

dc_400_12

Fullerénszerű nanoszerkezetek jellemzése transzmissziós elektronmikroszkópiával

MTA doktori értekezés tézisei

Czigány Zsolt
MTA TTK MFA

Budapest
2012

A kutatások előzményei

Védőbevonatként elterjedten alkalmaznak amorf szén vékonyrétegeket, összefoglaló néven DLC (diamond like carbon) rétegeket, melyeket általában nagy keménység (~30 GPa) jellemez. A szén alapú bevonatok fejlesztésének új lökést adott a Liu és Cohen [A.Y. Liu & M.L. Cohen: *Phys. Rev. B* 41 (1990) 10727] által megjósolt ultrakemény C_3N_4 fázis, melynek előállítására irányuló kísérletek során sokféle, többnyire amorf, szénitrid (CN_x) réteget állítottak elő különféle módszerekkel. A CN_x fullerénszerű (FL – fullerene-like) fázisát elsőként 1995-ben hozták létre [H. Sjöström et al. *Phys. Rev. Lett.* 75 (1995) 1336] grafit reaktív DC magnetron porlasztásával nitrogén és argon gázok keverékében. A legáltalánosabban alkalmazott DC porlasztás mellett kipróbáltak egyéb módszereket is, mint például az ionbombázással elősegített rétegnövesztés (IBAD = ion beam assisted deposition), ívpárologtatás, valamint az impulzuslézeres abláció (PLA = pulsed laser ablation). A szénitrid vékonyrétegekben grafén síkokba beépülő nitrogén atomok a grafén síkok meggörbítését idézik elő, lecsökkentve az ötszöges gyűrűk képződésének energiáját, ezzel lehetővé téve, hogy lokálisan a molekuláris fullerénekre emlékeztető szerkezet jöjjön létre viszonylag alacsony (300-400°C) hőmérsékleten, szemben a tiszta szénalapú fullerénekre jellemző ~6000°C-al.

Az ötszögeképződés elősegítése mellett a beépült N elősegítheti a grafén síkok összekapcsolását is. Így a beépült nitrogén a síkok meggörbítése és összekapcsolása révén, a főként sp^2 hibridizációjú szén kötéseinek hálózatát 3D szerkezetre kiterjesztve, összefüggő szilárd szerkezetet hoz létre, mely a viszonylagos keménység mellett, egyedülálló rugalmasságot kölcsönöz az anyagnak, mely jól hasznosítható tribológiai alkalmazásokban az ortopédiai protézisektől a gördülő csapágyakig. Napjainkban elterjedten alkalmazzák a CN_x rétegeket számítógépek merevlemezeiben az adattároló réteg és az olvasófej védőbevonataként. A rugalmasság óriási előny a DLC bevonatokkal szemben, melyek főleg sp^3 hibridizációjú szerkezetük miatt ugyan keményebbek, de egyben ridegebbek is, ami tribológiai alkalmazásokban könnyen vezethet a réteg felpattogzásához.

E dolgozat témaköre a szén alapú (elsősorban szénitrid) vékonyrétegekben létrejövő ún. fullerénszerű szerkezet kialakulása, mikroszkopikus jellemzői és makroszkopikus tulajdonságai közötti kapcsolat

vizsgálata. A fullerénszerű szénitrid szerkezete nem írható le a kristályos szerkezetekre jellemző hosszútávú renddel, mégis bizonyos fokú rendeződést mutat, mely leginkább a fullerén szerkezetekre jellemző. A CN_x az elektrondiffrakciójára jellemző diffúz gyűrűk alapján viszont az amorf anyagokkal mutat rokonságot. Ilyen értelemben átmenetet képez az amorf és a kristályos anyagok között, a részlegesen rendezett szerkezetek közé sorolható. A dolgozatban a *fullerénszerű* jelzővel különböztetem meg e részlegesen rendezett szerkezetet az amorf szerkezettől. A mikroszkópos technikák nélkülözhetetlenek az atomi szerkezet megértéséhez, illetve más (főleg spektroszkópiai) módszerekkel nyert információk értelmezéséhez. E kísérleti módszerek együttese és sokfélesége szükséges a komplex szerkezetek és rétegnövekedési folyamatok megértéséhez.

Célkitűzések

Kutatásaim fő részét a mikroszkopikus jellemzők nagyfeloldású transzmissziós elektronmikroszkópos (HRTEM) felderítése tette ki, beleértve a mintakészítési és leképezési műtermékek kiküszöbölését, a szerkezet és annak kialakulásának megértését, valamint az eredmények értelmezését modell szerkezeteken végzett képszimuláció és elektrondiffrakció számolásán keresztül.

A tömbi formában megjelenő fullerénszerű szerkezet új problémákat vet fel a CN_x szerkezetének elektronmikroszkópos leképezése szempontjából. A görbült fullerénszerű héjakból álló nanométeres szerkezeti elemek átfedése miatt nagyon vékony mintára van szükség. Szükséges a TEM mintával szemben támasztott követelmények meghatározása kísérletileg és képszimulációval, valamint a mintakészítési módszerek fejlesztése. További feladatot jelent a mintakészítési eljárás során keletkező műtermékek kiküszöbölése, melyek az atomi szerkezet megváltozásában nyilvánulnak meg a minta felületén néhány nm-es vastagságban.

A szerkezet megértése szempontjából lényeges kérdések a N beépülésének módja, az elektronmikroszkópos leképezéssel, elektronenergiavesztési spektroszkópiával (EELS) tapasztalt szerkezet és az egyéb spektroszkópiai módszerekkel nyert információk közti összefüggések megértése. További kérdés a rétegek előállítási paramétereinek hatása a szerkezetre, valamint az adalék bevitelének módja. Az magnetron porlasztással

növesztett CN_x rétegekben a nitrogén a semleges porlasztógázba kevert N_2 segítségével épül be, de más adalékok (pl. foszfor) bejuttatásának lehetősége is felmerült, melyek hasonló fullerénszerű szerkezetet hozhatnak létre.

Az amorf és részlegesen rendezett nanoszerkezetek megértésében alapvető szerepe van a diffrakciós technikáknak. A dolgozatban a különféle fullerénszerű szerkezetek elektrondiffrakciójának (SAED = Selected Area Electron Diffraction) modellezésére kinematikus elméletre alapozott szórási modellt alkalmaztam, amelyben az anyagot nanoméretű, átlagosan néhány 10 atomot tartalmazó, különféle alakú és orientációjú nanoklaszterek alkotják. Modell szerkezeteket hoztam létre a különféle fullerénszerű szerkezetek rövidtávú szerkezetének meghatározására.

Alkalmazott módszerek

A mikroszkópos technikák nélkülözhetetlenek az atomi szerkezet megértéséhez, illetve más (főleg spektroszkópiai) módszerekkel nyert információk értelmezéséhez. Az anyagtudományban a transzmissziós elektronszkópia egyaránt szerephez jut, mint képalkotó, diffrakciós és analitikai technika. A dolgozatban mindhárom módszert alkalmaztam.

A CN_x és CP_x rétegek növesztése a Linköpingi Egyetem UHV porlasztóberendezésében történt elsősorban társszerzőim közreműködésével.

A TEM vizsgálatokat egyaránt végeztem NaCl hordozóról leúsztatott és ionsugaras vékonyítással készített mintákon. Az érzékeny minták készítéséhez Technoorg Linda IV6 típusú ionsugaras vékonyítót használtam, mely alacsony ionenergiás (néhány 100 eV) bombázást tesz lehetővé.

Az elektronszkópos vizsgálatokat az MTA TTK MFA CM20 twin (200 kV; 2,8Å pontfeloldás) és JEOL3010 (300 kV; 1,7Å pontfeloldás) mikroszkópjain kívül a Linköpingi Egyetem (Svédország) CM20 ultratwin és FEI Tecnai G² (egyenként 200 kV; 1,9Å pontfeloldás) elektronszkópjain végeztem. Nagy térbeli felbontású (~1nm) vonalmenti EELS analízist VG HB501 pásztázó transzmissziós elektronszkópon (STEM) végeztem (Orsay, Paris).

A multislice módszeren alapuló HRTEM képszimulációkat P. Stadelmann által készített JEMS programmal végeztem. A modell rendszereken az elektrondiffrakció számításához egy saját fejlesztésű programot készítettem.

Új tudományos eredmények (tézisek)

1 Az ionbombázás hatása a fullerénszerű CN_x szerkezetére. [T3]

Meghatároztam az Ar^+ ionbombázás hatására kialakuló felületi roncsolt réteg vastagságát fullerénszerű CN_x vékonyrétegeken. Az ionbombázás roncsoló hatása a grafithez hasonló réteges szerkezet megszűnésében (amorfizáció) nyilvánul meg. A 3keV ionenergia mellett az amorfizált réteg vastagsága ~ 13 nm, mely a Si-ra mért érték ~ 3 szorosa. Az amorfizált réteg vastagsága 800eV-ig alig csökken, az alatt viszont jelentősen változik: 250eV-on a roncsoló hatás nem érzékelhető.

A minta XPS összetétel mérésével megmutattam, hogy a felületi réteg amorfizálódása mellett a rétegek N tartalma csökken az ionbombázás hatására, valamint az N1s XPS csúcs elemzése arra utal, hogy a megmaradt N kötésiállapota is megváltozik. A bombázás hatására egyre kevesebb N kötődik összefüggő sp^2 hálózatba, vagyis az sp^2 domének kiterjedése egyre kisebb. A N egyre inkább a domének szélét lezáró (piridin- vagy nitril-szerű) pozíciókba kerül.

2 Fullerénszerű nanoszerkezetek HRTEM leképezése. [T3, T12]

A szilárd fázisban létrejövő fullerénszerű szerkezetek görbült grafén síkokból álló kisméretű (~ 5 nm-es) egységei a szerkezet összefüggő volta miatt átfednek a TEM felvételeken. Kísérletileg és képszimulációval is megmutattam, hogy a szerkezeti elemek átfedése esetén a HRTEM felvételeken megjelenő kontraszt defókusztól és a mintavastagságtól való függése nem teszi lehetővé a szerkezet egyértelmű meghatározását. A fullerénszerű CN_x esetén a nanoméretű szerkezeti elemek átfedését azzal kerültem el, hogy a NaCl hordozóról leúsztatott vékonyréteget a réteg szakadási élei mentén vizsgáltam, ahol ~ 5 nm átmérőjű kerek alakzatok (nanohagymák) figyelhetők meg. Az ilyen vékony mintarészletekről Scherzer defókusznál nyert felvételek értelmezhetők. Ez lehetővé tette a nanohagymák szerkezetének meghatározását, valamint a nanohagymák belüli összetételváltozás meghatározását EELS analízissel.

A réteg szakadási élei mentén feltárt egyedi nanohagymák megfigyelésével egyben rámutattam, hogy a CN_x réteg szakadása a hagymák

határfelületén következik be, magukat a hagymákat érintetlenül hagyva, ami arra utal, hogy a nanohagymák belső szerkezete erősebb, mint közöttük a kapcsolódás. E jelenség más anyagoknál is előfordulhat, amire alapozva kidolgoztam egy nanoszerkezetű anyagok esetében alkalmazható módszert nagyon vékony, HRTEM leképezésre alkalmas, szakadási élek mesterséges létrehozására.

3 FL-CN_x szerkezete [T1-T3, T7, T10]

HRTEM módszerrel igazoltam, hogy a DC magnetron porlasztással előállított FL-CN_x ($x \approx 0,1$, előállítási paraméterek: $T_s = 450^\circ\text{C}$, $V_{\text{bias}} = -25\text{V}$, $p_{\text{Ar}} = 0,4\text{Pa}$) szerkezete a tiszta szén szerkezetekben is tapasztalt nanohagymákéval analóg. A nanohagymákban a fullerénekhez hasonló szerkezetű héjak leírhatók Goldberg poliéderek sorozataként. Vonalmenti EELS analízissel igazoltam, hogy a beépült N koncentrációja a nanohagymák közepén nagyobb, mint a felszínén, ami igazolja, hogy a fullerénszerű héjakba beépült N mennyisége a héjba beépült ötszögek mennyiségével és a héj görbületével függ össze. Nanoklaszterek elektronszórására alapozott modellel igazoltam, hogy a FL-CN_x-re jellemző rövidtávú rend a grafitéhez hasonló.

4 Magképződés és növekedési mechanizmus a FL-CN_x-ben [T1]

A szénitrid (CN_x) vékonyrétegekben az ún. fullerénszerű szerkezetet a szén grafén síkjaiba beépülő nitrogén idézi elő a grafén síkok meggörbítése és a lokálisan a molekuláris fullerénekre emlékeztető szerkezetek összekapcsolása révén. Keresztmetszeti HRTEM-re alapozva megalkottam a fullerénszerű CN_x rétegek magképződési és növekedési modelljét, mely leírja, hogy hogyan alakul ki összefüggő szilárd szerkezet a főként sp^2 hibridizációjú szén egységekből. A növekedés kezdeti szakaszában létrejövő magokat kupolaszerűen beborítják a fullerénszerű (ötszögeket is tartalmazó, görbült) CN_x héjak. A növekvő fullerénszerű héjszerkezetek felszínén is bekövetkezhet a nanohagymák magképződése és növekedése. Az újabb hagymák (fullerénszerű héjak) nukleációjában a N atom szomszédságában található kémiai aktív atomok játszanak szerepet, ezáltal a növekvő görbült héjak összekapcsolhatnak hagymákat.

5 DC porlasztott CN_x rétegek szerkezete [T4-T8, T13]

A CN_x szerkezetben kialakuló (grafit jellegű rövidtávú renddel jellemezhető) domének kiterjedtségében felfedezhető tendenciák jól követhetők elektrondiffrakcióval (SAED). 450°C hordozóhőmérséklet alatt a ~3,5Å-nek megfelelő SAED gyűrű intenzitása csökken a porlasztógáz N₂ tartalmával, az előfeszítéssel előidézett ionbombázással, valamint a hordozóhőmérséklet csökkenésével, a grafit jellegű rövidtávú rendeződés mértékének csökkenését jelezve. A ~3,5Å-nek megfelelő SAED gyűrű intenzitása korrelációt mutat a CN_x rétegek N1s XPS spektrumának két domináns P1 (~400,5eV) és P2 (~398,2eV) komponenseivel. A P2/P1 intenzitásarány növekedésével a ~3,5Å-nek megfelelő SAED gyűrű intenzitása csökken. A P1 és P2 csúcsok értelmezése szerint a P2/P1 arány növekedése arra utal, hogy egyre kevesebb N kötődik összefüggő sp^2 hálózatba, vagyis az sp^2 domének kiterjedése egyre kisebb, a N egyre inkább a domének szélét lezáró piridin-szerű (esetleg nitril szerű) pozíciókba kerül, ami a (görbült) sp^2 hálózat darabolódását (amorfizációját) jelenti.

6 A fullerénszerű CP_x szerkezete [T9-T11]

A FL-CP_{0.1} (T_s=300°C, U_b=-25V, p_{Ar}=0,4 Pa) diffrakciójában széles intenzitás maximumokat tapasztaltam a szén alapú bevonatoktól eltérő ~5,9Å ~2,6Å és ~1,6Å értéknél. SAED szimulációjával igazoltam, hogy a ~2,6Å és ~1,6Å értékek közel esnek a C₂₀ molekulára és annak töredékeire jellemző ~3Å és 1,7Å értékhez, ami arra utal, hogy a FL-CP_x elsődlegesen a C₂₀-hoz hasonlóan nagy lokális görbületű egységekből áll. Nemcsak a maximumok helye, de a maximumok alakja is hasonló jelleget mutat. A nagy görbületű, ezért nagyon kisméretű, domének HRTEM leképezése nem lehetséges, de az eredmény összhangban van a CP_x szerkezet felépülésére vonatkozó elméleti számítással, miszerint a P adalék hatására energetikailag kedvező a négy atomból álló gyűrűk kialakulása, ami nagy lokális görbülethez vezet. Foszforral adalékolt amorf C₂₀ fullerittel analóg modellszerkezeten végzett SAED számítással igazoltam, hogy a FL-CP_{0.1} elektrondiffrakciójában ~5,9Å-nél kísérletileg tapasztalt intenzitásmaximum magyarázható az anyagot felépítő, nagy lokális görbületű, klaszterek egymás közti véletlenszerű rövidtávú rendeződésével.

A növesztési paraméterter nagy részében a CP_x a grafithez hasonló rövidtávú renddel jellemezhető amorf szerkezetű. Társszerzőkkel megmutattuk, hogy a szén hálózatba beépült nagyméretű P atomok hatására megnő a héjak távolsága. Ennek következtében a grafit 002 csúcsa $\sim 3,35$ Å-tól 4 Å felé tolódik el.

7 Amorf és nanoszerkezetű anyagok elektronszórásának leírása. [T10]

Kinematikus szórási elméletre alapozott modellt alkalmaztam amorf és nanoszerkezetű anyagok szórási képének és rövidtávú rendjének leírásához. Az általam kidolgozott modellben a nanoszerkezetű anyag kristályos és/vagy poliéderez (pl. molekuláris fullerén) rövidtávú renddel jellemezhető nanoklaszterek együttese. Az anyagot alkotó domének különböző alakú és orientációjú nanoklaszterek, melyekhez méreteloszlás is rendelhető. A modellben Gauss eloszlást alkalmazva (az eloszlás félértékszélességét a $\sigma = N_{\text{average}}/3$ értékkel rögzítve) a szórt intenzitást a klaszterek átlagos atomszámának (N_{average}) függvényében határoztam meg. Az amorf anyagok diffrakciója $N_{\text{average}}=10-30$ atom paraméterekkel modellezhető. Fullerén nanoklaszter esetében a szórasi intenzitás maximumhelyeit a fullerénhéj görbülete határozza meg, amit a fullerénhéj töredékessége és belső szerkezete nem befolyásol számottevően. Az ismertett modellt alkalmaztam a fullerénszerű CN_x és CP_x elektrondiffrakciójának értelmezésére és meghatároztam a két anyagrendszer rövidtávú atomi szerkezetét.

A tézispontokhoz kapcsolódó saját publikációk

- [T1] **Zs. Czigány**, I.F. Brunell, J. Neidhardt, K. Suenaga, and L. Hultman: Growth of fullerene-Like Carbon Nitride Thin Solid Films Consisting of Cross-Linked Nano-Onions
Appl. Phys. Lett. 79 (2001) 2639-41
- [T2] L. Hultman, S. Stafström, **Zs. Czigány**, J. Neidhardt, N. Hellgren, I.F. Brunell, K. Suenaga and C. Colliex: Cross-Linked Nano-Onions of Carbon Nitride in Solid Phase; Existence of novel $C_{48}N_{12}$ Aza-Fullerene
Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 225503-1-4
- [T3] **Zs. Czigány**, J. Neidhardt, I.F. Brunell and L. Hultman: TEM imaging of fullerene-like structures in CN_x thin films with respect to ion-beam milling sample preparation artefacts
Ultramicroscopy 94 (2003) 163-173
- [T4] A.A.Voevodin, J.G. Jones, **Zs. Czigány**, L. Hultman and J.S. Zabinski: Growth and structure of fullerene-like CN_x thin films produced by pulsed laser ablation of graphite in nitrogen.
J. Appl. Phys 92 (2002) 4980-4988
- [T5] J. Neidhardt, **Zs. Czigány**, I.F. Brunell and L. Hultman: Growth of fullerene-like CN_x thin solid films by reactive magnetron sputtering; Role of low energy ion irradiation in determining microstructure and mechanical properties
J. Appl. Phys. 93 (2003) 3002-3015
- [T6] J. Neidhardt, **Zs. Czigány** and L. Hultman: Superelastic fullerene-like carbon nitride coatings synthesised by reactive unbalanced magnetron sputtering
Surface Engineering 19 (4) (2003) 299-303

- [T7] J. Neidhardt, **Zs. Czigány** and L. Hultman: Correlation of X-ray Photoemission Spectroscopy and High Resolution Transmission Electron Microscopy of Fullerene-Like Carbon Nitride Thin Solid Films
Carbon 42 (2004) 2729-2734
- [T8] R. Gago, G. Abrasonis, A. Mücklich, W. Möller, **Zs. Czigány** and G. Radnóczy: Fullerene-like arrangements in carbon nitride thin films grown by direct ion beam sputtering
Appl. Phys. Lett. 87 (2005) 071901
- [T9] A. Furlan, G.K. Gueorguiev, **Zs. Czigány**, H. Högberg, S. Braun, S. Stafström and L. Hultman: Synthesis of Phospho Carbide Thin Films By Magnetron Sputtering
Rapid Research Letter in Physica Status Solidi 2 (2008) 191-193
- [T10] **Zs. Czigány** and L. Hultman: Interpretation of electron diffraction patterns from amorphous and fullerene-like carbon allotropes
Ultramicroscopy 110 (2010) 815-819
- [T11] G.K. Gueorguiev, **Zs. Czigány**, A. Furlan, S. Stafström and L. Hultman: Intercalation of P atoms in Fullerene-like CP_x
Chem. Phys. Lett 501 (2011) 400-403
- [T12] **Zs. Czigány**: Plan-View Preparation of TEM Specimens from Thin Films Using Adhesive Tape
Microscopy and Microanalysis 17 (2011) 886-888
- [T13] S. Schmidt, **Zs. Czigány**, G. Greczynski, and L. Hultman: Ion Mass Spectrometry Investigations of the Discharge during Reactive High Power Pulsed and Direct Current Magnetron Sputtering of Carbon in Ar and Ar/N₂
J. Appl. Phys 112 (2012) 013305

A dolgozat témaköréhez kapcsolódó egyéb publikációk

- [1] E. Broitman, W. Macdonald, N. Hellgren, G. Radnóczy, Zs. Czigány, A. Wennerberg, M. Jacobsson and L. Hultman: Carbon Nitride films on Ortopaedic Substrates *Diamond and Related Materials* 9 (2000) 1984-1991
- [2] A. Zocco, A. Perrone, E. Broitman, Zs. Czigány, L. Hultman, M. Anderle and N. Laidani: Mechanical and tribological properties of CN_x films deposited by reactive pulsed laser ablation *Diamond and Related Materials* 11 (2002) 98-104
- [3] E. Broitman, N. Hellgren, Zs. Czigány, R.D. Twesten, J. Luning, I. Petrov, L. Hultman and B.C. Holloway: Structural and mechanical properties of diamond-like carbon films deposited by direct current magnetron sputtering *J. Vac. Sci. Technol. A* 21 (2003) 851-859
- [4] I. Brunell, L. Picon, N. Hellgren, Zs. Czigány, J. Neidhardt and L. Hultman: In-situ Stress Measurement During Deposition of CN_x Thin Films by Unbalanced Magnetron Sputtering; Formation of High Levels of Stress with 28 eV Ion Irradiation *Phil. Mag. Lett.* 84 (2004) 395-403
- [5] R. Gago, J. Neidhardt, M. Vinnichenko, U. Kreissig, **Zs. Czigány**, A. Kolitsch, L. Hultman and W. Möller: Synthesis of carbon nitride thin films by low-energy ion beam assisted evaporation: on the mechanisms for fullerene-like microstructure formation *Thin Solid Films* 483 (2005) 89-94
- [6] E. Broitman, A. Furlan, G.K. Gueorguiev, Zs. Czigány, A.M. Tarditi, A.J. Gellman, S. Stafström and L. Hultman: Water Adsorption on Phosphorous-Carbide Thin Films *Surface and Coatings Technology* 204(6-7) (2009) 1035-1039
- [7] T. Berlind, A. Furlan, Zs. Czigány, J. Neidhardt, L. Hultman and H. Arwin: Spectroscopic ellipsometry characterisation of amorphous carbon

and amorphous, graphitic and fullerene-like carbon nitride thin films *Thin Solid Films* 517(24) (2009) 6652-6658

- [8] E. Broitman, Zs. Czigány, G. Greczynski, J. Böhlmark, R. Cremer and L. Hultman: Industrial-scale deposition of highly adherent CN_x films on steel substrates *Surface and Coatings Technology* 204 (2010) 3349-3357
- [9] S. Schmidt, G. Greczynski, C. Goyenola, G.K. Gueorguiev, Zs. Czigány, J. Jensen, I.G. Ivanov and L. Hultman: CF_x Thin Solid Films deposited by High Power Impulse Magnetron Sputtering: Synthesis and Characterization *Surface and Coatings Technology* 206 (2011) 646-653
- [10] E. Broitman, A. Furlan, G.K. Geuorguiev, Zs. Czigány, H. Högberg, and L. Hultman: Structural and Mechanical Properties of CN_x and CP_x Thin Solid Films *Key Engineering Materials* 488-489 (2012) 581-584

Czigány Zsolt munkássága - tudománymetriai adatok

	referált (IF) közlemények	impakt faktor	független idézettség	ekvivalens idézettség
Teljes munkásság	69	136,890	610	511,50
PhD fokozat (1999) után	57	126,561	546	452,75
Tézis közlemények	13	36,383	215	187,25

Hirsch index: **14**