

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Fázisképződés kísérleti és szimulációs
vizsgálata nanoszerkezetű rendszerekben

Jáger Gabriella

Témavezető: Prof. Dr. Erdélyi Zoltán



DEBRECENI EGYETEM
Fizikai Tudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2023

Bevezetés

„There’s always something to look at if you open your eyes!”

– Ötödik Doktor a „Ki vagy, Doki?” című sorozatból

A nanotechnológia korszakába lépve rohamosan fejlődik az alkalmazott módszerek, eszközök téra, amely kapcsán egyre összetettebb anyagrendszerek, különlegesebb geometriák, valamint változatosabb tulajdonságokkal rendelkező kristályszerkezetek előállításai és alkalmazási lehetőségei merülnek fel. Azonban a sikeres, jól kontrollálható, valamint ipari szempontból is költséghatékony megvalósításhoz fel kell tárnai a kialakulásukhoz vezető, nanoskálájú atommozgási folyamatokat, valamint azokat a tényezőket, amelyek segítségével számunkra előnyös módon befolyásolhatjuk ezeket.

Az értekezésben ismertetett munkám során egyrészt a fenti célra tökéletesen alkalmas, a Debreceni Egyetem Szilárdtest Fizikai Tanszékén kifejlesztett modell, valamint az azt megvalósító programkód továbbfejlesztését végeztem, amellyel lehetőségem nyílt egy különleges módon előállítható nanokompozit számítógépes szimulációjára, valamint összetettebb jövőbeli szimulációk céljából az eredeti modell egy sajátosságának szisztematikus tesztelésében és értelmezésében is részt vettem.

A Debreceni Egyetem Szilárdtest Fizikai Tanszék és a Debreceni Egyetem – ATOMKI Anyagtudományi Kutatóhálózat laboratóriumaiban rendelkezésre álló eszközpark a nanoszerkezetekben lezajló diffúzió kísérleti úton történő tanulmányozását is lehetővé tette, így egy alkalmazás szempontjából nagyon sokoldalú kristályszerkezet kialakulásának részleteit derítettem fel, amely szintén kiváló támpontként szolgálhat jövőbeli, összetettebb kísérletsorozatok tervezésében, kivitelezésében és megértésében.

1. fejezet

Előzmények és célkitűzések

2016 júliusában jelent meg a Debreceni Egyetem Szilárdtest Fizikai Tanszék és a Cherkasy Egyetem kutatói által közösen megalkotott, a kinetikus átlagtér megközelítésen alapuló sztochasztikus kinetikus modellezési keretrendszer (Stochastic Kinetic Modelling Framework, SKMF), amely egy új módszer a háromdimenziós atomi konfigurációk időbeli változásának kiszámítására. A 2016-os nyári szakmai gyakorlatom során kapcsolódtam be a kutatócsoport munkásságába, azóta megismerkedtem az SKMF modell működésével, továbbá a rendeződő valamint fázisszeperálódó rendszerek viselkedésével, azok bizonyos paraméterektől való függésével. Az Erdélyi Zoltán és Tomán János iránymutatásával készült szakdolgozatom, diplomamunkám, és most doktori értekezésem célja, hogy hozzájáruljak a vizsgált rendszerek jobb megismeréséhez, a modell teszteléséhez, fejlesztéséhez, és a kapott eredményeim támpontként szolgáljanak jövőbeli kutatásokhoz.

A doktori képzésem alatt végzett elméleti, modellszámolási és kísérleti munkáim mind a fázisátalakulások területéhez tartoznak, azon belül is a szilárd fázisban lejátszódó fázisszeperáció (spinodális bomlás és nukleáció) és rendezett fázis képződés témaköréhez. Ezeknek a nanoskálájú önszerveződő folyamatoknak a megismerése és kontrollált alkalmazása számos technológiai fejlesztést tehet lehetővé a jövőben, többek között például a napelemcellák hatékonyságának növelésében.

A jelen dolgozatomban bemutatott, aktuális problémák egyike a fázisszeperálódó, ionimplantált mintákban lezajló folyamatok leírása. A szigetelő oxid vékonyrétegek a beléjük ágyazott vezető vagy félvezető nanorészecskékkel olyan nanokompozitokat alkotnak, amelyek ígéretes anyagai lehetnek például a nemfelejtő memória, nemlineáris optika, plazmonika, vagy katalízis alkalmazásainak. Az implantálás után kapott rendszer gyakran fázisszeperálódó, így hőkezelés során az oxidban elkülönülő nanorészecskékként válik ki az implantált anyag. A fázisok ilyen formában történő szétválását általában a nukleáció és növekedés folyamatának tulajdonítják, mivel a másik fázisszeperációs folyamathoz, a spinodális bomláshoz, összenőtt, labirintusszerű mintázatot társítanak. Emiatt az ionimplantált mintákban lezajló ré-

szecskeképződés során a szakemberekben még akkor sem merül fel a spinodális bomlás lehetősége, amikor az implantált minta összetétele legalább a minta egy részében egyértelműen a spinodális bomlás tartományába ér. Diplomamunkám során megkezdtem az SKMF modell továbbfejlesztését, hogy segítségével ionimplantált minták hőkezelési szimulációját végezhessem. Az akkor született előzetes eredmények alapján megállapítható volt, hogy az SKMF ideális módszer a részecskeképződés mögötti folyamat feltárására. Doktori munkám során a célom az volt, hogy a nukleáció és növekedés lehetőségét kizárva vizsgáljam, létrejöhetnek-e elkülönülő nanorészecskék spinodális bomlás útján, értékes megfigyelésekkel gyarapítva nemcsak az ionimplantáció, de a fázisszeptarációs elmélet szakirodalmát is.

A fenti rendszeren túl az SKMF számos más minta számítógépes szimulációját teszi lehetővé, amelyek esetén indokolt lehet a modellbe épített sztochaszticitás használata. A modell ezen tulajdonságának kihasználásához, valamint az eredmények helyes interpretációjához elengedhetetlen a zaj kinetikus átlagtér számításokra gyakorolt hatásának ismerete. Így munkám során az is célom volt, hogy részt vegyek az SKMF statisztikai viselkedésének feltérképezésében, és annak összehasonlításában egy már jól megalapozott módszer, a kinetikus Monte Carlo (KMC) statisztikai viselkedésével.

Végül doktori képzésem ideje alatt abba a szerencsés helyzetbe kerültem, hogy témámhoz kapcsolódóan egy másik, alkalmazás szempontjából fontos, úgynevezett spinell szerkezetű anyag kísérleti vizsgálatába is bekapcsolódhattam. Ennek során egy rendeződő rendszerben tanulmányozhattam nanorészecskék kialakulását és növekedését. Az elmúlt időben a spinell típusú anyagok jelentős érdeklődést váltottak ki kiváló optikai, elektronikai és katalitikai tulajdonságuknak köszönhetően. A Debreceni Egyetem Szilárdtest Fizikai Tanszék és a Debreceni Egyetem – ATOMKI Anyagtudományi Kutatóhálózat laboratóriumaiban lehetőségem adódott egy katalitikai és optikai anyagként is különösen érdekes, spinell szerkezetű réteg, a cink-aluminát (ZnAl_2O_4) kialakulásához vezető nanoskálájú folyamatok kísérleti megfigyelésére. Célom, hogy sík Al_2O_3 -ZnO kettősréteget állítsak elő a finoman szabályozható atomi rétegleválasztás segítségével, majd izoterm hőkezelések sorozatán keresztül végigkövessem a heterogén szilárdtest-reakcióban keletkező spinell típusú végtermék kialakulását és növekedését, elsőként megállapítva ennek módját, valamint a növekedést kontrolláló folyamatokat.

2. fejezet

Új tudományos eredmények

1. tézis: Ionimplantált minták hőkezelése során lejátszódó nanorészecske-képződés

1.1.

Az SKMF modell továbbfejlesztésével létrehoztam egy ionokkal implantált, alul hordozóval, felül valamilyen környezettel határolt vékonyréteg hőkezelési szimulációjára alkalmas modellt. Az új módszer lehetővé teszi a posztimplantációs hőkezelés során bekövetkező részcskeképződés tanulmányozását, tetszőleges implantáltanyag-eloszlás alkalmazása mellett. Implementálásra kerültek olyan új paraméterek, amelyek segítségével a határfelületek részcskeképződésre gyakorolt hatása is szisztematikusan vizsgálhatóvá válik [1].

1.2.

A kifejlesztett modell segítségével egy implantált anyag és vékonyréteg mátrix alkotta, erősen fázisszeperálódó rendszer vizsgálatát végeztem el; az implantált anyag eloszlását egydimenziós Gauss-eloszlással közelítettem, amelynek maximuma a spinodális bomlás tartományába ért. A kapott eredmény alapján megállapítottam, hogy a spinodális bomlás is képes elkülönülő nanorészcskék létrehozására, miközben a szakirodalomban a részcskeképződést szinte kizárólag a nukleáció és növekedés folyamatához kötik ilyen rendszerek esetén. Mivel egy valós rendszerben vélhetőleg mindkét fázisszeperációs mechanizmus hozzájárul a részcskék képzéséhez, ezért szorgalmaztam a tudományos közösség számára a két mechanizmus egymástól való éles elkülönítésének az újragondolását, valamint a spinodális bomlás lehetőségének figyelembe vételét ionimplantált minták esetén [1].

Az 1. tézis eredményeihez kapcsolódó közlemény: [1] .

2. tézis: Zaj bevezetésének hatása a kinetikus átlagtér számításokban: összehasonlítás kinetikus Monte Carlo módszerrel reguláris szilárdoldatok esetén

Az SKMF statisztikai viselkedésének vizsgálata céljából az eredeti modellbe implementáltam a kutatócsoportunk által meghatározott rácshely-összetétel fluktuáció, klaszterösszetétel-fluktuáció és térbeli korreláció definíciókat, majd számítógépes szimulációkat végeztem reguláris szilárd oldatok estére. Ennek segítségével megállapítottam, hogy az SKMF módszer alkalmazható homofázisú fluktuációk szimulációjára, és statisztikai viselkedése a fluktuáció és a térbeli korreláció tekintetében megfeleltethető az átlagolt Monte Carlo módszerének [2].

A 2. tézis eredményeihez kapcsolódó közlemény: [2].

3. tézis: ZnAl_2O_4 spinell nukleációja és növekedési kinetikája atomi rétegleválasztással előállított kristályos ZnO - amorf Al_2O_3 kettősrétegekben

3.1.

Elektronmikroszkópia segítségével végigkövettem a ZnAl_2O_4 spinell termékfázis képződését atomi rétegleválasztás útján előállított kristályos ZnO és amorf Al_2O_3 vékonyrétegek között. A kapott felvételek alapján megállapítottam, hogy a termékfázis két lépésben alakul ki: első lépésben szigetek nukleálódnak, amelyek kezdetben főleg laterálisan növekednek, majd második lépésben az összenőtt szigetek alkotta folytonos réteg vastagodik. Oxidok esetén ez az első kísérleti megfigyelés kétlépéses fázisnövekedésre [3].

3.2.

A TSEM felvételek analizését követően megállapítottam, hogy a növekedést hatványfüggvény írja le. Ennek kitevője a diffúziókontrollált folyamatokra jellemző 0,5-es érték alattinak adódott, amely alapján arra következtettem, hogy a vizsgált rendszerben a termékfázis növekedését kontrolláló fő folyamat a szemcsenövekedéssel együtt zajló szemcsehatár diffúzió [3].

A 3. tézis eredményeihez kapcsolódó közlemény: [3].

Az értekezéshez kapcsolódó közlemények

- [1] G. Jáger, J. J. Tomán és Z. Erdélyi. “Nanoparticle formation by spinodal decomposition in ion implanted samples”. *Journal of Alloys and Compounds* 910 (2022. júl.), 164781. old.
- [2] T. V. Zaporozhets és tsai. “The effect of introducing stochasticity to kinetic mean-field calculations: Comparison with lattice kinetic Monte Carlo in case of regular solid solutions”. *Computational Materials Science* 171 (2020. jan.), 109251. old.
- [3] G. Jáger és tsai. “Nucleation and growth kinetics of ZnAl_2O_4 spinel in crystalline ZnO - amorphous Al_2O_3 bilayers prepared by atomic layer deposition”. *Scripta Materialia* 219 (2022. okt.), 114857. old.



Nyilvántartási szám: DEENK/376/2023.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Jáger Gabriella

Doktori Iskola: Fizikai Tudományok Doktori Iskola

MTMT azonosító: 10069836

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (3)

1. **Jáger, G.**, Tomán, J., Erdélyi, Z.: Nanoparticle formation by spinodal decomposition in ion implanted samples.
J. Alloy. Compd. 910, 1-7, 2022. ISSN: 0925-8388.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164781>
IF: 6.2
2. **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
3. Zaporozhets, T. V., Taranovskyy, A., **Jáger, G.**, Gusak, A. M., Erdélyi, Z., Tomán, J.: The effect of introducing stochasticity to kinetic mean-field calculations: Comparison with lattice kinetic Monte Carlo in case of regular solid solutions.
Comput. Mater. Sci. 171 (171), 1-7, 2020. ISSN: 0927-0256.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2019.109251>
IF: 3.3





További közlemények

Magyar nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (2)

4. **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.

5. **Jáger, G.**, Tomán, J., Erdélyi, Z.: Beágyazott kvantumpöttyök és plazmonikus nanorészecskék létrehozása önszerveződéssel.

Fiz. szle. 71 (12), 414-420, 2021. ISSN: 0015-3257.

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (1)

6. 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.mtla.2023.101819>

IF: 3.4 (2022)

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 18,9

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre): 15,5

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, 2023.08.17.



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

Experimental and simulational study of phase
formation in nanostructured systems

by Gabriella Jáger

Supervisor: Prof. Dr. Zoltán Erdélyi



UNIVERSITY OF DEBRECEN
Doctoral School of Physics

Debrecen, 2023

Introduction

„There’s always something to look at if you open your eyes!”

– 5th Doctor from the television series „Doctor who?”

As we move into the era of nanotechnology, the set of applied methods and tools is rapidly evolving, and as a response the production and application possibilities of increasingly complex material systems, more special geometries and crystal structures with more diverse properties appear. However, the successful, well-controlled and industrially cost-effective implementation of these materials requires to understand the nanoscale atomic motion processes that lead to their formation and the factors that can be used to manipulate those in any desired way.

During my work described in this thesis, I have improved the model and the related computer code developed by the Department of Solid State Physics at the University of Debrecen that is perfectly suited for this purpose, and this has enabled me to perform a computer simulation of a specially manufactured nanocomposite, and for more complex future simulations I have also systematically tested a specific feature of the original model.

The tools at my disposal in the laboratories of the Department of Solid State Physics and the University of Debrecen – ATOMKI (Institute of Nuclear Research) Materials Science Research Network also allowed me to study the diffusion in nanostructures experimentally, thus I was able to reveal the details of the formation of a crystal structure with great versatility in terms of application, which could also serve as an excellent basis for a more complicated series of experiments in the future.

Chapter 1

Background and goals

In July 2016, the stochastic kinetic modelling framework (SKMF) based on the kinetic mean field approach was developed and published by researchers of the Department of Solid State Physics at the University of Debrecen together with their colleagues at Cherkasy University. It is a new method for calculating the time variation of three-dimensional atomic configurations. I joined the research group during my summer internship in 2016, and since then I have become familiar with the operation of the SKMF model and the behaviour of ordered and phase-separated systems, and their dependence on certain parameters. The aim of my thesis, my diploma thesis and now my doctoral dissertation, which I wrote under the guidance of Zoltán Erdélyi and János Tomán, is to contribute to a better understanding of the systems under investigation, to test and improve the model and to use the results obtained as a basis for future research.

The theoretical, modelling and experimental work done during my doctoral studies all belong to the field of phase transitions, and within that to the phase separation (spinodal decomposition and nucleation) and ordered phase formation in the solid phase. The understanding and controlled application of these nanoscale self-assembly processes could enable many technological advances in the future, such as increasing the efficiency of solar cells.

One of the current problems presented in this thesis is the processes occurring in phase separating ion implanted samples. Conducting or semiconducting nanoparticles embedded in an insulating oxide thin film form nanocomposites that can be promising materials for applications in, for example, nonvolatile memory, nonlinear optics, plasmonics, or catalysis. The system obtained after implantation is often phase separating, which means that upon annealing the implanted material forms separated nanoparticles in the oxide. Such phase separation is usually attributed to the process of nucleation

and growth, since the other phase separation mechanism, spinodal decomposition, is associated with a coalesced labyrinthine pattern. For this reason, in ion implanted samples experts do not consider the possibility of spinodal decomposition during particle formation even when the composition of the implanted sample clearly falls within the range of spinodal decomposition in at least part of the sample. During my diploma thesis I started to further develop the SKMF model to simulate the thermal treatment of ion implanted samples. The preliminary results obtained at that time suggest that SKMF is an ideal method to explore the process behind particle formation. During my research, excluding the possibility of nucleation and growth, my aim was to investigate whether separated nanoparticles can be formed via spinodal decomposition, adding valuable observations not only to the literature on ion implantation but also on phase separation theory.

In addition to the above mentioned system, SKMF allows the computer simulation of many other samples for which the use of stochasticity built into the model may be required (e.g. for ordering systems). To exploit this property of the model and to interpret the results correctly, it is essential to know the impact of noise on the kinetic mean field calculations. Thus, in my work, I also aimed to contribute to the exploration of the statistical behaviour of SKMF and its comparison with the statistical behaviour of the already well-established kinetic Monte Carlo (KMC) method.

Finally, during my doctoral studies, I was fortunate enough to be involved in the experimental investigation of another application-relevant material with a so-called spinel structure. This allowed me to study the formation and growth of nanoparticles in an ordered system. Recently, spinel-type materials have attracted considerable interest due to their excellent optical, electronic and catalytic properties. In the laboratories of the Department of Solid State Physics of the University of Debrecen and the Materials Science Research Network of the University of Debrecen - ATOMKI, I had the opportunity to experimentally observe the nanoscale processes leading to the formation of the zinc aluminate (ZnAl_2O_4) spinel layer, which is of particular interest as a catalytic and optical material. My aim is to prepare a planar Al_2O_3 -ZnO bilayer by means of finely controllable atomic layer deposition, and then to follow the formation and growth of the spinel-type end product in a heterogeneous solid-state reaction through a series of isothermal annealing treatments, first establishing the path of this process and the processes controlling its growth.

Chapter 2

New scientific results

1st Nanoparticle formation during heat treatment of ion implanted samples

1.1.

By further developing the SKMF technique, I have created a model which is suitable for simulating the annealing process of an ion implanted thin film bounded by a substrate at the bottom and an environment at the top. The new method enables us to study the particle formation during the post implantational heat treatment, applying arbitrary implanted material distributions. New parameters have been implemented to systematically investigate the influence of interfaces on particle formation [1].

1.2.

I used the developed model to investigate a thin film implanted with ions which forms a strongly phase-separating system; the distribution of the implanted material was approximated by a one-dimensional Gaussian distribution with a maximum in the region of spinodal decomposition. Based on the results obtained, I found that spinodal decomposition is also capable of generating separate nanoparticles, while in the literature, particle formation is almost exclusively associated with the process of nucleation and growth in such systems. Since in real systems it is likely that both phase separation mechanisms contribute to particle formation, I have suggested to the scientific community to rethink the sharp distinction between the two mechanisms, furthermore to consider the possibility of spinodal decomposition in ion implanted samples [1].

Publication related to the results of the 1st group of thesis statements: [1].

2nd The effect of introducing stochasticity to kinetic mean-field calculations: Comparison with lattice kinetic Monte Carlo in case of regular solid solutions

In order to investigate the statistical behaviour of the SKMF technique, I implemented the definitions of lattice site composition fluctuation, cluster composition fluctuation and spatial correlation defined by our research group into the original model, then I performed computer simulations for regular solid solutions. Using this approach, I found that the SKMF method can be applied to simulate homophase fluctuations and that its statistical behaviour in terms of fluctuation and spatial correlation can be matched to that of the averaged Monte Carlo method [2].

Publication related to the results of the 2nd thesis statement: [2].

3rd Nucleation and growth kinetics of ZnAl_2O_4 spinel in crystalline ZnO - amorphous Al_2O_3 bilayers prepared by atomic layer deposition

3.1.

Using electronmicroscopy, I followed the formation of the ZnAl_2O_4 spinel product phase between crystalline ZnO and amorphous Al_2O_3 thin films produced via atomic layer deposition. Based on the obtained images, I found that the product phase forms in two steps: in step 1, islands nucleate, which initially mainly increase their size laterally, then in step 2, the continuous layer formed by the coalesced islands thickens. This is the first experimental observation of two-step phase growth in case of oxides [3].

3.2.

After the analysis of the TSEM images, I found that the growth kinetics can be described with an exponential function. The exponent was found to be below the value 0.5 which is typical for diffusion-controlled processes. Based on this, I found that the main process controlling the growth of the product phase in the studied system is grain boundary diffusion taking place simultaneously with grain coarsening [3].

Publication related to the results of the 3rd group of thesis statements: [3].

Publications related to the dissertation

- [1] G. Jäger, J. J. Tomán, and Z. Erdélyi. “Nanoparticle formation by spinodal decomposition in ion implanted samples”. In: *Journal of Alloys and Compounds* 910 (July 2022), p. 164781.
- [2] T. V. Zaporozhets et al. “The effect of introducing stochasticity to kinetic mean-field calculations: Comparison with lattice kinetic Monte Carlo in case of regular solid solutions”. In: *Computational Materials Science* 171 (Jan. 2020), p. 109251.
- [3] G. Jäger et al. “Nucleation and growth kinetics of ZnAl_2O_4 spinel in crystalline ZnO - amorphous Al_2O_3 bilayers prepared by atomic layer deposition”. In: *Scripta Materialia* 219 (Oct. 2022), p. 114857.



Registry number:
Subject:

DEENK/376/2023.PL
PhD Publication List

Candidate: Gabriella Jáger

Doctoral School: Doctoral School of Physics

MTMT ID: 10069836

List of publications related to the dissertation

Foreign language scientific articles in international journals (3)

1. **Jáger, G.**, Tomán, J., Erdélyi, Z.: Nanoparticle formation by spinodal decomposition in ion implanted samples.
J. Alloy. Compd. 910, 1-7, 2022. ISSN: 0925-8388.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164781>
IF: 6.2
2. **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
3. Zaporozhets, T. V., Taranovskyy, A., **Jáger, G.**, Gusak, A. M., Erdélyi, Z., Tomán, J.: The effect of introducing stochasticity to kinetic mean-field calculations: Comparison with lattice kinetic Monte Carlo in case of regular solid solutions.
Comput. Mater. Sci. 171 (171), 1-7, 2020. ISSN: 0927-0256.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2019.109251>
IF: 3.3





List of other publications

Hungarian scientific articles in Hungarian journals (2)

4. **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.
5. **Jáger, G.**, Tomán, J., Erdélyi, Z.: Beágyazott kvantumpöttyök és plazmonikus nanorészecskék létrehozása önszerveződéssel.
Fiz. szle. 71 (12), 414-420, 2021. ISSN: 0015-3257.

Foreign language scientific articles in international journals (1)

6. 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.mtla.2023.101819>
IF: 3.4 (2022)

Total IF of journals (all publications): 18,9

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 15,5

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.

17 August, 2023

