

**Doktori (PhD) értekezéstézisei**

**Nanoskálájú atomi mozgások vizsgálata  
Cu/Si vékonyfilmekben**

Bodnár Eszter

Témavezető: Dr. Vad Kálmán



**DEBRECENI EGYETEM**

Fizikai Tudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2024

# 1. Bevezetés

Napjainkban az elektronikai ipar fejlődésével, a miniaturizálás és a nagyfokú integráció következtében, a mikroelektronikai áramkörök alkatrészeinek és vezetékeinek mérete lecsökken a nanométeres tartományba. A szilícium (Si), mint félvezető, az egyik legfontosabb alapanyag a mikroelektronikában, a memória és processzor chip-ek gyártásában, a számítógépekben, vagy az energiatermeléshez használt napelemcellák készítésében, illetve az akkumulátorgyártásban is. Az elektronikai elemek összekapcsolásához jó elektromos vezetőképességgel rendelkező fémre van szükség, pl. rézre (Cu). A különböző elektromos vezetőképességű rétegek (anyagok) keveredésükkel<sup>1</sup>, vagy csak az egyik anyagnak a másikon való átjutásával, degradálhatják a fémes kapcsolatokat az elektronikai eszközben, lecsökkentve azok működési élettartalmát. A degradáció szempontjából lényeges folyamatok az elektromigráció és a termikusan indukált atomi migráció. Ez utóbbi folyamat kevésbé feltérképezett alacsony hőmérsékleteken, a 100-180 °C hőmérsékleti tartományban. A klasszikusan ismert kísérleti technikákkal ebben a hőmérsékleti tartományban, a szükséges érzékenység hiánya miatt, nem lehet vizsgálatokat végezni. Ezért alig található irodalmi adat. A Si és Cu atompár esetében sem voltak olyan kísérleti adatok a szakirodalomban, melyek helyesen írják le az alacsony hőmérsékleti tartomány atomi mozgásait.

---

<sup>1</sup> Mehrer, Helmut. Springer Series In Solid-State Sciences 155, Diffusion in Solids. Berlin Heidelberg : Springer, 2007. ISSN 0171-1873.

## 2. Célkitűzések

Doktori munkám során új mérési módszereket alkalmaztam a hőkezelés hatására lejátszódó atomi migrációs folyamatok feltérképezésére. A vizsgálatokat Si hordozón lévő Cu/Si vékonyfilmekben végeztem az Atommagkutató Intézet felületfizikai laboratóriumában. Néhány nanométeres vastagságú réz rétegekben, Si atomok termikusan indukált vándorlását vizsgáltam alacsony hőmérsékleteken, kisenergiás ionszórás spektroszkópiával. A vizsgálatok elsődleges célja a módszer alkalmazhatóságának ellenőrzése volt, továbbá új jelenségek feltárása, leírása és a jelenségek mögött rejlő fizikai folyamatok megértése olyan elempár esetében, mely az elektronikai technológiákban is széleskörben alkalmazott. A kutatómunka célja volt a fizikai folyamatok hatására végbemenő szerkezeti változások feltérképezése is.

## 3. Módszerek

A kutatói munkámhoz Si és Cu vékonyrétegeket preparáltam  $\text{SiO}_2$  hordozóra magnetronos porlasztással. Az atommozgásokat hővel indukáltam, a méréseket pedig felületfizikai (LEIS, XPS, STM) és vékonyrétegfizikai (SNMS, elektronmikroszkóp) mérés technikával hajtottam végre. A Si szemcsehatármenti diffúzióját polikristályos Cu rétegben kisenergiás ionszórásos technikával (LEIS) és tömegspektrometriai mérésekkel (SNMS) követtem nyomon. Az SNMS-el végrehajtott mélységprofil-analízissel

feltártam a Si réz rétegen belüli mélységi koncentrációeloszlását. AFM-es mérésekkel a szemcsehatár sűrűsége tudtam következtetni. XPS mérésekkel vizsgáltam a jelenlévő kémiai kötéseket, azonosítottam a felületi Cu-O-Si kötést. Röntgen-diffrakciós módszerrel igazolni tudtam a  $\text{Cu}_3\text{Si}$  jelenlétét a mintában hosszabb hőkezelés után 180 °C-n.

## 4. Új tudományos eredmények

[T1] Réz/szilícium vékonyrétegekkel végrehajtott kísérleti mérésekkel bebizonyítottam, hogy a kisenergiás ionszórásos spektroszkópia alkalmas módszer a szemcsehatárdiffúziós folyamatok analizésére, a diffúzióban résztvevő atomok felületi megjelenési idejének közvetlen meghatározására, és a diffúzió okozta felületi borítottság vizsgálatára. A felületi borítottság a hőkezelési idő függvényében egy telítési értékbe simul. Ez az érték a minta felületének ~30%-a és független a hőkezelés hőmérsékletétől. A diffúzióban résztvevő Si atomok pontos megjelenési ideje a Cu réteg felületén ( $t_0$ ) a felületi borítottság időbeli változásából határozható meg. A megjelenési idő ismerete lehetővé teszi a diffúziós állandó kiszámítását. [C1, C2]

[T2] Réz/szilícium vékonyrétegekben tömegspektrométeres mélységprofil-analízissel és atomerőmikroszkópos mérésekkel meghatároztam a polikristályos réz réteg szemcsehatáraiban kialakult diffúziós tér dimenzióját. Megállapítottam, hogy polikristályos vékonyrétegekben történő szemcsehatár diffúziót jellemző diffúziós állandó  $D_{gb}=h^2/5t_0$  formában adható meg, ahol  $h$  a

rétegvastagság,  $t_0$  a felületi megjelenés idő. A nevezőben szereplő 5-ös faktor jellemzi a diffúziós tér dimenzióját, ami nagyobb, mint 2D, de kisebb, mint 3D. Becslést adtam a réz szemcsék által kialakított szemcsehatárok átlagos vastagságára, amire  $\sim 1$  nm értéket kaptam. [C1]

[T3] A diffúziós együttható hőmérsékletfüggését  $130$  °C és  $180$  °C közötti hőmérséklettartományban meghatároztam a felületen való megjelenési időből és a szemcsehatárokból kialakult hosszirányú koncentrációgradiensből is, tiszta C-típusú diffúziós kinetika esetén. A Si szemcsehatár diffúziójának aktivációs entalpiájára, polikristályos Cu-ben,  $\Delta H_{gb} = (98 \pm 7) \text{ kJ/mol} = (1.02 \pm 0.07) \text{ eV/atom}$  értéket kaptam, míg az exponenciális tényező előtti faktorra  $D_{gb0} = (6.0 \pm 0.9) \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  értéket. [C1, C2]

[T4] Atomerőmikroszkópos és elektronmikroszkópos mérésekkel megállapítottam, hogy a Cu felületre kijutott Si atomok nem alkotnak folytonos 2D réteget a felületen, ehelyett szigeteket formálnak. Ez ellentmond az eddigi diffúziós elképzeléseknek, miszerint a felületre diffúzióval kijutott atomok folytonos 2D réteget alkotnak a felületen, ami miatt a Hwang-Balluffi-modell a diffúziós mozgások jellemzésére csak megfelelő kritikával alkalmazható. Megállapítottam, hogy a szigetek száma az átmérő növekedésével exponenciálisan csökken. A szigetképződés nemcsak a Cu/Si rendszerre jellemző, a Ni/Cu rétegpárban is megfigyelték. [C2]

## 5. Értekezés témájában megjelent közlemények

**C[1]: E. Bodnár, V. Takáts, T. Fodor, J. Hakl, Y. Kaganovskii, G. Yang, X. Yao, K. Vad;** Grain boundary diffusion of Si in polycrystalline copper film, *Vacuum* vol. 203 (2022) 111260.

**C[2]: V. Takáts, E. Bodnár, Y. Kaganovskii, T. Fodor, J. Hakl, S. Molnár, M. Soha, K. Vad;** Characterization of nanoscale atomic motion of Si in polycrystalline Cu layer, *Heliyon* vol. 10 (2024) e25516.

## 6. További közlemények

1. Z. Gyökér, G. Gergely, D. Koncz Horváth, E. Bodnár, Z. Gácsi, Role of reinforcement surface treatment on the SnAg<sub>3</sub>Cu<sub>0.5</sub> microelectronic joints, Applied surface science vol. 475 (2019) 982-985.
2. V. Takáts, H. Bereczki, A. Csik, E. Bodnár, Zs. Kertész, Z. Szikszai, Z. Szoboszlai (2018): A kabai meteorit vizsgálata SNMS, XPS és mikro-PIXE analitikai módszerekkel; in:ActaGeoscientiaDebrecina, Specialissue 1 Átfogó Kutatások a kabai meteoriton, Comprehensive Research on Kaba Meteorite, Debrecen Egyetemi Kiadó, Debrecen (2018), 179-184. Konferencia közlemény

## 7. Konferencia részvétel, poszter

A Phd értekezés anyagához kapcsolódó előadások és poszterek:

1. E. Bodnár, V. Takáts, T. Fodor, J. Hakl, Y. Kaganovskii, K. Vad, Nanoskálájú atomi mozgások vizsgálata Cu/Si vékonyfilmben, MTA Felületkémiail és Nanoszerkezeti, Katalízis és Kolloidkémiail Munkabizottságok összevont ülése, Budapest 2023. május 24. (előadás)
2. E. Bodnár, V. Takáts, T. Fodor, J. Hakl, Y. Kaganovskii, K. Vad, Si szemcsehatár diffúziója polikristályos Cu filmben, Fizikus

Doktoranduszok konferenciája, Balatonvilágos 2021. szeptember 16-18. (előadás)

3. 3. IUUSTA-ELSEVIER STUDENT AWARD, E. Bodnár, V. Takáts, T. Fodor, K. Vad, Grain boundary diffusion in thin Cu/Si//Si systems, ICTF-JVC 2020, Budapest, Hungary, 22-26 November (2020), (poszter)
4. E. Bodnár, M. Soha, T. Fodor, K. Vad, J. Hakl, V. Takáts, Szemcsehatár diffúzió vizsgálata LEIS-szel, Magyar Fizikus Vándorgyűlés, Magyarország: Sopron 2019. augusztus 21-24. (poszter)

Egyéb előadás és poszter:

1. E. Bodnár, V. Takáts, Kabai meteorit vizsgálata röntgen-gerjesztésű fotoelektrom spektroszkópiával, Fizikus Doktoranduszok konferenciája, Balatonfenyves 2019, június 13. (2019) (előadás)
2. P. Lazarenko, S. Kozyukhin, E. Bodnár, A. Sitnikov, V. Glukhenkaya, F. Tamás, D. Seleznev, E. Kirilenko, A. Dedkova, A. Sherchenkov, Effect of Sn ion implantation on the structural and optical properties of amorphous Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> thin films, ICANS, Ecole polytechnique, Palaiseau France 4-9 August (2019) (poszter)



Nyilvántartási szám: DEENK/67/2024.PL  
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Bodnár Eszter  
Doktori Iskola: Fizikai Tudományok Doktori Iskola  
MTMT azonosító: 10065307

### A PhD értekezés alapján szolgáló közlemények

#### Idégen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (2)

1. Takáts, V., **Bodnár, E.**, Kaganovskii, Y. S., Fodor, T., Haki, J., Molnár, S., Soha, M., Vad, K.:  
Characterization of nanoscale atomic motion of Si in polycrystalline Cu layer.  
*Heliyon*. 10 (3), 1-9, 2024. ISSN: 2405-8440.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25516>  
IF: 4 (2022)
2. **Bodnár, E.**, Takáts, V., Fodor, T., Haki, J., Kaganovskii, Y. S., Yang, G., Yao, X., Vad, K.: Grain  
boundary diffusion of Si in polycrystalline copper film.  
*Vacuum*. 203, 1-5, 2022. ISSN: 0042-207X.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111260>  
IF: 4

### További közlemények

#### Idégen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (1)

3. Gyökér, Z., Gergely, G., Koncz Horváth, D., **Bodnár, E.**, Gácsi, Z.: Role of reinforcement surface  
treatment on the SnAg3Cu0.5 microelectronic joints.  
*Appl. Surf. Sci.* 475, 982-985, 2019. ISSN: 0169-4332.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.12.263>  
IF: 6.182





Magyar nyelvű konferencia közlemények (1)

4. Takáts, V., Bereczki, H. F., Csik, A., **Bodnár, E.**, Kertész, Z., Szikszai, Z., Szoboszlai, Z.: A kabai meteorit vizsgálata SNMS, XPS és mikro-Pixe analitikai módszerekkel.

In: Átfogó kutatások a kabai meteoriton : a kabai meteorit hullásának 160. évében rendezett nemzetközi konferencia előadásai : 2017. november 8. Református Kollégium, Debrecen.

Szerk.: Nagy Mihály, Rózsa Péter, McIntosh Richard William, Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen, 179-184, 2018, (Acta geographica ac geologica et meteorologica Debrecina. Acta Geoscientia Debrecina, ISSN 1788-4497 ; 1. különszám) ISBN: 9789633180532

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 14,182**

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjait szolgáló közleményekre): 8**

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

Debrecen, 2024.02.29.



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

**Investigation of nanoscale atomic motion in  
Cu/Si thin films**

by Eszter Bodnár

Supervisor: Dr. Kálmán Vad



UNIVERSITY OF DEBRECEN

Doctoral School of Physics

Debrecen, 2024.

# 1. Introduction

Nowadays, as a result of miniaturization and a high degree of integration in the electronic industry, the size of components and wires of microelectronic circuits is reduced to the nanometer range. Silicon (Si), as a semiconductor, is one of the most important raw materials in microelectronics, in the production of memory and processor chips, in computers, or in the manufacture of solar cells used for energy production, as well as in battery production. A metal with good electrical conductivity is needed to connect the electronic elements, e.g., copper (Cu). Layers (materials) with different electrical conductivity can degrade the metallic connections in the electronic device by mixing<sup>1</sup>, or just by passing through each other, reducing their operational life. Electromigration and thermally induced atomic migration are important processes for degradation. The latter process is less well mapped at low temperatures, in the temperature range of 100-180 °C. With the classically known experimental techniques, it is not possible to perform tests in this temperature range, due to the lack of the necessary sensitivity. Therefore, there is hardly any literary data. In the case of the Si and Cu atomic pair, there were no experimental data in the literature that correctly describe the atomic movements of the low-temperature range.

---

<sup>1</sup> Mehrer, Helmut. Springer Series In Solid-State Sciences 155, Diffusion in Solids. Berlin Heidelberg : Springer, 2007. ISSN 0171-1873.

## **2. Objectives**

In my doctoral work, I applied new experimental methods to study atomic migration processes that take place as a result of heat treatment. The measurements were carried out in Cu/Si thin films in the surface physics laboratory of the Institute for Nuclear Research. I investigated the thermally induced migration of Si atoms in copper layers with a thickness of a few nanometers, at low temperatures by low-energy ion scattering spectroscopy. The primary purpose of the tests was to check the applicability of the method, to explore and describe new phenomena, and to understand the underlying physical processes. The aim of the research work was also to map the structural changes that take place in the selected materials as a result of physical processes.

## **3. Methods:**

For research purposes, I prepared thin layers of Si and Cu onto SiO<sub>2</sub> substrates by magnetron sputtering. The atomic migration was induced by heat, the measurements were carried out by experimental techniques used in surface physics (LEIS, XPS, STM) and in thin-layer physics (SNMS, electron microscope). I have monitored the diffusion of Si along grain boundaries in the polycrystalline Cu layer by low-energy ion scattering technique (LEIS) and mass spectrometry measurements (SNMS). I have revealed the depth distribution of Si in the copper layer by SNMS depth profile analysis. I could

determine the grain boundary density with AFM measurements. I used XPS measurements to examine the chemical bonds present and identified the surface Cu-Si-O bond. I was able to confirm the presence of  $\text{Cu}_3\text{Si}$  in the sample only by X-ray diffraction method after a longer annealing at 180 °C.

#### 4. New scientific results

[T1] With experimental measurements carried out with copper/silicon thin films, I proved that low-energy ion scattering spectroscopy is a suitable method for the analysis of grain boundary diffusion processes, for the direct determination of the surface appearance time of atoms participating in diffusion, and for the investigation of surface coverage caused by diffusion. The surface coverage smooths out to a saturation value depending on the heat treatment time. This value is ~30% of the sample surface and is independent of the heat treatment temperature. The exact appearance time of the Si atoms participating in the diffusion on the surface of the Cu layer ( $t_0$ ) can be determined from the change in surface coverage over time. Knowing the appearance time allows the diffusion constant to be calculated.[C1, C2]

[T2] I determined the dimension of the diffusion space formed in the grain boundaries of the polycrystalline copper layer by mass spectrometer depth profile analysis and atomic force microscopy measurements in copper/silicon thin layers. I found that the diffusion constant characteristic of grain boundary diffusion in polycrystalline thin layers can be given in the form  $D_{gb} = h^2/5t_0$ , where  $h$  is the layer thickness and  $t_0$  is the surface appearance time.

The factor 5 in the denominator characterizes the dimension of the diffusion space, which is larger than 2D but smaller than 3D. I gave an estimate of the average thickness of the grain boundaries formed by the copper grains, for which I got a value of ~1 nm. [C1]

[T3] I determined the temperature dependence of the diffusion coefficient in the temperature range between 130 °C and 180 °C from the appearance time on the surface and the longitudinal concentration gradient formed in the grain boundaries, in the case of pure C-type diffusion kinetics. For the activation enthalpy of Si grain boundary diffusion in polycrystalline Cu, I obtained the value  $\Delta H_{gb} = (98 \pm 7) \text{ kJ/mol} = (1.02 \pm 0.07) \text{ eV/atom}$ , while for the factor before the exponential factor  $D_{gb0} = (6.0 \pm 0.9) \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  value. [C1, C2]

[T4] Using atomic force microscopy and electron microscopy measurements, I determined that the Si atoms that reached the Cu surface do not form a continuous 2D layer on the surface, but instead form islands. This contradicts the previous diffusion ideas, according to which the atoms reaching the surface by diffusion form a continuous 2D layer on the surface, which is why the Hwang-Balluffi model can only be used to characterize diffusion movements with appropriate criticism. I found that the number of islands decreases exponentially as the diameter increases. Island formation is not only characteristic of the Cu/Si system, it was also observed in the Ni/Cu layer pair. [C2]

## 5. Publications related to the dissertation

C[1]: **E. Bodnár**, V. Takáts, T. Fodor, J. Hakl, Y. Kaganovskii, G. Yang, X. Yao, K. Vad, Grain boundary diffusion of Si in polycrystalline copper film, VACUUM, Vol. 203, (2022), 111260

C[2]: V. Takáts, **E. Bodnár**, Y. Kaganovskii, T. Fodor, J. Hakl, S. Molnár, M. Soha, K. Vad; Characterization of nanoscale atomic motion of Si in polycrystalline Cu layer, Heliyon vol. 10 (2024) e25516.

## 6. List of other publications

1. Z. Gyökér, G. Gergely, D. Koncz Horváth, E. Bodnár, Z. Gácsi, Role of reinforcement surface treatment on the SnAg<sub>3</sub>Cu<sub>0.5</sub> microelectronic joints, Applied surface science vol. 475 (2019) 982-985.
2. V. Takáts, H. Bereczki, A. Csik, E. Bodnár, Zs. Kertész, Z. Szikszai, Z. Szoboszlai (2018): A kabai meteorit vizsgálata SNMS, XPS és mikro-PIXE analitikai módszerekkel; in:ActaGeoscientiaDebrecina, Specialissue 1 Átfogó Kutatások a kabai meteoriton, Comprehensive Research on Kaba Meteorite, Debrecen Egyetemi Kiadó, Debrecen (2018), 179-184. (conference report)

## 7. Conference participation

Presentations and posters related to the PhD dissertation:

1. E. Bodnár, V. Takáts, T. Fodor, J. Hakl, Y. Kaganovskii, K. Vad, Nanoskálájú atomi mozgások vizsgálata Cu/Si vékonyfilmben, MTA Felületkémiai és Nanoszerkezeti, Katalízis és Kolloidkémiai Munkabizottságok összevont ülése, Budapest 2023. május 24. (presentation)

2. E. Bodnár, V. Takáts, T. Fodor, J. Hakl, Y. Kaganovskii, K. Vad, Si szemcsehatár diffúziója polikristályos Cu filmben, Fizikus Doktoranduszok konferenciája, Balatonvilágos 2021. szeptember 16-18. (presentation)
3. IUVSTA-ELSEVIER STUDENT AWARD, E. Bodnár, V. Takáts, T. Fodor, K. Vad, Grain boundary diffusion in thin Cu/Si//Si systems, ICTF-JVC 2020, Budapest, Hungary, 22-26 November (2020), (poster)
4. E. Bodnár, M. Soha, T. Fodor, K. Vad, J. Hakl, V. Takáts, Szemcsehatár diffúzió vizsgálata LEIS-szel, Magyar Fizikus Vándorgyűlés, Magyarország: Sopron 2019. augusztus 21-24. (poster)

#### Other presentations and posters:

1. E. Bodnár, V. Takáts, Kabai meteorit vizsgálata röntgen-gerjesztésű fotoelektromos spektroszkópiával, Fizikus Doktoranduszok konferenciája, Balatonfenyves 2019, június 13. (2019) (presentation)
2. P. Lazarenko, S. Kozyukhin, E. Bodnár, A. Sitnikov, V. Glukhenkaya, F. Tamás, D. Seleznev, E. Kirilenko, A. Dedkova, A. Sherchenkov, Effect of Sn ion implantation on the structural and optical properties of amorphous Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> thin films, ICANS, Ecole polytechnique, Palaiseau France 4-9 August (2019) (poster)



Registry number: DEENK/67/2024.PL  
Subject: PhD Publication List

Candidate: Eszter Bodnár  
Doctoral School: Doctoral School of Physics  
MTMT ID: 10065307

### List of publications related to the dissertation

#### Foreign language scientific articles in international journals (2)

1. Takáts, V., **Bodnár, E.**, Kaganovskii, Y. S., Fodor, T., Haki, J., Molnár, S., Soha, M., Vad, K.:  
Characterization of nanoscale atomic motion of Si in polycrystalline Cu layer.  
*Heliyon*. 10 (3), 1-9, 2024. ISSN: 2405-8440.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25516>  
IF: 4 (2022)
2. **Bodnár, E.**, Takáts, V., Fodor, T., Haki, J., Kaganovskii, Y. S., Yang, G., Yao, X., Vad, K.: Grain  
boundary diffusion of Si in polycrystalline copper film.  
*Vacuum*. 203, 1-5, 2022. ISSN: 0042-207X.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111260>  
IF: 4

### List of other publications

#### Foreign language scientific articles in international journals (1)

3. Gyökér, Z., Gergely, G., Koncz Horváth, D., **Bodnár, E.**, Gácsi, Z.: Role of reinforcement surface  
treatment on the SnAg3Cu0.5 microelectronic joints.  
*Appl. Surf. Sci.* 475, 982-985, 2019. ISSN: 0169-4332.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.12.263>  
IF: 6.182





Hungarian conference proceedings (1)

4. Takáts, V., Bereczki, H. F., Csik, A., **Bodnár, E.**, Kertész, Z., Szikszai, Z., Szoboszlai, Z.: A kabai meteorit vizsgálata SNMS, XPS és mikro-Pixe analitikai módszerekkel.

In: Átfogó kutatások a kabai meteoriton : a kabai meteorit hullásának 160. évében rendezett nemzetközi konferencia előadásai : 2017. november 8. Református Kollégium, Debrecen.

Szerk.: Nagy Mihály, Rózsa Péter, McIntosh Richard William, Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen, 179-184, 2018. (Acta geographica ac geologica et meteorologica Debrecina. Acta Geoscientia Debrecina, ISSN 1788-4497 ; 1. különszám) ISBN: 9789633180532

**Total IF of journals (all publications): 14,182**

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

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.

29 February, 2024

