

Short Thesis for the degree of doctor of philosophy (PhD)
DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**Radiation- and Thermally Stimulated Changes in
Amorphous Chalcogenide Layers and
Nanocomposites**

**Sugárzással és hővel indukált változások amorf
kalkogénid rétegekben és nanokompozitokban**

Sándor Molnár

Supervisor/Témavezető:
Dr. Sándor Kökényesi



UNIVERSITY OF DEBRECEN
DOCTORAL SCHOOL OF PHYSICS
DEBRECENI EGYETEM
FIZIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
DEBRECEN, 2020

Prepared at
the Department of Experimental Physics, Institute of
Physics, University of Debrecen

Készült
a Debreceni Egyetem Fizikai Intézet Kísérleti Fizikai
Tanszékén

Introduction

Research and fine-tuning diverse functional, mostly semiconductor materials is one of the current goals of modern materials science. Application of these materials require the guided and planned feasibility of changing the properties of these materials and the stability of its given properties. If an external influence can change a given material's electrical, magnetic, optical and other parameters, then there are important discoverable applications, first of all in information technologies. Of course, better understanding the structural and electron processes ongoing in the semiconductor material determinates its wider applications.

Amorphous (inorganic and organic) materials are widely used in electrical and optical memory elements, optoelectronic sensors. Further basic and applied research tasks are connected to the nanostructured materials, nanocomposites, where in addition to the size limit, quantum effects appear.

Amorphous chalcogenide materials are still in the scientific spotlight today, since they are very important for information technologies and have been in the last few decades. Achievements include applications of them in printers, detectors, optical memory storage (CD, DVD, Blu-ray) and lately in solid state storage. Research and development of these materials could replace and improve other existing, interconnected technologies and applications, like security elements and integrated optical sensors.

The semiconductor materials discussed in this work are compositions of S, Se, Te and their compounds or

alloys. They maintain short and medium range order, and their physical properties can be purposefully manipulated depending on the chemical composition. The physical properties of these materials are also easily manipulated by external effects, such as light, ion or electron irradiation or the effect of temperature. All these properties inspire new insights to the physics of disordered materials and to the development of new functional materials. Potential application in biocompatible environment is also possible using some types of glasses and chalcogenide containing polymers.

New scientific results

This thesis is based on the research of radiation and thermally stimulated changes in selected amorphous chalcogenide layers and nanocomposites to better understand the undergoing physical processes and to improve their possible applications in optics and optoelectronics. To achieve this, I have set the goals presented below.

1. Separate the possible role of pure light and thermally stimulated effects in optical and geometrical relief formation processes.

I showed and analyzed the surface relief creating effect of focused He-Ne laser beams on bulk amorphous selenium samples at different light intensities, which includes thermally induced mass transport processes.

Hence, I created a thermal model for the region near the vicinity of the illuminated spot, and micro-Raman measurements were done, to study the structural changes depending on the distance from the illuminated spot, i.e. the temperature distribution under irradiation. This allowed the separation of thermal effects from the light induced ones, which happen during the surface profile formation [A1, B4, C1, D1, D2, D4, E2, E3].

2. Develop an experimental method for determining the viscosity of thin solid chalcogenide layers.

I showed for the first time, that the thermal erasing process of holographic relief gratings can be used for

direct measurement of the viscosity of thin chalcogenide films.

Furthermore, I showed that the thermal erasing of a holographic grating on an $\text{As}_{20}\text{Se}_{80}$ thin film can be described by Arrhenius law with 2.9 eV activation energy, and this process has a viscous flow character. My investigations showed, that the erasing process can be accelerated with band-gap light, and at the experiments, it was characterized by an activation energy between 2.9–1.1 eV, depending on light intensity and grating period. I showed, that erasing by light also depends on the light polarization.

I showed, that depending on the grating period, the erasing mechanism is viscous flow or diffusion flow [A2, A3, D3, E2, E3].

3. Develop new experimental methods for light stimulated mass transport investigations.

I have developed two new experimental methods for investigating light stimulated mass transport in As-Se (S) chalcogenide thin films.

With these methods I show *in situ*, that light induced mass transport direction depends on the material composition and recording light polarization.

I showed, that depending on the composition in the $\text{As}_x\text{Se}_{100-x}$ ($x=1,3,6,20,40$) system, optically induced mass transport is eliminated at around 1 at% of As. This method of “two adjacent chalcogenide layers” also showed, that during *in situ* recording investigations of the most used As-Se chalcogenide materials, where As is above 1 at%, the mass transport direction is opposite to the mass transport direction in amorphous selenium. I showed, that

mass transport direction in As_2S_3 was opposite to Se as well.

With the second developed method (“mesh mask”) I directly show, how mass transport direction depends on the illuminating light polarization during surface relief formations. Based on this, the type of material and possible recording output can be identified based on its mass transport properties.

Both methods can be used for simplifying more complicated or large experimental setups, and are improved in comparison with previously existing ones [A4, D3, D4, D8, E1, E2, E3].

4. Create surface relief structures by high-energy ion beams on amorphous chalcogenides.

On selected chalcogenide glass compositions (Se, $\text{As}_6\text{Se}_{94}$, $\text{As}_{20}\text{Se}_{80}$, As_2S_3 and $\text{As}_{30}\text{Ge}_{20}\text{S}_{50}$) I recorded surface relief structures with 2 MeV energy H^+ and He^+ ion beams.

I achieved the highest relief patterning efficiency on Se, similarly to results obtained by optical recording. Patterns of spots and lines were recorded in the selected compositions with high efficiency, which shows the applicability of ion beam recording to create structures like lens matrices and diffractive elements in a one-step process.

I showed that patterning by a 2 MeV He^+ ion beam on Se and $\text{As}_6\text{Se}_{94}$ chalcogenide layers on a non-conductive substrate is more efficient compared to a conductive substrate.

I showed, that patterning in the selected chalcogenide samples with the same 2 MeV energy ion

irradiation was more effective with He^+ ions compared to proton irradiation [A5, C1, D2, D4, D6, D10, E2, E3].

5. Polymer-chalcogenide nanocomposite creation for *in situ* recording holographic elements.

I showed that positive characteristics of transparent low refractive index photopolymers and light-sensitive high refractive index $\text{As}_{20}\text{Se}_{80}$ and As_2S_3 chalcogenide glasses can be combined in a nanocomposite. I recorded holographic gratings *in situ* in such media, which shows the applicability for optical elements, since without the nanoparticles, the grating formation is not possible in the used polymer.

I showed that just 2.6 vol% of As_2S_3 nanoparticles in the polymer matrix resulted refractive index is 1.54, whereas in the pure polymer it is 1.52. I achieved 20% diffraction efficiency in a holographic volume grating in an As_2S_3 -polymer nanocomposite and 47% diffraction efficiency for an $\text{As}_{20}\text{Se}_{80}$ -polymer nanocomposite [A6, C3, D5, D7, D9, D12, E2, E3].

Bevezetés

A modern anyagtudomány egyik kurrens problémája a különböző funkcionális, és főként félvezető anyagok kutatása és fejlesztése. Ezen anyagok alkalmazása megköveteli a tervezhető és irányítható tulajdonságváltozásokat, illetve az adott paraméterek időbeli stabilitását. Amennyiben a külső hatásokkal változtatni tudjuk egy adott anyag elektromos, mágneses, optikai, és egyéb paramétereit, akkor fontos alkalmazási lehetőségek tárhatók fel elsősorban az információs technológiákban. Természetesen a félvezető anyagban végbemenő szerkezeti és elektronfolyamatok mechanizmusának megismerése szükséges az alkalmazási lehetőségek jobb meghatározásához.

Az amorf (szervetlen és szerves) anyagok széles körben alkalmazottak az elektromos és optikai memóriaelemekben és optoelektronikai érzékelőkben. További alap, és alkalmazott kutatási feladatok fűződnek a nanostruktúrált anyagokhoz, nanokompozitokhoz, amelyekben a méretkorlátozás mellett megjelennek a kvantumeffektusok is.

Az amorf kalkogenidek évtizedek óta a tudományos figyelem középpontjában állnak, mivel fontosak az információs technológiák szempontjából. Alkalmazzák őket fénymásoló berendezésekben, szenzorokban, optikai (CD, DVD, Blu-ray) és újabban szilárdtest adattárolókban is. Ezen anyagok kutatása és fejlesztése a jövőben helyettesíthetne és továbbfejleszthetne más, már meglévő, komplex technológiákat és alkalmazásmódokat, például a

biztonsági elemek vagy integrált optikai érzékelők esetében.

A jelen munkában vizsgált félvezető anyagok a S, Se és Te kompozíciói, valamint ezek vegyületei vagy ötvözetei. Fizikai tulajdonságaik könnyen befolyásolhatók külső hatások, például fény-, ion-, vagy elektronbesugárzás, illetve hőmérséklet által. Ezen kívül rövid- és középtávú szerkezeti renddel rendelkeznek, és fizikai tulajdonságaik a kémiai összetételtől függően célirányosan változtathatók. Mindezen tulajdonságok új perspektívákat nyithatnak a rendezetlen anyagok fizikájában, és új típusú kutatásokat inspirálhatnak a funkcionális anyagok kutatása és fejlesztése terén.

Felhasználásuk lehetségesnek bizonyulhat biokompatibilis környezetben is, kalkogenideket tartalmazó polimerek használata során.

Új tudományos eredmények

A jelen disszertáció kiválasztott amorf kalkogenid rétegek és nanokompozitok sugárzás- és hőstimulált változásainak kutatásán alapul, és célja, hogy jobban megértsük a háttérben zajló fizikai folyamatokat, és ezáltal továbbfejleszthessük ezen anyagok felhasználását az optikában és az optoelektronikában. Ennek érdekében a lent ismertetett célokat tűztem ki.

1. Szétválasztani a fény- és hőhatás lehetséges jelenségeit optikai és geometriai relief formálódás folyamata során.

Kimutattam és elemeztem a fókuszált He-Ne lézernyaláb felületi reliefet létrehozó hatását amorf tömbi szelénium mintákon különböző fényintenzitások mellett, mely során a felületi struktúrák kialakulásakor hőindukált anyagtranszport folyamatok jönnek létre.

Ennek megfelelően kialakítottam egy termikus modellt a besugárzott pont környezetére vonatkozóan, valamint mikro-Raman vizsgálatokat végeztünk, hogy a besugárzott pontból kiinduló, távolságfüggő strukturális változások vizsgálata lehetővé váljon. Így a felületi struktúrák keletkezése során előforduló hő- és fényindukált jelenségek elkülöníthetővé váltak [A1, B4, C1, D1, D2, D4, E2, E3].

2. Új kísérleti módszer kifejlesztése vékony kalkogenid rétegek viszkozitásának meghatározására.

Az irodalomban először mutattam ki, hogy a holografikus rácsok termikus törlése használható direkt módszerként az amorf kalkogenid rétegek viszkozitásának meghatározására.

Kimutattam továbbá, hogy $As_{20}Se_{80}$ vékonyréteg felületén lévő holografikus rácsok termikus törlése Arrhenius törvény szerint megy végbe, melynek aktivációs energiája 2.9 eV. E törlési folyamat viszkozus folyás által megy végbe. Kimutattam, hogy ez a törlési folyamat gyorsítható tiltott sáv közeli energiával rendelkező fénykvantumok által, mely során a folyamat aktivációs energiája 2.9–1.1 eV között változott a fény intenzitástól és a rácsperiódustól függően. A felületi rács termikus törlése emellett függött a megvilágító fény polarizációjától.

Kimutattam, hogy a rácsperiódustól függően a törlési folyamat viszkozus vagy diffúziós folyás által megy végbe [A2, A3, D3, E2, E3].

3. Új kísérleti módszerek kifejlesztése fotostimulált anyagtranszport vizsgálatokhoz.

Két új kísérleti módszert fejlesztettem ki a fotostimulált anyagtranszport hatásfokának és irányának meghatározására amorf kalkogenid As-Se (S) összetételű vékonyrétegekben.

Ezen módszerek alkalmazásával *in situ* kimutattam, hogy az anyagtranszport iránya függ mind az író lézernyaláb polarizációjától, mind az anyag összetételétől.

A „szomszédos rétegek” módszer segítségével *in situ* kimutattam, hogy a fotoindukált anyagtranszport

megszűnik az As_xSe_{100-x} összetételű kompozíciókban 1 at% As koncentráció esetén. Továbbá a „szomszédos rétegek” módszer *in situ* kimutatta, hogy a legelterjedtebb As-Se kalkogenid üvegek esetén az anyagtranszport iránya ellentétes az amorf szelénhez viszonyítva, ha az As koncentráció meghaladja az 1 at% -ot. Az anyagtranszport iránya szintén ellentétesnek bizonyult As_2S_3 esetén a szelénhez képest.

A kifejlesztett „fémháló” módszer által *in situ* kimutattam, hogy az anyagtranszport iránya és határfoka függ az író fény lineáris polarizációjától a különböző kompozíciókban létrehozott felületi struktúrák kialakulása során.

Mindkét módszer továbbfejleszti és egyszerűsíti a korábbi eljárásokat a fotostimulált anyagtranszport tulajdonságainak meghatározására [A4, D3, D4, D8, E1, E2, E3].

4. Felületi relief struktúrák kialakítása nagy energiájú ion besugárzás segítségével.

Kimutattam, hogy 2 MeV energiájú, H^+ és He^+ ionok felhasználhatóak felületi reliefek kialakítására Se, As_6Se_{94} , $As_{20}Se_{80}$, As_2S_3 és $As_{30}Ge_{20}S_{50}$ kalkogenid üvegeken és amorf vékonyrétegeken, melyek a látható, NIR és IR spektrum tartományokban működő diffrakciós elemek, lencsemátrixok készítésére alkalmasak. Ezek a pont- és vonal struktúrák egylépcsős módszerrel lettek kialakítva.

Kimutattam, hogy a legnagyobb hatékonysággal amorf szelénben hozhatók létre felületi pont- és vonal

struktúrák nagy energiájú ionok hatására, melynek a legalacsonyabb a lágyulási hőmérséklete és az egyik legjobban alkalmazható anyag optikai írásra is a vizsgált minták között.

Kimutattam, hogy Se és As_6Se_{94} rétegen történő felületi mintázat létrehozása 2 MeV energiájú He^+ ionokkal nagyobb hatásokkal történik a szigetelő hordozón lévő mintákon, mint a vezető hordozón lévőkön.

Kimutattam, hogy a 2 MeV energiával történő ion besugárzás során a He^+ ionok által nagyobb hatásokkal hozhatók létre felületi struktúrák a H^+ ion besugárzáshoz képest a vizsgált kalkogenid mintákban [A5, C1, D2, D4, D6, D10, E2, E3].

5. Polimer-kalkogenid nanokompozitok létrehozása *in situ* holografikus elemek rögzítésére.

Kimutattam, hogy olyan nanokompozitok hozhatók létre, melyekben az átlátszó, de alacsony törésmutatójú fotopolimerek pozitív jellemzői egyesíthetők a fényérzékeny és magas törésmutatójú $As_{20}Se_{80}$ és As_2S_3 kalkogenid üvegek pozitív jellemzőivel. Ezekben a nanokompozitokban holografikus rácsokat hoztam létre, ami a nanokompozit optikai elemként való alkalmazhatóságát mutatja be, mivel a nanorészecskék nélkül az *in situ* rácsformálódás nem volt lehetséges az adott polimerekben.

Kimutattam, hogy egy mindössze 2.6 vol% értékű As_2S_3 nanorészecske koncentráció a polimer mátrixban 1.54 értékű törésmutatót eredményez a polimer kezdeti, nanorészecske nélküli 1.52 értékéhez képest. As_2S_3

polimer-kalkogenid nanokompozitokban 20%, $As_{20}Se_{80}$ polimer-kalkogenid nanokompozitokban pedig 47%-os diffrakciós hatásfokú térfogati rácsot hoztam létre [A6, C3, D5, D7, D9, D12, E2, E3].

Publications serving as the basis of the thesis/A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények:

[A1.] R. Bohdan, **S. Molnar**, I. Csarnovics, M. Veres, A. Csik, S. Kokenyesi, *Optical recording of surface relief on amorphous selenium*, J. Non. Cryst. Solids **408**, 57–61 (2015). **IF: 1.825**

[A2.] **S. Molnar**, R. Bohdan, V. Takats, Y. Kaganovskii, S. Kokenyesi, *Viscosity of As₂₀Se₈₀ amorphous chalcogenide films*, Mater. Lett. **228**, 384–386 (2018). **IF: 3.019**

[A3.] **S. Molnar**, R. Bohdan, V. Takats, Y. Kaganovskii, S. Kokenyesi, *Stimulated Surface Relief Erasing in Amorphous As-Se Layers: Thermal- and Light Induced Effects*, Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci. **215**, 24, 1–7 (2018). **IF: 1.606**

[A4.] R. Bohdan, **S. Molnar**, S. Kokenyesi, *Methods comparing peculiarities of surface-relief recording in amorphous chalcogenides*, Phys. status solidi **212**, 10, 2186–2190 (2015). **IF: 1.648**

[A5.] **S. Molnar**, R. Bohdan, G. Nagy, I. Rajta, L. Illes, A. Csik, S. Kokenyesi, *Direct surface patterning of amorphous chalcogenide layers with high- energy H⁺ and He⁺ ion beams*, J. Mater. Sci. Mater. Electron. **30**, 16, 15331–15338 (2019). **IF: 2.195**

[A6.] J. Burunkova, **S. Molnar**, V. Sitnikova, D. Shaimadiyeva, G. Alkhalil, R. Bohdan, J. Bako, F. Kolotaev, A. Bonyar, S. Kokenyesi, *Polymer–chalcogenide glass nanocomposites for amplitude–phase modulated optical relief recording*, J. Mater. Sci. Mater. Electron. **30**, 10, 9742–9750 (2019). **IF: 2.195**

Further publications/ További közlemények

[B1.] J. Burunkova, D. Zhuk, V. Kaliabin, **S. Molnar**, S. Kokenyesi, *Peculiarities of holographic microfabrication of photonic structures in functional polymer nanocomposites*, Optical Materials **88**, 516-521 (2019). **IF: 2.687**

[B2.] **S. Molnar**, R. Bohdan, V. Takats, Yu. Kaganovskii, K. Vad, S. Kokenyesi, *Kinetics of photo-darkening and -bleaching in amorphous $As_{20}Se_{80}$ layers: temperature dependence*, J. Optoelectron. Adv. Mater. **20**, 11/12, 646-650 (2018). **IF:0.588**

[B3.] I. Csarnovics, M. Veres, P. Nemeč, MR. Latif, P. Hawlova, **S. Molnar**, S. Kokenyesi, *Surface patterning in GeSe amorphous layers*, J. Non. Cryst. Solids **459**, 51-56 (2017). **IF: 2.488**

- [B4.] **S. Molnar**, R. Bohdan, S. Kokenyesi, *Crystallization at optical recording in amorphous selenium*, Acta Physica Debrecina **XLVIII**, 100 (2014). **IF: 0.00.**
- [B5.] I. Csarnovics, M. Veres, P. Nemeč, **S. Molnár**, S. Kökényesi, Surface plasmon enhanced light-induced changes in Ge-Se amorphous chalcogenide – Gold nanostructures, J. Non-Crystalline Solids X, 6, 100045 (2020). **IF: 0.00**

Conference proceedings/ Konferencia közlemények

- [C1.] **S. Molnar**, R. Bohdan, I. Csarnovics, I. Burunkova, S. Kokenyesi, *Amorphous chalcogenide layers and nanocomposites for direct surface patterning*, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering **9359**, 935908-935908-10 (2015).
- [C2.] I. Csarnovics, **S. Molnar**, J. Burunkova, D. Zhuk, I. Denisyuk, A. Bonyár, C. Cserhati, S. Kökényesi, *Patterning photosensitive layers for optoelectronic applications*, 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 57-60 (2015).

- [C3.] **S. Molnar**, J. Burunkova, R. Bohdan, J. Bako, L. Daroczi, S. Kokenyesi, *Development of functional polymer nanocomposites for direct optical relief recording*, Clusters and Nanostructured materials: Abstract book, 32 (2018).
- [C4.] **S. Molnar**, R. Bohdan, V. Takats, A. Reznik, S. Kokenyesi, *Influence of As-Se Based Chalcogenide Glasses' Electrical Conductivity on The Direction of Photo-Induced Mass Transport*, Conference proceedings, International Conference on Applied Physics and Mathematics, 1 (2019).

Posters/ Poszterek

- [D1.] R. Bohdan, **S. Molnar**, I. Csarnovics, A. Csik, S. Kokenyesi, *Thermal Effects in Surface Relief Recording on Chalcogenide Glasses*, 15th Joint Vacuum Conference, Vienna, Austria, June 15-20, 2014.
- [D2.] **S. Molnar**, Gy. Nagy, P. Hajdu, T. Nichol, M. Mitkova, R. Bohdan, I. Rajta, S. Kokenyesi, *Comparison of light- and ion beam surface patterning of amorphous chalcogenide layers*, 7th International Conference Amorphous and Nanostructured Chalcogenides, Cluj-Napoca, Romania, July 5-10, 2015.

- [D3.] **S. Molnar**, V. Takats, R. Bohdan, S. Misak, I. Csarnovics, Yu. Kaganovsky, S. Kokenyesi, *Investigations of phase-modulated optical recording in amorphous chalcogenide layers from As-Se-Te system*, 8th International Conference Amorphous and Nanostructured Chalcogenides, Sinaia, Romania, July 2-5, 2017.
- [D4.] **S. Molnar**, R. Bohdan, V. Takats, I. Csarnovics, Yu. Kaganovskii, S. Kokenyesi, *Temperature an illumination dependent mass transport during surface relief formation in As-S(Se) amorphous chalcogenides*, 15th International Conference on the Physics of Non-Crystalline Solids and 14th European Society of Glass Conference, St. Malo, France, July 9-13, 2018.
- [D5.] J. Burunkova, N. Zulina, M. Baranova, D. Kussainova, A. Churbanova, **S. Molnar**, S. Kokenyesi, *Polymer-Chalcogenide Glass Nanocomposites for Optical Relief Recording*, 13th International Conference on Solid State Chemistry, Pardubice, Czech Republic, September 16-21, 2018.
- [D6.] **S. Molnar**, R. Bohdan, I. Rajta, Gy. Nagy, S. Kokenyesi, *Ion beam patterning in As-Se amorphous layers*, 13th International Conference on Solid State Chemistry, Pardubice, Czech Republic, September 16-21, 2018.

- [D7.] J. Burunkova, **S. Molnar**, D. Kussainova, M. Uspenskaya, M. Baranov, R. Bohdan, T. Nosenko, S. Kokenyesi, *Acrylate polymer nanocomposites for direct optical relief recording*, The 9th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, Chisinau, Moldova, September 25-28, 2018.
- [D8.] **S. Molnar**, R. Bohdan, V. Takacs, A. Reznik, S. Kokenyesi, *The influence of conduction type on photo-induced mass transport in semiconductor chalcogenide glasses*, Conference proceedings, VIII. Ukrainian Conference on Physics of Semiconductors, Uzhgorod, Ukraine, October 2-4, 2018.
- [D9.] J. Burunkova, **S. Molnar**, G. Alkhalil, D. Shaymadiyeva, L. Daroczi, A. Bonyar, S. Kokenyesi, *Acrylate polymer-inorganic nanocomposites for photonic applications*, 8th International Conference on Nanotechnology & Materials Science, Amsterdam, The Netherlands, April 24-26, 2019.
- [D10.] **S. Molnar**, R. Bohdan, Gy. Nagy, I. Rajta, I. Makauz, M. Shipljak, V. Pinzenik, S. Kokenyesi, *Surface Patterning of Amorphous Chalcogenide Layers by Light and Ion-Beams*, XVII International Freik Conference On Physics And Technology of

Thin Films and Nanosystems, Ivano-Frankivsk, Ukraine, May 20-25, 2019.

[D11.] G. Alkhalil, J. Burunkova, **S. Molnar**, F. Kolotaev, M. Veres, S. Kokenyesi, *Optical Properties of As₂S₃ in Thin Layers and Solid Matrices*, XI. International Conference “Basic Problems of Optics” BPO-2019, St. Petersburg, Russia, October 21-25, 2019.

[D12.] G. Alkhalil, **S. Molnar**, J. Burunkova, F. Kolotaev, V. Sitnikova, T. Nosenko, M. Veres, S. Kokenyesi, *Polymeric composites based on As₂S₃ nanoparticles for holographic recording of Bragg gratings*, 15th International Saint Petersburg Conference of Young Scientists, St. Petersburg, Russia, October 28-31, 2019.

Main talks/ Főbb előadások

[E1.] **S. Molnar**, R. Bohdan, P. Nemeč, A. Bonyar, A. Reznik, S. Kokenyesi, *Composition- and electrical field-dependent surface relief recording in amorphous chalcogenide layers and structures*, 9th International Conference Amorphous and Nanostructured Chalcogenides, Chisinau, Moldova, June 30 - July 4, 2019.

[E2.] S. Kokenyesi, **S. Molnar**, J. Burunkova, G. Alkhalil, I. Csarnovics, Yu. Kaganovskii, *Surface relief recording-erasing in amorphous chalcogenide*

layers and nanocomposites, 9th International Conference Amorphous and Nanostructured Chalcogenides, Chisinau, Moldova, June 30 - July 4, 2019.

- [E3.] **S. Molnár**, *Felületi struktúrák kialakítása amorf kalkogenid rétegekben és nanokompozitokban sugárzás- és hőstimulált anyagtranszport által*, Az MTA Felületkémiai és Nanoszerkezeti Munkabizottság, az ELFT Vákuumfizikai, -technológiai és Alkalmazásai Szakcsoport, a Magyar Vákuumtársaság és az MTA Elektronikus Eszközök és Technológiák Tudományos Bizottság közös szemináriuma, Budapest, 2019. október 29.



Nyilvántartási szám: DEENK/177/2020.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Molnár Sándor
Neptun kód: YE7QWF
Doktori Iskola: Fizikai Tudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10056787

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (6)

1. **Molnár, S.**, Bohdan, R., Nagy, G., Rajta, I., Illés, L., Csik, A., Kökényesi, S.: Direct surface patterning of amorphous chalcogenide layers with high-energy H⁺ and He⁺ ion beams. *J. Mater. Sci.-Mater. Electron.* 30 (16), 15331-15338, 2019. ISSN: 0957-4522.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10854-019-01906-9>
IF: 2.195 (2018)
2. Burunkova, J., **Molnár, S.**, Sitnikova, V., Shaimadiyeva, D., Alkhalil, G., Bohdan, R., Bakó, J., Kolotaev, F., Bonyar, A., Kökényesi, S.: Polymer-chalcogenide glass nanocomposites for amplitude-phase modulated optical relief recording. *J. Mater. Sci.-Mater. Electron.* 30 (10), 9742-9750, 2019. ISSN: 0957-4522.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10854-019-01309-w>
IF: 2.195 (2018)
3. **Molnár, S.**, Bohdan, R., Takáts, V., Kaganovskii, Y. S., Kökényesi, S.: Stimulated Surface Relief Erasing in Amorphous As-Se Layers: Thermal- and Light Induced Effects. *Phys. Status Solidi A. Appl. Mat.* 215 (24), 1-7, 2018. ISSN: 1862-6300.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.201800589>
IF: 1.606
4. **Molnár, S.**, Bohdan, R., Takáts, V., Kaganovskii, Y. S., Kökényesi, S.: Viscosity of As₂₀Se₈₀ amorphous chalcogenide films. *Mater. Lett.* 228, 384-386, 2018. ISSN: 0167-577X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2018.06.065>
IF: 3.019
5. Bohdan, R., **Molnár, S.**, Kökényesi, S.: Methods comparing peculiarities of surface-relief recording in amorphous chalcogenides. *Phys. Status Solidi A. Appl. Mat.* 212 (10), 2186-2190, 2015. ISSN: 1862-6300.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.201532288>
IF: 1.648





6. Bohdan, R., **Molnár, S.**, Csarnovics, I., Veres, M., Csik, A., Kökényesi, S.: Optical recording of surface relief on amorphous selenium.
J. Non-Cryst. Solids. 408, 57-61, 2015. ISSN: 0022-3093.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2014.10.016>
IF: 1.825

További közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (1)

7. **Molnár, S.**, Bohdan, R., Kökényesi, S.: Crystallization at Optical Recording in Amorphous Selenium.
Acta Phys. Debr. 48, 1-8, 2014. ISSN: 1789-6088.

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (4)

8. Csarnovics, I., Veres, M., Nemeč, P., **Molnár, S.**, Kökényesi, S.: Surface plasmon enhanced light-induced changes in Ge Se amorphous chalcogenide: Gold nanostructures.
Journal of Non-Crystalline Solids: X. 6, 1-6, 2020. ISSN: 2590-1591.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nocx.2020.100045>
9. Burunkova, J., Žuk, D. I., Kaliabin, V., **Molnár, S.**, Kökényesi, S.: Peculiarities of holographic microfabrication of photonic structures in functional polymer nanocomposites.
Opt. Mater. 88, 516-521, 2019. ISSN: 0925-3467.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2018.12.026>
IF: 2.687 (2018)
10. **Molnár, S.**, Bohdan, R., Takáts, V., Kaganovskii, Y. S., Vad, K., Kökényesi, S.: Kinetics of photo-darkening and -bleaching in amorphous As₂₀Se₈₀ layers: temperature dependence.
J. Optoelectron. Adv. Mater. 20 (11-12), 646-650, 2018. ISSN: 1454-4164.
IF: 0.588
11. Csarnovics, I., Veres, M., Nemeč, P., Latif, M. R., Hawlova, P., **Molnár, S.**, Kökényesi, S.: Surface patterning in Ge-Se amorphous layers.
J. Non-Cryst. Solids. 459, 51-56, 2017. ISSN: 0022-3093.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.12.035>
IF: 2.488

Idegen nyelvű konferencia közlemények (2)

12. **Molnár, S.**, Bohdan, R., Csarnovics, I., Burunkova, J., Kökényesi, S.: Amorphous chalcogenide layers and nanocomposites for direct surface patterning.
In: Optical Components and Materials XII.. Ed.: Shubin Jiang, Michel J. F. Digonnet, SPIE, Bellingham, Wash., 1-10, 2015, (Proceedings of SPIE ; 9359.)





13. Csarnovics, I., **Molnár, S.**, Burunkova, J., Žuk, D. I., Denisiuk, I., Bonyár, A., Cserhádi, C.,
Kökényesi, S.: Patterning photosensitive layers for optoelectronic applications.
In: 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). Ed.: H. Wohlrabe, O.
Krammer, J. Nicolics, M. Franz, IEEE, New York, 57-60, 2015. ISBN: 9781479988600

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 18,251

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre):
12,488**

A DEENK a Jelölt által az iDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2020.06.08.





Registry number: DEENK/177/2020.PL
Subject: PhD Publikációs Lista

Candidate: Sándor Molnár
Neptun ID: YE7QWF
Doctoral School: Doctoral School of Physics
MTMT ID: 10056787

List of publications related to the dissertation

Foreign language scientific articles in international journals (6)

1. **Molnár, S.**, Bohdan, R., Nagy, G., Rajta, I., Illés, L., Csik, A., Kökényesi, S.: Direct surface patterning of amorphous chalcogenide layers with high- energy H⁺ and He⁺ ion beams.
J. Mater. Sci.-Mater. Electron. 30 (16), 15331-15338, 2019. ISSN: 0957-4522.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10854-019-01906-9>
IF: 2.195 (2018)
2. Burunkova, J., **Molnár, S.**, Sitnikova, V., Shaimadiyeva, D., Alkhalil, G., Bohdan, R., Bakó, J., Kolotaev, F., Bonyar, A., Kökényesi, S.: Polymer-chalcogenide glass nanocomposites for amplitude-phase modulated optical relief recording.
J. Mater. Sci.-Mater. Electron. 30 (10), 9742-9750, 2019. ISSN: 0957-4522.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10854-019-01309-w>
IF: 2.195 (2018)
3. **Molnár, S.**, Bohdan, R., Takáts, V., Kaganovskii, Y. S., Kökényesi, S.: Stimulated Surface Relief Erasing in Amorphous As-Se Layers: Thermal- and Light Induced Effects.
Phys. Status Solidi A. Appl. Mat. 215 (24), 1-7, 2018. ISSN: 1862-6300.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.201800589>
IF: 1.606
4. **Molnár, S.**, Bohdan, R., Takáts, V., Kaganovskii, Y. S., Kökényesi, S.: Viscosity of As₂₀Se₈₀ amorphous chalcogenide films.
Mater. Lett. 228, 384-386, 2018. ISSN: 0167-577X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2018.06.065>
IF: 3.019
5. Bohdan, R., **Molnár, S.**, Kökényesi, S.: Methods comparing peculiarities of surface-relief recording in amorphous chalcogenides.
Phys. Status Solidi A. Appl. Mat. 212 (10), 2186-2190, 2015. ISSN: 1862-6300.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.201532288>
IF: 1.648





6. Bohdan, R., **Molnár, S.**, Csarnovics, I., Veres, M., Csik, A., Kökényesi, S.: Optical recording of surface relief on amorphous selenium.
J. Non-Cryst. Solids. 408, 57-61, 2015. ISSN: 0022-3093.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2014.10.016>
IF: 1.825

List of other publications

Foreign language scientific articles in Hungarian journals (1)

7. **Molnár, S.**, Bohdan, R., Kökényesi, S.: Crystallization at Optical Recording in Amorphous Selenium.
Acta Phys. Debr. 48, 1-8, 2014. ISSN: 1789-6088.

Foreign language scientific articles in international journals (4)

8. Csarnovics, I., Veres, M., Nemeč, P., **Molnár, S.**, Kökényesi, S.: Surface plasmon enhanced light-induced changes in Ge Se amorphous chalcogenide: Gold nanostructures.
Journal of Non-Crystalline Solids: X. 6, 1-6, 2020. ISSN: 2590-1591.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nocx.2020.100045>
9. Burunkova, J., Žuk, D. I., Kaliabin, V., **Molnár, S.**, Kökényesi, S.: Peculiarities of holographic microfabrication of photonic structures in functional polymer nanocomposites.
Opt. Mater. 88, 516-521, 2019. ISSN: 0925-3467.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2018.12.026>
IF: 2.687 (2018)
10. **Molnár, S.**, Bohdan, R., Takáts, V., Kaganovskii, Y. S., Vad, K., Kökényesi, S.: Kinetics of photo-darkening and -bleaching in amorphous As₂₀Se₈₀ layers: temperature dependence.
J. Optoelectron. Adv. Mater. 20 (11-12), 646-650, 2018. ISSN: 1454-4164.
IF: 0.588
11. Csarnovics, I., Veres, M., Nemeč, P., Latif, M. R., Hawlova, P., **Molnár, S.**, Kökényesi, S.: Surface patterning in Ge-Se amorphous layers.
J. Non-Cryst. Solids. 459, 51-56, 2017. ISSN: 0022-3093.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.12.035>
IF: 2.488

Foreign language conference proceedings (2)

12. **Molnár, S.**, Bohdan, R., Csarnovics, I., Burunkova, J., Kökényesi, S.: Amorphous chalcogenide layers and nanocomposites for direct surface patterning.
In: Optical Components and Materials XII.. Ed.: Shubin Jiang, Michel J. F. Digonnet, SPIE, Bellingham, Wash., 1-10, 2015, (Proceedings of SPIE ; 9359.)





13. Csarnovics, I., **Molnár, S.**, Burunkova, J., Žuk, D. I., Denisiuk, I., Bonyár, A., Cserhádi, C., Kökényesi, S.: Patterning photosensitive layers for optoelectronic applications.
In: 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). Ed.: H. Wohlrabe, O. Krammer, J. Nicolics, M. Franz, IEEE, New York, 57-60, 2015. ISBN: 9781479988600

Total IF of journals (all publications): 18,251

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 12,488

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of the Journal Citation Report (Impact Factor) database.

08 June, 2020

