

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

DIPLOMOVÁ PRÁCA

2017

Bc. Lucia Hudecová

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ
KATEDRA OBECNÉ A ANORGANICKÉ CHEMIE

ABLÁCIA CHALKOGENIDOVÝCH SKIEL PULZNÝM LASEROM
DIPLOMOVÁ PRÁCA

AUTOR PRÁCE: Bc. Lucia Hudecová
VEDÚCI PRÁCE: Ing. Petr Knotek, Ph.D.

2017

UNIVERSITY OF PARDUBICE
FACULTY OF CHEMICAL-TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF GENERAL AND INORGANIC CHEMISTRY

PULSED LASER ABLATION OF THE CHALCOGENIDE GLASSES
DIPLOMA THESIS

AUTHOR: Bc. Lucia Hudecová
SUPERVISOR: Ing. Petr Knotek, Ph.D.

2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lucia Hudecová**
Osobní číslo: **C15541**
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**
Název tématu: **Ablace chalkogenidových skel pulzním laserem**
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 rešerši prací věnovaných interakci materiálů s intenzivním svazkem fotonů, zejména se zaměřením na ablaci materiálů pulzními lasery.
2. Vytvořte v binárních chalkogenidových sklech krátery pomocí pulzů s různým průměrem, intenzitou a počtem pulzů, krátery popište z hlediska topologie kráteru.
3. Porovnejte vzniklé krátery a jejich okolí z hlediska změn struktury a stupně oxidace.
4. Stanovte "laser ablation threshold" pro zvolené materiály a navrhnete klíčové parametry materiálu i opracování pro tvorbu pasivních optických elementů.
5. Diskutujte získané 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. Petr Knotek, Ph.D.

Katedra obecné a anorganické chemie

Konzultant diplomové práce:

Ing. Petr Kutálek, Ph.D.

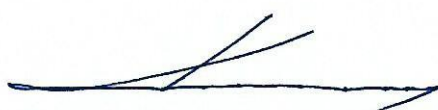
Společná laboratoř chemie pevných látek

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

Prehlasujem:

Túto prácu som vypracovala samostatne. Všetky literárne zdroje a informácie, ktoré som v práci využila, sú uvedené v zozname použitej literatúry.

Bola som oboznámená s tým, že sa na moju prácu vzťahujú práva a povinnosti vyplývajúce zo zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, hlavne so skutočnosťou, že Univerzita Pardubice má právo na uzavretie licenčnej zmluvy o užívaní tejto práce ako školského diela podľa § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tým, že pokiaľ dôjde k užívaniu tejto práce mnou alebo bude poskytnutá licencia o užívaní inému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávnená od mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré na vytvorenie diela vynaložila, a to podľa okolností až do ich skutočnej výšky.

Súhlasím s prezenčným sprístupnením svojej práce v Univerzitnej knižnici.

V Pardubiciach dňa 12.5.2017

Bc. Lucia Hudecová

Pod'akovanie:

Moje pod'akovanie patrí vedúcemu diplomovej práce, Ing. Petrovi Knotkovi Ph.D., za odborné vedenie, cenné rady a trpezlivosť pri vypracovaní diplomovej práce. Ďalej by som rada pod'akovala Ing. Petrovi Kutálkovi, Ph.D. za rady a pomoc pri interpretácii výsledkov, doc. Ing. Miloslavovi Pouzarovi, Ph.D. a Mgr. Tomášovi Vaculovičovi, Ph.D. za umožnenie merania a prístupu k laserovému ablačnému systému, Ing. Milanovi Vlčkovi, CSc. za pomoc pri meraní SEM a EDX, doc. Ing. Eve Černoškovej, CSc. za umožnenie prístupu k optickému mikroskopu a Andrei Šandovej za pomoc pri meraní vzoriek.

Nakoniec by som chcela pod'akovať mojej rodine, kamarátom a priateľovi, ktorí ma podporovali po celú dobu štúdia.

Súhrn:

Diplomová práca je zameraná na sledovanie odozvy chalkogenidových skiel systémov As_2S_3 , As_2Se_3 , GeS_2 a GeSe_2 na expozíciu UV (213 nm) pulzného nanosekundového laseru. Procesom ablácie boli vytvorené krátery s hĺbkou 4,2 – 5,8 μm pri priemernom toku laserového lúča 14,3 J/cm^2 (aktuálny fotónový tok v pulze 2,4 GW/cm^2). Reprodukovateľnosť tvorby a charakterizácie kráterov bola vysoká (odchýlka < 3%). Topografia vytvorených kráterov v týchto objemových sklách bola študovaná hlavne pomocou digitálneho holografického mikroskopu (DHM) a overená pomocou časovo náročnejšej mikroskopie atomárnych síl (AFM). Z pohľadu účinnosti ablácie (odabovaný objem na pulz) je najvhodnejšie použitie As_2S_3 (až 620 $\mu\text{m}^3/\text{pulz}$) vďaka nízkym hodnotám teploty tavenia, hustoty a množstva energie potrebného na vyparenie objemovej jednotky materiálu v porovnaní s ostatnými skúmanými sklami. Určená hodnota *laser induced ablation threshold* (LIAT) je ale najnižšia pre GeS_2 (0,05 J/cm^2) vďaka dlhšej penetračnej hĺbke žiarenia (17 nm) a nízkym hodnotám termálnej difuzivity materiálu. V poslednej časti boli vytvorené optické difrakčné mriežky do tenkých vrstiev v podobe kráterov/bodov a línií a overená ich funkčnosť pre viditeľné žiarenie.

Kľúčové slová: ablácia, chalkogenidové sklá, interakcia laser-materiál, topografia kráteru, mriežka

Summary:

This diploma thesis is focused on the response of chalcogenide glass systems As_2S_3 , As_2Se_3 , GeS_2 and GeSe_2 to exposure of UV (213 nm) pulsed nanosecond laser. Ablated craters had depth 4.2 – 5.8 μm with average laser beam fluency 14.3 J/cm^2 (actual fluency during pulse 2.4 GW/cm^2). Reproducibility of crater formation and characterization was high (deviation less than 3%). The topography of the craters created in bulk glass systems were studied mainly by digital holographic microscopy (DHM) and verified by more time-consuming method – atomic force microscopy (AFM). From the point of view of the ablation rate (ablated volume per pulse) is most convenient to use As_2S_3 (620 $\mu\text{m}^3/\text{pulse}$) due to the low volume of the melting temperature, density and amount of the energy required to vaporize volume unit of material compared to other studied glasses. However, the laser induced ablation threshold (LIAT) is the lowest for GeS_2 (0.05 J/cm^2) due to longer penetration depth of radiation and low values of thermal diffusivity. In the last part, optical diffraction gratings in the form of craters/dots and lines were created and their functionality for visible radiation was checked.

Key words: ablation, chalcogenide glasses, interaction laser-material, topography of crater, grating

OBSAH

1	ÚVOD.....	11
2	TEORETICKÁ ČASŤ	13
2.1	Sklo.....	13
2.2	Chalkogenidové sklá.....	14
2.2.1	Sklá systému As_xS_{1-x}	17
2.2.2	Sklá systému As_xSe_{1-x}	18
2.2.3	Sklá systému Ge_xS_{1-x}	19
2.2.4	Sklá systému Ge_xSe_{1-x}	20
2.3	Optické vlastnosti skiel.....	21
2.3.1	Odrazivosť	22
2.3.2	Absorpcia a priepustnosť	22
2.3.3	Optická charakterizácia objemových skiel a tenkých vrstiev	23
2.4	Elektromagnetické žiarenie	25
2.4.1	Elektromagnetické spektrum	26
2.4.2	Umelé zdroje žiarenia	27
2.5	Dôsledky interakcie žiarenie – materiál	31
2.5.1	Fotoindukované javy v chalkogenidových sklách	31
2.6	Dôsledky interakcie laser – materiál	32
2.6.1	Odozvy materiálu.....	33
2.6.2	Porovnanie nanosekundového (ns) a femtosekundového (fs) laseru.....	35
2.6.3	Interakcia UV pulzného nanolaseru s materiálom.....	36
2.6.4	Aplikácia ablácie.....	37
3	EXPERIMENTÁLNA ČASŤ.....	38
3.1	Syntéza objemových vzoriek skla As_2S_3 , As_2Se_3 , GeS_2 , $GeSe_2$	38
3.1.1	Príprava tenkých vrstiev	38
3.2	Techniky použité k charakterizácii materiálov.....	38

3.2.1	Laserové ablačné systémy	38
3.2.2	Digitálna holografická mikroskopia – DHM	40
3.2.3	Mikroskopia atomárnych síl – AFM.....	41
3.2.4	Skenovacia elektrónová mikroskopia SEM a EDX analýza.....	42
3.2.5	Optická mikroskopia.....	42
3.2.6	UV-VIS spektroskopia.....	43
3.2.7	Ramanova spektroskopia	43
4	VÝSLEDKY A DISKUSIA	44
4.1	Popis materiálov a kráterov	44
4.2	Reprodukovateľnosť ablovaných kráterov	47
4.3	Závislosť topografie kráterov na počte pulzov	48
4.4	Závislosť topografie kráterov na intenzite pulzov	52
4.5	Overenie určenia topografie a mechanické vlastnosti kráterov	54
4.6	Zobrazenie kráterov a zmena chemického zloženia	57
4.7	Popis kráterov použitím optickej mikroskopie	60
4.8	Štúdium štruktúry pomocou Ramanovej spektroskopie.....	62
4.9	Porovnanie rôznych prístrojov a vplyv inertnej atmosféry He na abláciu.....	64
4.10	Ablácia tenkých vrstiev As_2S_3	66
4.11	Ablácia difrakčných mriežok do tenkej vrstvy As_2S_3	67
5	ZÁVER	72
6	ZOZNAM SKRATIEK A ZNAČIEK	74
7	POUŽITÁ LITERATÚRA	76

1 ÚVOD

Chalkogenidové sklá patria k jedným z najznámejších amorfných materiálov. Vďaka svojej priepustnosti v blízkej a strednej infračervenej (IČ) oblasti spektra sa využívajú ako detektory IČ žiarenia, optické filtre alebo modulátory, optické materiály pre IČ oblasť spektra – šošovky, povlaky, materiál na optické vlákna či hranoly a filtre v systémoch na nočné videnie či termálne senzory [1].

Chalkogenidové sklá sú známe svojou fotocitlivosťou, pri ktorej výskume sa používa žiarenie s intenzitou stoviek mW/cm^2 . Ak je materiál vystavený vysoko intenzívnemu žiareniu s výkonom desiatok W/cm^2 (napr. z laseru), v materiáli môže dochádzať k taveniu, varu alebo ablácii. Intenzita žiarenia potrebná k vyvolaniu týchto javov je závislá na vlnovej dĺžke fotónov, penetračnej hĺbke žiarenia, absorpcii energie a jej transformácie na tepelnú energiu [2]. Ablácia je teda odstraňovanie materiálu laserom s vysokou intenzitou zo substrátu priamou absorpciou energie laserového lúča. K jej využitiu patrí napr. depozícia chalkogenidových a oxidických skiel či supervodivých materiálov, príprava pevného aerosólu v nosnom plyne pri prvkovej analýze, vytváranie mikroštruktúr a priame zapisovanie do materiálov (za účelom vytvárania optických prvkov) [3].

V iných prácach zaoberajúcich sa materiálovým výskumom už boli popísané ablácie za pomoci pulzného nanosekundového (ns) laseru emitujúceho v ultrafialovej (UV) oblasti spektra na materiáloch ako:

- i) kovy a z nich pripravených tenkých vrstiev napr. Al, Ni, Au a Cu (pomocou 20 ns pulzného laseru s vlnovou dĺžkou 355 nm) [4],
- ii) monokryštalický Si (3 ns pulzný laser s vlnovou dĺžkou 266 nm) [5],
- iii) keramika na báze Al_2O_3 (30 ns pulzný laser s vlnovou dĺžkou 248 nm) [6],
- iv) oxidické sklá na báze $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ a BK7 (10 ns pulzný laser s vlnovou dĺžkou 337 nm) [7].

Z oblasti chalkogenidov boli v literatúre nájdené iba ablácie:

- v) systému As_2Se_3 (200 – 1000 ns pulzný laser s vlnovou dĺžkou 3,2 – 5 μm) [8] alebo
- vi) AIST ($\text{Ag}_8\text{In}_{14}\text{Sb}_{55}\text{Te}_{23}$) (100 ns pulzný laser s vlnovou dĺžkou 405 nm) [9],
- vii) CuInGaSe_2 (8 ns pulzný laser s vlnovou dĺžkou 1064 nm) [10].

Vo väčšine prác bola sledovaná odozva materiálu alebo plazmy na intenzitu/počet/priemer pulzov a z nich stanovovaná hodnota, pri ktorej začína dochádzať k ablácii, tzv. *laser induced ablation threshold*, prípadne bola v materiáli vytváraná pravidelne

sa opakujúca štruktúra. V rámci chalkogenidových skiel a tenkých filmov je ale výrazne málo informácií o základnej odozve materiálu na UV ns pulzný laser.

Cieľom tejto práce bolo sledovanie odozvy základných binárnych stechiometrických chalkogenidových systémov na báze As a Ge na vysoko intenzívnu a vysoko energetickú expozíciu za použitia pulzného (doba trvania jedného pulzu 5 ns) laseru pracujúceho v UV oblasti (213 nm). Zvolené systémy boli As_2S_3 , As_2Se_3 , GeS_2 a GeSe_2 kvôli nasledujúcim dôvodom s predpokladaným vplyvom na abláciu:

- i) sú to základné, najdlhšie študované chalkogenidové systémy,
- ii) líšia sa optickými vlastnosťami (E_g^{opt} v rozmedzí 1,8 eV (As_2Se_3) až po 2,6 eV (pre GeS_2)),
- iii) majú rôzne termické vlastnosti (teploty tavenia od 310 °C (As_2S_3) do 840°C (GeS_2)),
- iv) majú rozdielne štruktúrne jednotky (As_2S_3 , As_2Se_3 – pyramídy, GeS_2 , GeSe_2 – tetraédre),
- v) sú rôzne náchylné voči oxidácii a
- vi) majú odlišnú hustotu (3,05 g/cm³ pre GeS_2 až 4,55 g/cm³ pre As_2Se_3).

Detekcia odozvy bola založená na popise topografie vytvorených kráterov (s rôznymi parametrami ablácie) a následnej charakterizácii ich okolia, ako aj samotných kráterov z hľadiska zmien štruktúry a chemického zloženia. Ďalej bol stanovený „*laser induced ablation threshold*“ a účinnosť ablácie pre všetky použité materiály. Na základe výsledkov bol zvolený materiál pre tvorbu periodicky sa opakujúcich systémov kráterov (optická mriežka) ako príklad pasívneho optického elementu.

6 ZOZNAM SKRATIEK A ZNAČIEK

A	Absorpcia
AFM	Mikroskopia atomárnych síl
AIST	Materiál zloženia $\text{Ag}_8\text{In}_{14}\text{Sb}_{55}\text{Te}_{23}$
BK7	Komerčné označenie borosilikátového skla
c_p	Teplotná entalpia
d	Hrúbka vrstvy
D	Termálna difuzivita materiálu
d	Priemer
DHM	Digitálna holografická mikroskopia
d_p	Penetračná hĺbka
E	Energia (J)
EDX	Energiovo disperzná mikroanalýza
E_g^{opt}	Optická šírka zakázaného pásu (eV)
E_η	Aktivačná energia pre viskózný tok
F_0^{av}	Priemerný tok laseru
fs	Femtosekunda
F_{th}	Minimálna hodnota toku laseru pri ktorej dochádza k ablácii
FWHM	<i>Full width at half maxima</i> - pološírka
h	Planckova konštanta (J.s)
\hbar	Redukovaná Planckova konštanta
h_a	Maximálna hĺbka ablovaného kráteru
HAZ	<i>Heat affected zone</i> - teplom zasiahnutá oblasť
H_v	Mikrotvrdosť
$I(\nu)$	Ramanova intenzita
I_0	Intenzita pôvodného žiarenia dopadajúceho na vzorku
I_A	Intenzita absorbovaného žiarenia
ICP-MS	Hmotnostná spektroskopia s indukčne viazanou plazmou
IČ	Infračervená oblasť žiarenia
I_D	Intenzita žiarenia rozptýleného od povrchu
I_R	Intenzita žiarenia odrazeného od povrchu
I^{red}	Redukovaná intenzita

I_T	Intenzita žiarenia vystupujúceho z materiálu
k	Boltzmanova konštanta
KAH	Krátkovlnná absorpčná hrana
LIAT	<i>Laser induced ablation threshold</i> - minimálna hodnota toku laseru, pri ktorej dochádza k ablácii
l_T	Difúzna vzdialenosť tepla
n	Index lomu
Nd:YAG laser	Neodýmový laser s aktívnym prostredím kryštálu Yttrium Aluminium Granát
PLD	Pulzná laserová depozícia
R	Odrazivosť
r	Polomer
s	Index lomu substrátu
SC	<i>Spin-coating</i> - rotačné nanášanie
SEM	Skenovacia elektrónová mikroskopia
T	Transmitancia
T_g	Teplota skleneného prechodu
T_m	Teplota tavenia
T_{min}	Optická priepustnosť v oblasti maxima
T_{max}	Optická priepustnosť v oblasti minima
TOF-MS	Časovo-preletový hmotnostný spektrometer
UV	Ultrafialová oblasť žiarenia
ν	Frekvencia žiarenia
VIS	Viditeľná oblasť žiarenia
ν_L	Frekvencia rozptýleného žiarenia
α	Absorpčný koeficient
α_{eff}^{-1}	Efektívna optická penetračná hĺbka
κ	Teplotná vodivosť
λ	Vlnová dĺžka
ρ	Hustota materiálu
τ	Čas doby trvania pulzu

7 POUŽITÁ LITERATÚRA

1. Kolobov, A. V. *Photo-induced metastability in amorphous semiconductors*. Wiley - VCH GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003. ISBN: 3-527-40370-1.
2. Vateva, E., *Giant photo- and thermo-induced effects in chalcogenides*. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol. 9(10), 2007, s. 3108-3114.
3. Adam, J. a Zhang, X. *Chalcogenide glasses*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2014. ISBN: 978-0-85709-345-5.
4. Bozsóki, I., Balogh, B., a Gordon, P., *355 nm nanosecond pulsed Nd: YAG laser profile measurement, metal thin film ablation and thermal simulation*. Optics & Laser Technology, Vol. 43(7), 2011, s. 1212-1218.
5. Zeng, X. J., Mao, X., Greif, R., a Russo, R. E., *Ultraviolet femtosecond and nanosecond laser ablation of silicon: ablation efficiency and laser-induced plasma expansion*. High-Power Laser Ablation V, Vol. 5448, 2004, s. 1150-1158.
6. Ihlemann, J., Scholl, A., Schmidt, H., a Wolff-Rottke, B., *Nanosecond and femtosecond excimer-laser ablation of oxide ceramics*. Applied Physics A, Vol. 60(4), 1995, s. 411-417.
7. Veiko, V. P., Kieu, Q. K., Nikonorov, N. V., Shur, V. Y., Luches, A., a Rho, S., *Laser-induced modification of glass-ceramics microstructure and applications*. Applied Surface Science, Vol. 248(1-4), 2005, s. 231-237.
8. Hari, P., Adair, J., Tolk, N., Sanghera, J., a Aggarwal, I., *Infrared laser ablation of glassy As₂Se₃*. Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 352(23-25), 2006, s. 2430-2433.
9. Dun, A., Wei, J., a Gan, F., *Patterned structures fabricated on chalcogenide phase-change thin films by laser direct writing*. Thin Solid Films, Vol. 519(11), 2011, s. 3859-3864.
10. Lee, G. J., Jeong, Y. H., Oh, C. H., Kim, E. K., a Lee, Y., *Femtosecond laser fabrication of surface-relief grating and internal diffraction grating in glasses*. Journal of the Korean Physical Society, Vol. 46, 2005, s. 175-180.
11. Hlaváč, J. *Základy technologie silikátů*. Vyd. 2, Praha : Státní nakladatelství technické literatury Praha, 1988.
12. Ležal, D. *Nekryštalické polovodiče*. ed. Macko, P. Vyd. 1, Bratislava : Alfa, Bratislava, 1988.
13. Kratochvíl, B. *Úvod do studia materiálů*. ed. Švorčík, V. and Vojtěch, D. Vyd. 1, Praha : Vydavatelství VŠCHT, Praha, 2005. ISBN: 80-7080-568-4.
14. Vojtěch, D. *Materiály a jejich mezní stavy*. ed. VŠCHT. Vyd. 1, Praha : Vydavatelství VŠCHT, Praha, 2010. ISBN: 978-80-7080-741-5.
15. Seddon, A. B., *Chalcogenide glasses: a review of their preparation, properties and applications*. Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 184, 1995, s. 44-50.
16. Matoušek, J. *Anorganické nekovové materiály*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha, 1992. ISBN: 80-708-0160-3.
17. Feltz, A. *Amorpouhs inorganic materials and glasses*. VCH Verlagsgesellschaft mbH., Weinheim, 1993. ISBN: 3-527-28421-4.
18. Aitken, B. G., Currie, S. C., Monahan, B. C., Wu, L., a Coonan, E. W. *Chalcogenide glass for low viscosity extrusion and injection molding*. Google Patents, 2006. <https://www.google.com/patents/US7116888>. [Online] [Citácia 12.3.2017]
19. Kawamoto, Y. a Tsuchihashi, S., *Properties and structure of glasses in the system As-S*. Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 5, 1971, s. 286-305.

20. Borisova, Z. U. *Glassy semiconductors*. Plenum Press, New York, 1981. ISBN: 0-306-40609-8.
21. Liu Ch'un-Hua, Pashinkin, A. S., a Novoselova, A. V., *Investigation of Ge-Se system*. Dokl. Akad. Nauk SSSR, Vol. 146(5), 1962, s. 1092-1093.
22. Fanderlík, I. *Vlastnosti skel*. Vyd. 1, Praha : Informatorium, Praha, 1996. ISBN: 80-85427-91-5.
23. Schröder, G. *Technická optika*. Vyd. 1. SNTL -Nakladatelství technické literatury, Praha, 1974.
24. Tauc, J. *Amorphous and liquid semiconductors*. ed. Tauc, J. Plenum Publishing Company Ltd, New York, 1974. ISBN: 0-306-30777-4.
25. Swanepoel, R., *Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon*. Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 16, 1983, s. 1214-1222.
26. Brown, M. S. a Arnold, C. B. *Fundamentals of laser-material interaction and application to multiscale surface modification*. Laser Precision Microfabrication, ed. Sugioka, K., Meunier, M., and Piqué, A. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, ISBN: 978-3-642-10523-4. s. 91-120.
27. Halliday, D., Resnick, R., a Walker, J. *Fyzika - Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vutium a Prometheus, Praha, 2000. ISBN: 80-214-1869-9.
28. Wikipedia, *Elektromagnetické žiarenie*.
https://sk.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_%C5%BEiarenie. [Online] [Citácia 18.2.2017]
29. Hecht, E. *Optics*. Vyd. 4, Addison Wesley, San Francisco, 2002. ISBN: 0-321-18878-0.
30. Habel, J. a kol. *Světelná technika a osvětování*. FCC PUBLIC, Praha, 1995. ISBN: 800-901985-0-3.
31. Krtilová, A. *Světlo a osvětlování*. ed. Matoušek, J. and Monzer, L. Vyd. 1, Praha : Avicenum, Praha, 1981.
32. Vrbová, M. *Lasery a moderná optika*. Prometheus, Praha, 1994 474. ISBN: 80-85849-56-9.
33. Štern, P., *Základy instrumentální analýzy v klinické biochemii*. Institut postgraduálního vzdělávání ve zdravotnictví, Praha,
<http://www1.lf1.cuni.cz/~kocna/biochem/text11.htm>. [Online] [Citácia 24.2.2017]
34. Plch, J. *Světelná technika v praxi*. IN-EL, Praha, 1999. ISBN: 80-86230-09-0.
35. Malý, P. *Optika*. Univerzita Karlova v Praze - Karolinum, Praha, 2008. ISBN: 978-80-246-1342-0.
36. Russo, R. E., Mao, X., Gonzales, J., a Yoo, J., *Femtosecond vs. nanosecond laser pulse duration for laser ablation chemical analysis*. Spectroscopy, Vol. 28(1), 2013, s. 24-39.
37. COHERENT INC., *Lasers: Understanding the Basics*.
<https://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25161>. [Online] [Citácia 21.3.2017]
38. LINTECH, spol. s r.o., *UV laser*. <http://www.lintech.cz/uv-laser>. [Online] [Citácia 12.3.2017]
39. Leonardo technology s.r.o., *Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů - 1064 nm Infra red*. <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>. [Online] [Citácia 12.3.2017]
40. Tanaka, K., Saitoh, A., a Terakado, N., *Giant photo-expansion in chalcogenide glass*. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol. 8(6), 2006, s. 2058-2065.
41. Arun, P., Vedeshwar, A., a Mehra, N., *Laser-induced crystallization in Sb₂S₃ films*. Materials Research Bulletin, Vol. 32(7), 1997, s. 907-913.

42. Knotek, P., Kincl, M., Tichý, L., Arsova, D., Ivanova, Z. G., a Ticha, H., *Oxygen assisted photoinduced changes in Ge₃₉Ga₂S₅₉ amorphous thin film*. Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 356(50–51), 2010, s. 2850-2857.
43. HILASE, *Výzkumné programy*. <http://www.hilase.cz/vyzkumne-programy>. [Online] [Citácia 21.4.2017]
44. Mao, S. *Laser ablation: fundamentals & applications*. University of California at Berkeley, Berkeley, 2005.
45. IMRA - The Femtosecond Fiber Laser Company, *Materials Processing*. <http://www.imra.com/applications/application-areas/materials-processing/#ablation>. [Online] [Citácia 28.3.2017]
46. Holmberg, P. *Laser processing of Silica based glass*. KTH – Royal Institute of Technology, Department of Applied Physics, Stockholm, 2015, ISBN: 978-91-7595-709-8.
47. Vaculovic, T., Warchilova, T., Simo, T., Matal, O., Otruba, V., Mikuska, P., a Kanický, V., *Elemental mapping of structural materials for a nuclear reactor by means of LA-ICP-MS*. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, Vol. 27(8), 2012, s. 1321-1326.
48. Kobayashi, H., Fujii, K., Nunokawa, T., Odawara, O., a Wada, H., *Surface modification of Y₂O₃: Er, Yb upconversion nanoparticles prepared by laser ablation in water*. Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 53(5S1), 2014, s. 05FK04.
49. Lyncée Tec SA, *REFLECTION DHM® R1000 Series*. <https://www.lynceetec.com/reflection-dhm/#tab-2>. [Online] [Citácia 24.3.2017]
50. RMI, s.r.o., *Digitální holografický mikroskop firmy Lyncée Tec*. <http://www.rmi.cz/digitalni-holograficky-mikroskop-firmy-lyncee-tec>. [Online] [Citácia 24.3.2017]
51. Mironov, V. L. *Fundamentals of scanning probe microscopy*. The Russian Academy of Sciences, Wikipedia, 2004. *Mikroskopie atomárních sil*. https://cs.wikipedia.org/wiki/Mikroskopie_atom%C3%A1rn%C3%ADch_sil. [Online] [Citácia 24.3.2017]
52. Šoltýs, J. *Výskum povrchov metódou atómovej silovej mikroskopie*. Elektrotechnický ústav SAV. <http://www.elu.sav.sk/old/vcite/soltys.pdf>. [Online] [Citácia 26.3.2017]
53. Cais, J. *Elektronová mikroskopie. Metalografie*. Centrum pro studium vysokého školství, Praha, 2015. http://www.csvs.cz/projekty/2014_veda_pro_zivot/data/11_KA3_Jaromir_Cais_2_Elektronova_%20mikroskopie_a_%20EDS_%20analiza_metodicka_prirucka.pdf. [Online] [Citácia 26.3.2017]
54. Mikš, A., *Zobrazovací metody v optické mikroskopii*. Katedra fyziky, FSv ČVUT, Praha, <http://www.mikroskop-mikroskopy.cz/mikroskopicke-metody/>. [Online] [Citácia 26.3.2017]
55. Novotná, R., Šilha, T., a Trávníček, Z., *Spektrální metody studia chemických látek*. Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého, Olomouc, http://agch.upol.cz/userfiles/file/pdf/Spektralni_metody.pdf. [Online] [Citácia 14.4.2017]
56. Klouda, P. *Moderní analytické metody*. Ostrava, 2003. ISBN: 80-86369-07-2.
57. Shuker, R. a Gammon, R. W., *Raman-scattering selection-rule breaking and the density of states in amorphous materials*. Physical Review Letters, Vol. 25(4), 1970, s. 222-225.
58. Černošek, Z., Holubová, J., a Černošková, E., *Kauzmann temperature and the glass transition*. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol. 7(6), 2005, s. 2941-2944.

59. Stølen, S., Johnsen, H. B., Abe, R., Atake, T., a Grande, T., *Heat capacity and thermodynamic properties of GeSe₂ at temperatures from T = (13 to 900) K. Structural phase transition at T = 423 K.* The Journal of Chemical Thermodynamics, Vol. 31(4), 1999, s. 465-477.
60. Málek, J., Chovanec, J., Svoboda, R., Taniguchi, Y., a Kawaji, H., *Heat capacity of vitreous GeSe₂.* The Journal of Chemical Thermodynamics, Vol. 81, 2015, s. 101-108.
61. Knotek, P., Chanova, E., a Rypacek, F., *AFM imaging and analysis of local mechanical properties for detection of surface pattern of functional groups.* Materials science & engineering. C, Materials for biological applications, Vol. 33(4), 2013, s. 1963-1968.
62. Element Collection, Inc., *Periodic table.* <http://www.periodictable.com/index.html>. [Online] [Citácia 10.4.2017]
63. Huang, Y., Liu, R., Lai, J., a Yi, X., *Design and fabrication of a negative microlens array.* Optics & Laser Technology, Vol. 40(8), 2008, s. 1047-1050.
64. Beadie, G., Rabinovich, W. S., Sanghera, J., a Aggarwal, I., *Fabrication of microlenses in bulk chalcogenide glass.* Optics Communications, Vol. 152(4-6), 1998, s. 215-220.
65. Knotek, P. a Tichy, L., *On photo-expansion and microlens formation in (GeSe₂)_{0.74}(Sb₂S₃)_{0.26} chalcogenide glass.* Materials Research Bulletin, Vol. 47(12), 2012, s. 4246-4251.
66. Ben-Yakar, A., Harkin, A., Ashmore, J., Byer, R. L., a Stone, H. A., *Thermal and fluid processes of a thin melt zone during femtosecond laser ablation of glass: the formation of rims by single laser pulses.* Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 40(5), 2007, s. 1447.
67. Linke, D., *Amorphous semiconductors.* Proc. Intern. Conf. Pardubice, Czechoslovakia, Vol. 1, 1978, s. 78.
68. Rosenfeld, A. a Campbell, E. E. B., *Picosecond UV-laser ablation of Au and Ni films.* Applied Surface Science, Vol. 96, 1996, s. 439-442.
69. NT-MDT Spectrum Instruments, *Phase Imaging mode.* <https://www.ntmdt-si.com/spm-principles/view/phase-imaging-mode>. [Online] [Citácia 10.4.2017]
70. Knotek, P. *AFM studie a vybrané optické vlastnosti Ag-As-S-Se amorfních filmů.* Vyd. 19. KOLOKVIUM 2010 UMCh AVCR, Ústav makromolekulární chemie AV ČR, v.v.i., 2010.
71. Bruker Corporation, *Periodic Table of Elements and X-ray Energies.* <https://www.bruker.com/hhxf>. [Online] [Citácia 13.4.2017]
72. González-Leal, J. M., *Surface and conformational characteristics of As₄₀S₆₀ glass films prepared by continuous-wave laser deposition.* Materials Research Express, Vol. 1(1), 2014, s. 015201.
73. Němec, P., Jedelský, J., Frumar, M., Štábl, M., a Vlček, M., *Structure, thermally and optically induced effects in amorphous As₂Se₃ films prepared by pulsed laser deposition.* Journal of Physics and Chemistry of Solids, Vol. 65(7), 2004, s. 1253-1258.
74. Korsalas, I. P. a Raptis, C., *Structural Raman studies of Ge_xSi_{1-x} chalcogenide glasses.* Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol. 3(3), 2001, s. 675-684.
75. Sugai, S., *Stochastic random network model in Ge and Si chalcogenide glasses.* Physical Review B, American Physical Society, Vol. 35(3), 1987, s. 1345-1361.
76. Pan, R. K., Tao, H. Z., Wang, J. Z., Wang, J. Y., Chu, H. F., Zhang, T. J., Wang, D. F., a Zhao, X. J., *Structure and optical properties of amorphous Ge-Se films prepared by pulsed laser deposition.* Optik - International Journal for Light and Electron Optics, Vol. 124(21), 2013, s. 4943-4946.

77. Knotek, P., Vlcek, M., Kincl, M., a Tichy, L., *On the ultraviolet light induced oxidation of amorphous As₂S₃ film*. Thin Solid Films, Vol. 520(16), 2012, s. 5472-5478.