

Abstract of PhD Thesis

**Nanoscale investigation of diffusion and solid state  
reactions of Ni/Si and Ag/Au thin film systems**

**Shenouda Shanda Shenouda Fam**

Supervisor

**Prof. Dr. Dezső L. Beke**



University of Debrecen  
PhD School in Physics  
Debrecen  
2015



## Introduction

The diffusion and solid state reactions in thin film systems on the nanoscale are very important for the recent technology. Thus, it is important to understand and control such processes especially the grain boundary diffusional kinetics and the low temperature solid state reactions in thin films. Thus, our experiments have been done at relatively low temperatures where the bulk diffusion is completely frozen.

Recently, NiSi has been used extensively as metallic contact in the ultra-large-scale integrated circuits and other electronic devices due to its advantages over the other silicides. Thus, we are interested in production of NiSi phase by grain boundary diffusion induced solid state reaction between Ni<sub>2</sub>Si and Si(100) substrate at low temperature heat treatment. This method has the following advantages; by the use of Ni<sub>2</sub>Si, instead of Ni as the initial reaction layer, the complications related to the initial formation of sometimes non-uniform Ni<sub>2</sub>Si layer can be avoided and the final thickness of the requested NiSi layer can be well controlled down to about 5 nm thickness. In addition, the fully GB controlled process allows the use of much lower temperatures as compared to the usual rapid thermal annealing (RTA) technologies. Thus, secondary neutral mass spectrometry (SNMS) and profilometer were used to map concentration profiles and to investigate the kinetics of solid state reactions between Ni<sub>2</sub>Si with different thickness and the Si substrate at low temperatures. The microstructure of some samples was analyzed by X-ray diffraction (XRD) and transmission electron microscope (TEM).

We studied the kinetics of shift of individual interfaces in Ni/crystalline(c)-Si and Ni/amorphous(a)-Si systems during low temperature reactions. In usual investigations, the thickness of the reaction layer is determined as function of the annealing time. However, the growth of a reaction layer is always a result of the *simultaneous shift of two interfaces* bordering the given phase. Thus, for a deeper understanding of such nanoscale solid state reactions, following the kinetics of both individual interfaces and thus the experimental methods of their determination are very important. Knowing these one can easily compose their combination for the interpretation of the growth kinetics of phases and the controllable formation of ultrathin metal silicide films.

Finally, we studied the grain boundary intermixing in Ag/Au thin film system and provided clear experimental evidence on porosity formation along GBs and triple junctions in Ag during the intermixing at low temperature (at 150°C). Then, we showed that the application of small (about 100 bar) hydrostatic pressure was enough to prohibit the nanoscale porosity formation along GBs at 150°C. Previously, the porosity formation was observed on micrometre scale and the annealing temperature was relatively high, i.e. the contribution of bulk diffusion was not negligible. Most studies in the literature investigated the diffusion induced grain boundary migration (DIGM) on the side of the *slower* component of the diffusion zone while we are interesting in the *faster* diffusing components as well.

All the results summarized in this thesis booklet are my own achievements.

## **Experimental techniques and tools**

Different thin film systems such as Ni<sub>2</sub>Si/crystalline(c)-Si, Ni/c-Si, Ni/amorphous(a)-Si, Ni(Pt)/c-Si, Ni(Pt)/a-Si and Ag/Au were prepared by DC magnetron sputtering. The sputtering rates were calculated from the layer thickness measured by AMBIOS XP-1 profilometer. The samples were annealed in high vacuum furnace ( $10^{-7}$  mbar) at different temperatures for different annealing times. Ag/Au samples were annealed under high and low hydrostatic pressure of high purity Ar.

Structure of some samples was investigated using X-ray diffraction (XRD) and by transmission electron microscope (TEM). The concentration-depth profiles were determined by means of secondary neutral mass spectrometry (SNMS) and profilometer. The resistance of the Ni<sub>2</sub>Si/c-Si sample as function of the annealing time was measured by the 4-wire resistance measurement technique at 180°C.

## **Results and conclusions**

### **1. Production of NiSi phase by grain boundary diffusion induced solid state reaction between Ni<sub>2</sub>Si and Si(100) substrate**

Investigation of the solid state reactions in Ni<sub>2</sub>Si/Si(100) system at low temperatures (180-200°C) shows that there exist certain temperature-time and thickness-time windows inside of which the formation of NiSi takes place. The NiSi phase formed along the grain boundaries of Ni<sub>2</sub>Si and grew gradually perpendicular to the grain boundary consuming the Ni<sub>2</sub>Si phase. This mechanism is identified as grain boundary diffusion induced solid state reaction (GBDIREAC).

From the depth profiles of the first stage of the process, using the linear dependence of the average composition inside the film on the annealing time, the velocity of the grain boundary diffusion induced interface motion was estimated ( $2 \times 10^{-4}$  nm/s). The normalized value of the resistance, proportional to the amount of the new phase, showed similar time evolution and yielded similar value for the interface velocity.

This model for the phase transformation offers a plausible explanation for the linear growth kinetics observed in the early stages of the solid state reactions. [papers 1, 4 and 5]

## **2. Kinetics of shift of individual interfaces in Ni/Si system during low temperature reactions**

Investigation of the very early stage of the solid state reactions in Ni/c-Si and Ni/a-Si systems (at 180°C) shows the formation of a product layer (Ni<sub>2</sub>Si+NiSi) with relatively large composition gradient in it. In contrast to the nanocrystalline-Ni<sub>2</sub>Si/Si(100) system, where intensive intermixing by grain boundary diffusion induced solid state reaction took place, here clear planar growth of the reaction product(s) was observed. Surprisingly even no penetration of Si along Ni grain boundaries could be detected.

Nevertheless, our method allowed the determination of the kinetics of shift of individual interfaces (i.e. the Si and Ni shrinkage) as well as the average growth kinetics of the product layer. They followed the parabolic growth law in both systems i.e. the change of their thicknesses were proportional to  $t^{1/2}$ . In addition, at longer annealing times, the formation of a plateau developed at composition of about 40% Ni in Ni/a-Si system, suggesting the formation of the NiSi<sub>2</sub> at the Si side. This was interpreted by the relatively high diffusivity of Ni in a-Si, leading to more intensive intermixing between the NiSi and a-Si.

The Pt has no influence on the kinetics of shrinkage of the initial layers and the growth of the product layer as well, i.e. the parabolic law has been fulfilled. At longer annealing times, similarly to the case without Pt addition, the NiSi<sub>2</sub> phase appeared on the a-Si side. [paper 2]

### **3. Grain boundary diffusional intermixing in Ag/Au thin film system and nanoscale Kirkendall porosity formation.**

The grain boundary diffusional intermixing in Ag/Au thin film system was studied at low temperatures (120-200°C) for different annealing times. We have provided clear experimental evidence on the nanoscale Kirkendall porosity formation along grain boundaries in Ag at low temperatures, where the bulk diffusion processes are completely frozen out. The porosity formation was suppressed by application of 100 bar pressure.

The interdiffusion leads to homogenization in both the Ag and Au layers up to levels corresponding to compositions left behind the moving boundaries during grain boundary diffusion induced grain boundary motion. The homogenization corresponds to saturation levels less than 50%, which would be expected for a system with complete mutual solubility, like Ag/Au. These levels results from some kind of kinetic constrains developed by the GB diffusion induced stress fields and the finite size effect. [paper 3]

## Bevezető

Vékony filmekben nanoskálán lejátszódó diffúzió és szilárdtest reakciók nagyon fontosak napjaink technológiáiban. Így különösen a szemcsehatár diffúziós kinetikák és az alacsony hőmérsékletű szilárdtest reakciók megértése és kontrollja fontos. Ezért kísérleteinket viszonylag alacsony hőmérsékleteken végeztük, ahol a tréfogati diffúzió gyakorlatilag befagyott.

Jelenleg a NiSi fázist kiterjedten használják integrált áramkörök nagyüzemi gyártásánál fémező kontaktusként és egyéb elektronikus eszközökben más szilicidokhoz viszonyított előnyösebb tulajdonságai miatt. Így NiSi fázist szerettünk volna előállítani szemcsehatár diffúzió indukálta szilárdtest reakcióval nanokristályos Ni<sub>2</sub>Si and Si(100) hordozó között alacsony hőmérsékletű hőkezeléssel. Ennek az eljárásnak a következő előnyei vannak: A Ni<sub>2</sub>Si-nak, mint kiindulási reagáló rétegnek, a Ni helyetti alkalmazásával a kezdetben nem egyenletes és inhomogén Ni<sub>2</sub>Si képződése elkerülhető és a kívánatos végső NiSi réteg vastagsága jól kontrollálható akár 5nm-ig lemenően is. Továbbá a teljesen szemcsehatár, SzH, kontrollált folyamat lehetővé teszi, a szokásos gyors termikus kezeléseknél, jóval alacsonyabb hőmérsékletek alkalmazását. Másodlagos neutrális tömegspektrométert (SNMS) és profilométert használtunk a koncentráció profilok meghatározására és arra, hogy a különböző vastagságú Ni<sub>2</sub>Si és Si hordozó közötti szilárdtest reakciók kinetikáját vizsgáljuk alacsony hőmérsékleteken. Egyes minták mikroszerkezetét Röntgen diffrakcióval (XRD) és transzmissziós elektron mikroszkóppal (TEM) vizsgáltuk.

Ezután a Ni/kristályos(c)-Si és Ni/amorf(a)-Si rendszerekben vizsgáltuk az egyedi határfelületek eltolódási kinetikáit alacsony hőmérsékleteken. A szokásos vizsgálatokban

a reakció réteg vastagságát határozzák meg a hőkezelési idő függvényében. Azonban, a reakció réteg növekedése az mindig *két külön határfelület egyidejű eltolódásának* a következménye. Így a nanoskálájú szilárdtest reakciók jobb megértése érdekében mindkét határfelület kinetikájának a követése és ezért az erre szolgáló kísérleti módszerek nagyon fontosak. Ezeket ismerve ezek kombinációból könnyen értelmezhetjük a fázisok növekedési kinetikáját és az ultra vékony fém-szilicid filmek kontrollált képződését.

Végül, szemcsehatár keveredést vizsgáltunk Ag/Au vékony film rendszerben és világos kísérleti bizonyítékot szolgáltatunk üregképződésre az Ag szemcsehatárain és szemcsehatár hármaspontjain alacsony hőmérsékleti ( $150^{\circ}\text{C}$ ) keveredés során. Megmutattuk, hogy kis hidrosztatikai nyomás (mintegy 100 bar) alkalmazása elegendő a nanoskálájú szemcsehatár üregképződés letiltásához  $150^{\circ}\text{C}$ -on. Korábban porozitás képződését mikrométeres skálán figyelték meg és a hőmérsékletek is viszonylag magasak voltak, azaz a térfogati diffúzió hozzájárulása nem volt elhanyagolható. Az irodalomban a legtöbb vizsgálat a szemcsehatár diffúzió indukálta szemcsehatár mozgást (DIGM) csak a *lassúbb* komponens oldalára irányult, ezzel szemben mi a jelenséget a *gyorsabb komponens* oldalán is vizsgáltuk.

Az ebben a tézisfüzetben ismertetett eredmények az én saját eredményeim.

## **Kísérleti technikák és eszközök**

Ni<sub>2</sub>Si/kristályos(c)-Si, Ni/c-Si, Ni/amorf(a)-Si, Ni(Pt)/c-Si, Ni(Pt)/a-Si and Ag/Au vékony film rendszereket állítottam elő Dc magnetronos porlasztással. A porlasztási sebességeket az AMBIOS XP-1 profilométerrel mért rétegvastagságokból számítottam ki. A mintákat nagyvákuumú ( $10^{-7}$  mbar) kemencében különböző hőmérsékleteken különböző ideig hőkezelttem. Az Ag/Au mintákat nagy tisztaságú argonban nagy és kis hidrosztatikai nyomásokon is hőkezelttem.

Néhány minta szerkezetét Röntgen diffrakcióval (XRD) és transzmissziós elektronmikroszkóppal is vizsgáltam. A koncentráció-mélység profilokat másodlagos semleges tömegspektroszkópiával (SNMS) határoztam meg. A Ni<sub>2</sub>Si/c-Si minta elektromos ellenállását a hőkezelési idő függvényében a 4-pontos ellenállás mérési technikát alkalmazva határoztam meg 180°C-om.

## Eredmények és konklúziók

### **1. NiSi fázis előállítása Ni<sub>2</sub>Si és Si(100) hordozó között lejátszódó, szemcsehatár diffúzió indukálta, szilárdtest reakcióval**

Ni<sub>2</sub>Si/Si(100) rendszerben alacsony hőmérsékleteken (180-200°C) lejátszódó szilárdtest reakciók vizsgálata azt mutatta, hogy létezik egy-egy hőmérséklet-idő és film vastagság-idő ablak, amelyen belül a NiSi képződése megy végbe. A Ni<sub>2</sub>Si szemcsehatárai mentén képződő NiSi fázis a Ni<sub>2</sub>Si szemcsehatáraitól merőlegesen, fokozatosan nő és elfogyasztja a Ni<sub>2</sub>Si fázist. Ezt a mechanizmust szemcsehatár diffúzió indukálta szilárdtest reakcióként (GBDIREAC) azonosítottuk.

A folyamat első szakaszának a mélységi eloszlásaiból, felhasználva, hogy a film átlagos koncentrációja lineárisan függ a hőkezelési időtől, a szemcsehatár diffúzió indukálta határfelület mozgás sebességét megbecsültük ( $2 \times 10^{-4}$  nm/s). Az elektromos ellenállásnak, amely arányos az új fázis mennyiségével, a normált értéke hasonló időfüggést mutatott és hasonló értéket adott a határfelület mozgási sebességére.

A fázisátalakulásnak ez a modellje kézenfekvő magyarázatot szolgáltat a szilárdtest reakciók kezdeti szakaszán megfigyelt lineáris növekedési kinetikákra.

## 2. Egyedi határfelületek kinetikája Ni/Si rendszerben alacsonyhőmérsékleti reakciók során

Ni/c-Si és Ni/a-Si rendszerekben a szilárdtest reakciók kezdeti szakaszának vizsgálata (180°C-on) egy (Ni<sub>2</sub>Si+NiSi) termék-réteg kialakulását mutatja, melyben viszonylag nagy összetétel gradiens van jelen. A nanokristályos-Ni<sub>2</sub>Si/Si(100) rendszerrel szemben, ahol szemcsehatár diffúzió indukálta szilárdtest reakció ment végbe, itt világos, párhuzamos határfelületekkel határolt reakciótermék(ek) növekedése volt megfigyelhető. Meglepő módon, nem tudtuk detektálni Si-nak még a Ni szemcsehatáraiba való behatolását sem.

Mindazonáltal, módszerünk lehetővé tette az egyedi határfelületek eltolódási kinetikáinak (azaz a Si és Ni fogyásának), valamint a reakció réteg átlagos növekedési kinetikájának a meghatározását. Ezek mindkét rendszerben követték a parabolikus növekedési törvényt, azaz a vastagságok változás arányos volt  $t^{1/2}$ -el. Továbbá, hosszabb hőkezelési időknél a Ni/a-Si rendszerben egy plató képződött közelítőleg 40%Ni tartalommal, amely a Ni<sub>2</sub>Si fázis képződésére utalt a Si-oldalon. Ezt a Ni-nek az amorf Si-ba való viszonylag nagy diffúziós együtthatójával magyaráztuk, amely intenzív keveredést eredményezett a NiSi és az amorf Si között.

A Pt-nak nincs hatása a kezdeti rétegek fogyási kinetikáira és a keletkezett rétegek növekedési kinetikájára sem, azaz a parabolikus törvény Pt jelenlétében is teljesült. Hosszabb időknél, hasonlóan a Pt-t nem tartalmazó esethez, a Ni<sub>2</sub>Si fázis megjelent a Si-oldalon.

### **3. Szemcsehatár keveredés Ag/Au vékony film rendszerben és nanoskálájú Kirkendall-porozitás képződés**

Szemcsehatár keveredést vizsgáltunk Ag/Au vékony film rendszerben alacsony hőmérsékleteken (120-200°C) különböző időkg. Világos kísérleti bizonyítékot szolgáltatunk nanoskálájú Kirkendall-porozitás képződésére az Ag szemcsehatárai mentén alacsony hőmérsékleteken, ahol a térfogati diffúziós folyamatok teljen befagyottak. Az üregképződést 100 bar nyomás alkalmazása letiltotta.

A kölcsönös diffúzió mind az Ag és az Au rétegben homogenizációhoz vezetett, olyan átlagos összetételekig, amelyek megfelelnek a szemcsehatár diffúzió indukálta szemcsehatár mozgás során hátrahagyott koncentrációknak. A homogenizációnak megfelelő telítési szint kisebb, mint 50%, amely olyan egymásban korlátlanul oldódó rendszerekben várható volna, mint az Ag/Au rendszerek. Ezek a telítési szintek bizonyos fajta kinetikus kényszerek következményei, amelyeket a szemcsehatár diffúzió indukálta feszültségterek és véges méret hatások okoznak.

## Publications

### 1. Scientific papers related to the dissertation

1- "Production of NiSi phase by grain boundary diffusion induced solid state reaction between Ni<sub>2</sub>Si and Si(100) substrate"

**S.S. Shenouda**, G.A. Langer, G.L. Katona, L. Daróczy, A. Csik, and D.L. Beke,

*Applied Surface Science*, **320** (2014) 627, cited by (1).

**Impact Factor: 2.711**

2- "Kinetics of shift of individual interfaces in Ni/Si system during low temperature reactions"

**S.S. Shenouda**, G. Molnar, G.A. Langer, G.L. Katona, F. Kristaly and D.L. Beke,

*Microelectronic Engineering*, **134** (2015) 14.

**Impact Factor: 1.197**

3- "Nanoscale Kirkendall porosity formation during grain boundary intermixing in Au/Ag thin film system"

**S.S. Shenouda**, G.L. Katona, G.A. Langer, L. Daróczy and D.L. Beke,

*Materials Letters*, **145** (2015) 67.

**Impact Factor: 2.489**

4- "Eljárás kontrollált vastagságú nanoréteg előállítására és ilyen eljárással előállított nanoréteg" c.

Hungarian patent registration No. P1400230/2014,

**S.S. Shenouda**, G.A. Langer, G.L. Katona, S. Kéki, M. Zsuga, and D.L. Beke.

5- "Investigation of solid state reactions between Ni<sub>2</sub>Si nanocrystalline film and Si Substrate"

**S.S. Shenouda**, G.A. Langer, A. Csik, G.L. Katona and D.L. Beke,

## 2. Other scientific papers

- 6- "Electrical properties of  $\text{ZnGa}_2\text{Se}_4$  defect chalcopyrite thin films"  
M. Fadel, I.S. Yahia, G.B. Sakr and **S.S. Shenouda**,  
*Proceedings of "The 2<sup>nd</sup> International Conference on Advanced Materials and their Applications" and its workshop on "New Trends on Nanoscience and Laser Physics"*, 2010, NRC, Cairo, p.107.
- 7- "Memory switching of  $\text{ZnGa}_2\text{Se}_4$  thin films as a new material for phase change memories (PCMs)"  
I.S. Yahia, M. Fadel, G.B. Sakr and **S.S. Shenouda**,  
*Journal of Alloys and Compounds* **507** (2010) 551, cited by (15).  
**Impact Factor: 2.134**
- 8- "Analysis of current–voltage characteristics of Al/p-ZnGa<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>/n-Si nanocrystalline heterojunction diode"  
I.S. Yahia, M. Fadel, G.B. Sakr, F. Yakuphanoglu, **S.S. Shenouda**  
and W.A. Farooq,  
*Journal of Alloys and Compounds* **509** (2011) 4414, cited by (20).  
**Impact Factor: 2.289**
- 9- "Impedance spectroscopy of nanostructure p-ZnGa<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>/n-Si heterojunction diode"  
I.S. Yahia, M. Fadel, G.B. Sakr, **S.S. Shenouda**, F. Yakuphanoglu,  
and W.A. Farooq,  
*Acta Physica Polonica A* **120** (2011) 563, cited by (6).  
**Impact Factor: 0.444**
- 10- "Effect of the frequency and temperature on the complex impedance spectroscopy (C-V and G-V) of p-ZnGa<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>/n-Si nanostructure heterojunction diode"

I.S. Yahia, M. Fadel, G.B. Sakr, S.S. Shenouda, and F. Yakuphanoglu,

*Journal of Materials Science* **47** (2012) 1719, cited by (6).

**Impact Factor: 2.163**

11- "Structure, optical spectroscopy and dispersion parameters of ZnGa<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> thin films at different annealing temperatures"

M. Fadel, I.S. Yahia, G.B. Sakr, F. Yakuphanoglu and S.S. Shenouda,

*Optics Communications* **285** (2012) 3154, cited by (2).

**Impact Factor: 1.438**

12- "Negative capacitance of ZnGa<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>/Si nano-heterojunction diode"

I.S. Yahia, G.B. Sakr, S.S. Shenouda, M. Fadel, S.S. Fouad and F. Yakuphanoglu,

*Applied Physics A: materials science and Processing*, **112** (2013) 275, cited by (4).

**Impact Factor: 1.694**

13- "Investigation of solid state reaction in Ag/Sn nanostructured thin films at room temperature"

N. Samy, S.S. Shenouda, M. Fadel, H.Talaat, G.L. Katona, G.A. Langer, A. Csik and D.L. Beke,

*Submitted to Philosophical Magazine.*

### **3. Conferences (presentations and posters) related to the dissertation**

1- Presentation in "The 3<sup>rd</sup> Scientific Workshop for Egyptian researchers" May 2, 2013 Vienna, Austria.

With title: "Solid state reactions between Ni<sub>2</sub>Si nanocrystalline film and Si substrate"

2- Poster in "The 9<sup>th</sup> International Conference on Diffusion in Solids and Liquids" (DSL-2013) June 24-28, Madrid, Spain.

With title: "Solid state reactions between Ni<sub>2</sub>Si nanocrystalline film and Si substrate"

3- Presentation in "The 4<sup>th</sup> Scientific Workshop for Egyptian researchers" June 22, 2014 Vienna, Austria.

With title: "Nanoscale investigations of solid state reactions and shift of individual interfaces in Ni/c-Si system by Secondary Neutral Mass Spectrometry".

4- Presentation in "The International Conference & Exhibition on Advanced & Nano Materials" (ICANM-2014) August 11-13, Calgary, Alberta, Canada.

With title: "Nanoscale investigations of solid state reactions and shift of individual interfaces in Ni/crystalline-Si system by secondary neutral mass spectrometry".

5- Poster in "The International Conference on Diffusion in Materials" (DIMAT 2014) August 17-22, Münster, Germany.

With title: "Nanoscale investigations of solid state reactions and shift of individual interfaces in Ni/amorphous-Si system by Secondary Neutral Mass Spectrometry".

6- Poster in "International Conference on Smart Materials for shaping our future" (SMART 2014) September 20-21, Debrecen, Hungary.

With title: "Nanoscale investigations of diffusion and solid state reactions in Ni/Si systems".

7- Poster in "The 11<sup>th</sup> International Conference on Diffusion in Solids and Liquids" (DSL-2015) June 22-26, Munich, Germany.

With title: "Grain boundary intermixing in Ag/Au thin film system and nanoscale Kirkendall porosity formation".

#### **4. Other conferences**

8- Presentation in "The 2<sup>nd</sup> International Conference on Advanced Materials and their Applications and its workshop on New Trends on Nanoscience and Laser Physics", April 6-8, 2010, NRC, Cairo, Egypt.

With title: "Electrical properties of  $\text{ZnGa}_2\text{Se}_4$  defect chalcopyrite thin films"



Registry number: DEENK/139/2015.PL  
Subject: Ph.D. List of Publications

Candidate: S. S. Shenouda  
Neptun ID: JACDYM  
Doctoral School: PhD School in Physics

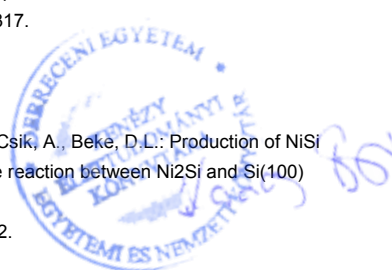
### List of publications related to the dissertation

#### Foreign language scientific article(s) in Hungarian journal(s) (1)

1. **Shenouda, S.S.**, Langer, G.A., Csik, A., Katona, G.L., Beke, D.L.: Investigation of solid state reactions between Ni<sub>2</sub>Si nanocrystalline film and Si Substrate.  
*Acta Phys. Debr.* 47 (175), 175-184, 2013. ISSN: 1789-6088.

#### Foreign language scientific article(s) in international journal(s) (3)

2. **Shenouda, S.S.**, Katona, G., Langer, A., Daróczy, L., Beke, D.L.: Nanoscale Kirkendall porosity formation during grain boundary intermixing in Au/Ag thin film system.  
*Mater. Lett.* 145, 67-69, 2015. ISSN: 0167-577X.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2015.01.044>  
IF:2.489 (2014)
3. **Shenouda, S.S.**, Molnár, G., Langer, G.A., Katona, G.L., Kristály, F., Beke, D.L.: Kinetics of shift of individual interfaces in Ni/Si system during low temperature reactions.  
*Microelectron. Eng.* 134, 14-21, 2015. ISSN: 0167-9317.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mee.2015.01.006>  
IF:1.197 (2014)
4. **Shenouda, S.S.**, Langer, G.A., Katona, G.L., Daróczy, L., Csik, A., Beke, D.L.: Production of NiSi phase by grain boundary diffusion induced solid state reaction between Ni<sub>2</sub>Si and Si(100) substrate.  
*Appl. Surf. Sci.* 320, 627-633, 2014. ISSN: 0169-4332.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.09.071>  
IF:2.711





## List of other publications

### Foreign language scientific article(s) in international journal(s) (6)

5. Yahia, I.S., Sakr, G.B., **Shenouda, S.S.**, Fadel, M., Fouad, S.S., Yakuphanoglu, F.: Negative capacitance of ZnGa<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>/Si nano-heterojunction diode.  
*Appl. Phys. A-Mater. Sci. Process.* 112 (2), 275-282, 2013. ISSN: 0947-8396.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00339-013-7739-7>  
IF:1.694
6. Yahia, I.S., Fadel, M., Sakr, G.B., **Shenouda, S.S.**, Yakuphanoglu, F.: Effect of the frequency and temperature on the complex impedance spectroscopy (C-V and G-V) of p-ZnGa<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>/n-Si nanostructure heterojunction diode.  
*J. Mater. Sci.* 47 (4), 1719-1728, 2012. ISSN: 0022-2461.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-011-5951-4>  
IF:2.163
7. Fadel, M., Yahia, I.S., Sakr, G.B., Yakuphanoglu, F., **Shenouda, S.S.**: Structure, optical spectroscopy and dispersion parameters of ZnGa<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> thin films at different annealing temperatures.  
*Opt. Commun.* 285 (13-14), 3154-3161, 2012. ISSN: 0030-4018.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2012.02.096>  
IF:1.438
8. Yahia, I.S., Fadel, M., Sakr, G.B., Yakuphanoglu, F., **Shenouda, S.S.**, Farooq, W.A.: Analysis of current-voltage characteristics of Al/p-ZnGa<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>/n-Si nanocrystalline heterojunction diode.  
*J. Alloy. Compd.* 509 (12), 4414-4419, 2011. ISSN: 0925-8388.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.01.068>  
IF:2.289
9. Yahia, I.S., Fadel, M., Sakr, G.B., **Shenouda, S.S.**, Yakuphanoglu, F., Farooq, W.A.: Impedance Spectroscopy of Nanostructure p-ZnGa<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>/n-Si Heterojunction Diode.  
*Acta Phys. Pol. A.* 120 (3), 563-566, 2011. ISSN: 0587-4246.  
IF:0.444





10. Yahia, I.S., Fadel, M., Sakr, G.B., **Shenouda, S.S.**: Memory switching of ZnGa<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> thin films as a new material for phase change memories (PCMs).  
*J. Alloy. Compd.* 507 (2), 551-556, 2010. ISSN: 0925-8388.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.08.021>  
IF:2.134

**Total IF of journals (all publications): 16,559**

**Total IF of journals (publications related to the dissertation): 6,397**

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of Web of Science, Scopus and Journal Citation Report (Impact Factor) databases.

01 July, 2015

