- [39] *Scanning Electron Microscopy (SEM) - Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, HZDR* [online]. [vid. 2017-05-15]. Dostupné z: <https://www.hzdr.de/db/Cms?pNid=67>
- [40] *LSR -3 Linseis - Seebeck Coefficient & Electric Resistivity Unit : LINSEIS - Thermische Analyse - Hersteller für Messsysteme* [online]. [vid. 2017-04-27]. Dostupné z: <https://www.linseis.com/en/our-products/seebeck-coefficient-electric-resistivity/lsr-3/>
- [41] WEI, Su-Huai a S.B. ZHANG. Defect properties of CuInSe₂ and CuGaSe₂. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* [online]. 2005, **66**(11), 1994–1999 [vid. 2017-05-14]. ISSN 00223697. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpcs.2005.10.003
- [42] BILC, Daniel, S D MAHANTI, Eric QUAREZ, Kuei-Fang HSU, Robert PCIONEK a M G KANATZIDIS. Resonant states in the electronic structure of the high performance thermoelectrics AgPbmSbTe_{2+m}: the role of Ag-Sb microstructures. *Physical review letters* [online]. 2004, **93**(14), 146403 [vid. 2017-04-14]. ISSN 0031-9007. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRevLett.93.146403
- [43] DOMAIN, C., S. LARIBI, S. TAUNIER a J.F. GUILLEMOLES. Ab initio calculation of intrinsic point defects in CuInSe₂. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* [online]. 2003, **64**(9), 1657–1663 [vid. 2017-05-18]. ISSN 00223697. Dostupné z: doi:10.1016/S0022-3697(03)00208-7
- [44] PASHINKIN, A. S. a V. A. FEDOROV. Phase Equilibria in the Cu–Te System. *Inorganic Materials* [online]. 2003, **39**(6), 539–554 [vid. 2017-05-12]. ISSN 00201685. Dostupné z: doi:10.1023/A:1024003932461
- [45] LOUADI, Souad, Abeer YASSIN, Hélène BROS a Robert CASTANET. Thermodynamic investigation of the Ag₂Te and Cu₂Te eutectic alloys. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 1995, **224**(2), 351–354 [vid. 2017-05-12]. ISSN 09258388. Dostupné z: doi:10.1016/0925-8388(95)01560-4