

Doktori (PhD) értekezés tézisei

**Diffúziós vizsgálatok hengeres
nanoszerkezetekben**

Vecsei Gergő

Témavezető: Dr. Cserhádi Csaba



DEBRECENI EGYETEM

Fizikai Tudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2025

Bevezetés

A diffúziós jelenségek vizsgálata a mai napig figyelmet élvez, tekintve, hogy bőven akadnék még megválaszolatlan kérdések a témában. Például a kölcsönös diffúzió és a mechanikai feszültségek kölcsönhatása egy nehezen leírható probléma. A kölcsönös diffúziós kísérleteket általában sík, ún. szendvics geometriában végzik. Ekkor a diffúziós párokat egymással párhuzamos, sík felületek választják el egymástól. Ebben a geometriában a diffúziós keveredés miatt kialakuló feszültségek könnyen relaxálhatnak, például a mintának a diffúzió irányával megegyező irányú deformálódásával, szabad végeinek elmozdulásával. Amennyiben azonban a minta henger, vagy gömbszimmetrikus, a két diffundáló komponens egymáshoz képest koncentrikusan helyezkedik el. Ebben az esetben a felépült feszültségek relaxációja nem mehet végbe ilyen módon. Várható, hogy az ilyen típusú szerkezetekben a feszültségek kialakulása és relaxációja erősen függ a minta alakjától, méretétől és a nanoméreték felé közelítve akár a folyamat erős sugárfüggése is felléphet.

A nanoméretű szerkezetekben zajló diffúziós folyamatok és a kapcsolódó mechanikai feszültségek különösen érdekesek, mivel ezek alapvetően meghatározzák a nanoszerkezetek stabilitását, élettartamát és funkcionalitását. Az ilyen rendszerekben lezajló kölcsönös diffúzió és feszültségképződés vizsgálata ezért nemcsak elméleti jelentőséggel bír, hanem kulcsfontosságú lehet a jövőbeli nanotechnológiai fejlesztések szempontjából is

A spinel típusú anyagok az utóbbi időben jelentős tudományos érdeklődést váltottak ki, köszönhetően kiváló optikai, elektronikus és katalitikus tulajdonságaiknak. Katalizátorként alkalmazható például a levegőszennyező anyagok eltávolításában, vagy fotokatalizátorként is működik a toxikus aromás vegyületek lebontásában. Különös lumineszcencia spektrumának köszönhetően szenzorként is

alkalmazható. Nemlineáris optikai tulajdonságai lehetővé teszik, hogy potenciális optikai korlátozó anyagként funkcionáljon. A cink-aluminátról például nemrég megmutatták, hogy jól alkalmazható napelemek tükröződésmentes bevonataként. A spinelek közt a ZnAl_2O_4 kiemelt figyelmet kap, köszönhetően nagyszerű optikai és katalitikus tulajdonságainak.

Célkitűzések

Doktori munkám célja az volt, hogy feltárjam a hengeres nanoszerkezetekben zajló kölcsönös diffúzió és a kapcsolódó mechanikai feszültségek kölcsönhatását. Bár a diffúziós folyamatokat sík geometriában széleskörűen tanulmányozták, a zárt, görbült geometriákban lezajló folyamatok eddig kevésbé feltártak.

Munkámhoz modellrendszerként az $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ anyagrendszert választottam, amelynek reaktív diffúzióját atomi rétegleválasztásos módszerrel előállított nanoszerkezetekben vizsgáltam. A kísérleteim során kettősfalú csöveket és kettős falú mag-héj struktúrákat állítottam elő. A munka központi célja az volt, hogy ezen szerkezetek ALD előállítása után hőkezeléssel reaktív diffúziót hozzak létre a rétegek között, és így feltárjam a kialakuló új fázis növekedését, kinetikai jellemzőit, valamint a folyamat során felépülő feszültségek hatását.

Az Al_2O_3 és ZnO anyagok kombinációjának vizsgálatával arra kerestem választ, hogyan befolyásolja a hengeres struktúrák geometriája és a rétegzés sorrendje a keletkező fázis növekedési kinetikáját. A folyamat során felépülő mechanikai feszültségek hatásának értelmezéséhez a Tanszéken kifejlesztett számítógépes szimulációs módszert használtam.

Módszerek

A diffúziós vizsgálatokhoz különböző 3 dimenziós hengeres nanostruktúrákat állítottam elő. Kétféle szerkezetet készítettem: kettős

falú nanocsöveket (double -layered nanotubes=DLNTs) és kettős falú nanooszlopokat (double-layered nanopillars=DLNPs).

A nanoszerkezeteket hordozókon állítottam elő. A nanocsövek hordozójaként polivinil-alkohol (PVA) polimer nanoszálakat használtam, a DLNP-khez Pt nanooszlopokat építettem Si egykristály hordozókra gáz injektáló rendszerrel (Gas Injection System=GIS).

A nanoszálakra/nanooszlopokra rétegeket választottam le, hogy aztán hőkezelve azokat, vizsgálni tudjam a köztük végbemenő kölcsönös diffúziós folyamatokat. A bevonáshoz az atomi rétegleválasztás (Atomic Layer Deposition=ALD) módszerét alkalmaztam. Kétféle oxidot választottam le, alumínium-oxidot és cink-oxidot: a.) a polimer szálakra kétféle szekvenciával: PVA)ZnO)Al₂O₃) és PVA)Al₂O₃)ZnO) b.) a Pt oszlopokra egyféle sorrendben: Pt)Al₂O₃)ZnO).

A minták a diffúziós kísérletek előtt különböző előhőkezélesen estek át, majd a diffúziós vizsgálatokhoz 700°C-on hőkezelttem őket különböző ideig.

A hőkezélések során végbemenő szilárdtest reakciók néhányszor 10 nanométer vastag reakció fázisokat eredményeztek, melyek vizsgálatához TSEM/TEM/HRSTEM felvételeket készítettem. Az ehhez szükséges lamellákat FIB-SEM berendezéssel vékonyítottam.

Használtam emellett további technikákat is, energiadiszperzív röntgenspektroszkópiát (EDX) elemanalízisre, valamint röntgen diffrakciós (X-Ray Diffraction=XRD) méréseket az új fázisok meghatározására.

A kísérletek mellett, a folyamat során felépülő mechanikai feszültségek hatásának értelmezéséhez a Tanszéken kifejlesztett számítógépes szimulációs módszert használtam.

Új tudományos eredmények

1. tézis: A rétegzési sorrend hatása hengeres geometriában a ZnAl_2O_4 spinel fázis növekedésére

T.1.1. Irodalmi ismereteim szerint elsőként vizsgáltam két oxid között végbemenő szilárdtest reakcióban keletkező spinel növekedési kinetikáját cső szerkezetű hengeres geometriában. Megmutattam, hogy kristályos ZnO és amorf Al_2O_3 kétrétegű nanocsövekben reaktív diffúzió megy végbe 700°C -on. A keletkező termék a kristályos ZnAl_2O_4 spinel fázis, miközben a ZnO/ ZnAl_2O_4 fázishatáron a ZnO oldalon Kirkendall-üregek keletkeznek, jelezvén, hogy a jelenség a ZnO diffúziója által kontrollált.

T.1.2. Megmutattam, hogy a spinel fázis növekedésének kinetikája rétegzési sorrendtől függetlenül parabolikus, de a növekedés gyorsabb a $(\text{ZnO})\text{Al}_2\text{O}_3$ rétegzési sorrend esetén, mint az $(\text{Al}_2\text{O}_3)\text{ZnO}$ szerkezetnél. A jelenséget a diffúziós folyamat során felépülő mechanikai feszültségtérrel magyaráztam, amely egyrészt a diffúziós áramok közti különbség, másrészt a megjelenő új fázis nagyobb moláris térfogata miatt épül fel.

2. tézis: ZnAl_2O_4 spinel fázis nukleációja és növekedése kétrétegű $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ nanooszlopokban és nanocsövekben

T.2.1. Irodalmi ismereteim szerint elsőként vizsgáltam két oxid között végbemenő szilárdtest reakcióban keletkező spinel növekedésének kinetikáját mag-héj szerkezetű hengeres geometriában. Al_2O_3 -dal és ZnO-dal bevont Pt nanooszlopokat készítettem. Vizsgáltam a rétegek között végbemenő reaktív diffúziót 700°C -on. Megmutattam, hogy a keletkező ZnAl_2O_4 spinel fázis növekedésének kinetikája parabolikus.

T.2.2. Kísérletileg megmutattam, hogy a ZnAl_2O_4 spinel fázis a sík geometriához hasonlóan két lépésben növekszik. Először szigetek

nukleálódnak, amik elsősorban a diffúzió irányára merőlegesen növekednek, ezután a szigetek összenőnek és az így kialakult folytonos réteg vastagodik.

T.2.3. Kísérletileg megmutattam, hogy a maggal rendelkező Pt)Al₂O₃)ZnO) hengeres birétegekben lassabb a spinel fázis növekedésének kinetikája, mint a hasonló szerkezetű, de üreges)Al₂O₃)ZnO) nanocsövekben. A ZnO/ZnAl₂O₄ fázishatáron eltérő a hidrosztatikai feszültség előjele a két rendszerben: üreges szerkezet esetén húzófeszültség, míg maggal rendelkező rendszerben nyomófeszültség van jelen.

Az értekezés témájában megjelent közlemények

1. **G. Vecsei**, G. Jáger, L. Juhász, J. J. Tomán, V. O. Odhiambo, I. M. Szilágyi, Z. Erdélyi, C. Cserhádi: *Effect of stacking order in cylindrical geometry on the growth of ZnAl₂O₄ spinel phase*, Materialia (2023), <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2023.101819>
2. **G. Vecsei**, B. Sárközi, L. Juhász, J. J. Tomán, I. G. Márián, P. Pekker, Z. Erdélyi, C. Cserhádi: *The effect of stress on the growth kinetics of ZnAl₂O₄ spinel phase developing in double-layered Al₂O₃/ZnO cylindrical nanopillars*, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.08.446>

További közlemények

1. H. L Hamsasew, L. Tolezani, T. Igricz, D. H., P. Pál, C. Cserhádi, **G. Vecsei**, B. Sárközi, E. M. Baradács, Z. Erdélyi, I. M. Szilágyi, *Enhanced photocatalysis via inverse opal structures: Synthesis and characterization of TiO₂/ZnO and ZnO/TiO₂ composites using plasma-enhanced ALD*, Ceramics International, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.10.465>.
2. G. Jáger, J. J. Tomán, L. Juhász, **G. Vecsei**, Z. Erdélyi, C. Cserhádi, *Nucleation and growth kinetics of ZnAl₂O₄ spinel in crystalline ZnO – amorphous Al₂O₃ bilayers prepared by atomic layer deposition*,

Scripta Materialia, Volume 219, 2022,

<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2022.114857>.

3. J. J. Tomán, E. Baradács, **G. Vecsei**, L. Nagy, B. Parditka, S. Kéki, Z. Erdélyi, *Low-temperature, ultra-giant blistering of atomic layer deposited barrier coatings on polyethylene films caused by additive segregation*, Progress in Organic Coatings, Volume 204, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109261>.
4. Kale, P., Muduli, S.P., Muduli, Pareshe Kale, **G. Vecsei**, L. Juhász, B. Parditka, T. Fodor, C. Cserhádi, Z. Erdélyi. *Interface Engineering via Metal-coating of Silicon Nanostructured Thin Films for Reducing Anode Pulverization*. *Trans. Electr. Electron. Mater.* **26**, 182–194 (2025). <https://doi.org/10.1007/s42341-024-00583-8>
5. Czifrák, K.; Lakatos, C.; Cserhádi, C.; **Vecsei, G.**; Zsuga, M.; Kéki, S. *Bio-Based Polyurethane Networks Containing Sunflower Oil Based Polyols*. *Int. J. Mol. Sci.* **2024**, *25*, 7300. <https://doi.org/10.3390/ijms25137300>
6. S.S. Fouad, E. Baradács, M. Nabil, G. Katona, **G. Vecsei**, Z. Erdélyi, *Investigation of Fe thickness effect on the absorption behavior of ZnO/Fe/ZnO tri-layers thin films*, Optical Materials, Volume 157, Part 3, 2024, 116403, <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116403>.
7. A. Forgács, M. Ranga, A. Ranga, L. I. Orosz, G. Paul, L. Marchese, D. Pércsi, A. Len, Z. Dudás, **G. Vecsei**, A. Csík, I. Fábíán, J. Kalmár, *Pristine and cross-linked gelatin aerogels of pH-responsive hydration and swelling*, Applied Surface Science Advances, Volume 27, 2025, 100765, <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2025.100765>.
8. Zoltán Balogh, Marcell Tátrai, Zoltán Dudás, **Gergő Vecsei**, Csaba Cserhádi, Attila Csík, István Csarnovics, István Fábíán, József Kalmár, *Morphological features control drug release from nanostructured borosilicate – alginate aerogels and xerogels*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Volume 727, Part 2, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.138320>.

Konferencia előadások és poszterek

1. 11th International Conference on Diffusion in Materials (DIMAT-2021), 5-9 July 2021, Debrecen, Hungary: *Diffusion Studies in Al₂O₃/ZnO Cylindrical Nanostructures* (poszter, legjobb poszter I. díj)
2. Magyar Fizikus Vándorgyűlés, 2022. augusztus 21-24. Veszprém: *Diffúziós vizsgálatok Al₂O₃/ZnO hengeres nanoszerkezetekben* (poszter)
3. Diffusion Fundamentals, September 21-24 2022, Kraków, Poland: *Effect of stacking order in cylindrical geometry on the growth of ZnAl₂O₄ spinel phase* (poszter)
4. Workshop on Aerogels Characterization and Modelling, 29 March to 31 March 2023, Debrecen, Hungary: *Preparation of 3D metal oxide nanostructures*
5. 15th International Conference on Nanomaterials - Research & Application, October 18-20, 2023 Brno, Czech Republic: *Blistering of low-temperature atomic layer deposited barrier coatings on polyethylene films caused by additive blooming*
6. 9th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME), 9-10 November 2023 Debrecen, Hungary: *Hydrogen diffusion through polymer-metaloxide hybrid membranes subjected to mechanical stress*
7. Diffusion Fundamentals XI, June 30 – July 1, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA: *The effect of stress on the growth kinetics of ZnAl₂O₄ in cylindrical nanotubes and nanopillars*



Nyilvántartási szám: DEENK/546/2025.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Vecsei Gergő
Doktori Iskola: Fizikai Tudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10079315

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (2)

1. **Vecsei, G.**, Tomán, J., Márián, I. G., Sárközi, B., Juhász, L., Pekker, P., Erdélyi, Z., Cserhádi, C.:
Nucleation and growth of ZnAl₂O₄ spinel phase in double-layered Al₂O₃/ZnO nanopillars and nanotubes prepared by atomic layer deposition.
Ceram. Int. [Epub ahead of print], 2025. ISSN: 0272-8842.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.08.446>
IF: 5.6 (2024)
2. **Vecsei, G.**, Jáger, G., Juhász, L., Tomán, J., Odhiambo, V. O., Szilágyi, I. M., Erdélyi, Z., Cserhádi, C.:
Effect of stacking order in cylindrical geometry on the growth of ZnAl₂O₄ spinel phase.
Materialia. 30, 1-5, 2023. ISSN: 2589-1529.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mta.2023.101819>
IF: 3

További közlemények

Magyar nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (1)

3. Jáger, G., Tomán, J., Juhász, L., **Vecsei, G.**, Erdélyi, Z., Cserhádi, C.: Két anyag aszimmetrikus házassága és egy új anyag születése.
Fiz. szle. 72 (7), 197-201, 2022. ISSN: 0015-3257.

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (9)

4. Lemago, H., Tolezani, L., Igricz, T., Hessz, D., Pál, P., Cserhádi, C., **Vecsei, G.**, Sárközi, B., Baradács, E., Erdélyi, Z., Szilágyi, I. M.: Enhanced photocatalysis via inverse opal structures: Synthesis and characterization of TiO₂/ZnO and ZnO/TiO₂ composites using plasma-enhanced ALD.
Ceram. Int. 51 (1), 339-352, 2025. ISSN: 0272-8842.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.10.465>
IF: 5.6 (2024)





5. Tomán, J., Baradács, E., **Vecsei, G.**, Nagy, L., Parditka, B., Kéki, S., Erdélyi, Z.: Low-temperature, ultra-giant blistering of atomic layer deposited barrier coatings on polyethylene films caused by additive segregation.
Prog. Org. Coat. 204, 1-9, 2025. ISSN: 0300-9440.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109261>
IF: 7.3 (2024)
6. Balogh, Z., Tátrai, M., Dudás, Z., **Vecsei, G.**, Cserhádi, C., Csik, A., Csarnovics, I., Fábrián, I., Kalmár, J.: Morphological features control drug release from nanostructured borosilicate - alginate aerogels and xerogels.
Colloid Surf. A-Physicochem. Eng. Asp. 727, 1-11, 2025. ISSN: 0927-7757.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.138320>
IF: 5.4 (2024)
7. Forgács, A., Ranga, M., Ranga, A., Orosz, L. I., Paul, G., Marchese, L., Pércsi, D., Len, A., Dudás, Z., **Vecsei, G.**, Csik, A., Fábrián, I., Kalmár, J.: Pristine and cross-linked gelatin aerogels of pH-responsive hydration and swelling.
Appl. Surf. Sci. Adv. 27, 1-12, 2025. ISSN: 2666-5239.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsadv.2025.100765>
IF: 8.7 (2024)
8. Czifrák, K., Lakatos, C., Cserhádi, C., **Vecsei, G.**, Zsuga, M., Kéki, S.: Bio-Based Polyurethane Networks Containing Sunflower Oil Based Polyols.
Int. J. Mol. Sci. 25 (13), 1-17, 2024. ISSN: 1661-6596.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ijms25137300>
IF: 4.9
9. Kale, P., Muduli, S. P., Muduli, R. C., **Vecsei, G.**, Juhász, L., Parditka, B., Fodor, T., Cserhádi, C., Erdélyi, Z.: Interface Engineering via Metal-coating of Silicon Nanostructured Thin Films for Reducing Anode Pulverization.
Trans. Electr. Electron. Mater. 1, 1-13, 2024. ISSN: 1229-7607.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s42341-024-00583-8>
IF: 1.9
10. Fouad, S. S., Baradács, E., Nabil, M., Katona, G., **Vecsei, G.**, Erdélyi, Z.: Investigation of Fe thickness effect on the absorption behavior of ZnO/Fe/ZnO tri-layers thin films.
Opt. Mater. 157, 1-7, 2024. ISSN: 0925-3467.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116403>
IF: 4.2
11. Jáger, G., Tomán, J., Juhász, L., **Vecsei, G.**, Erdélyi, Z., Cserhádi, C.: Nucleation and growth kinetics of ZnAl₂O₄ spinel in crystalline ZnO - amorphous Al₂O₃ bilayers prepared by atomic layer deposition.
Scr. Mater. 219, 1-5, 2022. ISSN: 1359-6462.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2022.114857>
IF: 6





**DEBRECENI
EGYETEM**

**DEBRECENI EGYETEM
EGYETEMI ÉS NEMZETI KÖNYVTÁR**

H-4002 Debrecen, Egyetem tér 1, Pf.: 400
Tel.: 52/410-443, e-mail: publikaciok@lib.unideb.hu

12. Korol, Y. D., Cserhádi, C., **Vecsei, G.**, Tiutenko, V. M.: Experimental study os Al-Zn alloy
decomposition at various temperature deformation regimes.

*Cherkasky university bulletin: physical and mathematical sciences. 1, 107-114, 2017. ISSN:
2076-5851.*

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 52,6

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre):
8,6**

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

Debrecen, 2025.10.08.



Short thesis for the degree of doctor of philosophy (PhD)

Diffusion studies in cylindrical nanostructures

by Gergő Vecsei

Supervisor: Dr. Csaba Cserhádi



UNIVERSITY OF DEBRECEN

Doctoral School of Physics

Debrecen, 2025

Introduction

The investigation of diffusion phenomena continues to attract significant attention, as numerous questions in the field remain unresolved. One particularly challenging issue is the interaction between interdiffusion and mechanical stresses. Interdiffusion experiments are typically conducted in planar, so-called sandwich geometries, where the diffusion couple is formed by two materials with flat, parallel surfaces. In such geometries, the stresses arising from diffusion-induced mixing can easily relax, for instance, through deformation in the direction of diffusion or via the displacement of the sample's free ends. However, if the sample has cylindrical or spherical geometry, the two diffusing components are arranged concentrically. In these cases, stress relaxation cannot proceed in the same manner. It is expected that in such structures, the development and relaxation of stresses will strongly depend on the sample's shape and dimensions. As the system approaches nanoscale dimensions, a pronounced radial dependence of the process may also emerge.

Diffusion processes and the associated mechanical stresses in nanoscale structures are of particular interest, as they fundamentally influence the stability, lifespan, and functionality of nanostructures. Investigating the interplay between interdiffusion and stress generation in such systems is therefore not only of theoretical importance but may also be crucial for future developments in nanotechnology.

Spinel-type materials have recently garnered significant scientific attention due to their excellent optical, electronic, and catalytic properties. They can be used as catalysts in the removal of air pollutants or as photocatalysts for the degradation of toxic aromatic compounds. Owing to their distinct luminescence spectra, they are also applicable as sensors. Their nonlinear optical properties make them promising candidates for use as optical limiting materials. For instance, zinc

aluminate has recently been demonstrated to serve effectively as an anti-reflective coating in solar cells. Among spinel compounds, ZnAl_2O_4 stands out due to its remarkable optical and catalytic characteristics.

Goals

The aim of my doctoral research was to investigate the interplay between interdiffusion and the associated mechanical stresses in cylindrical nanostructures. While diffusion processes have been extensively studied in planar geometries, much less is known about these phenomena in closed, curved geometries.

As a model system, I selected the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ material pair, and studied their reactive diffusion in nanostructures fabricated using atomic layer deposition (ALD). In my experiments, I fabricated double-walled nanotubes as well as double-walled core-shell structures. The central objective of this work was to induce reactive diffusion between the layers by thermal annealing and to investigate the growth of a newly formed phase, its kinetic characteristics, and the influence of stress development during the process.

Through the examination of the Al_2O_3 and ZnO diffusion couple, I aimed to determine how the geometry of cylindrical structures and the sequence of layering affect the growth kinetics of the resulting phase. To interpret the role of mechanically induced stresses during the process, I utilized a computational simulation method developed at our Department.

Methods

For the diffusion studies, I fabricated various three-dimensional cylindrical nanostructures. Two types of structures were prepared: double-layered nanotubes (DLNTs) and double-layered nanopillars (DLNPs).

The nanostructures were fabricated on different substrates. For the nanotubes, polyvinyl alcohol (PVA) polymer nanofibers were used as templates. For the DLNPs, platinum nanopillars were grown on single-crystalline silicon substrates using a Gas Injection System (GIS).

Conformal coatings were deposited onto the nanofibers/nanopillars to enable the investigation of interdiffusion processes upon subsequent thermal annealing. The coatings were applied using the Atomic Layer Deposition (ALD) technique. Two metal oxides, aluminum oxide and zinc oxide were deposited in the following configurations: (a) on the polymer nanofibers in two different sequences: PVA)ZnO)Al₂O₃) and PVA)Al₂O₃)ZnO); and (b) on the Pt nanopillars in a single sequence: Pt)Al₂O₃)ZnO).

Prior to diffusion annealing, the samples were subjected to various pre-annealing treatments. For the diffusion studies, the samples were annealed at 700 °C for different durations. The solid-state reactions during thermal treatment resulted in reaction layers with thicknesses on the order of several tens of nanometers. These layers were analyzed using TSEM, TEM, and HRSTEM imaging. For this purpose, cross-sectional lamellae were prepared by focused ion beam (FIB) thinning using a FIB-SEM system.

In addition, further characterization techniques were employed, including energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) for elemental analysis and X-ray diffraction (XRD) for phase identification. To interpret the effects of mechanically induced stresses developed during the process, I utilized a computational simulation method developed at our Department.

New scientific results

Thesis 1: The Influence of Layering Order on the Development of the ZnAl_2O_4 Spinel Phase in Cylindrical Geometry

T.1.1. To the best of my understanding, I was the first to investigate the growth kinetics of a spinel phase formed via solid-state reaction between two oxides in a tubular cylindrical geometry. I demonstrated that reactive diffusion occurs at 700 °C in bilayer nanotubes composed of crystalline ZnO and amorphous Al_2O_3 . The resulting product is the crystalline ZnAl_2O_4 spinel phase. Kirkendall voids formed at the ZnO/ ZnAl_2O_4 phase boundary indicate that the process is controlled by ZnO diffusion.

T.1.2. I showed that the growth kinetics of the spinel phase follow a parabolic law regardless of the layer sequence; however, the growth rate is higher in the ZnO) Al_2O_3) configuration than in the Al_2O_3)ZnO) structure. I explained this phenomenon by the presence of mechanical stresses developed during diffusion. These stresses arise due to differences in the diffusion fluxes and the volumetric mismatch between the reactants and the product phase.

Thesis 2: Nucleation and Growth of ZnAl_2O_4 Spinel Phase in Bilayer $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ Nanopillars and Nanotubes

T.2.1. According to the literature, I was the first to study the growth kinetics of spinel formation in a core–shell cylindrical geometry through solid-state reaction between two oxides. I fabricated Pt nanopillars coated with Al_2O_3 and ZnO and examined their reactive diffusion behavior at 700 °C. I showed that the growth of the ZnAl_2O_4 spinel phase follows parabolic kinetics.

T.2.2. Experimentally, I demonstrated that the ZnAl_2O_4 spinel phase grows in two stages, similar to planar geometries: initially, islands

nucleate and grow preferentially perpendicular to the diffusion direction, followed by lateral growth into a continuous layer, which then thickens.

T.2.3. I showed that the growth kinetics of the spinel phase are slower in the solid-core Pt(Al_2O_3)ZnO bilayer nanopillars compared to the analogous but hollow Al_2O_3 /ZnO nanotubes. Furthermore, I demonstrated that the sign of the hydrostatic stress at the ZnO/ ZnAl_2O_4 phase boundary differs between the two systems: in hollow structures, a positive tensile stress is present, while in the nanopillar structures, a negative compressive stress develops.

Publications related to the dissertation

1. **G. Vecsei**, G. Jáger, L. Juhász, J. J. Tomán, V. O. Odhiambo, I. M. Szilágyi, Z. Erdélyi, C. Cserháti: *Effect of stacking order in cylindrical geometry on the growth of ZnAl_2O_4 spinel phase*, Materialia (2023), <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2023.101819>
2. **G. Vecsei**, B. Sárközi, L. Juhász, J. J. Tomán, I. G. Márián, P. Pekker, Z. Erdélyi, C. Cserháti: *The effect of stress on the growth kinetics of ZnAl_2O_4 spinel phase developing in double-layered Al_2O_3 /ZnO cylindrical nanopillars*, (még nem jelent meg)

Other publications

1. H. L Hamsasew, L. Tolezani, T. Igricz, D. H., P. Pál, C. Cserháti, **G. Vecsei**, B. Sárközi, E. M. Baradács, Z. Erdélyi, I. M. Szilágyi, *Enhanced photocatalysis via inverse opal structures: Synthesis and characterization of TiO_2 /ZnO and ZnO/ TiO_2 composites using plasma-enhanced ALD*, Ceramics International, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.10.465>.
2. G. Jáger, J. J. Tomán, L. Juhász, **G. Vecsei**, Z. Erdélyi, C. Cserháti, *Nucleation and growth kinetics of ZnAl_2O_4 spinel in crystalline ZnO – amorphous Al_2O_3 bilayers prepared by atomic layer deposition*, Scripta Materialia, Volume 219, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2022.114857>.

3. J. J. Tomán, E. Baradács, **G. Vecsei**, L. Nagy, B. Parditka, S. Kéki, Z. Erdélyi, *Low-temperature, ultra-giant blistering of atomic layer deposited barrier coatings on polyethylene films caused by additive segregation*, Progress in Organic Coatings, Volume 204, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109261>.
4. Kale, P., Muduli, S.P., Muduli, Paresh Kale, **G. Vecsei**, L. Juhász, B. Parditka, T. Fodor, C. Cserhádi, Z. Erdélyi. *Interface Engineering via Metal-coating of Silicon Nanostructured Thin Films for Reducing Anode Pulverization*. *Trans. Electr. Electron. Mater.* **26**, 182–194 (2025). <https://doi.org/10.1007/s42341-024-00583-8>
5. Czifrák, K.; Lakatos, C.; Cserhádi, C.; **Vecsei, G.**; Zsuga, M.; Kéki, S. *Bio-Based Polyurethane Networks Containing Sunflower Oil Based Polyols*. *Int. J. Mol. Sci.* **2024**, *25*, 7300. <https://doi.org/10.3390/ijms25137300>
6. S.S. Fouad, E. Baradács, M. Nabil, G. Katona, **G. Vecsei**, Z. Erdélyi, Investigation of Fe thickness effect on the absorption behavior of ZnO/Fe/ZnO tri-layers thin films, *Optical Materials*, Volume 157, Part 3, 2024, 116403, <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116403>.
7. A. Forgács, M. Ranga, A. Ranga, L. I. Orosz, G. Paul, L. Marchese, D. Pércsi, A. Len, Z. Dudás, **G. Vecsei**, A. Csík, I. Fábíán, J. Kalmár, Pristine and cross-linked gelatin aerogels of pH-responsive hydration and swelling, *Applied Surface Science Advances*, Volume 27, 2025, 100765, <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2025.100765>.
8. Zoltán Balogh, Marcell Tátrai, Zoltán Dudás, **Gergő Vecsei**, Csaba Cserhádi, Attila Csík, István Csarnovics, István Fábíán, József Kalmár, *Morphological features control drug release from nanostructured borosilicate – alginate aerogels and xerogels*, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Volume 727, Part 2, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.138320>.



Registry number: DEENK/546/2025.PL
Subject: PhD Publication List

Candidate: Gergő Vecsei
Doctoral School: Doctoral School of Physics
MTMT ID: 10079315

List of publications related to the dissertation

Foreign language scientific articles in international journals (2)

1. **Vecsei, G.**, Tomán, J., Márián, I. G., Sárközi, B., Juhász, L., Pekker, P., Erdélyi, Z., Cserhádi, C.:
Nucleation and growth of ZnAl₂O₄ spinel phase in double-layered Al₂O₃/ZnO nanopillars and nanotubes prepared by atomic layer deposition.
Ceram. Int. [Epub ahead of print], 2025. ISSN: 0272-8842.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.08.446>
IF: 5.6 (2024)
2. **Vecsei, G.**, Jáger, G., Juhász, L., Tomán, J., Odhiambo, V. O., Szilágyi, I. M., Erdélyi, Z., Cserhádi, C.:
Effect of stacking order in cylindrical geometry on the growth of ZnAl₂O₄ spinel phase.
Materialia. 30, 1-5, 2023. ISSN: 2589-1529.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mta.2023.101819>
IF: 3

List of other publications

Hungarian scientific articles in Hungarian journals (1)

3. Jáger, G., Tomán, J., Juhász, L., **Vecsei, G.**, Erdélyi, Z., Cserhádi, C.: Két anyag aszimmetrikus házassága és egy új anyag születése.
Fiz. szle. 72 (7), 197-201, 2022. ISSN: 0015-3257.

Foreign language scientific articles in international journals (9)

4. Lemago, H., Tolezani, L., Igricz, T., Hessz, D., Pál, P., Cserhádi, C., **Vecsei, G.**, Sárközi, B., Baradács, E., Erdélyi, Z., Szilágyi, I. M.: Enhanced photocatalysis via inverse opal structures: Synthesis and characterization of TiO₂/ZnO and ZnO/TiO₂ composites using plasma-enhanced ALD.
Ceram. Int. 51 (1), 339-352, 2025. ISSN: 0272-8842.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.10.465>
IF: 5.6 (2024)





5. Tomán, J., Baradács, E., **Vecsei, G.**, Nagy, L., Parditka, B., Kéki, S., Erdélyi, Z.: Low-temperature, ultra-giant blistering of atomic layer deposited barrier coatings on polyethylene films caused by additive segregation.
Prog. Org. Coat. 204, 1-9, 2025. ISSN: 0300-9440.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109261>
IF: 7.3 (2024)
6. Balogh, Z., Tátrai, M., Dudás, Z., **Vecsei, G.**, Cserhádi, C., Csik, A., Csarnovics, I., Fábrián, I., Kalmár, J.: Morphological features control drug release from nanostructured borosilicate - alginate aerogels and xerogels.
Colloid Surf. A-Physicochem. Eng. Asp. 727, 1-11, 2025. ISSN: 0927-7757.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.138320>
IF: 5.4 (2024)
7. Forgács, A., Ranga, M., Ranga, A., Orosz, L. I., Paul, G., Marchese, L., Pércsi, D., Len, A., Dudás, Z., **Vecsei, G.**, Csik, A., Fábrián, I., Kalmár, J.: Pristine and cross-linked gelatin aerogels of pH-responsive hydration and swelling.
Appl. Surf. Sci. Adv. 27, 1-12, 2025. ISSN: 2666-5239.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsadv.2025.100765>
IF: 8.7 (2024)
8. Czifrák, K., Lakatos, C., Cserhádi, C., **Vecsei, G.**, Zsuga, M., Kéki, S.: Bio-Based Polyurethane Networks Containing Sunflower Oil Based Polyols.
Int. J. Mol. Sci. 25 (13), 1-17, 2024. ISSN: 1661-6596.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ijms25137300>
IF: 4.9
9. Kale, P., Muduli, S. P., Muduli, R. C., **Vecsei, G.**, Juhász, L., Parditka, B., Fodor, T., Cserhádi, C., Erdélyi, Z.: Interface Engineering via Metal-coating of Silicon Nanostructured Thin Films for Reducing Anode Pulverization.
Trans. Electr. Electron. Mater. 1, 1-13, 2024. ISSN: 1229-7607.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s42341-024-00583-8>
IF: 1.9
10. Fouad, S. S., Baradács, E., Nabil, M., Katona, G., **Vecsei, G.**, Erdélyi, Z.: Investigation of Fe thickness effect on the absorption behavior of ZnO/Fe/ZnO tri-layers thin films.
Opt. Mater. 157, 1-7, 2024. ISSN: 0925-3467.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116403>
IF: 4.2
11. Jáger, G., Tomán, J., Juhász, L., **Vecsei, G.**, Erdélyi, Z., Cserhádi, C.: Nucleation and growth kinetics of ZnAl₂O₄ spinel in crystalline ZnO - amorphous Al₂O₃ bilayers prepared by atomic layer deposition.
Scr. Mater. 219, 1-5, 2022. ISSN: 1359-6462.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2022.114857>
IF: 6





**UNIVERSITY of
DEBRECEN**

**UNIVERSITY AND NATIONAL LIBRARY
UNIVERSITY OF DEBRECEN**

H-4002 Egyetem tér 1, Debrecen

Phone: +3652/410-443, email: publikaciok@lib.unideb.hu

12. Korol, Y. D., Cserháti, C., **Vecsei, G.**, Tiutenko, V. M.: Experimental study os Al-Zn alloy
decomposition at various temperature deformation regimes.

*Cherkasky university bulletin: physical and mathematical sciences. 1, 107-114, 2017. ISSN:
2076-5851.*

Total IF of journals (all publications): 52,6

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 8,6

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

08 October, 2025

