

Univerzita Pardubice

Fakulta chemicko-technologická

Vlastnosti keramiky $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ s příměsemi

Bc. Michaela Buriánková

Diplomová práce

2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michaela Buriánková**
Osobní číslo: **C15540**
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**
Název tématu: **Vlastnosti keramiky $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ s příměsemi**
Zadávací 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 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ (pozornost soustředte zejména na vliv stechiometrie a příměsí).
2. Připravte řadu polykrystalických vzorků systému $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ s nestechiometrií selenu a s příměsemi vybraných prvků 14 a 17 skupiny.
3. Polykrystalické vzorky charakterizujte
 - a) RTG difrakcí,
 - b) měřením teplotních závislostí elektrické vodivosti, Seebeckova koeficientu a tepelné vodivosti.
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:

Ing. Pavlína Ruleová, 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 vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena 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 17. 5. 2017

.....

Bc. Michaela Buriánková

Poděkování

Ráda bych poděkovala Ing. Pavlíně Ruleové, Ph.D. a profesorovi Ing. Petru Lošťákovi, DrSc. za věcné rady a úsilí věnované ke zpracování diplomové práce, ochotu a spolehlivost.

Souhrn

Tato diplomová práce se zabývá vlivem nestechiometrie a dopování na termoelektrické vlastnosti polykrystalického $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ prvky 14. a 17. skupiny periodické tabulky. Byly připraveny následující řady vzorků:

- $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1\pm x}$ ($x = 0; 0,01; 0,02$)
- $\text{Bi}_{2-x}\text{Ge}_x\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$ ($x = 0,05; 0,075; 0,1$)
- $\text{Bi}_{1,925}\text{M}_{0,075}\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$ ($M = \text{Ge}, \text{Sn}, \text{Pb}$) a $\text{Bi}_2\text{O}_{1,9}\text{Cl}_{0,1}\text{Se}_{1,01}$.

Tyto vzorky byly charakterizovány rentgenovou difrakční analýzou a byla změřena jejich elektrická vodivost, tepelná vodivost a Seebeckův koeficient v rozmezí teplot 300-773 K. Z naměřených hodnot byl vypočítán výkonový faktor PF a parametr termoelektrické účinnosti ZT .

Klíčová slova

$\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$, termoelektrické vlastnosti, dopování, nestechiometrie

Title

Properties of $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ ceramics

Annotation

This thesis deals with the effect non-stoichiometry and doping on the thermoelectric properties of polycrystalline $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ by elements 14th and 17th group of periodic table. Several series of samples were prepared:

- $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1\pm x}$ ($x = 0; 0,01; 0,02$)
- $\text{Bi}_{2-x}\text{Ge}_x\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$ ($x = 0,05; 0,075; 0,1$)
- $\text{Bi}_{1,925}\text{M}_{0,075}\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$ ($M = \text{Ge}, \text{Sn}, \text{Pb}$) and $\text{Bi}_2\text{O}_{1,9}\text{Cl}_{0,1}\text{Se}_{1,01}$.

These samples were characterized by X-ray diffraction and by measuring their electrical conductivity, thermal conductivity, Seebeck coefficient in the temperature range 300-773 K. From the measured values the power factor PF and the figure of merit ZT were calculated.

Keywords

$\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$, thermoelectric properties, doping, non-stoichiometry

Obsah

Úvod.....	10
1 Teoretická část	12
1.1 Vlastnosti $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$	12
1.1.1 Monokrystalický $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$	13
1.1.2 Polykrystalický $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$	14
1.2 Vliv dopování na vlastnosti $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$	16
1.2.1 Dopování cínem.....	16
1.2.2 Dopování stříbrem	17
1.2.3 Dopování chlórem.....	18
1.3 Vliv nestechiometrie na vlastnosti $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$	19
1.4 Vliv podmínek přípravy na vlastnosti $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$	20
1.5 Teoretické výpočty vlastností $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$	20
1.6 Transportní vlastnosti polovodičů a kovů	23
1.6.1 Termoelektrický jev (Seebeckův jev)	23
1.6.2 Elektrická vodivost	26
1.6.3 Tepelná vodivost.....	27
1.6.4 Parametr termoelektrické účinnosti	28
1.7 Složení a struktura materiálu.....	29
1.7.1 Rentgenová difrakční analýza.....	29
2 Praktická část	32
2.1 Příprava a charakterizace materiálu	32
2.1.1 Příprava vzorků.....	32
2.1.2 Rentgenová difrakční analýza.....	33
2.1.3 Elektrická vodivost a Seebeckův koeficient	33
2.1.4 Tepelná vodivost a tepelná difuzivita	33
3 Výsledky a jejich diskuze	34
3.1 Vliv nestechiometrie na vlastnosti $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$	34
3.2 Studium vlivu prvků 14. skupiny periodické tabulky na vlastnosti $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$...	43
3.3 Studium vlivu příměsí atomů chlóru na vlastnosti $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$	55
4 Závěr	62
5 Citovaná literatura.....	65

Seznam ilustrací a tabulek

Obrázek 1: Krystalová struktura $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ s vrstevnatým $(\text{Na}_{0,25}\text{Bi}_{0,75})_2\text{O}_2\text{Cl}$ typem struktury (11).....	12
Obrázek 2: Teplotní závislosti (a) elektrické vodivosti, (b) Seebeckova koeficientu, (c) tepelné vodivosti a (d) parametru ZT pro $\text{Bi}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_2\text{Se}$ (18).	17
Obrázek 3: Teplotní závislosti parametru ZT pro $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1-x}\text{Cl}_x$ (20).....	18
Obrázek 4: Teplotní závislosti parametru ZT pro $\text{Bi}_{2-x}\text{O}_2\text{Se}$ (11).	19
Obrázek 5: Závislost elektrické vodivosti na teplotě ve srovnání s experimentálními výsledky pro vzorky připravené při vysokém tlaku a různých teplotách 400, 500 a 550 °C. Vložený graf ukazuje elektrickou vodivost jako funkci energie (23).....	21
Obrázek 6: Závislost Seebeckova koeficientu na teplotě ve srovnání s experimentálními výsledky pro vzorky připravené při vysokém tlaku a různých teplotách 400, 500 a 550 °C. Vložený graf ukazuje Seebeckův koeficient jako funkci energie (23).	21
Obrázek 7: Seebeckův jev (25).	23
Obrázek 8: Průběh Seebeckova jevu (8).....	24
Obrázek 9: Závislost elektrické vodivosti σ , Seebeckova koeficientu S a výkonového faktoru na koncentraci volných nositelů proudu (8).....	29
Obrázek 10: Bragg – Brentano geometrie difraktometru (30).....	29
Obrázek 11: K odvození Braggovy rovnice (6).....	30
Obrázek 12: Prvky z 14. skupiny periodické tabulky (31).	32
Obrázek 13: RTG difraktogram práškového $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$	34
Obrázek 14: Teplotní závislosti Seebeckova koeficientu S vzorků $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1\pm x}$	35
Obrázek 15: Teplotní závislosti elektrické vodivosti σ vzorků $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1\pm x}$	37
Obrázek 16: Teplotní závislosti celkové tepelné vodivosti κ_{celk} vzorků $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1\pm x}$	38
Obrázek 17: Teplotní závislosti elektronické složky tepelné vodivosti κ_{el} vzorků $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1\pm x}$	38
Obrázek 18: Teplotní závislosti mřížkové složky tepelné vodivosti κ_{m} vzorků $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1\pm x}$	39
Obrázek 19: Teplotní závislosti výkonového faktoru PF vzorků $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1\pm x}$	41
Obrázek 20: Teplotní závislosti koeficientu termoelektrické účinnosti ZT vzorků $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1\pm x}$	42
Obrázek 21: RTG difraktogram vzorku $\text{Bi}_{1,925}\text{Ge}_{0,075}\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$	43
Obrázek 22: Teplotní závislost Seebeckova koeficientu S vzorků $\text{Bi}_{2-x}\text{Ge}_x\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$	45
Obrázek 23: Teplotní závislosti elektrické vodivosti σ vzorků $\text{Bi}_{2-x}\text{Ge}_x\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$	46
Obrázek 24: Teplotní závislosti výkonového faktoru PF vzorků $\text{Bi}_{2-x}\text{Ge}_x\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$	47
Obrázek 25: Teplotní závislosti tepelné vodivosti κ_{celk} vzorků $\text{Bi}_{2-x}\text{Ge}_x\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$	48
Obrázek 26: Teplotní závislosti elektronické složky tepelné vodivosti κ_{el} vzorků $\text{Bi}_{2-x}\text{Ge}_x\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$	49
Obrázek 27: Teplotní závislosti mřížkové složky tepelné vodivosti κ_{m} vzorků	49

Obrázek 28: Teplotní závislosti parametru ZT vzorků $\text{Bi}_{2-x}\text{Ge}_x\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$	50
Obrázek 29: Teplotní závislosti Seebeckova koeficientu S vzorků $\text{Bi}_{1,925}\text{M}_{0,075}\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$ (M = Ge, Sn, Pb).....	51
Obrázek 30: Teplotní závislosti elektrické vodivosti σ vzorků $\text{Bi}_{1,925}\text{M}_{0,075}\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$ (M = Ge, Sn, Pb).....	53
Obrázek 31: Teplotní závislosti celkové tepelné vodivosti κ_{celk} vzorků $\text{Bi}_{1,925}\text{M}_{0,075}\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$ (M = Ge, Sn, Pb).....	54
Obrázek 32: Teplotní závislosti koeficientu termoelektrické účinnosti ZT vzorků $\text{Bi}_{1,925}\text{M}_{0,075}\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$ (M = Ge, Sn, Pb).....	54
Obrázek 33: RTG difraktogram vzorku $\text{Bi}_2\text{O}_{1,9}\text{Cl}_{0,1}\text{Se}_{1,01}$	56
Obrázek 34: Teplotní závislosti Seebeckova koeficientu S vzorků $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$ a $\text{Bi}_2\text{O}_{1,9}\text{Cl}_{0,1}\text{Se}_{1,01}$	57
Obrázek 35: Teplotní závislosti elektrické vodivosti σ vzorků $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$ a $\text{Bi}_2\text{O}_{1,9}\text{Cl}_{0,1}\text{Se}_{1,01}$	58
Obrázek 36: Teplotní závislosti výkonového faktoru PF vzorků $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$ a $\text{Bi}_2\text{O}_{1,9}\text{Cl}_{0,1}\text{Se}_{1,01}$	58
Obrázek 37: Teplotní závislosti celkové tepelné vodivosti κ_{celk} vzorků $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$ a $\text{Bi}_2\text{O}_{1,9}\text{Cl}_{0,1}\text{Se}_{1,01}$	59
Obrázek 38: Teplotní závislosti elektronické složky tepelné vodivosti κ_{el} vzorků $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$ a $\text{Bi}_2\text{O}_{1,9}\text{Cl}_{0,1}\text{Se}_{1,01}$	60
Obrázek 39: Teplotní závislosti mřížkové složky tepelné vodivosti κ_{m} vzorků $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$ a $\text{Bi}_2\text{O}_{1,9}\text{Cl}_{0,1}\text{Se}_{1,01}$	60
Obrázek 40: Teplotní závislosti koeficientu termoelektrické účinnosti ZT vzorků $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$ a $\text{Bi}_2\text{O}_{1,9}\text{Cl}_{0,1}\text{Se}_{1,01}$	61
Obrázek 41: Porovnání nejvyšších hodnot parametru ZT z dostupné literatury s našimi naměřenými hodnotami keramiky $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$	63
Tabulka 1: Fyzikální parametry $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$	13
Tabulka 2: Mřížkové parametry a příměsi ve vzorcích $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1\pm x}$	35
Tabulka 3: Transportní parametry pro nestechiometrický vzorek $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1\pm x}$ při teplotě 300 a 773 K.....	40
Tabulka 4: Výsledky RTG analýzy a hustota vzorků $\text{Bi}_{2-x}\text{Ge}_x\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$	44
Tabulka 5: Hodnoty Seebeckova koeficientu S, elektrické vodivosti σ , tepelné vodivosti κ a parametru ZT pro teploty 300 a 773 K vzorků $\text{Bi}_{2-x}\text{Ge}_x\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$	45

Úvod

V současné době se řada vědců zabývá hledáním a zefektivňováním alternativních zdrojů energie. Alternativními zdroji jsou například vodní a větrné elektrárny, dále získávání energie z biomasy, ze slunečního záření a také využívání odpadního tepla pomocí zařízení využívajících polovodičové materiály s termoelektrickými (TE) vlastnostmi, tzv. termoelektrické generátory, které by mohly hrát důležitou roli v globálním řešení udržitelné energie. Termoelektrické materiály mohou být dále používány jako pevné Peltierovy články, které se většinou používají ke chlazení. Jejich výhodou jsou: malé rozměry, dlouhá životnost (neobsahují pohyblivé součásti), dosažení nízkých teplot, okamžitý efekt chlazení a absolutně tichý provoz. Jedná se o zařízení, která pracují na bázi termoelektrických jevů (Seebeckův jev, Peltierův jev, elektrická a tepelná vodivost). TE materiálům je věnována pozornost již od 20. století ve snaze najít vhodné materiály pro efektivní převod tepla na elektřinu a naopak (1), (2).

Aby bylo možné porovnávat termoelektrické materiály je potřeba znát parametr termoelektrické účinnosti Z [K^{-1}], respektive jeho bezrozměrný ekvivalent ZT . ZT je definováno jako: $ZT = S^2\sigma T/\kappa$, kde S je Seebeckův koeficient, σ je měrná elektrická vodivost materiálu, T je absolutní teplota a κ je celková tepelná vodivost materiálu (2). Pro zvýšení parametru ZT je tedy potřeba dosáhnout co nejvyšších hodnot elektrické vodivosti (tedy nízkého elektrického odporu) a Seebeckova koeficientu a naopak co nejnižších hodnot tepelné vodivosti. Ovšem tyto parametry jsou na sobě závislé. Jsou společně propojeny například koncentrací nositelů náboje. Čím je elektrická vodivost vyšší, tím nižší je Seebeckův koeficient a elektrická složka tepelné vodivosti je také vyšší a tím i celková tepelná vodivost. Výzkum materiálů, které mají velmi nízkou tepelnou vodivost, je jedním ze způsobů, jak dosáhnout vysoké termoelektrické účinnosti. Materiály s hodnotou parametru $ZT > 1$ se považují za vysoce účinné.

Bi_2O_2Se se z hlediska termoelektrických vlastností studuje buď v monokrystalickém nebo polykrystalickém stavu nebo ve formě keramiky. Monokrystalický Bi_2O_2Se má horší mechanické vlastnosti a jeho příprava je obtížná a časově náročná. Výhodou polykrystalického Bi_2O_2Se jsou lepší mechanické vlastnosti a také by měl mít teoreticky menší tepelnou vodivost než monokrystalický Bi_2O_2Se , z důvodu výskytu poruch v jeho struktuře. V této práci se zabývám termoelektrickými

vlastnostmi $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ ve formě keramiky, což je polykrystalický $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$, který obsahuje ještě další fáze a z tohoto důvodu by měla být tepelná vodivost ještě menší než u polykrystalického $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ s jednou fází a tím tedy vyšší parametr ZT .

Cílem této práce bylo prozkoumat vliv nestechiometrie selenu a vliv dopantů na termoelektrické vlastnosti polykrystalického $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$. Byly připraveny následující vzorky:

- $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{0,99}$; $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$; $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$; $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}_{1,02}$
- $\text{Bi}_{1,95}\text{Ge}_{0,05}\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$; $\text{Bi}_{1,925}\text{Ge}_{0,075}\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$; $\text{Bi}_{1,9}\text{Ge}_{0,1}\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$
- $\text{Bi}_{1,925}\text{Sn}_{0,075}\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$; $\text{Bi}_{1,925}\text{Pb}_{0,075}\text{O}_2\text{Se}_{1,01}$; $\text{Bi}_2\text{O}_{1,9}\text{Cl}_{0,1}\text{Se}_{1,01}$.

Složení vzorků bylo zkoumáno práškovou rentgenovou difrakční analýzou. Vzorky pro měření byly připraveny lisováním za tepla, metodou hot-pressing. U vzorků byla měřena jejich teplotní závislost elektrické vodivosti, tepelné vodivosti a Seebeckova koeficientu v rozmezí teplot 300-773 K. Z naměřených hodnot byl vypočítán výkonový faktor PF a parametr termoelektrické účinnosti ZT .

Teoretická část této práce se zaměřuje na vlastnosti $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ a je doplněna o rešerši vlivu dopantů, vlivu způsobu přípravy na termoelektrické vlastnosti $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ a teoretické výpočty jeho vlastností. Dále v této části nalezneme teoretický popis metod, které byly použity k experimentům a také popis termoelektrických jevů a transportních vlastností polovodičů a kovů. Tato část byla vypracována především za použití knih (3), (4), (5), skript (6) a diplomových prací (7), (8), (9). V praktické části je popsána příprava vzorků, následuje shrnutí naměřených výsledků a jejich diskuze.

5 Citovaná literatura

1. **Snyder, G., J. a Toberer, E., S.** Complex thermoelectric materials. *Nature materials*. 2008, 7, stránky 105-114.
2. **Nolas, G. S., Sharp, J. a Goldsmid, H. J.** *Thermoelectric / Basic Principles and New Material Developments*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2001. str. 128.
3. **Frank, H.** *Fyzika a technika polovodičů*. Praha : SNTL, 1990. ISBN 80-03-00401.
4. **Kittel, Ch.** *Úvod do fyziky pevných látek*. 1. Praha : Academia, 1985. ISBN 21-103-85.
5. **Šalimonová, K. V.** *Fyzika polovodičů*. Bratislava : Alfa, 1978.
6. **Šulcová, P. a Beneš, L.** *Experimentální metody v anorganické technologii*. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2002. ISBN 80-7194-420-3.
7. **Šraitrová, K.** *Optimalizace termoelektrických vlastností SnSe – studium vlivu dopantů*. Univerzita Pardubice. 2016. Diplomová práce.
8. **Dvořáková, R.** *Studium transportních a termoelektrických vlastností sloučeniny CuInTe₂ dotované rtuťí*. Univerzita Pardubice. 2016. Diplomová práce.
9. **Ruleová, P. Ing.** *Příprava a transportní vlastnosti vrstevnatých polovodičů pro termoelektrické aplikace*. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2013. Disertační práce.
10. **Boller, H.** *Monatsh. Chem.* 1973, 104, str. 916.
11. **Zhan, B., a další.** Enhanced thermoelectric properties of Bi₂O₂Se ceramics by Bi deficiencies. *Journal of Electroceramics*. 2015, stránky 175-179.
12. **Schmidt, P., a další.** *Z. Anorg. Allg. Chem.* 2000. str. 626.
13. **Oppermann, H., a další.** *Z. Anorg. Allg. Chem.* 1996. str. 622.
14. **Oppermann, H., a další.** *Z. Naturforsch.* 1999. str. 54b.
15. **Drašar, Č., a další.** Preparation and transport properties of Bi₂O₂Se single crystals. *J. Electron. Mater.* 2012.
16. **Ruleová, P., a další.** *Bi₂O₂Se - a prospective thermoelectric material?* Paříž : Paříž ECT 2008, 2008. stránky P2-35-1.
17. **Ruleová, P., a další.** Thermoelectric properties of Bi₂O₂Se. *Materials chemistry and physics*. 2010, Sv. 119, 1-2, stránky 299-302.
18. **Zhan, B., a další.** High-temperature thermoelectric behaviors of Sn-doped n-type Bi₂O₂Se ceramics. *Journal of Electroceramics*. 2015, 34.

19. **Zhan, B., a další.** Enhanced thermoelectric performance of Bi₂O₂Se with Ag addition. 2015.
20. **Xing, T., a další.** Enhanced thermoelectric performance of n-type Bi₂O₂Se by Cl-doping at Se site. *Journal of the American Ceramic Society*. 2017, 100.
21. **Xing, T., a další.** Optimization of the thermoelectric properties of Bi₂O₂Se ceramics by altering the temperature of spark plasma sintering. *Journal of Electroceramics*. 2016, Sv. 37, 1, stránky 66-72.
22. **Quang, T. V., Lim, H. a Kim, M.** Temperature and carrier-concentration dependences of the thermoelectric properties of bismuth selenide dioxide compounds. *J. Korean. Phys. Soc.* 2012, 61.
23. **Liangruksa, M.** Effects of negative response of electron transport to thermoelectric properties of Bi₂O₂Se. *Computational Materials Science*. 2016, 120, stránky 142-148.
24. **Donling, G., a další.** Strain effect to optimize thermoelectric properties of doped Bi₂O₂Se via Tran-Blaha modified Becke-Johnson density functional theory. *The journal of physical chemistry*. 2013.
25. **Encyklopedie fyziky.** [Online] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>.
26. **Heikes, R. R. a Ure, R.W.** *Thermoelectricity: Science and Engineering*. New York : Interscience Publisher, 1961. str. 108.
27. **Heikes, R. R. a Ure, R.W.** *Thermoelectricity: Science and Engineering*. New York : Interscience Publisher, 1961. str. 43.
28. **Franz, R. a Weidemann, G.** *An. Phys.* 1853.
29. **Dekker, A. J.** *Fyzika pevných látek*. Praha : Academia, 1966.
30. **<http://astronuklfyzika.cz>.** [Online] <http://astronuklfyzika.cz/JadRadMetody.htm>.
31. [Online] <https://www.bankovnikod.cz/chemicke-znacky-periodicka-tabulka-prvku/>.
32. **Brown, G., I.** *Úvod do anorganické chemie*. Praha : SNTL, 1982. str. 314.
33. **Lošťák, P. a Votinský, J.** *Vybrané kapitoly z obecné chemie (Struktura atomu, chemická vazba)*. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2010. str. 40.