

Doktori (Ph.D.) értekezés tézisei

## **Vízadszorpció hatása szilárdtestek dielektromos tulajdonságaira**

Haspel Henrik

Témavezető:

Dr. Kukovecz Ákos

Egyetemi docens

Kémia Doktori Iskola

Szegedi Tudományegyetem

Természettudományi és Informatikai Kar

Alkalmazott és Környezeti Kémiai Tanszék

Szeged

2014

# 1. Előzmények és célkitűzés

Az anyagok elektromos tulajdonságai nagymértékben függenek a felületükön megkötődő kémiai spécieszekektől. Ennek a mindennapi életben teljesen általános jelenségnek egyes tudományos mérések és technikai megoldások esetén döntő jelentősége van. A legtöbb esetben a hidrofil felületeken adszorbeálódó vízmolekulákat, és az ennek hatására kiépülő vízrétegeket kell számításba vennünk.

A jelenség fontos szerepet játszik egyes szenzorok érzékelési mechanizmusában, a heterogén katalízisben, a papíralapú elektronikai eszközök működésében, egyes ipari folyamatokban, illetve felbukkan hidrofil élelmiszeripari és gyógyszeripari alapanyagokban. Az élő szervezetekben megtalálható, biológiailag is fontos vegyületek, szénhidrátok, fehérjék, nukleinsavak töltésátviteli folyamatainak jelentőségét pedig nem lehet eltúlozni.

A tárgyalt folyamatok elméleti leírásához tudnunk kell, hogy a felületen lévő molekulák miként befolyásolják az anyag dielektromos tulajdonságait. Azonban a másfél évszázada ismert, kiemelkedő tudományos és technikai fontossággal bíró jelenség széles körben elfogadott, ellentmondásmentes, mikroszkopikus mechanizmusát a mai napig sem sikerült felállítani.

Munkám célja a hidrofil adszorbensek dielektromos tulajdonságaiban vízadszorpció során bekövetkező változások vizsgálata volt. Ehhez egy – egyéb tulajdonságait tekintve – igen jól ismert modellrendszert választottunk. Az elmúlt bő egy évtizedben az SZTE TTIK Alkalmazott és Környezeti Kémiai Tanszékén kiterjedt kutatások folytak egydimenziós titanát nanoszerkezetek előállítására, jellemzésére és módosítására. A hidrotermálisan előállított trititanát szerkezetű nanoszál (titanate nanowire, TiONW), egy hidrofil, ionos oxid, mely kiváló rendszernek bizonyult a fenti kérdéskör tanulmányozására.

Célul tűztük ki a titanát nanoszálak vízadszorpciója során lejátszódó dielektromos folyamatok részletes vizsgálatát. Ennek során különös hangsúlyt fektettünk a szálak víztartalmának jellemzésére, illetve a különböző víztípusok dielektromos válaszhoz való hozzájárulásának vizsgálatára. Továbbá, a hidrofil adszorbensekben tapasztalható dielektromos változások víztartalom-, és hőmérsékletfüggésének tanulmányozásával megkíséreltünk közelebb kerülni a folyamatok molekuláris eredetének feltárásához. Terveink közt szerepelt egy egyszerű elméleti keret kidolgozása, mely képes a vízmolekulák adszorpciója során létrejövő vezetési karakterisztika alakjának létrejöttét magyarázni.

## 2. Kísérleti rész

A modellrendszerként használt titánát nanoszálakat (TiONW) az Alkalmazott és Környezeti Kémiai Tanszéken állítottuk elő bázikus közegű hidrotermális eljárással. Anatóz  $\text{TiO}_2$ -ot NaOH oldatban diszpergáltunk, a kapott fehér szuszpenziót zárt, teflonbélésű autoklávban hőkezeltük, miközben az autoklávot annak rövidebb tengelye körül forgattuk. A nyers terméket ioncserélt vízzel és sósavval  $\text{pH} = 7$ -ig mostuk, majd a diszperziót szűrtük. A nanoszálakat ezután szárítószekrényben szárítottuk. A mérések során a mintákat állandó relatív páratartalmú atmoszférában tartottuk. A mintatartóban a páratartalmat szilárd sójokkal érintkező telített sóoldatokkal állítottuk be.

A nanoszálak méreteit, morfológiáját és szerkezetét transzmissziós (TEM) és pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) vizsgáltuk, míg a minta kémiai összetételéről a pásztázó elektronmikroszkópban található energiadiszperzív röntgenspektrométer (EDS) segítségével tájékozódunk. A nanoszálak adszorpciós/deszorpciós izotermáit, fajlagos felületét nitrogén adszorpciós-deszorpciós méréssel határoztuk meg, a pórusméret-eloszlást a deszorpciós ágból a Barrett-Joyner-Halenda (BJH) módszerrel számítottuk ki. A titánát nanoszálak kristályszerkezetéről, illetve az abban a vízadszorpció során bekövetkező változásokról röntgendiffrakciós vizsgálatokkal (XRD) nyertünk információt. A titánát nanoszálakban található víz mennyiségét termogravimetriás mérésekkel (TGA) határoztuk meg. A vízadszorpció során bekövetkező dielektromos változásokhoz közvetlenül kapcsolódó fiziszorbeált víz mennyiségét a termogravimetriás mérésekből meghatározott vízadszorpciós izotermával jellemeztük. A felületen kötött víz termodinamikai állapotát Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópiával és mélyhőmérsékletű ( $-50^\circ\text{C}$ – $25^\circ\text{C}$ ) pásztázó kalorimetriás mérésekkel határoztuk meg.

A rendszer elektromos vezetésében vízadszorpció során bekövetkező változásban meghatározó szerepet játszó paramétereket tranziens ionáram mérésekből (ITIC) határoztuk meg. A titánát nanoszálak dielektromos tulajdonságait dielektromos relaxációs spektroszkópia (DRS) segítségével jellemeztük. A méréseket a  $10^{-3}$ - $10^6$  Hz frekvenciatartományban végeztük. Vizsgáltuk az egyes dielektromos folyamatok változását az adszorbens víztartalmával, és így annak termodinamikai állapotával, a mérési feszültséggel és a hőmérséklettel. Az elektromos tulajdonságok teljesebb jellemzése érdekében felvettük a nanoszálak áram-feszültség (I-V) karakterisztikáját is.

### **3. Új tudományos eredmények**

#### **T.1. A titanát nanoszálakban lévő vizek típusának, mennyiségének és termodinamikai állapotának jellemzése.**

1.1. Termogravimetriás mérésekkel megmutattuk, hogy a titanát nanoszálak fiziszorbeált, kemiszorbeált és szerkezeti vizet tartalmaznak. Röntgendiffrakciós vizsgálatokkal megállapítottuk, hogy a titanát nanoszálak interlamelláris távolsága szobahőmérsékleten a 6 - 100% relatív páratartalom tartományban állandó, így a vizsgált vízfüggő elektromos folyamatokban nem a szálak szerkezeti vize, hanem az azok felületén fiziszorbeált víz vesz részt. A termogravimetriás mérésekből meghatároztuk a titanát nanoszálak vízadszorpciós izotermáját, melynek segítségével az elektromos változásokban szerepet játszó fiziszorbeált víz mennyiségét tudtuk kvantitatíven jellemezni.

1.2. Mélyhőmérsékletű pásztázó kalorimetriás mérések segítségével jellemeztük a titanát nanoszálakon adszorbeált víz termodinamikai állapotát. A felmelegedési görbéken 60% relatív páratartalomtól egy mélyhőmérsékletű ( $\sim -25^{\circ}\text{C}$ ), míg 90% relatív páratartalom felett egy újabb, magasabb hőmérsékletű ( $\sim 0^{\circ}\text{C}$ ) fázisátmenetet találtunk. Megállapítottuk, hogy az előbbi fázisátmenet vagy az erősen kötött vízréteget követő ún. átmeneti rétegben vagy a nanoszálak pórusaiban lévő vízrétegekben következik be. A magasabb hőmérsékletű fázisátmenetet a tömbi fázisú vízhez hasonló állapotban lévő legfelső, kondenzált vízrétegek olvadási átmeneteként azonosítottuk.

#### **T.2. A titanát nanoszálak dielektromos válaszánaK részletes elemzése; az egyes dielektromos folyamatok vízfüggésének vizsgálata.**

2.1. Szobahőmérsékletű dielektromos spektroszkópiás és tranziens ionáram méréseket végeztünk a 6 – 100% relatív páratartalom tartományban, melyek segítségével megmutattuk, hogy a titanát nanoszálak elektromos vezetőképessége a környező atmoszféra relatív páratartalmával exponenciálisan változik. A tranziens ionáram módszer segítségével továbbá meghatároztuk a fajlagos vezetőképességet meghatározó paraméterek – az ionmobilitás és töltéshordozó koncentráció – relatív páratartalom-függését is. Kimutattuk, hogy a relatív páratartalommal exponenciálisan változó töltéshordozó koncentráció a meghatározó a vezetőképesség változásában, míg az ionmobilitás hatása sokkal kisebb.

2.2. Azonosítottuk a titanát nanoszálak dielektromos spektrumában fellelhető folyamatokat. Megállapítottuk, hogy legalább három dielektromos relaxáció és az ún. kisfrekvenciás diszperzió lép fel minden vizsgált páratartalom esetén. A kis-, és középfrekvenciás folyamatokat határfelületi relaxációként, a nagyfrekvenciás folyamatot egy valódi dipólus orientációs relaxációjaként azonosítottuk. A legkisebb frekvenciákon megjelenő diszperzív folyamat az ún. kisfrekvenciás diszperzió, melyet a hosszú távú töltéstranszport okoz.

2.3. Megvizsgáltuk az egyes dielektromos folyamatok adszorbeált vízmennyiségtől való függését. A vezetőképesség exponenciálisan nőtt a felületi borítottsággal az adszorptívum kondenzációjának megindulásáig (<90 RH%), majd szintén exponenciálisan, bár sokkal kisebb érzékenységgel, növekedett tovább. A határfelületi folyamatok relaxációs ideje esetén szintén kétszakaszos exponenciális függést tapasztaltunk. A két szakasz közti váltás ezen esetekben is a kondenzáció megindulásához tartozó felületi borítottság tartományára esett.

2.4. Megvizsgáltuk, hogy áll-e fenn korreláció a kis-, és középfrekvenciás folyamatok relaxációs ideje, és az elektromos vezetőképesség között. Előbbieket utóbbi függvényében kettős logaritmikus formalizmusban ábrázolva kétszakaszos lineáris függést kaptunk mindkét folyamat esetén. A kis-, és középfrekvenciás folyamatok relaxációs idejének párhuzamos változása a vezetőképességgel további bizonyítékot szolgáltatott azok közös, határfelületi polarizációs eredetére.

### **T.3. A titanát nanoszálak vízfüggő dielektromos válasza hőmérsékletfüggésének vizsgálata.**

3.1. Megvizsgáltuk a dielektromos spektrumban fellelhető folyamatok hőmérsékletfüggését a  $-150^{\circ}\text{C}$  -  $+80^{\circ}\text{C}$  hőmérséklettartományban közel izosztér körülmények között. Mind a vezetés, mind a határfelületi relaxációk esetében hőmérsékletaktivált, ún. Arrhenius típusú hőmérsékletfüggést tapasztaltunk mind az alacsony ( $<-20^{\circ}\text{C}$ ), mind a magas ( $>0^{\circ}\text{C}$ ) hőmérsékletek tartományában.

3.2. Megállapítottuk, hogy a kis-, és középfrekvenciás folyamatokat más-más dinamika jellemzi az alacsony, és a magas hőmérséklettartományban. Figyelembe véve azok határfelületi eredetét, ezzel indirekt módon bizonyítottuk a töltéstranszport folyamatok dinamikájában a  $-20^{\circ}\text{C}$  –  $0^{\circ}\text{C}$  közötti hőmérsékletintervallumban bekövetkező változást.

3.3. Megvizsgáltuk a vezetés, illetve a kis-, és középfrekvenciás folyamatok Arrhenius-paramétereinek függését a titanáton adszorbeált víz mennyiségétől. Megállapítottuk, hogy mindhárom folyamat aktiválási energiája és a pre-exponenciális tényezője lineárisan nő az adszorbeált víz mennyiségével. Megmutattuk, hogy a növekvő vezetéssel, és gyorsuló relaxációkkal párhuzamos aktiválási energia növekedés ellentmondása csak látszólagos, az a víztartalommal és hőmérséklettel való exponenciális változás együttes fennállásából következik.

3.4. Kimutattuk, hogy a titanát nanoszálakban mérhető dielektromos folyamatok mindegyikének aktiválási energiája és pre-exponenciális tényezője között lineáris kapcsolat áll fenn. Ezzel bizonyítottuk, hogy ezen folyamatokra érvényes a kompenzációs hatás.

#### **T.4. Az adszorpció indukált elektromos vezetési folyamatok univerzalitása; egy egyszerű elektromos modell felállítása.**

4.1. Az elmúlt 100 év vonatkozó szakirodalma kiterjedt tanulmányozása során azt találtuk, hogy kémiaiailag igen eltérő anyagok dielektromos tulajdonságai egészen különböző adszorbátumok hatására is egy jól meghatározott, általános mintázat szerint változnak. Megállapítottuk, hogy töltéstranszport folyamatokra ez az általános karakterisztika három szakaszból áll: egy kezdeti enyhe emelkedésből, egy ezt követő meredek exponenciálisan növekvő szakaszból, és egy végső enyhe emelkedésből/telítési szakaszból. Az egyes adszorbens/adszorbátum anyagpárok esetén publikált karakterisztikák ennek az általános szigmoid görbének az egyes szakaszai.

4.2. Az általános vezetési karakterisztika megértésére megalkottunk egy egyszerű elektromos modellt. Megállapítottuk, hogy az adszorbátum molekula vezetési hatásának lokalizációja perkolációra jellemző szigmoid görbét szolgáltat, míg a hatás növekvő delokalizációja a perkolációs görbét fokozatosan az irodalomban talált univerzális karakterisztikába transzformálja. Megállapítottuk, az univerzális viselkedés az adszorpció és a felülettel való töltésátvitel inherens dinamikus és delokalizált jellegéből adódik.

#### **4. A doktori értekezés alapját képező közlemények**

1. **Water-Induced Charge Transport Processes in Titanate Nanowires: An Electrodynamic and Calorimetric Investigation**

**Haspel H**, Laufer N, Bugris V, Ambrus R, Szabó-Révész P, Kukovecz, Á

The Journal of Physical Chemistry C, 116 (35) 18999–19009 (2012)

IF(2012): 4,814 független hivatkozás: -

2. **Water Sorption Induced Dielectric Changes in Titanate Nanowires**

**Haspel H**, Bugris V, Kukovecz Á

The Journal of Physical Chemistry C, 117 (32), 16686–16697 (2013)

IF(2012): 4,814, független hivatkozás: -

3. **Water-Induced Changes in the Charge-Transport Dynamics of Titanate Nanowires**

**Haspel H**, Bugris V, Kukovecz Á

Langmuir, 30 (8) 1977-1984 (2014).

IF(2012): 4,187, független hivatkozás: -

4. **Dynamic origin of the surface conduction response in adsorption-induced electrical processes**

**Haspel H**, Peintler G, Kukovecz Á

Közlésre benyújtva, (2014)

5. **On a possible universality in conduction processes on solid surfaces**

**Haspel H**, Kukovecz Á

Közlésre benyújtva, (2014)

## 5. Előadások, poszterek, konferencia részvételek

- 1. Mechanism of humidity sensing: An unfinished story**  
50<sup>th</sup> anniversary of the first ab initio calculations on organic molecules 1963-2013,  
2013. október 28-29., Szeged (előadás)
- 2. Water sorption-related dielectric changes in titanate nanowires**  
**Haspel H**, Bugris V, Kukovecz Á, Kónya Z  
7<sup>th</sup> International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems (7<sup>th</sup> IDMRCS),  
2013. július 21-26., Barcelona, Spanyolország (poszter)
- 3. Identification of water types during the rehydration of a dehydrated CaFe-layered double hydroxide**  
Bugris V, **Haspel H**, Kukovecz Á, Kónya Z, Sipos P, Pálinkó I  
7<sup>th</sup> International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems (7<sup>th</sup> IDMRCS), 2013. július 21-26., Barcelona, Spanyolország (poszter)
- 4. Humidity-sensitive dielectric properties of titanate nanowires (TiONW)**  
**Haspel H**, Bugris V, Laufer N, Kukovecz Á, Kónya Z  
5<sup>th</sup> Szeged International Workshop on Advances in Nanoscience (SIWAN5),  
2012. október 24-27., Szeged (poszter)
- 5. A simple and economic way to measure low-temperature quasiisothermal dielectric spectra**  
**Haspel H**, Bugris V, Király A, Kukovecz Á, Kónya Z  
7<sup>th</sup> International Conference on Broadband Dielectric Spectroscopy and Its Applications (BDS 2012), 2012. szeptember 3-7., Lipcse, Németország (poszter)
- 6. Rehydration of dehydrated CaFe-L(ayered)D(ouble)H(ydroxide) followed by dielectric relaxation spectroscopy at low temperature**  
Bugris V, **Haspel H**, Sipiczki M, Kukovecz Á, Kónya Z, Sipos P, Pálinkó I  
7<sup>th</sup> International Conference on Broadband Dielectric Spectroscopy and Its Applications (BDS 2012), 2012. szeptember 3-7., Lipcse, Németország (poszter)



7. **Rehydration of dehydrated CaFe-L(ayered)D(ouble)H(ydroxide)**  
Bugris V, **Haspel H**, Sipiczki M, Kukovecz Á, Kónya Z, Sipos P, Pálinkó I  
16<sup>th</sup> International Symposium on Intercalation Compounds (ISIC16),  
2011. május 22-27., Sec-Ústupy, Csehország (poszter)
  
8. **Dielectric Spectroscopic Studies on Titanate Nanowires**  
6<sup>th</sup> International Conference on Broadband Dielectric Spectroscopy and Its Applications  
(BDS 2010), 2010. szeptember 7-10., Madrid, Spanyolország (előadás)
  
9. **Dielectric Spectroscopic Studies on Titanate Nanowires**  
The Eights Student Meeting (SM-2009) „Processing and Application of Ceramics”,  
2009. december 5., Novi Sad, Szerbia (előadás)
  
10. 5<sup>th</sup> International Conference on Broadband Dielectric Spectroscopy and Its Applications  
(BDS 2008), 2008. augusztus 26-29., Lyon, Franciaország
  
11. **Fluctuation enhanced gas sensing on functionalized carbon nanotube thin films**  
**Haspel H**, Ionescu R, Heszler P, Kukovecz Á, Kónya Z, Gingl Z, Maklin J, Mustonen  
T, Kordás K, Vajtai R, Ajayan PM  
XXII. International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials  
(IWEPM 2008), 2008. március 1-8., Kirchberg in Tirol, Ausztria (poszter)
  
12. **Drift effect of fluctuation enhanced gas sensing on carbon nanotube sensors**  
Heszler P, Gingl Z, Mingesz R, Csengeri A, **Haspel H**, Kukovecz Á, Kónya Z, Kiricsi I,  
Ionescu R, Maklin J, Mustonen T, Tóth G, Halonen N, Kordás K, Vahakangas J,  
Moilanen H  
XXII. International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials  
(IWEPM 2008), 2008. március 1-8., Kirchberg in Tirol, Ausztria (poszter)
  
13. **Inkjet printed resistive and chemical-FET carbon nanotube gas sensors**  
Maklin J, Mustonen T, Halonen N, Tóth G, Kordás K, Vahakangas J, Moilanen H,  
Kukovecz Á, Kónya Z, **Haspel H**, Gingl Z, Heszler P, Vajtai R, Ajayan PM  
XXII. International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials  
(IWEPM 2008), 2008. március 1-8., Kirchberg in Tirol, Ausztria (poszter)

14. **Low impedance multi-wall carbon nanotube films made suitable for temperature and pressure measurement by localized charge injection**  
Kukovecz A, Smajda R, Óze M, Schaeffer B, **Haspel H**, Kónya Z, Kiricsi I  
XXII. International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials (IWEPNM 2008), 2008. március 1-8., Kirchberg in Tirol, Ausztria (poszter)
  
15. **Buckypaper gas chromatograph: evaporation profile based identification of liquid analytes using multi-wall carbon nanotube films**  
Smajda R, Kukovecz Á, **Haspel H**, Kónya Z, Kiricsi I  
XXI. International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials (IWEPNM 2007), 2007. március 10-17., Kirchberg in Tirol, Ausztria (poszter)
  
16. **On the morphology and transport properties of HDPE–titanate nanowire nanocomposites**  
Szél J, Horváth E, Sági A, **Haspel H**, Kukovecz Á, Kónya Z, Kiricsi I  
XXI. International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials (IWEPNM 2007), 2007. március 10-17., Kirchberg in Tirol, Ausztria (poszter)
  
17. **Vibrational spectroscopic studies on the formation mechanism of ion-exchangeable titania nanotubes**  
Hodos M, **Haspel H**, Horváth E, Kukovecz A, Kónya Z, Kiricsi I  
XIX. International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials (IWEPNM 2005), 2005. március 12-19., Kirchberg in Tirol, Ausztria (poszter)

## 6. Egyéb közlemények

- 1. Low-temperature Conversion of Titanate Nanotubes into Nitrogen-doped TiO<sub>2</sub> Nanoparticles**  
Buchholz B, **Haspel H**, Kukovecz A, Kónya Z  
Közlésre benyújtva
- 2. Water Types and their Relaxation Behavior in Partially Rehydrated CaFe-Mixed Binary Oxide Obtained from CaFe-Layered Double Hydroxide in the 155 K – 298 K Temperature Range**  
Bugris V, **Haspel H**, Kukovecz Á, Kónya Z, Sipiczki M, Sipos P, Pálinkó I  
Langmuir 29 (43) 13315-13321 (2013)  
IF(2012): 4,187 független hivatkozás: 1
- 3. Rehydration of dehydrated CaFe-L(ayered)D(ouble)H(ydroxide) followed by thermogravimetry, X-ray diffractometry and dielectric relaxation spectroscopy**  
Bugris V, Haspel H, Sipiczki M, Kukovecz Á, Kónya Z, Sipos P, Pálinkó I  
Journal of Molecular Structure 1044 21-26 (2013)  
IF(2012): 1,404 független hivatkozás: -
- 4. Electrical resistivity and thermal properties of compatibilized multi-walled carbon nanotube/polypropylene composites**  
Szentés A, Varga C, Horváth G, Bartha L, Kónya Z, **Haspel H**, Szél J, Kukovecz Á  
Express Polymer Letters 6 (6) 494-502 (2012)  
IF: 2,294 független hivatkozás: 3
- 5. Numerical differentiation methods for the logarithmic derivative technique used in dielectricspectroscopy**  
**Haspel H**, Kukovecz Á, Kónya Z, Kiricsi I  
Processing and Application of Ceramics 4 (2) 87-93 (2010)  
IF: - független hivatkozás: -

6. **Carbon nanotube based sensors and fluctuation enhanced sensing**  
 Kukovecz Á, M. D., Kordás K, Gingl Z, Moilanen H, Mingesz R, Kónya Z, Maklin J, Halonen N, Tóth G, **Haspel H**, Heszler P, Mohl M, Sági A, Roth S, Vajtai R, Ajayan P.M., Pouillon Y, Rubio A, Kiricsi I  
 Physica Status Solidi C 7 1217-1221 (2010)  
 IF: - független hivatkozás: -
  
7. **Increasing chemical selectivity of carbon nanotube-based sensors by fluctuation-enhanced sensing**  
 Molnár D, Heszler P, Mingesz R, Gingl Z, Kukovecz Á, Kónya Z, **Haspel H**, Mohl M, Sági A, Kiricsi I, Kordás K, Maklin J, Halonen N, Toth G, Moilanen H, Roth S, Vajtai R, Ajayan PM, Pouillon Y, Rubio A  
 Fluctuation and Noise Letters 9 (3) 277-287 (2010)  
 IF: 0,460 független hivatkozás: 3
  
8. **Pyroelectric temperature sensitization of multi-wall carbon nanotube papers**  
 Kukovecz Á, Smajda R, Öze M, **Haspel H**, Kónya Z, Kiricsi I  
 Carbon 46 (9) 1262-1265 (2008)  
 IF: 4,373 független hivatkozás: 2
  
9. **Improving the performance of functionalized carbon nanotube thin film sensors by fluctuation enhanced sensing.**  
 Kukovecz Á, Heszler P, Kordás K, Roth S, Kónya Z, **Haspel H**, Ionescu R, Sági A, Maklin J, Mohl M, Gingl Z, Vajtai R, Kiricsi I, Ajayan PM  
 Proceedings of SPIE 2008. San Diego, USA, 08.10.2008-08.14.2008 pp. 70370Y/1-70370Y10  
 IF: - független hivatkozás: -
  
10. **Fluctuation enhanced gas sensing on functionalized carbon nanotube thin films**  
**Haspel H**, Ionescu R, Heszler P, Kukovecz Á, Kónya Z, Gingl Z, Maklin J, Mustonen T, Kordás K, Vajtai R, Ajayan PM  
 Physica Status Solidi B 245 (10) 2339-2342 (2008)  
 IF: 1,166 független hivatkozás: 3

11. **Multiwall carbon nanotube films surface-doped with electroceramics for sensor applications**

Kukovecz Á, Smajda R, Óze M, Schaefer B, **Haspel H**, Kónya Z, Kiricsi I

Physica Status Solidi B 245 (10) 2331-2334 (2008)

IF: 1,166 független hivatkozás: 5

12. **Drift effect of fluctuation enhanced gas sensing on carbon nanotube sensors**

Heszler P, Gingl Z, Mingesz R, Csengeri A, **Haspel H**, Kukovecz Á, Kónya Z, Kiricsi I, Ionescu R, Maklin J, Mustonen T, Tóth G, Halonen N, Kordás K, Vahakangas J, Moilanen H

Physica Status Solidi B 245 (10) 2343-2346 (2008)

IF: 1,166 független hivatkozás: -

13. **Inkjet printed resistive and chemical-FET carbon nanotube gas sensors**

Maklin J, Mustonen T, Halonen N, Tóth G, Kordás K, Vahakangas J, Moilanen H, Kukovecz Á, Kónya Z, **Haspel H**, Gingl Z, Heszler P, Vajtai R, Ajayan PM

Physica Status Solidi B 245 (10) 2335-2338 (2008)

IF: 1,166 független hivatkozás: 4

14. **Temperature response of carbon nanotube films modified with pyroelectric materials**

Smajda R, Kukovecz Á, Óze M, **Haspel H**, Kónya Z, Kiricsi I

Proceedings of the seventh students' meeting – SM-2007 School of Ceramics, 2007. december 6-8., Novi Sad, Szerbia and Montenegro, Editors: V.V. Srdic, J. Ranogajec

IF: - független hivatkozás: -

15. **Vibrational spectroscopic studies on the formation of ion exchangeable titania nanotubes**

Hodos M, **Haspel H**, Horváth E, Kukovecz A, Kónya Z, Kiricsi I

Proceedings of the XIX. Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials

AIP Conference Proceedings 786 345-348 (2005)

IF: - független hivatkozás: 2

16. **Photosensitization of ion-exchangeable titanate nanotubes by CdS nanoparticles**

Hodos M, Horváth E, **Haspel H**, Kukovecz Á, Kónya Z, Kiricsi I

Chemical Physics Letters 399 512-515 (2004)

IF: 2,438 független hivatkozás: 117

## 7. Szabadalom

1 Horváth Géza, Szentes Adrienn, Kiricsi Imre, Kónya Zoltán, Kukovecz Ákos, Horváth

Endre, Vanyorek László, Haspel Henrik, Szél József

Carbon nanocomposite additive and its use as adjuvant for polymer materials.

WIPO Patent WO/2009/156775 A2 (2009)

Összes referált közlemény: 14,

ebből az értekezéshez kapcsolódik: 3

Összesített impakt faktor: 33,635,

ebből az értekezéshez kapcsolódik: 13,815

Összes idegen hivatkozás: 140,

ebből az értekezéshez kapcsolódik: -