



**Műegyetem – Kutatóegyetem**

**K+F+I Stratégia**

**Nanofizika, nanotechnológia és anyagtudomány  
Kiemelt Kutatási Terület**

2010. október 25.

Készítette:

Dr. Mihály György (TTK) a kutatási terület vezetője  
Dr. Czigány Tibor (GPK)  
Dr. Dobránszky János (GPK)  
Dr. Gyurcsányi Róbert (VBK)  
Dr. Harsányi Gábor (VIK)  
Dr. Hórvölgyi Zoltán (VBK)  
Dr. Kocsányi László (TTK)  
Dr. Mizsei János (VIK)

Véleményezte:

Dr. Karsai Béla, elnök, Karsai Műanyagtechnikai Holding Zrt.  
Dr. Pálinkás József, az MTA rendes tagja, egyetemi tanár, Debreceni Egyetem  
Prof. Springer György, az MTA külső tagja, Stanford University, USA  
Prof. Vancsó Gyula, az MTA külső tagja, University of Twente, Hollandia



**Building Blocks of nanotechnology**

*Nature can turn carbon into diamonds;  
humans can turn carbon into nanotubes.  
Though an enormous number of these microscopic  
threads resemble a big pile of chimney soot (top),  
it weighs only as much as 50 carats of diamonds  
(bottom).*

*Nanotubes are stronger than steel wires, carry a  
thousand times more electricity than copper wires,  
and can support more than a million times their  
own weight. They're also the cornerstone of a  
molecular science that is manipulating ordinary  
materials so they behave in extraordinary ways.*

National Geographic – Photo Gallery  
Photograph by Mark Thiessen

## TARTALOMJEGYZÉK

Tartalomjegyzék.....	3
Vezetői összefoglaló.....	5
1. Bevezetés.....	7
2. Helyzetelemzés.....	9
2.1. Nano-tudományok és technológiák helyzetképe.....	9
2.1.1. USA.....	9
2.1.2. EURÓPA.....	10
2.1.3. Távol-kelet.....	11
2.1.4. Magyarország.....	12
2.1.5. BME helyzete.....	14
2.2. Versenytársak, potenciális együttműködő partnerek.....	17
3. SWOT analízis.....	19
4. Jövőkép, vízió.....	22
5. A stratégiaalkotás alapelvei, célkitűzései.....	29
6. Kutatási területek.....	30
6.1. Nanoelektronika.....	30
6.1.1. Spintronika.....	30
6.1.2. Molekuláris elektronika, hibrid nanoszerkezetek.....	32
6.1.3. Nanoelektronikai eszközök.....	33
6.2. Felületi nanostruktúrák.....	35
6.2.1. Felületfizika, felületanalitika.....	35
6.2.2. Felületek minősítése.....	36
6.2.3. Biokompatibilis és hatóanyagleadó bevonatok.....	38

6.3. Szerkezeti és funkcionális anyagok.....	40
6.3.1. Polimer nanokompozitok .....	40
6.3.2. (Bio)kémiai érzékelés funkcionizált nanoszerkezetekkel.....	41
6.3.3. Funkcionális és rezponzív nanoanyagok .....	44
7. Innovációs potenciál és erőforrások fejlesztése .....	48
7.1. Humán erőforrásigény, annak biztosítása.....	48
7.2. Infrastrukturális feltételek fejlesztése .....	49
7.3. Tudományos eredmények hasznosítása.....	51
7.4. Külső ipari és intézményi kapcsolatrendszer.....	53
7.5. BME kiemelt kutatási területeinek kapcsolatrendszere .....	56
8. Forrásigény, finanszírozás, pénzügyi terv .....	59
8.1. A tervezett fejlesztések költségeinek becslése .....	59
8.2. A lehetséges források azonosítása .....	60
9. Ütemezés .....	61
10. Monitorozás .....	63
11. Hatáselemzés .....	65
11.1. Kutatás és oktatás. ....	65
11.2. Innovációs lánc.....	66
12. Fogalomtár .....	67
13. Források.....	70

## VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ

A nanotechnológia az anyag olyan tulajdonságait hasznosítja, amelyek eltérnek mind a makroszkopikus, mind pedig a molekuláris méretekben ismert, a kémia és az atomfizika által feltárt viselkedéstől. A mikrométer alatti, 1-100 nanométeres tartományban olyan új jelenségek kerülnek előtérbe, amelyek korábban nem gondolt módon kibővítik az új típusú eszközök készítésének, kívánatos funkciók kialakításának és anyagi paraméterek tervezésének lehetőségeit.

A nanotechnológiai megoldások alkalmazása ugrásszerű fejlődést jelentett az elektronikában, optikában, számítástechnikában, és rohamosan terjed az orvostudományban, környezetvédelemben, energetikában. Előretörése természetes a nagy szellemi hozzáadott értéket tartalmazó termékek előállításában, ugyanakkor előnyei még egyszerű tömegtermékekénél is áttörést jelenthetnek. A nanotudomány eredményein alapuló innovációk, a nanotechnológia eljárásokkal előállított eszközök és anyagok mindig interdiszciplináris kutatásokra épülnek. A BME szakmai erősségeinek összekapcsolásával a természettudományos jelenség-orientált kísérleti és elméleti kutatásokat, valamint a műszaki tapasztalatokon alapuló technológia fejlesztéseket az alábbi három területre fókuszáljuk:

A **nanoelektronika** területén olyan új nanoszerkezetek előállítását, kísérleti és elméleti vizsgálatát tűzzük ki célul, amelyekben a makroszkopikus tulajdonságokat felváltó kvantumfizikai jelenségkör megértése alapvető kihívást jelent, de egyúttal potenciális elektronikai alkalmazások lehetőségét is ígéri. A vizsgálatok kiterjednek a mintaelőállításra is, melynek során a korszerű nanotechnológiai eljárások mellett (rétegnövesztés, litográfia, kémiai preparálás) egy-egy célfeladatra egyedi megoldásokat is keresünk (molekulák kötése atomi láncokhoz, önszerveződő rendszerek).

A **felületi nanostruktúrák** kutatása során új felületkezelési és bevonatolási eljárásokat tervezünk kifejleszteni és minősíteni. Az alkalmazandó felületanalitikai módszerek, a vékonyréteg-készítő és elektronsugaras litográfiai eljárások egyúttal mérés-technikai és gyártástechnológiai háttérrel is biztosítanak a BME-n kutatott nanoszerkezetek részére. A felületi nanostruktúrák alkalmazási lehetőségeit a napelemektől kezdve, a kémiai szenzorokon keresztül, egészen a biofunkcionális orvostechonikai eszközökig széles körben vizsgáljuk.

A **szerkezeti és funkcionális anyagok** területén a nanorészecskék kedvező tulajdonságainak egy-egy kívánatos specifikus célra történő kihasználása mellett az ún. aktív nanoszerkezetek vizsgálatát is célul tűzzük ki. Ilyenek pl. a biológiai szenzorok vagy a célzott gyógyszer-leadásra alkalmas nanoszerkezetek. Jellemzőjük a nanoméretekben zajló folyamatok pontos ismeretén alapuló tervezés, majd az egyes funkciók kialakítása, alulról történő építkezéssel.

A kutatások infrastrukturális háttérét a **BME Nanotechnológiai Laboratóriumi Hálózat<sup>1</sup>** jelenti, melynek csomópontjait jelenleg négy SKI Nekifut laboratórium adja. A projekt keretében tervezett jelentős eszközfejlesztések a hálózat bővítésével a BME kutatói széles körének nyitnak meg új lehetőségeket, és nagymértékben hozzájárulnak új jelenségek felfedezéséhez és a legkorszerűbb technológiai megoldások kialakításához.

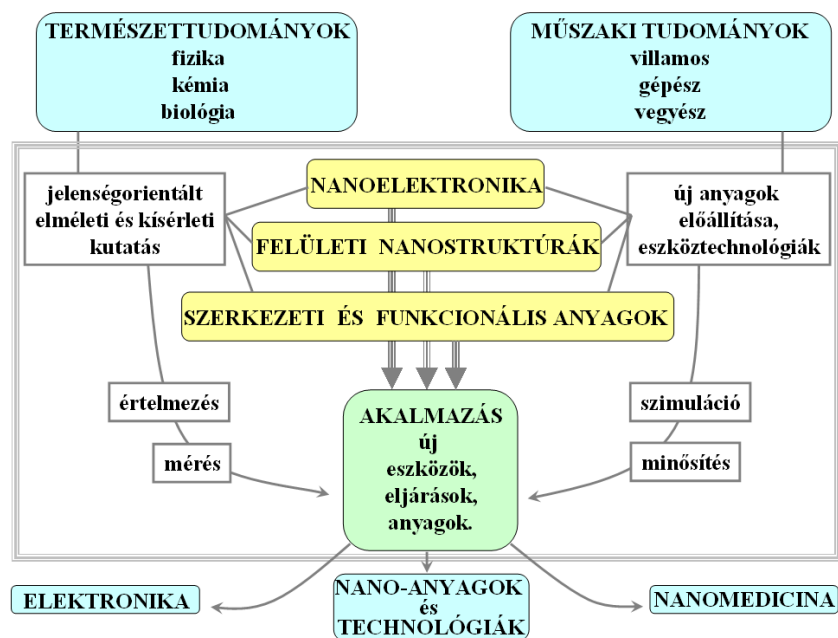
<sup>1</sup> <http://nano.bme.hu>

A *nanofizika – nanotechnológia – anyagtudomány* (Nano) kiemelt kutatási területen szerzett K+F+I tapasztalatok közvetlenül beépülnek az BSc és MSc oktatásba, így hallgatóink versenyképes tudásra tesznek szert. A fenti kutatások innovatív gondolkozást és tipikusan 3-5 fős csoportmunkát feltételeznek, már csak ezért is jelentős mértékben PhD-hallgatókra épülnek. A reményeink szerint ezen a területen elérhető kimagasló kutatási eredmények az egyetemi képzés mindhárom szintjén hozzájárulhatnak oktatásunk nemzetközi elismertségéhez is.

Magyarországon jelen vannak azon a multinacionális vállalatok, amelyek egyre inkább korszerű nanotechnológia eljárások alkalmaznak, és igénylik az ehhez értő magasan képzett szakembergárdát. A velük kialakított ipari kapcsolatok alapvető fontosságúak a BME szakmai szintjének meghatározásában, és iránymutatóak a képzési profil kialakításában.

Az innováció során kapott eredmények az egyetemmel szoros kapcsolatban álló spin-off cégekben is hasznosulhatnak. Ezen vállalkozások elsődleges feladata az egyetemen született eredmények piaci alkalmazása, egy inkubátor-időszak utáni önálló tevékenységi kör létrehozása. Nemzetközi példák alapján a *Nano* kutatási terület a spin-off vállalkozások létrejöttének optimális hátterét jelenti.

A nanotechnológiai eljárások alkalmazása napjaink kihívásainak minden szintjén átütő megoldásokat ígér. Kis- és középvállalkozások versenyképességét, piaci térnyerését alapozhatja meg egy-egy korszerű megoldás bevezetése. A kutatás – fejlesztés - innovációs eredményeink közvetlenül, míg jól képzett hallgatóink szaktudása közvetve járul hozzá a hazai KKV-k munkahelyteremtéséhez.



1. ábra  
Működési modell

## 1. BEVEZETÉS

*„Nanotechnology is the understanding and control of matter at dimensions between approximately 1 and 100 nanometers, where unique phenomena enable novel applications”<sup>2</sup>*

A nanotechnológia az anyag olyan tulajdonságait hasznosítja, amelyek eltérnek mind a makroszkopikus viselkedéstől, mind pedig a molekuláris méretekben ismert (kémia, atomfizika) reakcióktól. A mikrométer alatti, 1-100 nanométeres tartományban, új kvantum-jelenségek kerülnek előtérbe, ami új típusú eszközök készítésének, a kívánatos funkciók kialakításának és az anyagi paraméterek tervezésének széles eszköztárát nyitja meg. A nanotechnológia jellemzője atomi szintről, alulról felfelé történő építkezés,<sup>3</sup> szemben a hagyományos tervezéssel és anyagmegmunkálással.

Az előre tervezett, összetett nanoszerkezetek széles körben elterjedt alkalmazására a legjobb példát azok a megoldások szolgáltatják, melyek az utóbbi évek számítógépeiben jelentek meg. Ilyenek a 30 nm-es tranzistorokból felépített, szubmikronos litográfiával kialakított integrált áramkörök, vagy az új spintronikai elveken alapuló gyors mágneses memóriák. Az első nanoelektronikai eszközök között szereplő flash-memória éppen a nanotechnológiai megoldások miatt vált tömegtermékké a 2000-es évek elején (pen-drive, digitális képrögzítés, mobil-kártya, stb).

A technológiai megvalósítást – a fent felsorolt területeken – kiterjedt *nanofizikai* kutatások és fejlesztések alapozták meg. Ezek a kutatások tették lehetővé azokat az innovációkat, melyek eredményeként évről-évre nagyobb kapacitású, gyorsabb és megfizethetőbb termékek jelennek meg. Az évtizedek óta tartó exponenciális növekedést a háttérben olyan komoly *nanotechnológiai* változások teszik lehetővé, amelyek felhasználói szinten többnyire rejtve maradnak.

Ugyanakkor a félvezető ipar is egyre inkább a „more than Moore” elvet alkalmazva érhet el áttörést, alternatívát állítva az integrált áramkörök további méretcsökkentési folyamatának, ahol a technológiai költségek növekedése mellett már elvi akadályok is felmerülnek. A „more than Moore” irányzatnak lényege, hogy új, nem digitális funkcionalitással (pl. kémiai, biológiai, optikai, termikus, stb.) egészíti ki a félvezető chippek képességeit jelentősen növelve azok értékét és kibővítve az alkalmazási területeket.<sup>4</sup> A jelenleg is rohamosan terjedő kommunikációs eszközök, mint az I-phone vagy a GPS, szintén nanoelektronikai alkotórészekből épülnek fel, részben már a „more than Moore” irányzatot követve.

<sup>2</sup> A nanotechnológia definíciója az USA 2011-es költségvetésben 1,8 milliárd dollárral előterjesztett nanotechnológiai fejlesztés indoklásában, [http://www.nano.gov/NNI\\_2011\\_budget\\_supplement.pdf](http://www.nano.gov/NNI_2011_budget_supplement.pdf)

<sup>3</sup> Richard Feynman “Plenty of Room at the Bottom” című 1959. decemberi előadásának eredeti szövege megtekinthető: <http://www.its.caltech.edu/~feynman/plenty.html>

<sup>4</sup> G.Q. Zhang and A.J. van Roosmalen (editors): „More than Moore”, Springer (2009), ISBN 978-0-387-75593-2 Google\_books: [http://books.google.hu/books?id=RtgC2Ak80r8C&printsec=frontcover&dq=more+than+moore&source=bl&ots=M79BeFCMKq&sig=kBpzZJVDRzLHxeIZFpBUOI03txI&hl=hu&ei=1OyKTIImHGpGCswaa0fSFAg&sa=X&oi=book\\_result&ct=result&resnum=8&ved=0CDsQ6AEwBw#v=onepage&q&f=false](http://books.google.hu/books?id=RtgC2Ak80r8C&printsec=frontcover&dq=more+than+moore&source=bl&ots=M79BeFCMKq&sig=kBpzZJVDRzLHxeIZFpBUOI03txI&hl=hu&ei=1OyKTIImHGpGCswaa0fSFAg&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=8&ved=0CDsQ6AEwBw#v=onepage&q&f=false)

A szélesebb értelemben vett *anyagtudomány* bevonásával a nanotechnológia egy olyan technológiai platformot jelent, amely a napjaink kihívásainak minden szintjén átütő megoldásokat ígér. Az alábbi átfogó területeken felsorolt példák mögött már számos megvalósult konkrét alkalmazás szerepel,<sup>5</sup> és további áttöréseket ígérő intenzív nanotechnológiai fejlesztések folynak világszerte:

- *orvostudomány: képzőanyag, diagnosztika, genetika, gyógyszerkutatás,*
- *fenntartható fejlődés: energiatárolás, környezetbarát nanokompozitok, katalizátorok,*
- *információs társadalom: nanoelektronika, kommunikáció, adattárolás.*

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem kutatóegyetemi stratégiai célkitűzése a *nanofizika – nanotechnológia – anyagtudomány (Nano)* kiemelt kutatási területen a fenti széles diszciplínák egy-egy részterületére koncentrálnak:

- *nanoelektronika*
- *felületi nanostrukturák*
- *szerkezeti és funkcionális anyagok*

Ezeknek a fókuszterületeknek a részletes ismertetését a 6. fejezet tartalmazza. Kiválasztásukat az egyetemen felhalmozott szakmai tudás, kutatási tapasztalat és infrastrukturális háttér határozta meg. Stratégiánk alapeleme a természettudományok és műszaki tudományok területén nemzetközi szintű eredményeket felmutató műhelyek horizontális szervezése.

A nanotechnológia/nanotudomány az interdiszciplináris kutatások mintapéldányának tekinthető. A szakmai erősségek összekapcsolásával azt kívánjuk elérni, hogy a BME a fenti kiválasztott fókuszterületeken a hazai kutatások, fejlesztések és innovációk egyik központjává váljon.

---

<sup>5</sup> <http://www.nano.gov/html/facts/benefits.html>, [http://www.hessen-nanotech.de/mm/NanoEnergy\\_web.pdf](http://www.hessen-nanotech.de/mm/NanoEnergy_web.pdf)

## 2.1. NANO-TUDOMÁNYOK ÉS TECHNOLÓGIÁK HELYZETKÉPE

A nanotechnológiai megoldások alkalmazása ugrásszerű fejlődést jelentett az elektronikában, optikában, számítástechnikában, és rohamosan terjed az orvostudományban, környezetvédelemben, energetikában. Előretörése természetes a magas szellemi hozzáadott értéket tartalmazó termékek előállításában, ugyanakkor előnyei még egyszerű tömegtermékeknél is áttörést jelenthetnek. Napjainkban a nanotechnológia már megjelenik cipőpasztától, napkrémektől és festék alapanyagától kezdve, a gépkocsikat vezérlő elektronikán keresztül az önadagoló-gyógyszerekig – az élet minden területén.

A világ vezető ipari országai a saját igényeik és technológia felkészültségük alapján eltérő nanotechnológiai fejlesztéseket folytatnak. Az USA például alapjában tudomány-alapú stratégiát alkalmaz, Korea és Kína ipari célkitűzéseket valósít meg, míg Japán és Németország egy-egy speciális területen törekszik meghatározóvá válni.

### 2.1.1. USA

Az Amerikai Egyesült Államok a 10 évvel ezelőtt indította el a National Nanotechnology Initiative K+F+I intenzív támogatási programját Bill Clinton elnök alábbi szavaival: ***“Just imagine, materials with 10 times the strength of steel and only a fraction of the weight; shrinking all the information at the Library of Congress into a device the size of a sugar cube; detecting cancerous tumors that are only a few cells in size. Some of our research goals will take 20 or more years to achieve. But that is why, precisely why...there is such a critical role for the Federal Government.”***

A programra szánt átlagosan évi 1,2 milliárd USD állami támogatás révén az USA a nanotechnológia vezető erejévé vált. Az intenzív támogatás eredményeként az Egyesült Államokban 2009-ben már 80 milliárd USD értékben termeltek a nanotechnológia komponensét tartalmazó terméket<sup>6</sup> (világviszonylatban 35%), és az USA vezeti a nanotechnológiai szabadalmak számát<sup>7</sup> (világviszonylatban 44 %), valamint meghatározó a területen született tudományos publikációk tekintetében is (1. ábra).

Az elkövetkező időszakban az USA kiemelt kutatási területei<sup>8</sup>:

*Nanoelektronika*<sup>9</sup>

*Nanomegmunkálás*<sup>10</sup>

*Nanotechnológiai alkalmazások napenergia-hasznosításra*<sup>11</sup>

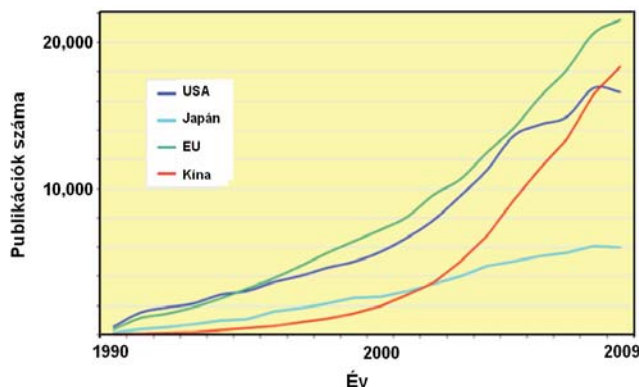
<sup>6</sup> A *National Nanotechnology Initiative* 2010. márciusi jelentése az „Elnök és a Kongresszus” részére: <http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast-nano-report.pdf>

<sup>7</sup> Nanotechnológiai szabadalmi nyilvántartás: <http://www.patentgenius.com/class/977.html>

<sup>8</sup> [http://www.nano.gov/html/research/signature\\_initiatives.html](http://www.nano.gov/html/research/signature_initiatives.html)

<sup>9</sup> <http://www.nano.gov/html/research/NNISigInitNanoelectronicsJul2010.pdf>

<sup>10</sup> <http://www.nano.gov/html/research/NNISigInitSustainableMfrFINALJuly2010.pdf>



2. ábra

A Science Citation Index-ben nyilvántartott nanotechnológia témájú tudományos közlemények száma <sup>4</sup>

### 2.1.2. EURÓPA

Az Európai Unió FP7 programjában 3.475 milliárd EUR összeggel központilag támogatja a nanotechnológiai kutatásokat a *Nanosciences, nanotechnologies, materials and new production technologies* kiemelt területen keresztül.<sup>12</sup> A nanotechnológia ERC biztosa a szerteágazó támogatási rendszertől várt eredményekből három olyan területet nevezett meg,<sup>13</sup> ahol az alap kutatások sikeres innovációkra fordítása a lakosság életszínvonalát növelő termékekre vezet: *gyógyszerkutatás, környezetvédelem, elektronika*.

Az EU vezető országai között többen kiemelt kormányprogramban támogatják saját stratégiai célkitűzéseiket. *Németország* a Gazdasági Minisztérium, valamint a Kutatási Minisztérium projektfinanszírozása mellett 9 Kompetencia Hálózatot hozott létre a nanotechnológia területén.<sup>14</sup> A 2010-ben lefektetett részletes nanotechnológiai stratégiai dokumentumban<sup>15</sup> – az EU-s három terület mellett – megjelenik az *optika*, az *információs technológia* és a *fogyasztói termékek köre*. *Franciaország* a nanotechnológia fejlesztéseket a *C’Nano*<sup>16</sup> program keretében (Centre of Competences in Nanoscience) a stratégiai területekre kiválósági központokat építettek ki.<sup>17</sup> Az ugyancsak idén nyilvánosságra hozott *UK Nanotechnology Strategy*<sup>18</sup> a szigetország prioritási pontjai között a *nananyagok kockázatának elemzését* is fontos területnek jelöli meg.

<sup>11</sup> <http://www.nano.gov/html/research/NNISigInnitSolarEnergyFinalJuly2010.pdf>

<sup>12</sup> [http://cordis.europa.eu/fp7/cooperation/nanotechnology\\_en.html](http://cordis.europa.eu/fp7/cooperation/nanotechnology_en.html)

<sup>13</sup> EU Nanotechnológiai honlapja: <http://cordis.europa.eu/nanotechnology/>

<sup>14</sup> Németországi nanotechnológiai kataszter: <http://www.nano-map.de/>

<sup>15</sup> Nano-Initiative – Aktionsplan 2010, [http://www.bmbf.de/pub/nano\\_initiative\\_aktionsplan\\_2010.pdf](http://www.bmbf.de/pub/nano_initiative_aktionsplan_2010.pdf)

<sup>16</sup> <http://www.cnano.fr/?lang=en>

<sup>17</sup> A francia nanotechnológiai kutatások áttekintő kiadványai: International Journal of Nanotechnology, Vol. 5, No. 6/7/8 (2008) and Vol. 7 No. 4/5/6/7. [http://www.inderscience.com/www/news/ijnt\\_special.html#01](http://www.inderscience.com/www/news/ijnt_special.html#01)

<sup>18</sup> Anglia stratégiai dokumentuma, <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+/interactive.bis.gov.uk/nano//>

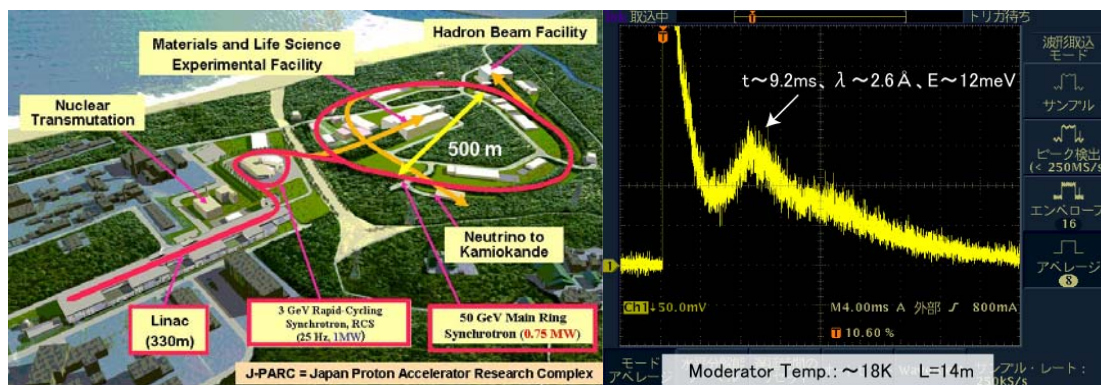
### 2.1.3. TÁVOL-KELETI TÉRSÉG

A távol-keleti országok blokkja (Kína, Japán, Korea, Tajvan, Szingapúr) – a terület harmadik húzóereje – jelenleg már az USA-val és az EU országaival összemérhető erőket koncentrálnak a nanokutatásokra. Az első generációs technológiákban (nanorészecskék, nanobevonatok) a három térség még közel egyforma eredményeket ért el. Míg Kína a tömegtermelésben tör előre, Japán átvette a vezető szerepet a második generációs nanotechnológia termékekben (nanokompozitok, nanoeszközök). Néhány területen – mint pl. digitális képalkotás, mágneses adattárolás, molekuláris elektronika – az utóbbi évek jelentős innovációi már Japánban születtek. Fejlesztési prioritásai:<sup>19</sup>

*Tiszta energia*

*Nanoelektronikai képalkotás és adattárolás*

*Nagyberendezések nanoszerkezetek meghatározására*



3. ábra

A nanoméretű objektumok szerkezetének meghatározására épített egyik legkorszerűbb berendezés a japán neutron spallációs forrás (bal oldali ábra). Az első neutron impulzus sikeres detektálása 2008. május 30-án történt az Anyag- és Élettudományi Kísérleti Központban.<sup>20</sup>

<sup>19</sup> <http://www.entrepreneur.com/tradejournals/article/201599863.html>

<sup>20</sup> Japan Proton Accelerator Research Complex (J-Parc), és ennek része a Japan Spallation Neutron Source (JSNS), <http://j-parc.jp/MatLife/en/index.html>

#### 2.1.4. MAGYARORSZÁG

Az NKTH koordinálásában elkezdődött ugyan a stratégiaalkotás a nanotudományok és technológiák területén, de még nem jött létre egy hivatalos „nemzeti nanotechnológia stratégia”. A folyamatot elősegítheti, hogy a magyar EU elnökség ideje alatt Budapesten kerül megrendezésre az „EuroNanoForum” konferencia. A 2011. évi nemzetközi találkozó az Európai Bizottság kiemelt rendezvénye, ahol az ipar, az egyetemek, a kutatószféra és a politikai döntéshozók konzultációja a elősegítheti nanotechnológia célkitűzések nemzetközi összehangolását, valamint a „nanoFutures” integrált Technológiai Platform létrehozását. A konferencia egyúttal felkészít a 8. Keretprogram Nanotech-Material-Manufacturing kutatási prioritásaira, erősítve a hazai pályázati kör esélyeit.

Egy nemzeti nanotechnológia stratégia kialakítása jelentősen hozzájárulhat annak tudatosításához, hogy nanotechnológiai alkalmazások nélkül belátható időn belül nem lehet versenyképes terméket gyártani, és hogy a magas hozzáadott értékű csúcstechnológiai megoldások bevezetése valamennyi hagyományos termelési és szolgáltatási területen ugrásszerű fejlődésre vezethet. Szerencsére ezt a hazai kutatóhálózat több intézménye már felismerte és K+F stratégiáját ennek megfelelően alakítja. Így például a MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet által vezetett IMNTP<sup>21</sup> figyelemre méltó stratégiai tervet dolgozott ki a mikro- és nanoelektronikai szakterületen.<sup>22</sup>

A nanotechnológia alap és alkalmazott kutatások központjaivá a megfelelő profilú MTA kutatóintézetek váltak, ezen belül kiemelendő az Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet,<sup>23</sup> a Kémiai Kutatóközpont,<sup>24</sup> valamint a Szegedi Biológia Központ.<sup>25</sup> Ezekben az intézetekben komoly nemzetközi visszhangot kiváltó eredmények születtek a nanotudományok területén. Néhány példa: szén nanoszerkezetek kutatása,<sup>26</sup> optikai nano-manipuláció (lézer-csipesz),<sup>27</sup> új típusú tüzelőanyag cellák fejlesztése.<sup>28</sup> A 2006-ban alakult a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatói Közalapítvány intézeteiben elsősorban az anyagtudományi kutatási projekteknél kerültek előtérbe a nanotechnológia megoldások.<sup>29, 30</sup>

<sup>21</sup> Integrált Mikro/Nanorendszerek Nemzeti Technológia Platform, <http://www.imntp.hu/>

<sup>22</sup> Magyar mikro- és nanoelektronikai kutatás-fejlesztési stratégiai terv, [http://www.imntp.hu/user/IMNTP\\_MNstrategia\\_20100409.pdf](http://www.imntp.hu/user/IMNTP_MNstrategia_20100409.pdf)

<sup>23</sup> Az MTA MFA küldetésnyilatkozata:

- Komplex funkcionális anyagok és nanométeres méretű szerkezetek interdiszciplináris kutatása, fizikai, kémiai és biológiai elvek feltárása és alkalmazása integrált mikro- és nanorendszerekben valamint vizsgálati módszerek fejlesztésében.

- A megszerzett ismeretek közzététele, hasznosítása a graduális és posztgraduális képzésben, nemzetközi és hazai ipari K+F programokban, különös tekintettel a KKV igényekre. <http://www.mfa.kfi.hu/>

<sup>24</sup> KKKI, <http://www.chemres.hu/#intezetek.3.0>.

<sup>25</sup> SZBK, <http://www.szbk.u-szeged.hu/>

<sup>26</sup> [www.nanotechnology.hu](http://www.nanotechnology.hu)

<sup>27</sup> [http://www.szbk.u-szeged.hu/biophys\\_optical\\_micromanipulation.php](http://www.szbk.u-szeged.hu/biophys_optical_micromanipulation.php)

<sup>28</sup> [http://www.mta.hu/index.php?id=634&no\\_cache=1&backPid=390&tt\\_news=128572&cHash=4edae8f44b](http://www.mta.hu/index.php?id=634&no_cache=1&backPid=390&tt_news=128572&cHash=4edae8f44b)

<sup>29</sup> BAY-ATI, <http://www.bayzoltan.org/bzaka/bzaka.head.page?nodeid=895>

<sup>30</sup> BAY-NANO, <http://www.bayzoltan.org/bzaka/bzaka.head.page?nodeid=22>

A hazai iparban elsősorban a piacérzékeny és innovatív kis és közepes vállalkozások, az egyetemi/kutatóintézeti háttérrel rendelkező spin-off cégek, valamint a tradicionális húzóágazatok (gyógyszeripar, orvostechika, vegyipar) vezető intézményei körében folyik a nanotechnológia megoldások bevezetése. Ezek egy-egy célfeladatra kiválasztott eseti alkalmazások, egyelőre hiányoznak az olyan nanotechnológia vállalatok melyek kimondott profilja a legújabb technikákat alkalmazó nanomegmunkálás, szubmikronos szerkezeti minősítés, nanoanalitika (nanométeres léptékben végzett anyagvizsgálat), stb.

Ugyanakkor hazánkban is jelen vannak azok a multinacionális elektronikai vállalatok, amelyek elsődleges profilja nem kimondottan nanotechnológia vonatkozású, viszont egyre nagyobb igényt támasztanak – általában analitika célból – a legmodernebb nanoanalitikai eljárások elérhetőségére.

Problémát jelent egyelőre a megfelelő kommunikáció a potenciális megrendelőként, felhasználóként megjelenő cégek és a nanotechnológiával foglalkozó intézetek és egyetemek között. A szakmai közönség csak kevés tájékoztatást kap a kutatóhelyeken folyó munkáról, irányokról, lehetőségekről. Gyakran nem közvetlenül a kutatóintézetekből, vagy szakmai szervezetektől szerzik információikat, ami egyrészt a kutatási együttműködés elmaradásához, vagy pedig a kutatási célok, lehetőségek téves felméréséhez vezethet. Mivel a nanotechnológia friss tudományterületet képvisel, az iparban dolgozó fejlesztőmérnökök és döntéshozók viszonylag csekély információval rendelkeznek; a legtöbben a tanulmányaik során nem találkoztak a témakörrel. Ezt a helyzetet felismerve stratégiai céljaink között szerepel egy *Nanotechnológus szakmérnök képzés* elindítása a Nano projektben érintett tanszékek összefogásával.

### 2.1.5. BME

Az elmúlt 10 évben a nano-tudományok és technológiák különböző elemei fokozatosan bekerültek az egyetemen képzési és kutatási területei közé. Megjelenésük természetesnek tekinthető a változásokat rugalmasan követő műszaki és természettudományos tanszékeken, a doktori képzésben, az MTA kutatócsoportokban, míg a képzésbe illesztésüket elősegítette a bolognai rendszerre történő átállás miatt is időszerűvé vált tantervfejlesztés.

A különböző karokon művelt nano-kutatások közötti kapcsolat kiépülését az új témák elindításához, majd fejlesztéshez szükséges szellemi és infrastrukturális támogatás igénye, elsősorban a laboratóriumi lehetőségek keresése indította el. Nem egyszer közös külső partnerrel való együttműködés révén alakult ki az egyetemen belüli kooperáció. A *Nano projekt* kiemelt kutatási területté nyilvánítása felerősítette ezt a horizontális szerveződést, és elősegítette a szakterületen folyó tevékenységek áttekintését. Létrejött a *BME Nanotechnológiai Laboratóriumi Hálózat*,<sup>31</sup> melynek eszközparkja szabadon hozzáférhető a projekt résztvevői számára.

Egyetemünk jelenlegi erőforrásai és a szakterületen elért eddigi eredményei<sup>32</sup> kijelölik azokat az átfogó területeket, ahol egyaránt megjelenik az alap és alkalmazott kutatás, a technológia- és eszközfejlesztés, valamint az egyetemi szintű integráció:

#### *Nanoelektronika (TTK, VIK)*

Rétegszerkezetek és litografált nanostruktúrák elektromos vezetési tulajdonságainak vizsgálata  
Alkalmazott eljárások: optikai és magneto-optikai spektroszkópia, magnetooptikai Kerr-effektus (MOKE), elektron spin rezonancia (ESR), kvantum dot-, illetve Andrejev-spektroszkópia.

A spinfüggő transzport alapjelenségeinek elméleti leírása és kísérleti vizsgálata (spin-injektálás, spin-koherencia és detektálás), valamint a kvantummechanikai korrelációk szerepének feltárására.

Hő- és elektron-transzfer vizsgálata nanoméreteken. Szimulációs modellezés, hőtérképezés, új, nem CMOS-alapú nanoelektronikai eszközök fejlesztése, fluidika.

Félvezető nanostruktúrák kvantumfizikai elektromágneses és optikai modellezése.

#### *Felületi nanostruktúrák (GPK, TTK, VBK, VIK)*

A felületi nanostruktúrák, bevonatok minősítése várhatóan sok esetben érintés vagy roncsolás mentes körülmények között lesz csak elképzelhető. Ilyenek például a félvezetőkön kialakított nanoszerkezetek. A minősítésben egyre nagyobb jelentőséget kapnak az új, általában közvetett, de in-situ mérések. A jövőben az ilyen eljárások egyre alapvetőbbek lesznek. Fejlesztésük döntő, mondhatni stratégiai jelentőségű. Egyetemünkön olyan alapvető mérési elveket és módszereket kutatunk és tervezünk a jövőben is fejleszteni, melyek széles körű alkalmazásra adnak lehetőséget.

<sup>31</sup> <http://nano.bme.hu>

<sup>32</sup> A kutatás erőforrásainak, kapacitásának, feltételrendszerének tételiesen hivatkozott bemutatását a SWOT analízis „Erősségek” fejezete tartalmazza (19. oldal)

Ilyen a fotomodulált reflexió, mely alkalmasnak bizonyult félvezetőkön, ultra vékony (<100nm), implantálással létrehozott, adalékolt rétegek minősítésére (adalékkoncentráció). Az általunk kifejlesztett optikai berendezés e területen ipari hasznosítás kidolgozása alatt áll. Ugyanakkor a módszer felületi érzékenysége révén, érintésmentes volta miatt várhatóan további gyakorlatban létrehozott nanobevonat minősítésére is alkalmas (pl. felületi fémstruktúrák hibái).

Hasonlóképpen perspektivikus eljárás és berendezés a lézeres gerjesztéssel létrehozott kisülési (letörési) spektroszkóp (LIBS), mely kalibráció után *in situ* felületanalitikai vizsgálatokat tesz lehetővé vákuumrendszer nélkül, hordozható kivitelben akár a szabadban is.

Fontos kutatási területünk a korszerű, konfokális mikroszkópia, mely szubmikronos felbontású, háromdimenziós, gyors analízisre ad lehetőséget biológiai eredetű mintákon vagy, vagy pl. félvezetők belsejében.

Transzparens, nanostrukturált (10-1000 nm vastag) bevonatok, ill. folyadékfelszíni nanorészecskés filmek törésmutatóját és szerkezetét optikai módszerekkel (pásztaozószerű reflektometria, UV-Vis spektroszkópia) tanulmányozzuk. Különböző modelleket hoztunk létre a gradiens törésmutatójú rétegek elemzésére. Ennek révén módszert javasoltunk vízfelszínen csapdázódott nanorészecskék nedvesedési szögének meghatározására.

Alkalmazott kutatások a nanotechnológiai megoldásokkal létrehozott alábbi rendszereken:

Kontaktusok, MEMS-ek, ólommentes forrasztások, félvezető alapanyagok felülete, polimer, kerámia és fémes koszorúér sztentek és implantátumok bevonata (funkcionális tulajdonságok meghatározása), szerkezeti és funkcionális polimer nanokompozitok, kémiai, szol-gél, ill. Langmuir-Blodgett-technikával eljárással létrehozott felületek, kémiaileg módosított nanoszerkezetű bioérzékelők, nanokompozit TIM-ként (thermal interface material) alkalmazott CNT (CARBON NANOTUBE) anyagok, félvezető felületén előállított ultravékony szigetelők.

### ***Szerkezeti és funkcionális anyagok (GPK, TTK, VBK, VIK)***

- Nanoszálak és szerkezeti polimer nanokompozitok előállítása, modellezése.
- Szilikon elasztomer szerkezeti anyagok fejlesztése és gumyszerű anyagok nanotribológia vizsgálata.
- Funkcionális, „intelligens” polimer nanokompozitok és lágy anyagok előállítása, tönkremeneteli formáinak feltárása.
- Orvostechikai terápiás eszközök, implantátumok, illetve a fém és kerámia bioanyagok felületkezelése, bevonatolása.
- Szervetlen és hibrid nanoanyagok (bevonatok, membránok és monolitok) nedves kémiai eljárásokkal történő előállítása.
- Kémiaileg módosított nanopórusokon alapuló DNS szenzorok létrehozása.
- Femtoszekundumos lézeralblációval strukturált felületek készítése.
- Vékonyréteg technológiával kialakított alumíniumból anódizációval előállított nanopórusos alumínium-oxid mint érzékelő és antireflexiós réteg
- Ultravékony szigetelő rétegek előállítása félvezető felületeken

Példák a fenti három területen megvalósult alkalmazásokra:

Hőmérséklet, fény, pH és mágneses térre érzékeny, azaz rezponzív tulajdonságú, tömbi lágy anyagok (polimer alapú liogélek), gél-kompozitok, részecskék, valamint biokompatibilis bevonatok, optoelektronikai (nanokristályos napelemek, hullámvezetők, LED és OLED, piezoelektromos eszközök), magas hőmérsékleti (hőálló és szigetelő anyagok), kémiai és elválasztástechnikai (katalizátorok, membránok, korrózióvédő és öntisztító bevonatok), orvosbiológiai (implantátumok, gyógyszerhatóanyag tároló és leadó, valamint antibakteriális anyagok), valamint tapadásgátló (vízlepergető és szennyezés-gátló bevonatok) és szenzorikai funkciók kialakítása céljából. Új áramköri elvek, jobb ólommentes forrasztások, TIM anyagok.

A *Nano projektben* jelenleg az egyetem 73 főállású kutatója vesz részt, a minősítettek száma 62. A magas szellemi háttérrel jelzi a minősítettek fokozat szerinti megoszlása is: 43 PhD, 17 MTA doktor, 2 akadémikus. A területen a K+F+I tevékenység a BME négy karának 13 tanszékére koncentrálódik.

Természettudományi Kar (TTK):	Atomfizika Tanszék Elméleti Fizika Tanszék Fizika Tanszék
Gépészmérnöki Kar (GPK):	Anyagtudomány és Technológia Tanszék Gépgyártástudomány és -technológia Tanszék Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék Polimertechnika Tanszék Gép- és terméktervezés Tanszék Műszaki Mechanika Tanszék
Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar (VBK):	Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék Szervetlen és Analitikai Kémia Tanszék
Villamosmérnöki és Informatikai Kar (VIK):	Elektronikai Technológia Tanszék Elektronikus Eszközök Tanszék

A kutatások infrastrukturális háttérét a *BME Nanotechnológiai Laboratóriumi Hálózat*,<sup>33</sup> biztosítja. Ezen belül is kiemelendő a Nano területen akkreditált 5 db. stratégiai jelentőségű kutatási infrastruktúra (SKI) NEKIFUT laboratórium:

- Alacsony hőmérsékletű, nagy mágneses terű transzport mérőrendszer<sup>34</sup>
- Komplex polimer és polimer kompozit anyag- és szerkezetvizsgáló laboratórium<sup>35</sup>
- Elektron Spin Rezonancia Laboratórium<sup>36</sup>
- Felületfizikai Laboratórium<sup>37</sup>
- Szervetlen és Analitikai Kémiai Tanszék Stratégiai Kutatási Infrastruktúrája<sup>38</sup>

<sup>33</sup> <http://nano.bme.hu>

<sup>34</sup> <http://dept.phy.bme.hu/laboratories/coolmaglab.htm>

<sup>35</sup> <http://www.pt.bme.hu/index.php?oldalcim=hberendezeseink.php&l=m>

<sup>36</sup> <http://nano.bme.hu/esr.htm>

<sup>37</sup> <http://nano.bme.hu/feluletfizika.htm>

<sup>38</sup> <http://aak.bme.hu/SZAK-SKI.htm>

## 2.2. VERSENYTÁRSÁK/POTENCIÁLIS EGYÜTTMŰKÖDŐ PARTNEREK

Magyarországon a különböző felsőoktatási intézményekre és kutatóintézetekre – általában történeti okokból - jellemző a nanotechnológián belüli specializálódás, amelynek következményeképp az adott szűkebb „nano” területen nem alakulhatott, és nem is alakult ki verseny. Az nanotechnológiát kiemelten kezelő magyar intézmények összességét laza érdekszövetségként tekintve lefedhető a nanotechnológia valamennyi lényeges területe, ilyen értelemben valamennyien potenciálisan együttműködő partnerek. A hazai kooperáció erősítésével - a nanotechnológia eredendő multidiszciplináris tulajdonságát kihasználva – új távlatok nyílhatnak a magyar „nano” kutatás, fejlesztés és innováció előtt.

A BME széles körű együttműködést alakított ki a *Nano kiemelt kutatási terület* egy-egy témájához közel álló intézmények széles körével: akadémiai kutatóintézetekkel, multinacionális cégek kutatás-fejlesztő egységeivel, hazai és külföldi egyetemekkel, kis- és középvállalkozásokkal. A jelenlegi partnerek részletes listája és a közös kutatások, fejlesztések tevékenységi köre elérhető az interneten.<sup>39</sup> Ezen együttműködések fenntartása és továbbfejlesztése minden résztvevő közös érdeke.

Az alábbiakban néhány kiemelt stratégiai partnerre vonatkozó terveinket vázoljuk:

A **MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézete** a hazai akadémiai környezetben jelenleg unikális mikro- és nanofabrikációs műszerparkkal rendelkezik. Ennek megfelelően szoros együttműködés van a BME *Nano kiemelt kutatási területén* dolgozó tanszékek és az MFA között, amely eddig is már több közös laboratórium kialakításához és közös pályázati tevékenységhez vezetett. Az Akadémia stratégiai tervei között szerepel, hogy kutatóintézeti hálózatának egy részét egyetemi környezetbe, a néhány éves időtávon belül elkészülő *Q2 épület*be telepíti. Ebben a kölcsönösen előnyös helyzetben – előzetes egyeztetések alapján – közös MFA-BME laboratóriumukat tervezünk kialakítani:

*Integrált bio(kémiai) nanoérzékelők kutatólaboratórium,  
Nanofabrikálási és nanoszkópai centrum.*

A **MTA Kémiai Kutatóközpont** a tervek szerint szintén az egyetemi negyedbe költözik, ugyancsak a *Q2 épület*be. Ez megnyitja a lehetőséget, hogy közös finanszírozású laboratóriumokat hozzunk létre: remélhetőleg a közeljövőben eljutunk konkrét laboratóriumokra vonatkozó olyan szintű megállapodásokra, mint amit az MFA-val kötöttünk.

<sup>39</sup> <http://nano.bme.hu/partnerek.htm>

A **Semmelweis Orvostudományi Egyetemen** kialakított, több szálon meglévő kapcsolatainkat kibővíteni tervezzük a 2009-ben alapított *Semmelweis Nanobiotechnológiai és In Vivo Képző Központtal*.

A **Twentei Egyetem (Hollandia) Nanotechnológiai Intézete**<sup>40</sup> nemzetközi szinten kiemelkedő eszközparkkal rendelkezik. Célunk az önszerveződő nanoszerkezetek és kémiai nanomegmunkálási technológiák területén meglévő kapcsolatunk erősítése, a *makromolekuláris nanotechnológia*<sup>41</sup> eszközeire építve új mintaelőállítási módszerek kidolgozása, valamint az így készített nanoszerkezet alkalmazásának kiterjesztése a nanoelektronika területére.

---

<sup>40</sup> <http://www.utwente.nl/mesaplus/>

<sup>41</sup> <http://mtp.tnw.utwente.nl/>

### 3. SWOT ANALÍZIS

Az alábbiakban a *Nano projekt* specifikus értékelését adjuk. A Műszaki Egyetemre vonatkozó, egyetemi szinten kialakított általános érvényű analízist és célkitűzéseket a horizontális stratégiai terv tartalmazza.

#### Erősségek

- A BME természettudományos és műszaki képzése gyorsan reagált a világban lezajló technológia váltásra: az elmúlt 5-10 évben megjelent és azóta is fokozatosan bővül a *nanotudományok* és a *nanotechnológia* oktatása. A területen nívós TDK és diplomamunkák, valamint PhD értekezések születtek, a BME *Nano* projektjébe bevont saját nevelésű fiatal kutatók komoly hazai és nemzetközi elismertséget élveznek.<sup>42</sup>
- Erős elméleti háttér, egyes területeken hazai szinten kiemelkedő laboratóriumi felszereltség, *BME Nanotechnológiai Laboratóriumi Hálózat*<sup>43</sup> ezen belül 4 db. minősített NEKIFUT laboratórium.<sup>44</sup>
- A területen elért eddigi eredmények nemzetközi publikáltsága nívós folyóiratokban.<sup>45</sup>
- Pályázati versenyképesség hazai és EU szinten, a kutatási témáink elismertsége a 2010. évi nagy pályázati rendszerekben.<sup>46</sup>
- Erős kapcsolatok a nanotechnológiát alkalmazó vezető hazai és nemzetközi cégekkel.<sup>47</sup>
- A *Nano* kutatási témáihoz kapcsolódó akadémiai kutatócsoportok,<sup>48</sup> és a doktori iskolák<sup>49</sup> kutatási potenciálja.
- SOTE együttműködés az interdiszciplináris területeken.<sup>50</sup>
- MTA intézeti kapcsolatok a *Nano* területeken, közös technológiai laboratóriumok.<sup>51</sup>

<sup>42</sup> Marie Curie EU ösztöndíj (6 fő), Talentum díj (4 fő), Akadémiai Ifjúsági Díj (5 fő), Junior Prima Díj (1 fő), Magyarai Zoltán posztdoktori ösztöndíj (8 fő), Békésy György posztdoktori ösztöndíj (7 fő)

<sup>43</sup> <http://nano.bme.hu>

<sup>44</sup> NEKIFUT laboratóriumok: *Alacsony-hőmérsékleti labor*, *ESR*, *Felületfizika*, *Polimer*

<sup>45</sup> Nature, Nature Materials, Nano Letters, Advanced Materials, Physical Review Letters, Carbon, Composites Science and Technology, Journal of Polymer Science, Applied Physics Letters, Polymer Engineering and Science, Polymer...

<sup>46</sup> Nanoelektronika: OTKA projekt [http://nano.bme.hu/otka\\_spintronika.html](http://nano.bme.hu/otka_spintronika.html),  
2 db. ERC projekt: CooPairEnt <http://nano.bme.hu/coopairent.html>, SYLO; <http://nano.bme.hu/sylo.html>  
Nano-diagnosztika: ENIAC EU projekt

<sup>47</sup> Siemens, Bosch, Semilab, Mediso

<sup>48</sup> MTA-BME Kondenzált anyagok fizikája kutatócsoport,  
MTA-BME Műszaki Analitikai Kémiai Kutatócsoport.

<sup>49</sup> *Fizikai Tudományok Doktori Iskola*, *Oláh György Doktori Iskola*, *Villamosmérnöki Tudományok DI*

<sup>50</sup> Szándéknyilatkozat (2009)

<sup>51</sup> BME-MFA közös elektron-litográfia laboratórium, <http://nano.bme.hu/nanotechnologia.htm>  
BME-MFA közös Szol-Gél folyamatok és Kémiai Nanoszerkezetek Laboratóriumok:  
[http://web.fkt.bme.hu/~colloid/kutatas\\_bmemfa.html](http://web.fkt.bme.hu/~colloid/kutatas_bmemfa.html), SZFKI, KKKI,

### Gyengeségek

- A 35-40 éves korosztály hiánya a kutatói (oktatói) gárdában. A *Nano* terület extenzív fejlesztése nem építhet kizárólag a saját nevelésű hallgatók megtartására, ehhez a meglévő kutatói kapacitások egyetemen belüli átcsoportosítása is szükséges. Ennek nincs kiépült gyakorlata az egyetemen, a kutatói mobilitás alacsony.
- A *Nano* terület speciális képzettséget és gyakorlati szaktudást igényel (kriotechnika, pásztázó mikroszkópia, litografálás, stb.). A versenyszféra és a külföldi álláslehetőségek erős szívóhatása miatt váratlanul kieső kulcsemberek pótlása megoldhatatlan feladatot jelentene.
- A különböző karokon működő *Nano* laboratóriumok közti együttműködés kezdeti szakaszban van, az eszközpark közös használatának nincs kialakult gyakorlata.
- Nincs vendégkutató program, pedig a nanotechnológia területén különösen erős agyelszívást ezzel lehet kompenzálni (lásd: **Veszélyek** fejezet).  
Pozitív példa: a német Humboldt Alapítvány.

### Lehetőségek

- A nanotechnológia a világ vezető országaiban mindenütt a K+F+I prioritások közé került. Az „Új Széchenyi terv” kiemelt területeinek fejlesztése nanotechnológiai megoldásokat igényel (egészségipar, energia, járműipar).
- Kapcsolatok kiépítése a nanotechnológiai megoldásokat alkalmazó hazai cégek bővülő körével.
- A horizontális kutatási együttműködés leképezése az oktatási rendszerre. Egyetemen belül áthallgatások ösztönzése, annak érdekében, hogy átfogó interdiszciplináris nanotechnológiai tudást szerezzenek a hallgatók, a hagyományos oktatási rendszerben elszigetelt tudományos és mérnöki területekről (fizika, kémia, biológia, anyagtudomány, elektronika, orvosi ismeretek, gyógyszerkutatás, ...)

### Veszélyek

- Nemzeti nanostratégia hiánya: kiszámíthatatlan finanszírozási feltételrendszer, a korszerű kutatási infrastruktúra fejlesztésének forráshiánya.
- A speciális szaktudással rendelkezőkre erős szívóhatást gyakorol a *Nano* területen dinamikusán fejlődő versenyszféra. A pályakezdő fiatalok, PhD fokozatot szerzettek külföldi tapasztalatszerzése (munkavállalás, posztdoktori állás) után korlátozottak a visszacsábítási lehetőségek.
- A legtehetségesebb fiatalok külföldi egyetemekre távozása, amit elősegít a *Nano* területen 2010-ben hivatalosan is deklarált „brain drain”.<sup>52</sup>

---

<sup>52</sup> Idézet a *National Nanotechnology Initiative* kongresszusi jelentésének ajánlásaiból:

„Congress and the Administration need to take steps to retain scientific and engineering talent trained in the United States by developing a program to provide U.S. Permanent Resident Cards for foreign individuals who receive an advanced degree in science or engineering at an accredited institution in the United States and for whom proof of permanent employment in that scientific or engineering discipline exists.”

<http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast-nano-report.pdf>

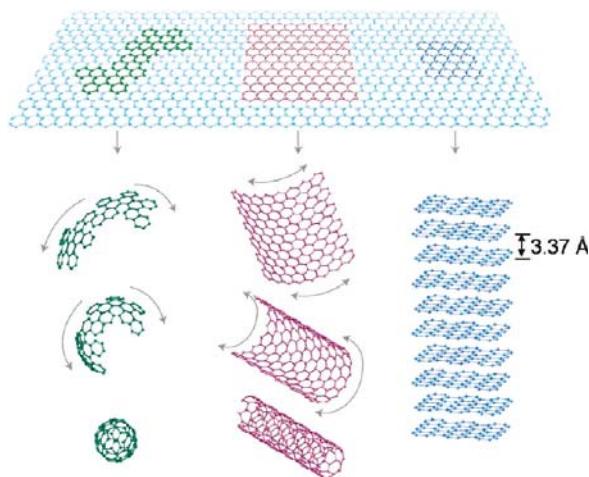
## 4. JÖVŐKÉP, VÍZIÓ

A nanotudományok területén a fizikai, kémiai és biológia szemléletmódok összekapcsolása – a meglévő technológiák hatékonyság- és minőség-növelése mellett – merőben új megoldások előtt nyitja meg a lehetőséget. A várható fejlődési irányokat az alábbiakban az alkalmazott eljárások komplexitása alapján csoportosítjuk, és egy-egy esettanulmánnyal szemléltetjük jelentőségüket.

A *passzív nanoszerkezetek* mára már bevonultak a korszerű anyagtechnológiák közé. Az anyagi paraméterek javítása (pl. bevonatok, polimerek, kerámiák) mellett elterjedt a nanorészecskék kedvező tulajdonságainak egy-egy kívánatos specifikus célra történő kihasználása is (üzemanyag cella, aeroszolok). A szerteágazó intenzív kutatások az alkalmazások rohamosan bővülő körét ígéri, a passzív nanostruktúrák szinte bármely termékben megjelenhetnek.

### 1. Esettanulmány: polimer/szén nanokompozitok

A szén valamennyi allotrópjja a kétdimenziós atomi vastagágú grafén síkból vezethető le. Eszerint a szén nanocsövek egy 1-dimenziós (1D) szén allotrópnak tekinthető. A szén nanocső (CNT) felfedezése 1991-ben történt,<sup>53</sup> nem sokkal a 0D fullerénét követően.<sup>54</sup> Kroto, Curl és Smalley együtt kaptak kémiai Nobel díjat 1996-ban. Az 1. ábra arra utal, hogy az egyedi grafén síklemez rendelkezik valószínűleg a legkedvezőbb mechanikai (merevség, szilárdság), hő- és elektromos vezetőképességgel valamennyi ismert anyag közül.



4. ábra

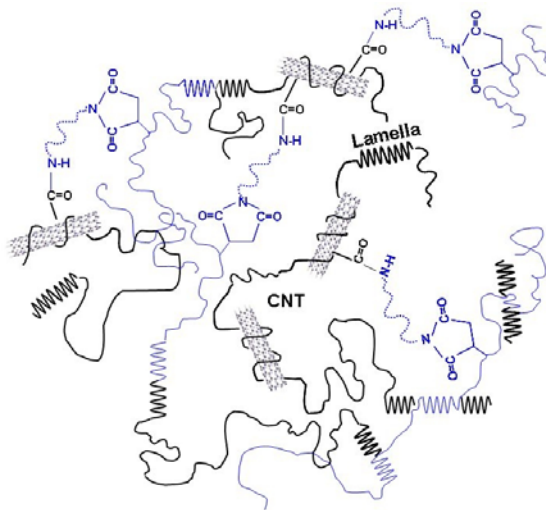
Grafén mint a grafitos szerkezetek építőköve:  
balra 0 dimenziós fullerén, középen 1dimenziós SWCNT, jobbra 3D grafit.<sup>55</sup>

<sup>53</sup> S. Iijima 1991 – Nature, 354 (1991), 56

<sup>54</sup> H.W. Kroto, J.R. Heath, S.C.O'Brien, R.F. Curl, R.E. Smalley – Nature, 318 (1985), 162

<sup>55</sup> H.K. Kim, A.A. Abdala and C.W. Macosko: Macromolecules, 43 (2010), 6515

Az egy- és többfalú (SWCNT és MWCNT) szén nanocsövek manapság már kereskedelmi forgalomban kaphatók. Így pl. a Bayer cég által forgalmazott MWCNT 3-15 falréttegű, 20 nm alatti külső átmérőjű, a csövecskék hossza elérheti a 10 mikrométert, villamos és hővezető-képessége rendre  $>104$  S/cm és  $>2000$  W/(mK). Az MWCNT-k merevsége 1 TPa-nál, szilárdsága 10 GPa-nál nagyobb, és fajlagos felületük több ezer  $m^2/g$  lehet. A felsorolt tulajdonságok alapján polimerekben való alkalmazásuk mechanikai, hőtani, villamos és abszorpciós tulajdonságok javítását célozza. A kísérleti eredmények azonban nagyon sok esetben messze a várakozás alatt maradtak. Ennek elsődleges oka az, hogy a CNT polimerekben való eloszlása nem egyszerű a van der Waals erők által összetartott, „összekuszált” szerkezetük folytán. További probléma forrása az, hogy a polimer/CNT határfelületi kölcsönhatás gyenge, és ennek megfelelően az utóbbi nem tudja az erősítőadalek szerepét ellátni. Ezen a CNT célirányos felületkezelése segíthet, amely azonban sok esetben a primer grafén szerkezet „megbontásával” és így a fentebb felsorolt tulajdonságok némelyikének romlásával jár. A CNT polimerekben való kellő diszpergáltsága megnöveli ugyan a merevséget és szilárdságot, mindezt azonban a szívósság kárára. Lehetőség nyílik azonban a fenti jellemzők egyidejű javítására is. A 5. ábra arra mutat példát, hogy miként lehet egy részlegesen kristályos polimerben - CNT részvételével - egy olyan további „fizikai térhálószerkezetet” kialakítani, amely az amorf részeket erősíti a kristályos fázis bevonásával, miközben a polimer duktilitását számottevően nem befolyásolja.



5. ábra

Morfológiai modell kristályos polimerek merevségének, szilárdságának és szívósságának egyidejű növelésére célszerűen funkcionális CNT bevitelével.<sup>56</sup>

<sup>56</sup> J. Karger-Kocsis in „Nano- and Micromechanics of Polymer Blends and Composites”, Eds.: J. Karger-Kocsis and S. Fakirov, Hanser, München, 2009, p.439)

Villamos vezetőképességi mérések arra utaltak, hogy a CNT-nek nem feltétlenül kell olyan hálószerkezetet alkotni, amelyben az egyes CNT elemek egymással érintkeznek, mert a vezetőképesség alakulásában az alagút-effektusnak komoly szerepe lehet. A CNT változatok gázelnyelő képessége nem felel ugyan meg a jövő hidrogén-meghajtású járművek abszorpciós úton való üzemanyag tárolására, azonban fontos szerepük lehet pl. műszaki gumitömítésekben. Ez utóbbiak igen gyakran tönkremennek gyors gáz(gőz) eltávozás útján, amikor a berendezést nyomáson kívül helyezik. A CNT abszorpciós sajátságai fontos szerephez juthatnak gyógyszeripari hatóanyagok hordozójaként is.

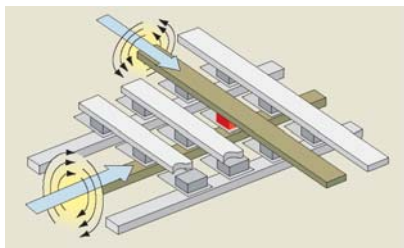
A jövőbeli kutatás fő irányai a következők: szén nanocsövek egyedi formában történő egyszerű és megbízható elosztatása, felületük célirányos funkcionálizálása. Ez érvényes mind strukturális, mind pedig funkcionális anyagokra. Az előbbi fogalom alatt általában a mechanikai jellemzők javítását értjük. A „funkcionális” jelző CNT-tartalmú polimerek érzékelőként, jeladóként való alkalmazását fedi. Ezen alkalmazásokban a külső igénybevétel (mechanika, hő, atmoszféra) hatására megváltozó tulajdonságok direkt (pl. villamos) vagy indirekt módon (p. hő vagy villamos vezetés gázabszorpció miatt) megváltoznak és válnak érzékelhetővé, mérhetővé – esetleg szabályozhatóvá (aktuátorok). Így pl. sikerrel kecsgetet a kompozit szerkezet „épségének” ellenőrzése oly módon, hogy a benne kialakított vezetőképés CNT-hálószerkezet villamos vezetésében bekövetkező változást követjük az adott szerkezet élettartama során.

Ezek az alkalmazások már átvezetnek az *aktív nanoszerkezetek* körére.

Az *aktív nanoszerkezetek* legismertebb példái a szubmikronos félvezető technológiával előállított elektronikai eszközök, a fizikai-kémiai-biológiai szenzorok, katalizátorok vagy akár a célzott gyógyszer-adalékolás. Jellemzőjük a nanoméretekben zajló folyamatok pontos ismeretében történő tervezés, majd az egyes funkciók kialakítása, alulról történő építkezéssel. Az összetett aktív nanoszerkezetek megvalósítása komoly technológiai kihívás, és jelentős szellemi erőforrásokat követel.

## 2. esettanulmány: Spin-szelep

Az 1988-ban felfedezett „óriás mágneses ellenállás” (GMR) alapozta meg az első spintronikai eszköz, az ún. spin-szelep létrehozását, majd széles körű alkalmazását. Az alapvetési eredmény – Albert Fert és Peter Grünberg, Nobel-díj 2007 – a nanoméretű mágneses domének kölcsönhatására, valamint a rajtuk keresztül haladó elektronhullámok terjedésére vonatkozott: megmutatták, hogy a párhuzamos mágneszettségű doménekből felépített nanoszerkezeten az elektronok könnyebben átjutnak, mint az ellentétes irányban álló doméneken. Mivel a domének egymáshoz viszonyított iránya mágneses térrel kapcsolható, a spin-szelep mágneses szenzorként működik: a rajta átfolyó áramot az érzékelt mágneses tér határozza meg. A spin-szelep technológiai megvalósítását (1991) követte a tömeges alkalmazás: 1997-től ilyen elven történik a merev-lemezek mágneses adatainak kiolvasása.



A spin-szelep önmaga is lehet egy memóriaegység, ahol az információt a két domén relatív iránya tárolja. Az információ beírása történhet a memóriaelemek négyzethálós megcímzésével: vezetékek találkozási pontjában összeadó szórt mágneses terek forgatják el az egyik domént. Az 1996-ban született ötletet követően az MIT kutatói 2003-ban elkészítették az így működő szilárdtest-memória prototípusát (MRAM).

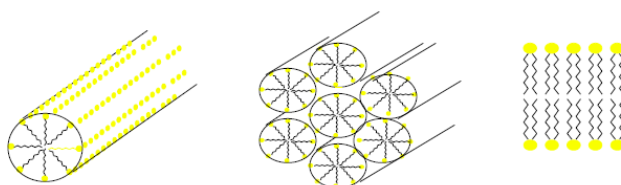
Az új elven működő memória sebessége nagyságrendekkel felülmúlja a hagyományos merevlemez megoldást, ezért a világ vezető cégei nagy erővel fejlesztették a tömegtermeléshez szükséges nanotechnológiát. A 2006-ban piacra dobott első (és még megfizethetetlenül drága) termék azonban mindmáig nem terjedt el. Időközben ugyanis olyan kutatási eredmények születtek, ami alapján reálissá vált egy nagyobb adatsűrűséget megengedő és még gyorsabb kapcsolási módszer alkalmazása, ráadásul lényegesen egyszerűbb technológiát igényelve (a memóriaelemek adatbeírása és kiolvasása ugyanazokon a vezetékeken történhet). Az új felismerés alapján ugyanis nanométeres méretskálán az elektromos áramot szállító elektronok mágnesesen polarizálhatók, és nagy áramsűrűséget alkalmazva ez közvetlenül felhasználható a mágneses domének forgatására (elektron-spin által közvetített forgatónyomaték: Spin Transfer Torque, SST).

Az elméleti felvetést (J.C. Slonczewski, 1997) a kísérleti igazolás követte (J.Z. Sun, 2002), majd az ezeket az alap kutatási eredményeket felhasználó fejlesztések révén 2009-ben mutatták be az **SST-MRAM** prototípusát (Hitachi – Tohoku University). Néhány éves időskálán várható az új memória tömeges elterjedése, miközben a területen továbbra is intenzív K+F+I tevékenység folyik. Az új eszköz a számítástechnika ugrásszerű fejlődéséhez és minőségi változásához vezethet, mert gyorsasága az aritmetikai műveletek végzésére is alkalmassá teszi: a memória és műveleti funkciók összekapcsolása olyan utakat nyit meg, ami miatt a spintronikára épített digitális technológia kiszoríthatja a hagyományos félvezető technológiával készülő számítástechnikai eszközöket.

*Az irányított önszervezéssel* létrehozott nanoszerkezetek olyan több komponensű hálózatok, amelyek kialakítását a molekuláris szintű kölcsönhatások és folyamatok szabályozása révén építhetők. Az akár három dimenziós, több komponensű komplex nanostruktúrákba megfelelő funkciókat ellátó egységek – molekulák, atomi klaszterek vagy biológiailag aktív fehérjék – is beintegrálhatók. Ennek a technológiának a fejlődése közép- és hosszútávon áttörést jelenthet a molekuláris elektronikában, szenzorikában, nanomedicinában.

### 3. Esettanulmány: önszerveződő rendszerek

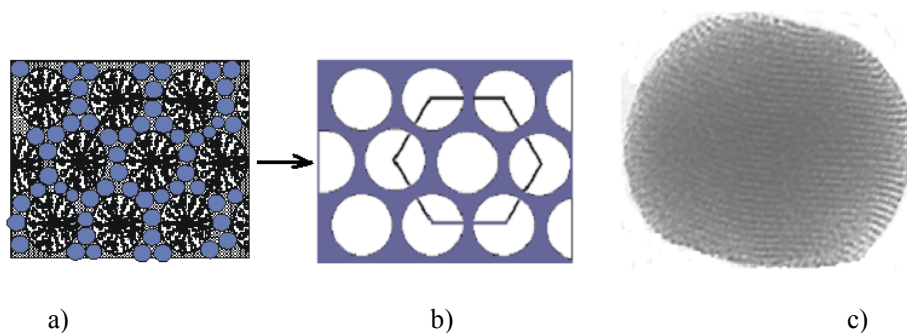
Az önszerveződéses technikák jelentősége abban áll, hogy közvetlen emberi beavatkozás nélkül a kívánalmaknak megfelelő, makroszkopikus méretű nanostrukturált halmazok, ill. mintázatok állíthatók elő. A témakörben először (az 1980-as években) demonstrált jelenség alkil-szulfidoknak aranyfelületen végbemenő adszorpciója volt – vagyis molekuláris önszerveződés. Ennek révén az alkil-szulfidok orientált, monomolekuláris filmje alakul ki a szilárd hordozón. A molekuláris önszerveződés jelensége azonban a kolloid- és határfelületi kémiában már jóval régebről ismert. A micellák amfipatikus molekulák asszociációja révén (jellemzően vizes közegben) spontán keletkeznek bizonyos töménységű oldataikban (spontán önszerveződés). Az amfipatikus molekulás anyag (tenzid) töményebb oldataiban (henger alakú, ill. lemezes) nagymicellák keletkeznek (ábra).



6. ábra

Spontán önszerveződéssel keletkező hengeres alakú és lemezes szerkezetű nagymicellák amipatikus molekulák vizes oldataiban.

Mint az utóbbi időben kiderült ezek a kolloidális asszociátumok anorganikus oxidok (pl.  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) prekursor szoljaiban irányított önszerveződésre kényszerítik a néhány nm-es szilárd mikrofázisokat, ami az ún. szol-gél technika alkalmazásával 2-10 nm vastag pórusokat tartalmazó, ultravékony bevonatok, ill. tömbi anyagok kialakítását teszi lehetővé (ábra, template assisted self-assembly, TASA).

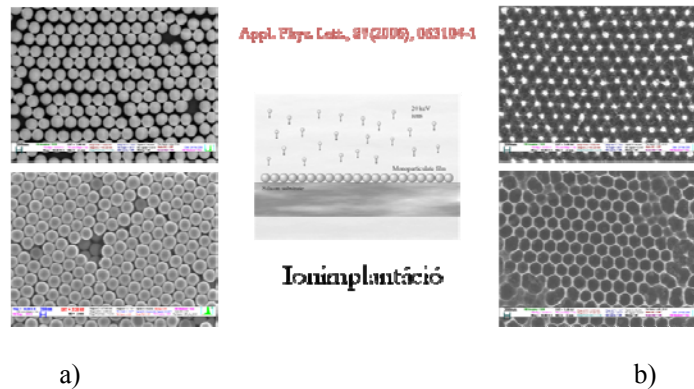


7. ábra

A szervesetlen anyagú nanorészecskék az egymáshoz szorosan illeszkedő micelle-hengerek közé ékelődnek (a). A bevonatot vagy tömbi anyagot hőkezelve az organikus micellák kiégnek, és maguk után monodiszperz szabályos elrendeződésű mezopórus rendszert hagynak (b) Bizonyos körülmények között ezzel a módszerrel mezopórusos nanorészecskék is előállíthatók. A képen (c) mintegy 100 nm-es szilika részecske mezopórusos hálózata látható (elektronmikroszkopos felvétel).

A kolloidrészecskék rendezésére szolgáló módszerek halmazából az a tulajdonsága emeli ki a Langmuir-Blodgett (LB)-technikát, hogy alkalmazásával egy lépésben, jól kézben tartható módon rendezett monoréteg készíthető. Az irányított önszerveződésen alapuló eljárás elvben tetszőleges alkalommal ismétlődő, így megvalósítható a rétegenkénti építkezés, az ún. Layer-By-Layer Assembly (LBL), és a hordozó planaritása sem követelmény.

A jövőben az egyes önszerveződésen alapuló eljárásoknak egyéb (pl. nanofizikai) eljárásokkal való ötvözése-kiegészítése hozhat új eredményeket makroszkopikus méretű felületek nanomegmunkálásában. Jó példa erre a nanogömb litográfia (nanosphere lithography) területéről a LB- és az ionimplantációs technika egymást követő alkalmazása, amely szabályos, előre tervezhető nanomintázatok kialakítását teszi lehetővé akár kristályos szilícium hordozó felületén.

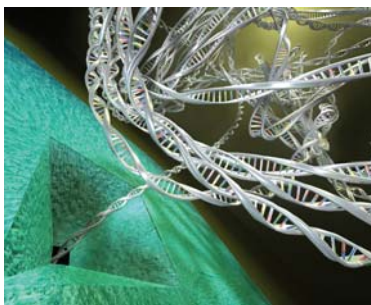


**8. ábra**  
**Irányított önszerveződés (LB-technika) és ionimplantációs technika egymást követő alkalmazása révén nyert nanomintázat kristályos szilícium felületén (l. a szöveget).**

A szilícium hordozóra felvitt egy- vagy kétrétegű nanorészecskés LB-film maszkként szolgál az ionimplantációs folyamat során: a nagyenergiájú ionok csak a gömb alakú részecskék közötti hézagokon át érik el a szilícium felületét olyan változásokat előidézve annak felső rétegében, amely a részecskés film eltávolítását követően előhívható. Az ábra baloldali képei az egy- és kétrétegű LB-filmet, míg a jobboldaliak a hordozón kialakított nanomintázatok mutatják. Egyrétegű maszk esetén háromszöges illeszkedésű szilícium oszlopok, míg kétrétegű maszk esetén méhsejt morfológiájú nanomintázat keletkezik.

#### 4. Esettanulmány: DNS szekvenálás nanopórusokkal?

Az ioncsatornák a sejt falban található fehérje pórusok, amelyek az ionok membránon keresztüli transzportjéért és a membránpotenciál kialakításáért felelősek. A nanoméretű pórusokon keresztüli iontranszport mechanizmus megértésének fontosságát bizonyítja, hogy a témakörben elért eredményekért két Nobel díjat is kiosztottak. Ugyanakkor a vizsgálatok átvezettek egy másik területre is. 1996-ban felfedezték, hogy az  $\alpha$ -hemolizin pórusokon keresztül, amelyek legszűkebb keresztmetszete 1.5 nm, elektromos tér hatására egyszálú DNS szálak átvezethetők. Ebben az esetben a lipid kettős rétegbe ágyazott protein nanopórus két elektrolittal töltött oldatteret választ el egymástól és a DNS szálak áthatolása során a pórus ellenállása megnő, amely a jellegzetes áramimpulzusok alapján nyomkövethető. Az első információ amit egy ilyen rendszer a DNS szálról szolgáltatott az a hossza volt, hiszen rövidebb DNS gyorsabban áthatol és ezáltal rövidebb az áramimpulzus időtartama. Felmerült azonban ennél nagyságrendekkel ambiciózusabb terv is, mégpedig a DNS szálak bázissorrendjének (szekvenciának) megállapítása. A human genom feltérképezése több mint egy évtizedes projekt volt. Ehhez képest a nanopórusos DNS szekvenálók célkitűzése az adott DNS szál bázissorrendjének meghatározása mindössze egy óra alatt és 1000 USD-nél kisebb összegért. Mindezen lehetőségek alapját egy kis nanopórus biztosítaná, amely immár szintetikus szilárd fázisú membránokban is kialakítható nanométer alatti felbontással a nanofabrikációs technológiák fejlődésének köszönhetően. Ezek az új struktúrák már biztosítják azt a geometriai flexibilitást és stabilitást, amely gyakorlati alkalmazásokhoz szükséges és jelenleg bizonyított, hogy oldatban az egyedi bázisok nanopórus alapú érzékelőkkel az „áram ujjlenyomatuk” alapján azonosíthatóak.



9. ábra

DNS szál áthatolása egy nanopóruson keresztül.<sup>57</sup>

Amennyiben az új, ultragyors és költséghatékony DNS szekvenálók fejlesztése sikeres lesz az a teljes egészségügyet forradalmasíthatná, így például jelentős mértékben segítené a gyógyszerkutatókat, illetve új lehetőséget nyújt a preventív és egyénre szabott medicinára. Egy páciens genetikai anyagának ismeretében az orvos meg tudja állapítani annak valószínűségét is, hogy milyen genetikai betegségekre hajlamos.

<sup>57</sup> Griffiths J. The Realm of the Nanopore. Analytical Chemistry 2008;80(1):23.

## 5. A STRATÉGIAALKOTÁS ALAPELVEI, CÉLKITŰZÉSEI

A stratégialakotás alapelve, hogy a BME nemzetközi színvonalú természettudományos kutatásainak, valamint a műszaki tapasztalatokon alapuló technológia fejlesztéseinek összekapcsoljuk a nanotudományok és a nanotechnológia területén. Összhangban a kutatóegyetemi címpályázat vállalásaival a Műegyetem „Nanofizika, nanotechnológia, anyagtudomány” kiemelt kutatási terület stratégiáját – figyelembe véve a hazai K+F+I, valamint ipari érdekeket és elvárásokat – az alábbi szakma-specifikus célkitűzések figyelembe vételével alakítottuk ki:

- Korábbi eredményekre alapozott kutatási irányok célzott kiválasztása, a karok együttműködésén alapuló interdiszciplináris témák előtérbe helyezése.
- A kutatási irányok és szervezeti keretek hatékonyabbá tétele a hazai/európai/nemzetközi trendekkel összhangban.
- Az egyetemen laboratóriumi kapacitásainak koordinációja, a szórványosan megtalálható csúcstechnológiai berendezések és mintaelőállítási technológiák hatékony kihasználása.
- Egy-egy szelektált kutatási területen unikális fejlesztések megvalósítása, specializálódás az alkalmazások területén.
- Versenyképességet és hatékonyságot növelő termékek és technológiák kifejlesztése, igazodva az ipari igényekhez. Az ipari kapcsolatok erősítése, a nano-alkalmazások terjesztése.
- Szoros kooperáció kialakítása az nanotechnológia vezető akadémiai kutatóintézeteivel, hazai és külföldi egyetemeivel
- A BME erős és nemzetközileg elismert tudományos iskoláinak és műhelyeinek szakmai erősítése, új interdiszciplináris iskolák megalapozása
- A nanotudományok fejlődésének követése az oktatásban, hozzájárulás a kutatói és mérnöki utánpótlás országos szinten történő biztosításához.
- Az EU szinten is versenyképes kutatási pályázati potenciál növelése.

A fentieknek megfelelően az eredményesség biztosítása érdekében a stratégia megvalósítása során három, egymásra épülő fázist különböztetünk meg:

1. tudomány és technológia;
2. tudásbázis és infrastruktúra;
3. alkalmazás.

Az első fázis a fejlődés szempontjából nélkülözhetetlen alapokat szolgáltatja. Ezen alapok a megfelelő erőforrásokkal kombinálva biztosítják a további fázisok sikeres végrehajtását.

A második fázis a humánerőforrások és infrastrukturális fejlesztések szakasza. A megfelelő felkészültségű és motivált kutatói gárda és az általuk működtetett jól felszerelt és folyamatosan fejlesztett kutatási infrastruktúra (laboratóriumi háttér) ad biztos alapot innovatív megoldások kifejlesztéséhez és az ehhez kapcsolódó tudásbázis létrehozásához.

A harmadik fázis az innovatív és piacképes megoldások ipari/üzleti alkalmazásba ültetése az egyetem-ipar kapcsolatok aktivizálásával.

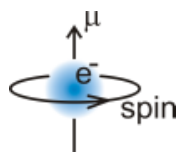
## 6. KUTATÁSI TERÜLETEK

### 6.1. NANOELEKTRONIKA

Célkitűzésünk olyan új nanoszerkezetek előállítása, kísérleti és elméleti vizsgálata, melyekben a makroszkopikus tulajdonságokat felváltó kvantumfizikai jelenségkör megértése alap kutatási kihívást jelent, de egyúttal potenciális elektronikai alkalmazások lehetőségét is ígéri. Az atomi méretektől a néhány száz nanométerig terjedő tartományban a korszerű nanotechnológiai eljárások mellett (rétegnövesztés, litográfia, kémiai preparálás) egy-egy célfeladatra egyedi mintaelőállítási megoldásokat is keresünk (molekulák kötése atomi láncokhoz, önszerveződő rendszerek).

A nanoméretű objektumokban az elektronok hullámszerű terjedésekor a fázis-információk fontossá válnak, a spin-memória megőrizhető, és meghatározóvá válnak a kvantum effektusok. Ennek köszönhetően megnyílik a lehetőség, hogy az elektron spinjét információ-közvetítésre lehessen felhasználni, hogy aritmetikai műveleteket kvantummechanikai alapokon lehessen végezni, valamint hogy néhány atomból felépülő tranzistorok, illetve egyedi molekulákból kialakított kiemelkedő érzékenységgű szenzorok készüljenek. A modern fizika ezen új irányzatai központi szerepet játszanak a *Nano projekt* elméleti és kísérleti kutatásai, valamint technológiai fejlesztései között.

#### 6.1.1. SPINTRONIKA



Az elektromos jelenségekben az elektron töltése mellett a spinje is fontos szerepet játszik: az elektronnak nemcsak töltése van, hanem "forog" is. Ehhez a forgáshoz tartozó mágneses momentum határozza meg a legtöbb anyag mágneses viselkedését, a szupravezetésért pedig két ellentétesen forgó (ellentétes spinű) elektron kötött állapota felelős (Cooper-pár).

A spintronika alap gondolata az elektronok spinje révén megvalósított információ-tárolás, továbbítás és feldolgozás. Makroszkopikus áramkörökben a forgás által hordozott információ elveszik a szórásfolyamatok miatt. Ha spin-polarizált – azaz egy irányban forgó – elektronokat juttatunk be egy vezetőbe, a spin-memória tipikusan csak 10-1000 nm távolságon belül marad meg. A forgási állapot ennél rövidebb méretskálán történő sikeres detektálása és nanoméretű mágnesek létrehozásának technikai megvalósítása áttörést jelentett a mágneses adattárolásban: ezeknek az alkalmazásoknak az első generációja már jelen van a korszerű számítógépekben és kommunikációs eszközökben.

Néhány éves felismerés, hogy a spin-polarizált áram egyúttal lehetőséget ad a mágneses információk közvetlen beírására. A terület dinamizmusára jellemző, hogy jelenleg világszerte párhuzamosan folynak a jelenség megismerésére vonatkozó alap kutatások, az optimális anyagokat kiválasztó

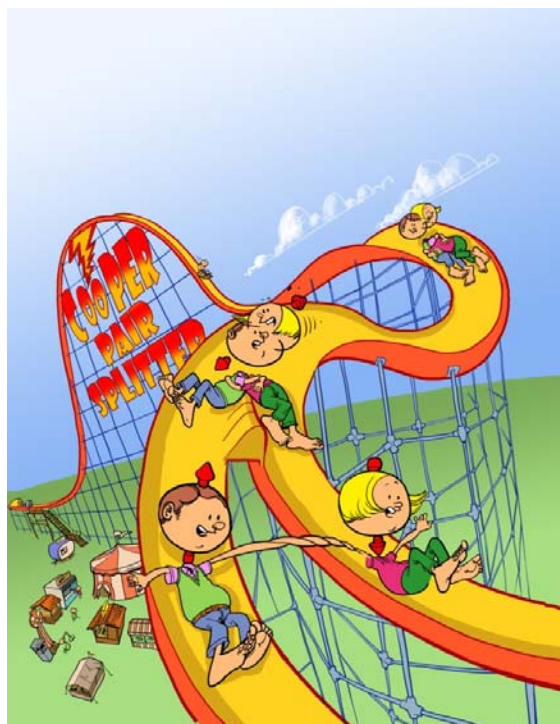
fejlesztések, a piacképes termék létrehozásához szükséges technológiai újítások, valamint az első prototípusok elkészítése. A fokozott érdeklődés oka, hogy az elektronok forgásának (spinjének) bevonása az aktív vezérlésbe koncepcionálisan új érzékelők, adathordozók és logikai elemek készítését teszi lehetővé. A mágneses memóriák területén pl. reális a mostani merevlemezeknél 1000-szer gyorsabb adatforgalom, magasabb adatsűrűség mellett ( $300 \text{ GB/cm}^2$ ), egy olyan szilárdtest memóriában, amely nem tartalmaz forgó alkatrészt.

A spintronikai jelenségek elméleti és kísérleti kutatása a terület születése óta, mintegy tíz éve jelen van a BME karain. Laboratóriumainkban a nanoszerkezeteket az erre a célra több éven át fejlesztett pásztázó-mikroszkópiai eszközökkel, spektroszkópiai módszerekkel, és speciális mágneses mérésekkel minősítjük. Stratégiai célkitűzéseink kiemelt irányát jelenti a spin-függő elektromos vezetés tanulmányozása az alábbi területeken:

*nanoméretű mágneses domének detektálása és manipulálása spin-polarizált árammal, spin-terjedés mérése ESR spektroszkópiával, fázis-, spin- és szupravezető-korrelációk mérése nanoszerkezetekben.*

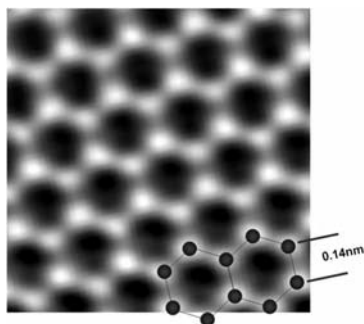
Ez utóbbi témakör a kvantum-számítógépek világába is átvezet. A kvantum-informatika különböző vonatkozásai egyetemünkön hagyományosan erős elméleti kutatási területet jelentenek: vezető informatikusok, matematikusok és fizikusok köré a terület hazai tudományos iskolái alakultak ki.

A szupravezető Cooper-párok ellentétes spinű elektronjai természetes forrásai lehetnek a kvantum számítógépekben kulcsszerepet játszó, „összefonódott” elektronállapotoknak. Megfigyelésük a kvantummechanika olyan alapelveinek határát érinti, mint az ún. „távolbhatás” (Einstein-Podolsky-Rosen paradoxon). A felhasadó Cooper-pár elektronjainak kísérleti azonosítása alapkutatói jelentőségű, egyúttal egy olyan nanotechnológia feladat, mely megoldása hozzásegíthet a jövő kvantum-számítógépeinek alapegységeinek létrehozásához (qubit).



### 6.1.2. MOLEKULÁRIS ELEKTRONIKA, HIBRID NANOSZERKEZETEK

Hibrid nanostruktúrák vizsgálata napjaink nanofizikai kutatásainak egyik élenjáró területe. Egzotikus elektromos tulajdonsággal bíró (pl. szupravezető, ferromágneses) makroszkopikus elektródák kombinálása nemkonvencionális nanoméretű objektumokkal (komplex molekulák, szén nanoszerkezetek, ballisztikus fémek) új fizikai jelenségek széles skáláját eredményezi a speciális elektron korrelációkból és a méretből adódó kvantum effektusoknak köszönhetően. Az elkövetkezendő időben ezen jelenségkörök komoly érdeklődésre tartanak számot, hiszen a hibrid nanoszerkezetek vizsgálata koncepcionálisan új nano-elektronikai eszközök fejlesztése előtt nyitja meg az utat. Elsődleges célunk hibrid nanostruktúrák gyártása és karakterizálása.



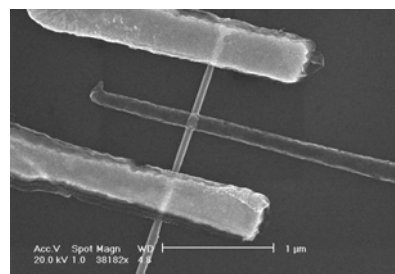
A nemrégiben felfedezett grafén – a hatszögrácsba rendeződött szén atomok egyetlen síkja – az elektronika irányában mutat rendkívül ígéretes tulajdonságokat. Az elektron-mobilitás közel ezerszerese a szilícium alapú elektronikáénak, a töltéshordozó koncentráció közvetlenül vezérelhető a feszültséggel, az elektron a terjedési irányától függő félvezető, ill. fémes sávszerkezetet érzékel. Mindezek miatt a grafén feltehetően a jövő anyaga lesz az elektronikában. (Az ábra egy grafén lap elektronmikroszkópos felvételét mutatja.)

Célkitűzésünk a különböző nanostruktúrák és az ezekre épülő hibrid áramkörök vezetési tulajdonságainak vizsgálata korszerű karakterizálási technikák alkalmazásával. A vizsgálni kívánt rendszerek:

*grafén,*

*szén nanocső és félvezető nanopálcikák,*

*fémes, félvezető és szupravezető nanorétegek.*



10.ábra

**Egyszerű hibrid nanoszerkezet: InAs nanopálcika mágneses és szupravezető kontaktusokkal**

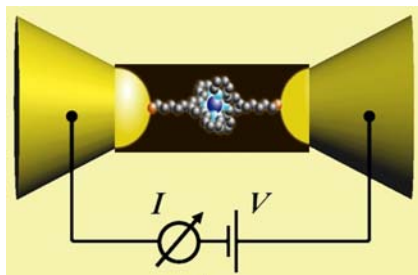
Napjaink félvezető technológiáját egyetlen vagy néhány molekulából felépülő tranzisztorok, memóriaelemek, illetve egyedi molekulákból kialakított kiemelkedő érzékenységű szenzorok válthatják fel. Megbízható molekuláris nanoszerkezetek létrehozása azonban kifejezetten nehéz, hiszen

a félvezető nanoszerkezeteknél megszokott mérnöki tervezés helyett a különböző anyagok és molekulák között atomi méretskálán kialakuló, részleteiben nem ismert kémiai kölcsönhatásokra kell hagyatkozni. Stratégiai célunk szerves molekulák kontaktálási technikájának kidolgozása, áramköri tulajdonságaik kísérleti feltérképezése és modellezése. Távlati és ígéretes cél az egyedi molekulák kémiai reakciójára épített „egy-molekula” szenzorok megvalósítása.

A molekuláris elektronikához szorosan kapcsolódó terület a különböző ionos vezetőkben kialakuló atomi kapcsolási jelenségek vizsgálata. Az itt létrehozott új áramköri elem, a *memriszor*, napjainkban még alapkutatási téma, de könnyen versenytársa lehet a mágneses elven működő adattároló egységeknek, vagy a szilícium technológia félvezető áramköri elemeinek. A vizsgálni kívánt rendszerek és jelenségek:

*Vezető elektródákkal kontaktált egyedi molekulák és molekuláris vékonyrétegek*

*Kapcsolási jelenségek atomi méretskálán*



11. ábra

Egyedi, speciális funkcionalitású szerves molekulák kémiai állapotának kiolvasására lehetőség nyílik az atomi méretű kontaktálással.

### 6.1.3. NANOELEKTRONIKAI ESZKÖZÖK

Nanométeres mérettartományba eső objektumok számos elektronikus eszköz működésében játszanak alapvető szerepet. Néhány példa a nanoszerkezetű anyagok használatával elérhető előnyökre:

- félvezető gázérzékelők nanoszemcsékkel érzékenyíthetők, aktiválhatók,
- félvezető nanohuzalokból gázérzékelők készíthetők, nanoporusos réteget tartalmazó érzékelők többek között páratartalom mérésére is alkalmasak,
- a nanokristályos Si napelemek örökölhetik mind az amorf, mind a polikristályos napelemek előnyös tulajdonságait,
- a napelemek felületének mikro- és nanostrukturálása csökkenti a reflexiót,
- az IC chip hőmérsékletekben jelentős csökkenés érhető el szén nanocsövekkel és fém mikroszemcsékkel dúsított hővezető polimerek segítségével,

-félvezető felületeken és tervezérelt tranzisztorokban általános a tunnelezhető oxidréteg megjelenése.

A fenti modellrendszerek és eszközök fizikai vizsgálata, valamint számítógépes szimulációs modellek készítése olyan feladatok, amelyek hosszú távon is lehetőséget adnak ipari kapcsolatok építésére, doktori témák kiírására, új tudományos eredmények elérésére.

Kutatásaink kiemelt irányai:

- *kapacitív páraérzékelő megvalósítása (anódos oxidációval, ill. szol-gél technikával előállított porózus Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)*
- *új generációs nanokristályos és hibrid napelemek vizsgálata, napelemek felületi nanostrukturálása, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>antireflexió és öntisztító bevontatok a napelemek kültéri egységein*
- *nano-kompozit anyagok minősítése (CNT mint kitűnő hővezető)*
- *statikus és tranziens termikus minősítő eljárások fejlesztése*
- *rezgőkondenzátoros és KFM potenciálmérések nanoméreteken lezajló töltésmozgások vizsgálatára*
- *töltéshordozó, anyag és termikus transzportok számítógépes modellezése mikro és nanorendszerekre*

A nanométeres tartományban a MOS tranzisztoroknak egy jellegzetes hátránya jelentkezik, abból adódóan, hogy felépítésük bonyolult, sok határfelületet tartalmaznak. Megoldást jelenthet új, („beyond CMOS”) „tömbi” nanoelektronikai eszközök kifejlesztése, melyekben elektromos, termikus és mechanikai hatások együtt jelentkezhetnek, és ezek közül több is szolgálja az információ feldolgozását, tárolását. A vanádium-dioxid (VO<sub>2</sub>, vanádium(IV)-oxid) egy, az utóbbi több mint ötven évben intenzíven vizsgált anyag, mely 68°C közelében félvezető-fémes fázisátmenetet mutat; ezt kapcsoló elemhez elegendően éles (3-4 nagyságrendű) vezetőképesség-változás kíséri. A jelenség elektromosan gerjesztve közvetlenül vagy Joule-hő közvetítésével (ennek mechanizmusa vitatott) is kiváltható, így alkalmazásával termikusan vezérelhető kapcsoló elem valósítható meg.

Kutatásaink kiemelt irányai:

- VO<sub>2</sub> nanoelektronikai alkalmazhatóságának vizsgálata*
- a tranzisztorokhoz hasonlóan alkalmazható kapcsoló elem megvalósítása*
- VO<sub>2</sub> nanoelektronikai eszközök elektro-termikus modellezése*

## 6.2. FELÜLETI NANOSTRUKTÚRÁK

Gyakorlatban alkalmazható nanostruktúrák kifejlesztéséhez több alap tevékenységre van szükség.

- alkalmazási területet ismerő tervezőre, alkalmazóra;
- alapanyagra és hozzátartozó technológiára;
- mérésekre, melyek egyik része anyagvizsgálat a másik része funkcionális minősítés.

Egyetemünkön több ilyen struktúra készítéséhez – különböző karokon szétszórtan – megvan a teljes szellemi erőforrás és a szükséges infrastruktúra. *Célunk*, hogy egyetemi szintű együttműködések keretében, ipari kapcsolatainkat bevonva az alapkutatástól az ipari vagy gyakorlati alkalmazásig eljuttassunk több stratégiai fontosságú, felületi nanoszerkezetű eszközt, vagy bevonatot.

*Olyan új felületkezelési és bevonatolási eljárásokat tervezünk kifejleszteni és minősíteni, melyek segítségével biofunkcionális kívánalmakat kielégítő orvostechikai terápiás eszközök, implantátumok készíthetők.*

*Nedves kémiai szol-gél eljárással készített nanokristályos bevonatokat tervezünk konkrét optikai eszközökben (napelemek, hullámvezetők) és szenzorokban alkalmazni, azzal a céllal, hogy azok alapvető optikai, funkcionális jellemzőit javítsuk.*

*Célunk továbbá, hogy a nanoszerkezetek minősítésére (pl. felületi összetétel, adalékkoncentráció, morfológia) is alkalmas, érintés és roncsolás mentes mérőberendezéseket és eljárásokat fejlesszünk ki, melyek később az iparban (pl. félvezetőgyártás) is alkalmazást nyernek*

### 6.2.1. FELÜLETFIZIKA, FELÜLETANALITIKA

A felületi nanoszerkezetek fejlesztésében kulcs szerepet játszik a felület morfológiájának és összetételének ismerete. Alapkutatási szinten ezek a berendezések már a XX. században, lényegében a mikrotechnológia fejlődésével párhuzamosan, igen magas fejlettségi szintre jutottak. Egyetemünkön mintegy fél évszázada folynak felületanalitikai kutatások, és megteremtődött a szükséges szellemi tudás és infrastruktúra. A berendezések zöme legalább nagyvákuumhoz kötött, így a vizsgálat nehézkes. Úgy véljük, hogy a jövőben egyre fontosabb lesz a vizsgálatok *in situ*, roncsolás (és érintés) mentes elvégzése, pl. reaktorfelületeken, ahonnan nem lehet „mintát venni”, vagy chip-gyártás közben a Si szelet felületén, melyet a legkisebb behatás módosíthat, és a mérés maga tönkretelheti a készülék eszközt.

Célunk olyan berendezések kifejlesztése, melyek, a felületi összetételt, adalékkoncentrációt vákuumtól függetlenül, *in situ* képesek meghatározni. Két ilyen eljárást és berendezést tervezünk kifejleszteni, az egyik egy univerzális analitikai berendezés, a másik a félvezetőgyártáshoz kötődő ipari célműszer:

*Terepi vizsgálatokra alkalmas lézeres gerjesztéssel létrehozott letörési spektroszkópia (LIBS) felületi összetétel meghatározása céljával.*

*Fotomodulált reflexiómérő berendezés, melynek segítségével ultra sekély ion-implantált rétegek (32-64 nm) adalékkoncentrációját és rétegvastagságát lehet meghatározni. Az ipari bevezetést partnerünkkel, a Semilab Rt.-vel közösen tervezzük.*

Felületi mikro- és nanoszerkezetek létrehozásában sok esetben fontos szerepet játszik a lézeres megmunkálás és annak monitorozása. Az ilyen típusú, „száraz maratási” eljárásoknál fontos szerepet játszik a lemart réteg vastagságának, ütemének monitorozása, vagy legalábbis a szelektivitás biztosítása (a hordozó, vagy az alul levő réteg sértetlen kell maradjon). Erre alkalmas módszerek tartjuk az előzőekben említett LIBS eljárást.

*Célul tűzzük ki a LIBS segítségével monitorozott lézeres megmunkálási technológia megvalósíthatóságának kutatását, kifejlesztését és potenciális alkalmazási lehetőségeinek felderítését.*

## 6.2.2. FELÜLETEK MINŐSÍTÉSE

A szilárdtestek felületének kémiai, és fizikai tulajdonságainak vizsgálati módszerei az utóbbi két évtizedben központi kutatási területek a BME-n.

A nanométeres mérettartományban ennek a területnek az interdiszciplináris volta megkérdőjelezhetetlen, hiszen összemosódik a kémia (felületi reakciók, funkcionizálás, migráció), a felületfizika (felületi kötések, elektronszerkezet, optikai tulajdonságok), illetve az anyagtudomány (mechanikai tulajdonságok, fémek anyagszerkezete). Az utóbbi néhány évben a kutatás-fejlesztés előterébe kerültek a „nano” mérettartományban működő mikroszkópos módszerek, melyeket a BME-n a természettudományos és a műszaki szakterületek kutatói egyaránt felhasználnak és fejlesztenek.

Célunk a BME-n meglévő metrológiai infrastruktúra (pl. a klasszikus felületfizikai műszerek – SIMS, Auger spektroszkópia, pásztázó elektronmikroszkópos és pásztázószondás mikroszkópok) komplex felhasználása a napjainkban legjobban kutatott felületi jelenségek vizsgálatára. Ezen belül is az alábbiakban kiemelünk néhány olyan problémakört, amely motivációját tekintve elektronikai technológiai jellegű, azonban megoldásukhoz feltétlenül szükséges a fizikai, kémiai jelenségek együttes vizsgálata.

Az elektronikus alkatrészek és készülékek működése szempontjából kiemelkedő fontosságú az egyes részegységek között megfelelő minőségű elektromos kontaktus kialakítása. Ilyen kontaktus lehet például a chip huzalkötése, az ún. flip-chip bonding, a tokozott MEMS eszközök kontaktálása vagy a forrasztás. Az utóbbi években megjelent publikációk tanulsága szerint a kontaktus jellemző méreténél 3 nagyságrenddel kisebb méretskálán lejátszódó folyamatok is befolyásolhatják az elektronikus célú kötések minőségét és hosszú távú megbízhatóságát. Például egy ultrahangos mikrohuzalkötés jellemző átmérője a 10–100  $\mu\text{m}$  közötti, így 100 nm nagyságrendjébe eső felületi struktúrákat kell vizsgálnunk

annak érdekében, hogy megértsük és leírjuk az esetlegesen gyártás alatt vagy a készülék működése közben előforduló hibajelenségeket. Az ólommentes forrasztás bevezetése miatt megjelenő számos, különböző anyagú kontaktusfelület miatt ismét előtérbe kerültek a különféle felületi hibajelenségek, mint az ón whisker<sup>58</sup> képződés vagy az elektrokémiai migráció problémája, ami magával vonja a felületi minősítési eljárások fejlesztésének szükségességét is. A whisker növekedés és az elektrokémiai migráció jellemzően nem nanométeres mérettartományban játszódik le, azonban a hozzájuk kapcsolódó transzportjelenségek a nanofizika eszköztárával tárgyalhatók, amelyek egyetemünk a dinamikus fejlődő nano kutatások miatt már több karon is jelen vannak. Ezen felül a BME-n hagyományosan erős felületfizikai ismeretek is segítenek a whisker növekedés leírásában, amelyre a mai napig nincs kielégítő magyarázat. Hasonló gondolatmenet érvényes a MEMS eszközökre, valamint az ún. fine-pitch forrasztási felületekre is. A témához kapcsolódó konkrét kutatási feladatok:

*a különféle felületi bevonatok anyagának és a felületi szennyezők hatásának vizsgálata*

*a különféle klimatikus vizsgálati módszerek hatásának kutatása*

*in situ optikai vizsgálati módszerek fejlesztése a jelenségek valós idejű vizsgálatára klimatikus vizsgálatok közben*

*az AFM technológia alkalmazhatóságának vizsgálata*

*kis koncentrációjú felületi szennyeződések detektálhatóságának fejlesztése pásztázó mikroszkópiával*

*Nanostruktúrált felületi bevonatok minősítése, optimális rétegszerkezet kiválasztása a szenzorikában használt MEMS eszközök megbízhatóságának javítására.*

Eszközfejlesztéseink révén egyúttal komoly *méréstechnikai* és *gyártástechnológiai* háttérrel is biztosítunk a BME-n kutatott nanoszerkezetek részére. Előbbit morfológia-meghatározó<sup>59</sup> és analitikai<sup>60</sup> módszerekkel, míg az utóbbit vékonyréteg készítő<sup>61</sup> és elektronsugaras litográfiai eljárások révén.

<sup>58</sup> Az ón whiskerek túszerű ón egykristályok, amelyek a tiszta ónbevonatból spontán növekednek. Az elektrokémiai migráció során feszültség alatt lévő vezetősávok között a fémek ionizációja következtében vezető dendritek növekedése tapasztalható.

<sup>59</sup> tús, optikai és interferometrius alak és érdesség mérés, mikroszkópia, pásztázó elektronmikroszkópia

<sup>60</sup> röntgensugaras fotoelektron-spektroszkópia – XPS, Auger-elektron spektroszkópia – AES, szekunderion tömegspektrometria – SIMS, optikai és fluoreszcens spektroszkópia az UV-tól az IR-ig

<sup>61</sup> elektronsugaras párolgatás, porlasztás

### 6.2.3. BIOKOMPATIBILIS ÉS HATÓANYAGLEADÓ BEVONATOK

Az élő szervezetbe beültetett eszközök (implantátumok, értágítóbetétek) felületét általában olyan bevonattal kell ellátni, amelyek összeférhetőek a környező szövetekkel (biokompatibilitás), esetleg gyulladásgátló hatóanyagot képesek leadni, ill. egy idő után akár fel is szívódnak, szükségtelemné téve ezáltal a további sebészi beavatkozást.

Az értágítóbetétekkel kapcsolatos fejlesztéseink egyik fő területe a koszorúértágító-betétek anyagai és gyártása, a másik pedig ezek bevonatai. Mindezek azért kapnak egyre nagyobb jelentőséget, mert az implantálást követően közép és hosszú távon a legnagyobb problémát még napjainkban is a resztenózis (az ér visszaszűkülése) okozza. E probléma leküzdésére a felületkezelés és a hatékony bevonatok alkalmazása adhat megoldást. Mind a felületkezelésnél, mind pedig a bevonatolásnál jelentős hangsúlyt kapnak a nanotechnológiai megoldások a legújabb kutatásokban (pl. a 2010-ben, a KORANET nemzetközi kutatási szervezet által indított „Nano4Stent” projekt).

A keringési rendszer terápiája mellett szintén jelentős kutatási erőforrások összpontosulnak az ortopédiai és fogászati implantátumok fejlesztésére is, és ezen a területen fontos kutatási eredményeket, szabadalmakat értek el az egyetem kutatói. Az implantátumok anyagainak fejlesztése és felületkezelése a csontszövet regenerációja szempontjából a mai legfontosabb kutatási feladat. E téren új fejezetet nyitottak a nanokerámiák és a nanoszerkezetű kerámiabevonattal ellátott fémimplantátumok. E két implantátumcsalád felületi tulajdonságainak és az élő szervezettel való kölcsönhatásának elemzésére új kutatási együttműködés indult francia egyetemi partnerekkel.

A *Nano* projektben a fém és kerámia bioanyagok felületmódosítása témakörben éppen ezért az értágítóbetétek, az ortopédiai és fogászati implantátumok felületi tulajdonságainak kutatása egybevághat a nemzetközi nanotechnológiai kutatási trendekkel.

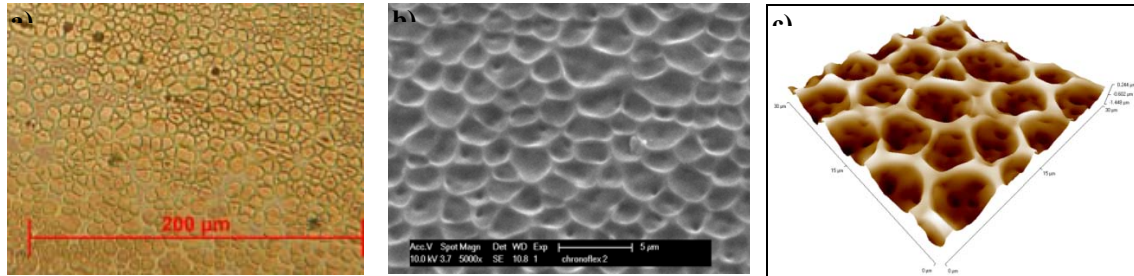
A bioanyagok kutatásának célja az értágítóbetétek, az ortopédiai és a fogászati implantátumok felületkezelése, bevonatolása és felületmódosítása olyan különleges felületi anyagtulajdonságok elérése érdekében, amelyek a jelenleg fennálló problémák leküzdésére irányulnak. Ennek eredményeképpen az implantátumok élettartalma megnő, kedvezőbbek az élettani hatások. További cél, hogy a kezelt felületek bioaktivitásának jellemzésére alkalmas vizsgálati módszereket fejlesszünk ki, ezzel lehetővé téve a létrehozott bevonatok objektív összehasonlítását.

A sztentbevonatok funkcionális tulajdonságainak fejlesztésében a perifériás artériákba kerülő, öntáguló sztentek felületkezelési technológiáját helyezük előtérbe, továbbá azt vizsgáljuk, hogy a funkcionális tulajdonságok hogyan hatnak a resztenózisra.

A perifériás értágítóbetétekhez kötődő célok eléréséhez patkányok nyaki főverőérébe illeszkedő mérettel sztenteket készítünk és ültetünk be. A sztentek fémmel fedett felületének nagyságát elektropolírozással változtatjuk. Ennek, valamint a bevonatok mikroszerkezetének resztenózisra gyakorolt hatását állatkísérletekkel vizsgáljuk. A patkányok nyaki főverőérébe beültetett különböző sztenteket és érszakaszokat 3-4 hetes megfigyelés után szövettani és immunhisztokémiai módszerekkel vizsgáljuk.

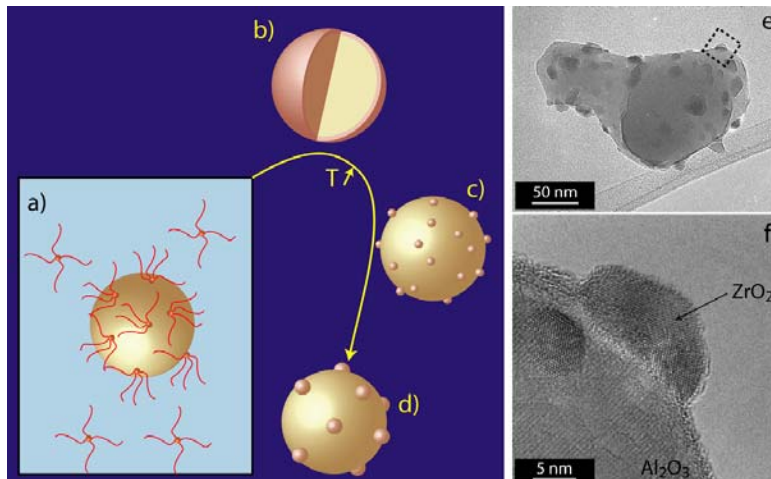
A perifériás sztentek esetében agyi aneurizma kezelésére szolgáló, nanoszerkezetű poliuretán bevonattal fedett mintákat is létrehozunk. A sztent felületét ultranagysebességű lézersugaras hevítéssel

és gyorsítással felületkezeljük. Elemezzük, hogy a sztent flexibilitásában és egyéb mechanikai tulajdonságaiban történik-e változás a bevonat alkalmazásának következtében.



12. ábra  
Pórusos sztentbevonatról fénymikroszkóppal (a), elektronmikroszkóppal (b) és atomerő-mikroszkóppal készített felvétel

A fogászati és az ortopédiai implantátumok esetében arra fókuszálunk, hogy az élő szervezettel való kölcsönhatásban az implantátum és a bevonatának mikroszerkezete milyen szerepet játszik. A fő figyelmet az alumínium-oxid–cirkónium-oxid és a szilícium-nitrid biokerámia implantátumokra – amelyek valójában úgynevezett mikro-nanokompozitok –, valamint ezekből készült bevonatokra irányítjuk, amelyektől áttörést várnak a jelenlegi előrejelzések a szívós biokerámia implantátumok anyagaiként való alkalmazásoknak köszönhetően. Emellett felületmódosítási kísérleteket végzünk az implantátumok biokompatibilitásának növelése végett: bioinert és bioaktív kerámiákból készítünk bevonatokat.



Forrás: J. Chevalier, L. Gremillard / Journal of the European Ceramic Society 29 (2009) 1245–1255

**Várható tudományos eredmények**

*Növelt biofunkcionalitású és élettartamú implantátumok*

*Implantátumok felületkezelésére szolgáló új eljárások és azok optimális alkalmazási feltételei*

*Perifériás sztentek fémmel fedett felületének optimális értéke a resztenózis szempontjából, nanoszerkezetű poliuretán bevonatok*

*Mikro-nanokompozit, biokerámia implantátumok és az élő szervezet közötti kölcsönhatás jellemzőinek meghatározása*

**6.3. SZERKEZETI ÉS FUNKCIONÁLIS ANYAGOK****6.3.1. POLIMER NANOKOMPOZITOK**

Szerkezeti anyagok esetében a szükséges erősítést különböző módszerekkel érhetjük el: a) eleve nanoskálájú adalékok elosztatása, b) mikroméretű adalékok „lebontása” nanoméretűvé termodinamikai és/vagy műszaki alapokon, c) nanoadalékoltság vagy nanoszerkezet in situ létrehozása alkalmas szintézis vagy alakadás révén. Munkánkban a nanotechnológia nem csupán nanoméretű adalékok elosztatását, hanem két- vagy háromdimenziójú nanoskálájú szerkezetek kialakítását is jelent. Ez utóbbira példa az olyan egymásba hatoló hálószerkezetű gyanta, amely alkalmas gyanták hibridizációjával hozható létre. Az elektromos erőterben végzett nanoszálképzés (electrospinning) termékei erősítő feladatok ellátásán túl, orvos egészségügyi célokra is messzemenően alkalmasak lehetnek (csont- vagy bőrregenerálódást elősegítő szubsztrátum, gyógyszerek késleltetett leadását elősegítő hordozóanyag). Nanoadalékok, pl. szén nanocsövek bevitelére révén nemcsak a mechanikai jellemzők javíthatók (pl. alakemlékező polimerek alakváltozásakor kifejtett erő aktuátorok céljából), hanem az általuk előidézett villamos vezetőképesség révén a szerkezet épsége vizsgálható, a termikusan kiváltott alakemlékezés villamosan előidézetté tehető. Ezt a tulajdonságot, amely immár „funkcionális” jellegű, pl. hő hatására indukált öngyógyuló rendszerekben is kiaknázzhatjuk (kapszulák, üreges szálak). Egyre több jel utal arra, hogy hagyományos mikro és az új nanoerősítésű, azaz hibrid-erősítésű rendszereké a jövő, elsősorban tartós igénybevételek során mutatott kedvező tulajdonságaik folytán. Nanoadalékok „hagyományos” úton történő elosztatása továbbra is fontos feladat. Így pl. az önerősítéses rendszerek erősítőanyagának hőterhelhetősége jelentősen növelhető, ami rendkívüli előny mind előállításuk mind pedig feldolgozásuk szempontjából.

Polimer nanokompozitok esetén már kis töltőanyag tartalom mellett is jelentős szilárdság növekedés érhető el, ha a töltőanyag elosztatása a polimer mátrixban egyenletes és valóban nanométeres léptékű. Az általunk vizsgált töltőanyagok az úgynevezett rétegszilikát ásványok, melyek elsősorban hozzáférhetőségük és áruk révén váltak népszerűvé. Az eddig létrehozott polimer/rétegszilikát nanokompozitok között azonban kevés olyan van melynél jelentős szilárdságnövekedés tapasztalható. A nanoméretű töltőanyagot tartalmazó polimer kompozitok elterjedésének gátat szab az a tény, hogy a mai napig nem sikerült kiemelkedő mechanikai tulajdonságokkal rendelkező kompozitot előállítani olyan műanyagokból, mint például a polipropilén (PP), mely az egyik legnagyobb mennyiségben

gyártott és felhasznált műanyag világszerte. Ennek alapvető oka a kompozitokban kialakuló összetett szerkezet és kölcsönhatások ismeretének hiánya. Munkánk célja PP/rétegszilikát kompozitokban kialakult szerkezet és kölcsönhatások tanulmányozása és ezeknek módosítása, megnövekedett mechanikai tulajdonságok elérése céljából. Ennek érdekében különböző töltőanyagok vizsgálatával és felületkezelési módszerek kidolgozásával is foglalkozunk.

A mechanikai tulajdonságokon kívül a nanoléptékű töltőanyagok más tulajdonságokra is hatással vannak (gázzárás, stabilitás, hőállóság, mágneses tulajdonságok, törésmutató stb.). Az MTA Kémiai Kutatóközponttal együttműködve dolgozunk rádió frekvenciás plazma segítségével létrehozott ferrit nanorészecskék előállításán és terveink között szerepel az előállított részecskék felületkezelése és polimer mátrixba keverése. A kutatás célja szabályozott törésmutatójú polimer nanokompozitok létrehozása, ugyanis ezeket a polimereket optikai adatátvitelben és egyéb optoelektronikai alkalmazásokban kívánjuk felhasználni.

Fontosnak tartjuk továbbá a szilikon elasztomer anyagok kutatását is. Ezen gumyszerű anyagokból mágnesezhető, ill. mágneses tulajdonságot mutató, ugyanakkor kellően elasztikus anyagok jöhetnek létre nanorészecskék formájában hozzáadálékolt mágneses szemcsék révén. Ezen anyagok fontosak az orvostechikában, a biomechanikában, ahol különleges szenzorok kialakítására nyílik lehetőség (a Semmelweis Egyetem is részt vesz a közös fejlesztésben).

A jövőre nézve rendkívül fontos az, hogy a polimerek nanotechnológiája funkcionális anyagok fejlesztése irányába mozduljon el. Ez röviden azt jelenti, hogy az anyagok külső stimulus hatására képesek legyenek megfelelő választ adni („intelligens”, „ügyes” anyagok). Mindez elképzelhetetlen azonban interdiszciplináris kutatómunka és az ehhez szükséges beruházások nélkül (pl. analitikai szerkezetfelderítő módszerek, kis mennyiségek előállítására alkalmas diszpergátorok). A jövőbeli tervek között szerepel a külső elektromágneses erőterrel kialakítható aktuátorok, pl. ujj ízületek, emberi szervezeten belüli mesterséges csővezetékek elzárására/nyitására (vizelet, széklet), protézisek kialakítására stb. Finommechanikai alkalmazásként a repüléstechnikában és az űrkutatásban használható villamosan vezető bevonatok kialakítását is tervezzük.

### 6.3.2. (BIO)KÉMIAI ÉRZÉKELÉS FUNKCIONALIZÁLT NANO-SZERKEZETTEKKEL

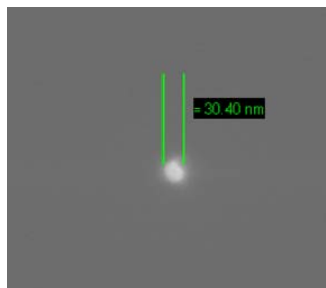
A kémiai információ, környezetünk bio(kémiai) komponenseinek azonosítása és mennyiségi jellemzése, rendkívül fontos helyet foglal el információs társadalmunkban. A kémiai és biológiai folyamatok megértése, modellezése és kontrollja lehetetlen kémiai információ hiányában. Környezetünk kémiai összetételéről információt szolgáltató kémiai szenzorok (érzékelők), a kémiai tulajdonságok (koncentráció, szerkezet) fizikai-kémiai jellé való átalakítását végzik. A kémiai és bioérzékelők, illetve mikroanalitikai rendszerek jelentőségét jól szemléltetik a vércukormérők és lambda szenzorok. A vércukor mérők világszinten több mint 100 millió cukorbetegnek segítenek a cukorbetegség krónikus szövődemények elkerülésében a vér glükóz koncentrációjának meghatározásán keresztül; mindezt otthoni körülmények között, közvetlenül egy csepp vérből. A lambda szenzor, amely ma már minden modern gépkocsiban megtalálható, a kipufogó gáz oxigén szintjének mérésén

keresztül teszi lehetővé az üzemanyag fogyasztás optimalizálását. Mindkét érzékelőnek kiemelkedő társadalmi és gazdasági jelentősége van.

A kémiai és bioszenzorok jellemző tulajdonsága a szelektív molekuláris felismerés, amely folyamatot egy jelátalakító legáltalánosabban elektromos jelé konvertál. A molekuláris felismerés, amely a (bio)kémia, anyagtudományok és biológia területére vezet át, és a jelátalakítás is egyre nagyobb mértékben támaszkodik nanoszerkezetek által biztosított lehetőségekre. Ennek megfelelően a kémiai érzékelés egy erősen multidiszciplináris terület mind a fejlesztés mind pedig az alkalmazás tekintetében. A fejlesztés húzó ágazatát egyértelműen az orvos diagnosztikai piac képezi, de 2001 szeptember 11-e óta a bioszenzorok a vegyi és biológiai terrorizmus elleni védekezés eszközeiként is fontossá váltak. Emellett egyre hangsúlyosabb igények fogalmazódnak meg a környezetvédelem és élelmiszeripar részéről és általánosan a gyors helyszíni meghatározások, amely hasonlóan gyors beavatkozási lehetőséget biztosítanak jelentősen felértékelődtek az utóbbi években. A rendkívüli érzékenység és szelektivitás mellett a kémiai és bioszenzorok illetve integrált mikroanalitikai eszközök meg kell feleljenek a költséghatékony gyártással kapcsolatos követelményeknek, amelyek biztosítanak elterjedésüket eddig még lefedetlen alkalmazásokban. A nanoszerkezetek lehetőséget nyújtanak a detektálási folyamat intim molekuláris szintű kontrolljára azáltal, hogy a jelátalakító rendszerek méretét a molekuláris tartományba tolja ki. Jelenleg a nanoszerkezeteken alapuló meghatározások a bioanalitika legérzékenyebb módszerei között vannak számon tartva, ugyanis sok esetben lehetővé tették a rendkívül nagy, esetenként akár egy molekula detektálásához szükséges érzékenységet. Ilyen tulajdonságokkal rendelkeznek a kémiaailag módosított nanopórusos érzékelők és nanorészecskéken alapuló mikroanalitikai rendszerek is, amelyek kutatása jelenleg a nanotechnológia és élettudományok homlokterében áll. Terveink között szerepel szintetikus és biológiai eredetű receptorokkal módosított szilárdtest nanopórusok, nanokavitások, nanoszerkezetek és nanorészecskék előállítására, illetve ezekre alapozva új érzékelési és szelektív molekuláris felismerési mechanizmusok kifejlesztése.

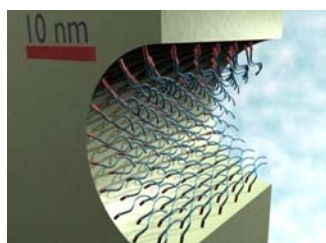
#### ***Kémiaailag módosított nanopórusok, nanokavitások előállítása és szelektív molekuláris felismerésre való alkalmazása***

A tervezett kutatás kémiaailag módosított szintetikus nanopórusokban végbemenő biomolekuláris kölcsönhatások megértését és szelektív molekuláris felismerésre való alkalmazását tűzi ki célul. A nagy affinitású szintetikus bioreceptorokkal módosított nanopórusok alkalmazása analitikai célokra megoldást nyújthat a jelenlegi bioszenzorok stabilitási problémáira és mindemellett egy jelölés nélküli széles körben alkalmazható bioérzékelési elvet biztosít. A megfelelően kis átmérőjű nanopórusok esetében a célvegyület kötődése a nanopórusokban immobilizált receptorokhoz megváltoztathatja a nanopórusok átjárhatóságát megfelelően megválasztott marker-ionok számára. Tekintettel arra, hogy egy nanopórus esetében akár egy molekula bekötődése is jelentős változást okozhat a nanopóruson keresztüli ionáramban, a módszer elviekben akár egy molekula (részecske) detektálására is alkalmas lehet. Célunk kontrollált méretű és alakú nanopórusok előállítása (arany nanocsövek, nanopipetták, illetve fókuszált ionsugár maratással nanofabrikált nanopórusok) és ezek új szintetikus specifikus receptorokkal (ionoforokkal, aptamerekkel, stb.) való módosítása molekuláris önrendeződés alkalmazásával.



13. ábra

Fókuszált ionnyalábos nanomegmunkálással aranyrétegben kialakított 30 nm átmérőjű pórus



Peptid-nukleinsavakkal módosított 10 nm átmérőjű nanopórus sematikus megjelenítése

A receptoroktól függően elsősorban diagnosztikai szempontból fontos ionok, nukleinsavak, proteinek, vírusok meghatározására tervezünk érzékelőket fejleszteni. A tervezett kutatás a nanopórusok gyártásának, valamint a velük történő analitikai meghatározás módszertanának fejlesztését és optimalizálását is magában foglalja. Ezek a fejlesztések nagymértékben támaszkodnak multifizikai számítógépes szimulációk alkalmazására.

A tervezett kutatás hosszú távú célkitűzése az integrált nanobioszenzor platformok létrehozása mikrofluidikai, hardver és szoftverfejlesztések segítségével. A "lab-on-a-chip" platformok remélhetőleg az *in-vitro* diagnosztikai tesztek gyártók számára lehetőséget adnak robusztus, felhasználóbarát, olcsó multiparaméteres tesztek előállítására.

### ***Kémiaiilag módosított nanoszerkezetek***

A nanoszerkezetek funkcionalitása nagymértékben változtatható kémiai módosításokon keresztül. Ebben a témakörben a nanoszerkezetek fizikai-kémiai tulajdonságainak beállítását tervezzük elsődlegesen új kémiai vegyületek alkalmazásával. Ennek megfelelően a tervezett kutatómunka alappillérei az originális szintetikus receptorok előállítása, a nanoszerkezetek kémiai módosításának kidolgozása, az új nanoszerkezetek jellemzése, illetve szelektív molekuláris felismerésre való alkalmazásuk.

### ***Bioérzékelő eszközök***

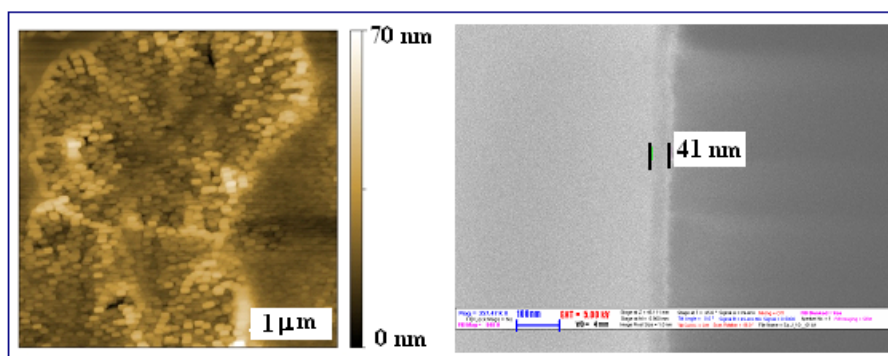
A bioérzékelő eszközök legfontosabb paramétereit (érzékenység, szelektivitás) döntően befolyásolja a transzducer felületen rögzített bioreceptor molekulák orientációja és interakciója a vizsgált mintában lévő cél-molekulákkal. Ezen receptor molekulák (pl. DNS szálak) mérete a nanométeres tartományban mozog, ezért a receptorréteg felépítésének vizsgálata, a molekulák szerveződésének, ill. orientációjának a megértése és manipulálása (optimalizálása) sok kihívást jelentő feladat. Ezen a területen kutatásunk célja a bioérzékelő eszközök legfontosabb paramétereit (érzékenység, szelektivitás) döntően befolyásoló transzducer elemek felületi tulajdonságainak és a funkcionális receptorrétegek felületi orientációjának vizsgálata és optimalizálása pásztázó-mikroszkópiás eljárások segítségével.

### 6.3.3. FUNKCIONÁLIS ÉS RESZPONZÍV NANOANYAGOK SZINTÉZISE

Terveink között szerepel passzív és aktív nanoszerkezetű anyagok nedves kémiai eljárásokkal történő előállítása, és azoknak a felhasználás szempontjából fontos jellemzése. A nedves nanokémiai eljárások általában makroszkopikus méretű anyagi halmazok nanoszerkezetének pontos (és tervezhető) kialakítását teszik lehetővé viszonylag költségkímélő módon.

*Nedves kémiai módszereken alapuló, nanostrukturált bevonatok előállítása elektronikai eszközökben, valamint határfelületi technológiákban való alkalmazásokra*

A nedves eljáráson alapuló szol-gél technika alkalmas nanorészecskék, részecske kompozitok, szabályozott vastagságú bevonatok (belső felületeken is), tervezett alakú tömbi termékek (köztük szálak és lemezek) előállítására a szokottnál sokkal alacsonyabb hőmérsékleti kezeléssel. A technika viszonylag olcsó, robosztus és nem környezetszennyező. Az alap komponensek és a bevitt funkcionális anyagok homogén eloszlása és mennyiségi aránya biztosítható, ami lehetővé teszi az anyag fizikai és kémiai tulajdonságainak sokoldalú tervezését.



a)

b)

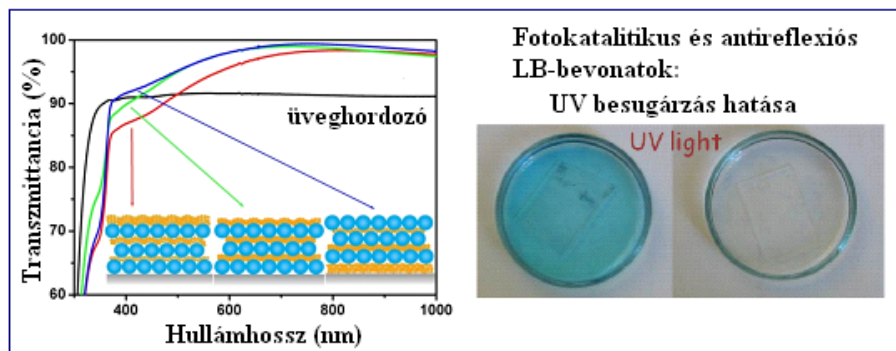
14. ábra

**10 mol% ZnO-ot tartalmazó SiO<sub>2</sub> ultravékony és nanostrukturált bevonata üveghordozón. A bevonat szol-gél technikával készült (AFM (a) és FESEM (b) felvételek). A ZnO méretkvantált nanokristallitok formájában található a mezopórusos szilika mátrixban.**

Az intenzív kutatások eredményeképpen a szerkezet nanoléptékben szabályozható, és előállíthatók teljesen új tulajdonságokkal rendelkező hibrid (szervetlen-szerves) anyagok is.

A szol-gél eljárás egyéb – nanokémiai (pl. LB, LBL) és nanofizikai (porlasztásos permetpírolízis, atomi réteg leválasztás, ALD) – eljárásokkal házítva speciális tulajdonságú, a felhasználás kívánalmainak megfelelő bevonatok, nanomorfológiájú felületek és membránok kialakítását teszik lehetővé.

A fent felsorolt vékony bevonatok előállítására vonatkozó módszerek optimalizálása, a bevonatok szerkezetének, valamint funkcionalitásának megfelelő kialakítása megköveteli a rétegek kiterjedt és rendszeres analitikai, ill. felületanalitikai műszeres vizsgálatát is. A réteg-előállításokat követő, a végső szerkezeti viszonyokat kialakító gyakorta alkalmazott hőkezelések hatásának, az eközben lejátszódó kémiai bomlások, kristályszerkezetbeli módosulat változások, esetlegesen fellépő magas hőmérsékletű szilárdfázisú reakciók nyomon követése termoanalitikai módszerekkel (HT-XRD, TG/DTA-MS, TG-FTIR, Py-GC-MS) szintén igen nagy jelentőséggel bír, különösen a léptéknövelések technológiája és környezetvédelme szempontjából.



15. ábra

#### Multifunkcionális nanorészecskés bevonat üveghordozón.

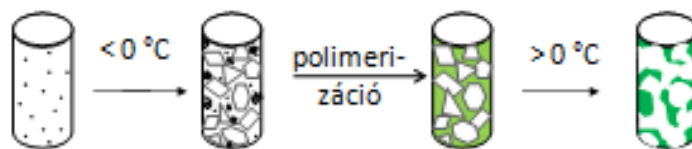
**A bevonat megnöveli a hordozó fényáteresztését és egyben fotokatalitikus (öntisztító) hatású is.**

Új lehetőség kínálkozik funkcionális bevonatok biológiai úton történő létrehozására. Ennek keretében antimikrobiális tulajdonságú ezüst-nanoszerkezeteket kívánunk előállítani fonalgombok felhasználásával.

Felhasználási lehetőségek: szenzorika; orvosbiológia; optoelektronika (napelem, LED, OLED, tranzistorok); katalízis; elválasztástechnika; tapadásgátlás és vízlepergetés.

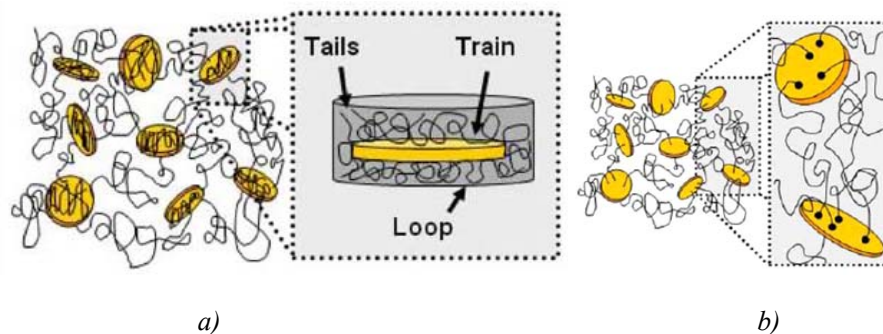
#### *Nanorészecske-kriogél kompozitok környezetvédelmi és orvosbiológiai célokra*

A kriogél kompozitok a polimer gélek rezponzív és shape-memory tulajdonságát párosítják a nanorészecskék nagy fajlagos felületével és sokoldalúságával. Elsősorban szén nanorészecskék, nanocsövek és grafén felhasználását célozzuk meg.



16. ábra  
A kriogél eljárás vázlatja

A kriogélek szupermakroporozitása és szivacszerű rugalmas morfológiája a jégkristályok segítségével kialakítható összefüggő pórusrendszernek köszönhető. A jó diffuzivitás megfelelő mechanikai tulajdonságokkal párosul. Hidrofil és hidrofób polimerekből tetszőleges alakú (monolit, film, stb.) eszközök szintetizálhatók. A monomerek és a szintéziskörülmények megválasztásával a morfológiai és kémiai tulajdonságok hangolhatók.



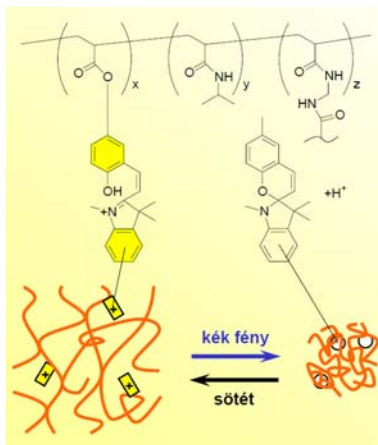
17. ábra  
Fizikai (a) és kémiai (b) kötésekkel hidrogél-mátrixba ágyazott nanorészecskék

A nanorészecskék növelik a mechanikai és kémiai stabilitást és szélesítik a mechanikai, termikus, hang, mágneses, elektromos, stb. ingerrel kiváltható rezponzivitást.

Felhasználási lehetőségek: elválasztástechnika, hatóanyagleadás, katalízis, elektronika, szenzorika

### Nanoméretű, szabályozott és célzott hatóanyag-leadású készítmények fejlesztése

A polimer gélek különleges helyet foglalnak el az intelligens anyagok között. Nincs ugyanis még egy olyan anyagi rendszer, amely ilyen sokféle környezeti hatásra reagálna. A gél nagymértékű térfogatváltozása a környezeti paraméterek (hőmérsékletére, pH) kritikus pont körüli kismérvű változtatásával idézhető elő. Nemcsak a gél térfogata, hanem az összes ettől függő tulajdonsága is hirtelen megváltozik: jelentős mértékben módosulnak pl. a transzport tulajdonságok. A polimer gélek lehetséges felhasználási területe igen széles körű. A humánbiológiai alkalmazásoktól kezdődően – szabályozott hatóanyag leadás, mesterséges szövetek létrehozása – a szennyvíztisztításig igen széles a spektrum.



18. ábra

**Fényérzékeny polimer. Liogéljeinek térfogata drasztikusan csökken fény hatására.**

Az orvoslásban az értékes terápiás szerek felhasználásának hatékonysága jelentősen növelhető az ún. „szabályozott és célzott hatóanyag-leadású” készítmények alkalmazásával. Humánbiológiai alkalmazás esetén a rezponzív tulajdonságok mellett azonban elengedhetetlen, hogy a polimer gélek biokompatibilisek és biológiailag lebonthatók legyenek, ezért kerülhetnek előtérbe a poliaminosav alapú rendszerek.

A projekt célja környezeti hatások változására érzékeny poliaminosav alapú polimerek és gélek szintézise, hatóanyag-leadó rendszerek fejlesztése. A tömbfázisú rendszerek megismerése után a rezponzív rendszerek nano méretekben történő előállítására, melyek potenciálisan a nanomedicina területén kerülhetnek felhasználásra, mely tudományterület jelentősége exponenciálisan növekszik az orvostudományban.

## 7. INNOVÁCIÓS KÉPESSÉG ÉS ERŐFORRÁSOK FEJLESZTÉSE

### 7.1. HUMÁN ERŐFORRÁSIGÉNY, ANNAK BIZTOSÍTÁSA

Az Egyetem magasan képzett, tapasztalt kutatói és oktatói gárdával rendelkezik. A *Nano projektben* különösen magas a nemzetközileg is ismert és elismert kutatók aránya, több tehetséges fiatal kutató már témavezetőként jelenik meg. A kutatásba bevont hallgatók, a doktoranduszok és a doktorjelöltek szerepe meghatározó a kutatói utánpótlás biztosításában. Célkitűzésünk a kutatási területhez kapcsolódó képzés erősítése mind MSc, mind pedig PhD szinten. Ezen a gyorsan fejlődő területen a elengedhetetlen a jelenlegi szaktárgyak<sup>62</sup> tematikájának folyamatos frissítése, valamint a nemzetközi trendeket követő, újabb tárgyak kidolgozása. Hosszabb távon, az érintett karok összefogásával, ezekre a tárgyra épülhet egy interdiszciplináris *Nanotechnológia MSc szakirány*, illetve *Doktori Program*.

A BME-n a magas fokozatszerzési követelmények a doktori képzés szinte valamennyi területén az országos szint feletti nívót deklarálnak.<sup>63</sup> Ez nem csak az egyetemünk által kiadott tudományos fokozat értékét növeli, hanem az egyetemen maradó vagy ide visszatérő oktatók és kutatók szakmai pályájának is erős alapot ad. A fokozatok számának növelése országos szinten általános elvárás a doktori képzéssel szemben. Ez elérhetőnek látszik a követelmények csökkentésével is, egyetemünk azonban fontosabbnak tartja a megfelelő erőforrások biztosítását a színvonalas doktori képzésre. Erre komoly lehetőséget nyújt a kutatóegyetemi státusz, valamint a minőségi képzést támogató újabb pályázati források bevonása. Ezek a többletforrások lehetővé teszik a saját doktori és doktorjelölti ösztöndíjak, illetve posztdoktori álláshelyek létesítését, valamint a doktori képzés infrastrukturális hátterének kibővítését.

A SWOT analízisben utaltunk arra (20. oldal), hogy a nanotechnológia speciális képzettségű és gyakorlati szaktudással rendelkező munkatársaira erős szívóhatást gyakorol a versenyszféra, valamint a külföldi egyetemek és kutató-fejlesztő intézmények által kínált kedvező elhelyezkedési lehetőség. A legkiválóbb fiatal kutatók itthon tartására, valamint a külföldi posztdoktori teljesítmény alapján kiemelkedő eredményességű kutatók hazatérésének elősegítésére a projekt erőforrásainak összevonásával „*start up*” támogatást tervezünk biztosítani. Ez magába foglalja az infrastrukturális fejlesztések anyagi támogatását, az optimális kutatási feltételek biztosítását (laboratóriumi terület, munkakörülmények), az önálló kutatócsoport kialakításának támogatását (PhD ösztöndíjak allokálása, technikai személyzet biztosítása), és egy hazai szinten versenyképes személyi jövedelem biztosítását. A 3-5 év időtartamú, egyedi támogatások alapját a „Nano kiemelt kutatási terület” egyetemi szintű pályázatainak költségvetése, illetve az erre a célra elkülönített része biztosíthatja.

<sup>62</sup> [http://nano.bme.hu/nano\\_targyak](http://nano.bme.hu/nano_targyak)

<sup>63</sup> [http://doktori.bme.hu/phd\\_publ\\_kovetelemenyek/phd\\_fokozatszerzesi\\_kovetelemenyek.html](http://doktori.bme.hu/phd_publ_kovetelemenyek/phd_fokozatszerzesi_kovetelemenyek.html)

## 7.2. INFRASTRUKTURÁLIS FELTÉTELEK FEJLESZTÉSE

Az egyetemen folyó nanotechnológiai kutatásokat nagy mértékben fellendítené egy központi, jól felszerelt nanotechnológia kutatólabor létrehozása. Első lépésként már létrehoztuk a **BME Nanotechnológiai Laboratóriumi Hálózatot**,<sup>64</sup> melynek eszközparkja hozzáférhető a projekt résztvevői számára. Ezáltal az egyetemen belüli kapcsolatrendszer, együttműködés és nem utolsósorban az interdiszciplináris tárgyak oktatása is erősödik.

További érv az egyetemi műszerpark jelentős mértékű fejlesztése mellett, hogy a nanoszerkezetek előállítása és vizsgálata során az esetleges szennyezések és stabilitási problémák elkerülése, illetve a folyamatok gyors kontrollja jobban megoldható egy közeli intézményi háttérrel, mint a minták szállításával külső együttműködő partnerek között, akármilyen jó kapcsolatrendszerben.

A hosszú távon létesítendő központi laboratóriumok kialakítását nagyban elősegítené a Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézzel és a Kémiai Kutatóközponttal közös infrastruktúrafejlesztés a Q2 *épület*ben. Ennek keretében a nanotechnológiai kutatások több fontos területén az MTA intézetekkel közös kutató és mintaelőállító laboratórium kerülne kialakításra. Ez a fejlesztés megteremtené az alapjait egy olyan nanotechnológiai centrum létrehozásának, ahova a korszerű nanotechnológiai eszközpark koncentráltan telepíthető, és egy helyen elérhetővé válik az összes egyetemi és egyetemen kívüli felhasználó részére.

A nanotechnológiai infrastruktúra hosszú távú fejlesztése szempontjából az alábbi laboratóriumok kialakítását és berendezések beszerzését tartjuk indokoltnak:

**Nanolitográfiai laboratórium:** A kutatási potenciál bővülésével hosszabb távon igény formálódik egy széles körben hozzáférhető modern nanolitográfiai laboratórium kialakítására, melyben a nanoelektronikai eszközök rutinszerű előállítását nagyteljesítményű elektronsugár litográfias berendezés, modern párologtató berendezések, mintaelőállítási tiszta tér, és korszerű maratási és felületmegmunkálási technológiák állnak rendelkezésre.

**Pásztázó Hélium Ion Mikroszkóp:** Hagyományos mikroszkopiát forradalmasító új eszköz, ami a transzmissziós elektron mikroszkóp felbontására képes a pásztázó alagút mikroszkóp egyszerű kezelhetősége mellett. Felületi struktúrák vizsgálatát teszi lehetővé nanométer alatti felbontással, rendkívül kis áramok mellett (1femtoA), roncsolásmentesen.

<sup>64</sup> <http://nano.bme.hu>

**Speciális pásztázó mikroszkópia berendezések (SPM):** A rendelkezésre álló hagyományos atomi erő és alagútmikroszkópok speciális funkciót ellátó pásztázó mikroszkópiai berendezésekkel történő bővítésével az atomi szintű feltérképezés és manipuláció mellett különböző speciális tulajdonságok (pl. mágneses tulajdonságok, elektromos potenciál) lokális, nanométeres skálájú mérésére is lehetőség nyílik.

**Transzmissziós elektronmikroszkóp (TEM és HRTEM)** és a minták előkészítéséhez szükséges mikrotóm: A nanotechnológiai kutatások egyik alapvető eszköze a TEM, aminek felbontó- és nagyítóképessége lehetővé teszi a nanoméretű struktúrák tanulmányozását. A jelenleg folyó nanotechnológiai kutatások egyik fő hátráltató tényezője egy TEM hiánya a BME-n. A nagy értékű berendezés beszerzésére az egyes különálló szervezeti egységek képtelenek, így a nagy kutatóközpontok (KKKI, KFKI stb.) berendezéseit kénytelenek a kutatók használni, melyek hozzáférhetősége igen korlátozott.

**Téremissziós Katódú Pásztázó Elektronmikroszkóp (FESEM)** alapú komplex képalkotó és nanomegmunkáló állomás: Ugyan a BME több tanszéke is rendelkezik hagyományos, wolfram katódos pásztázó elektronmikroszkóppal, azonban ezek felbontóképessége csak igen korlátozottan teszi őket képessé nanoszerkezetek vizsgálatára. A téremissziós katód sugárforrás lehetőséget teremt a hagyományos elektronmikroszkópiás felvételek nanométeres vagy akár az alatti felbontásra történő kiterjesztésére, valamint a készülékbe integrált ún. fókuszált ionsugaras megmunkáló (Focused Ion Beam - FIB) segítségével a szilárd anyagokba rendkívüli finomságú alakzatokat marva feltárulnak a felszín alatti struktúrák. A környezeti üzemmód biztosítása, amely szintén költséges lehetőséget adna nem vezető, illetve biológiai eredetű minták, felületek vizsgálatára.

**Repülési Idő Szekunderion-tömegspektrométer (TOF-SIMS):** A modern SIMS berendezések nagy (1-2 atomi rétegnyi) mélységbeli felbontásuk mellett – jól fókuszált ionnyalábok alkalmazásával – már laterális irányban is képesek szubmikronos felbontás elérésére, ami lehetővé teszi alkalmazásukat nanoszerkezetek kutatásánál. Nagy érzékenységüknek köszönhetően képesek a ppm (bizonyos esetekben akár ppb) tartományba eső szennyező vagy adalékatomom kimutatására is. A TOF SIMS berendezések által elérhető igen nagy tömegtartomány lehetővé teszi akár nagy szerves molekulák kimutatását is, ami jól alkalmazható orvosbiológiai kutatások során.

**Röntgen Fotoelektron Spektrométer (XPS)** Az XPS az egyik legalapvetőbb és legszélesebb körben használt felületanalitikai berendezés. Néhány nanométeres mélységbeli felbontása kiválóan alkalmas teszi vékonyrétegek vizsgálatára. Nem csak a mintát alkotó elemek mélységbeli eloszlásának, hanem kémiai kötésiállapotának meghatározására is alkalmas. A modern XPS berendezések (az egyetemen jelenleg elérhető berendezéssel ellentétben) képesek az egyes paraméterek laterális eloszlásának vizsgálatára is.

**Összefoglalva:** A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen egy ilyen méretű, és felszereltségű laborrendszer alapítása ésszerű üzemeltetés mellett európai és világszinten javítaná az Egyetem versenyképességét a nanotechnológia és anyagtudomány területén, mind az alap kutatásban, mind a K+F+I-ben.

### 7.3. TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSA

A **Nano** területen a komoly sikert a széleskörű *ipari hasznosítás* jelentheti igazán. Ennek végigvitele csak *közép- és hosszútávon* képzelhető el. Szükség van hozzá *tőkeerős ipari partnerekre*, akik az általunk már elvégzett alap-, vagy alkalmazott kutatási szakaszokra építve finanszírozzák a *marketingkutatás* alapján specifikált ipari fejlesztési szakaszt (a *prototípusépítést*), a *technológia transzfer*t, a *kísérleti gyártást*, végül az utóbbi eredményeként létrejövő *eszközök (technológiák) bevezetését a tervezett piacra*. Ez a teljes folyamat a piac gyors változása és a konkurencia tevékenysége miatt viszonylag rövid kell, hogy legyen (tipikusan 6-12 hónap), így fokozottan tőkeigényes.

Az ipari hasznosításnál kulcskérdés a partner meggyőzése. Ennek elérésében lényegesnek tartjuk a TÁMOP keretében a **Nano** kiemelt kutatási terület rendelkezésére álló *kapcsolatteremtési keret* szerepét, amit célszerű egyéb forrásokból kiegészíteni. Úgy gondoljuk, hogy ezt a keretet az elért kutatási eredményeink direkt terjesztésére (*disszemináció*) kell felhasználni. Elsősorban tőkeerős potenciális ipari partnereinknél (pl. Siemens, PPG Industries) kell megtalálni az érdekelt kutatócsoportokat, a kutatásaink eredményét ipari kivitelben megvalósítani képes gyártókat, végül a marketing tevékenységet végző hasznosítókat. Ezek ma egy multinacionális cégen belül nem csak szervezetenként, de földrajzilag is elkülönülhetnek, akár kontinentális méretekben. A módszer az ismétlődő szemináriumok szervezésén és olyan vendégelőadások tartásán múlik, ahova előbb utóbb minden terület képviselőjét meghívjuk, vagy külön-külön felkeressük őket. *A siker kizárólag akkor képzelhető el, ha a láncolat minden szemében megtaláljuk a megfelelő személyeket és bizonyítjuk nekik érdekeltységüket a projekt végig végrehajtásában*. Nagy valószínűséggel még így is 3 vagy 6 hónapos K+F szakaszokból áll a teljes folyamat, melyek mindegyikét – beleértve a marketingkutatást is, ami rajtunk kívül áll – sikeresen kell lezárni ahhoz, hogy a következő szakasz finanszírozását elérjük.

Hazai vagy külföldi kis- és középvállalatok esetében a fenti modell nem működik. Itt sokkal inkább a termékeik ismeretében, azok célirányos javítása, kínálatuk bővítése lehet a cél (Pl. Semilab ZRt.), azaz a **Nano** kutatás kezdeti szakaszában már figyelni kell partnereink közvetlen érdekeit, potenciális lehetőségeit. Hátrány, hogy ilyen esetekben a szükséges tőkét a vállalat valószínűleg további konzorciális hazai vagy európai pályázatokból fogja finanszírozni. Előny ugyanakkor az előző bekezdésben említett láncolat egysége, így a meggyőzés egyszerűbb, az elérhető eredmény viszont szűkebb körben jelentős.

A *nanofizika, nanotechnológia, anyagtudomány* területén feltárt igények, lehetséges kutatási irányok interdiszciplinárisak, vagyis több egyetemi karról összeálló kutatócsoportoknak kell a konkrét munkát elvégezniük. Ez azt jelenti, hogy együttműködés jön létre az adott témákban, ez a fajta klaszterképződés pedig az egyetemi szervezeti egységek közötti kohéziót növeli. Hasonló jelleggel lehet elképzelni azt is, hogy a jelentősebb kutatócsoportok a jelenlegi tudásközpontokat erősítik, vagy esetlegesen jövőbeli tudásközpontokat hozzanak létre.

Az innováció során kapott eredmények hasznosításának kiváló terepe az egyetemmel szoros kapcsolatban álló és maradó spin-off cégek létrejötte. Ezeknek a vállalkozásoknak elsődleges feladatuk piaci körülmények között az egyetemi vagy egyetemhez köthető inkubációs feltételek mellett megszületett eredmények hasznosítása. Amennyiben ezen cégeknél az egyetem tulajdoni hányadot tart meg, az egyetem érdekei (hírverés, esetleges bevételek, hivatkozások, további együttműködések stb.) tartósan érvényesülnek, míg a kicsiny vállalkozások a jól csengő BME „brand”-et használhatják. A szimbiózisnak köszönhetően adott feltételek mellett az egyetem szintén hivatkozhat az általa létrehozott spin-off vállalkozásra.

Az eredmények hasznosításának majdnem legkézenfekvőbb területe az oktatás. A tudományos munkában megszerzett tapasztalatokat az oktatásban működő kollégák átadják a hallgatóknak, bevonják őket egy-egy részprobléma megoldásába, így versenyképes tudással szerelhetik fel őket. A nemzetközi mércével mért kimagasló eredmények külföldi elismerést vívnak ki az oktatásban is, a BSc, MSc és PhD képzésünk ennek megfelelően nemzetközi szinten is versenyképesé válhat. Az oktatásban így az eredmények egészen hosszú távon hasznosulnak, megőrizve a BME kutatóegyetemi besorolását.

#### 7.4. KÜLSŐ IPARI ÉS INTÉZMÉNYI KAPCSOLATRENDSZER

A Műegyetem széles körű együttműködést alakított ki a *Nano kiemelt kutatási terület* egy-egy témájához közel álló intézményekkel: akadémiai kutatóintézetekkel, multinacionális cégek kutatás-fejlesztő egységeivel, hazai és külföldi egyetemekkel, valamint néhány kis- és középvállalkozással. A jelenlegi partnerek részletes listája és a közös kutatások, fejlesztések tevékenységi köre elérhető az interneten.<sup>65</sup> Ezen együttműködések fenntartása és továbbfejlesztése minden résztvevő közös érdeke.

Az iparral való közvetlen kapcsolattartás azonban sokszor hiányos, az információáramlás nehézkes. Az ipar döntési szempontrendszere jelentősen eltér attól, mint amit a kutatóhelyeken a kutatási irányok kijelölésekor alkalmaznak. A jelen projekt során a sikeres egyetemi és ipari együttműködés érdekében ezen különböző értékrendszerek között kell megtalálni az összhangot. Ennek elérésére a projekt keretében tervezzük egy időszakosan megrendezésre kerülő egyetemi nanotechnológiai fórum létrehozását: a *nanotechnológiai börze* keretében az ipari döntéshozók, fejlesztők naprakész, gyakorlati, "ipari nyelvre lefordított" információhoz juthatnak a nanotechnológia aktuális trendjeiről, eredményeiről, az egyes egyetemi kutatócsoportok munkájáról, illetve az azokkal történő együttműködési lehetőségekről. A fórum egyik fő célja, hogy közérthetően bemutassa az alapkutatástól, az alkalmazott kutatáson keresztül az ipari hasznosulásig tartó folyamatot, megvilágítsa a hosszú távú innovatív együttműködés gyakorlati jelentőségét.

A fórum társrendezvényeiként az egyes szűkebb kutatási területek szerinti osztásban workshopok is megrendezésre kerülhetnek, amelyek során a közvetlen párbeszéd még inkább kiteljesedhet. Az érdeklődő ipari szakemberek közvetlenül a kutatóknak tehetik fel kérdéseiket, megismerhetik a rendelkezésre álló korszerű technológiákat, potenciált. Az adott időközönként megrendezésre kerülő fórum, és workshopok mellett a folyamatos kapcsolattartást központi, és az egyes kutatócsoportokhoz tartozó *ipari kapcsolattartók* kijelölése teszi teljessé. A kapcsolattartó feladata a már meglévő ipari kapcsolatok ápolása, valamint az új kooperációs lehetőségek feltérképezése.

Az alábbiakban néhány olyan kiemelt együttműködő partnerünket soroljuk fel, akikkel kapcsolatunk hosszú múltra tekint vissza. A velük való kooperáció fenntartása és kibővítése a projekt megvalósításának fontos feltétele.

Az *MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet*e a hazai akadémiai környezetben jelenleg unikális mikro- és nanofabrikációs műszerparkkal rendelkezik. Ennek megfelelően szoros együttműködés van a BME *Nano kiemelt kutatási területén* dolgozó tanszékek és az MFA között, amely eddig is már több közös sikeres projekt végrehajtásához vezetett. Az intézettel alapított közös laboratóriumok: BME-MFA Elektron-Litográfia Laboratórium, BME-MFA Szol-Gél Folyamatok és Kémiai Nanoszerkezetek Laboratóriumok.

<sup>65</sup> <http://nano.bme.hu/partnerek.htm>

A *KFKI Részecske- és Magfizikai Kutató Intézet* által üzemeltetett epitaxiális rétegnövesztő berendezés (MBE) fémes vékonyrétegek nagy tisztaságú és pontosságú kialakításának biztosításával alapvető jelentőségű a az elektron-sugár litográfiával készülő nanoszerkezetek gyártásában.

Az *MTA Szilárdtestfizikai Kutató Intézet*hez fűződő kapcsolatot a BME-n 1993-ben létrehozott közös alacsony hőmérsékleti fizika labor alapozta meg. A kísérleti és elméleti kutatások olyan anyagcsaládok vizsgálatában eredményezett sikeres közös projekteket, mint pl. a szerves molekula-kristályok, a magas hőmérsékleti szupravezetők, a szén nanoszerkezetek, a mágneses multirétegek és granuláris ötvözetek, valamint a különleges mágneses szerkezetű rendszerek széles köre.

A NANO kutatások egyik legfontosabb kedvezményezettje az orvostudomány. A múltban szoros kapcsolat alakult ki a BME és *Semmelweis Egyetem* között az oktatás és a kutatás területén. A BME elsődlegesen a műszaki és természettudományos háttért míg a SOTE ezek élettudományi kutatásokba való alkalmazásukat, illetve a konkrét klinikai, orvostudományi igények megfogalmazását szolgáltatta a kutatási együttműködések keretében. Az orvosi egyetemekkel való kapcsolat továbbra is stratégiai célkitűzése a BME-nek, ugyanis az orvos-biológus (egészségügyi) mérnöki kutatások amelyek itt folynak igénylik a klinikai orvosi háttért.

Az *Eötvös Loránd Tudományegyetem több* tanszékével hosszú tradícióra visszatekintő kutatások folynak. Kémiai Intézet, Fizikai Kémia Tanszék: Nanorészecskék és sejtmembránok kölcsönhatásának tanulmányozása a sejtmembránt modellező monomolekulás lipid (Langmuir) filmekkel. Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék: molekuláris nanoszerkezetek számítógépes ab initio modellezése, spintronikai eszközök elméleti leírása. MTA Peptidkémiai Kutatócsoport: Di- és oligopeptidek szintézise biológiailag lebontható hidrogélek előállítására.

A korszerű technológiák bevezetésében érdekelt, azokat több esetben elsőként szabadalmaztató és bevezető *SIEMENS AG Központi Kutató Laboratóriumával* (Zentral Forschung und Entwicklung, München, Németország) közel húsz éves együttműködése van egyetemünknek a szenzorika (félvezető alapú gázszenzorok, koromérzékelők) és az optikai spektroszkópia (közeli infravörös folyamatirányító berendezés) területén. Több EU projektben léptünk fel közösen további partnerekkel, jelenleg az épületekben alkalmazott intelligens anyagok így nano bevonatok kutatása terén (CLEAR-UP) folynak kutatások. Az intézet meghatározó kutatói, egyetemünkön rendszeres előadásokat tartanak hallgatónknak, doktoranduszainknak a legújabb technológiai trendekről és termékekről. Ez a kétoldalú, közvetlen kapcsolat rendkívüli esélyt ad a nanofizika terén elérendő sikereink hasznosítására.

A *SEMILAB ZRT* (Magyarország) a korszerű félvezető metrológia világszinten versenyképes, és a gazdasági válság ellenére is rendkívüli gyorsan fejlődő hazai képviselője. Közös kutatásokat végzünk, és új berendezéseket fejlesztünk a 32 nm- es ionimplantált technológia foto-modulált reflexióval történő minősítése és a tömbi anyagok külső és belső szubmikronos szennyeződéseinek érintésmentes pásztázó mikroszkópos, valamint pásztázó rezgőkondenzátoros és SPV (felületi fotofeszültség) mérése területén. E téren elért sikereink tehát közvetlenül hasznosulnak

Az egyetemünkkel évtizedek óta a felületanalitika és az anyagminősítés területén együttműködő **GE Hungary** korszerű fényforrásainak fejlesztése során egyre több felületi struktúra, réteg kerül alkalmazásra. A nanofizika és -kémia terén végzett kutatásaink során létrejövő bevonatok, felületi struktúrák hozzájárulhatnak a fényforrások hatásfokának, élettartamának növeléséhez.

A **Robert Bosch GmbH**. lassan közel 10 éve a BME egyik legaktívabb ipari kutatási partnere. A hazánkban elsősorban autó elektronikai gyártással foglalkozó cég, az alkalmazás orientált kutatás-fejlesztésen felül, néhány éve intenzíven érdeklődik és részt is vesz az olyan felületi hibajelenségek alapkutatásában, mint az elektrokémiai migráció vagy az ón whisker növekedés. Ezáltal érdekeltté válnak a nanotechnológia eszköztárát alkalmazó felület minősítési eljárások kutatásában is.

A **Mercedes** kecskeméti gyárnyitása kiváló alkalom az együttműködés kialakítására és elmélyítésére. Az autópárhazban a nanokompozitok felhasználása melletti egyik nyomós érv a hagyományos kompozitokénál jóval hatékonyabb újrahasznosíthatóság. A két jelenleg már működő autógyár (Audi, Suzuki) és beszállítói körük (pl. Jász-Plasztik, Perion, Karsai stb.) már most is a BME legszorosabb partnerei.

Az Egyesült Államok egyik vezető üvegyára, a **PPG Industries** évek óta igénybe veszi egyetemünk felületanalitikai és rétegtechnika know howját a legkorszerűbb rétegezett üvegtermékei minőségének javításához. A közeljövőben kifejlesztésre kerülő új, in-situ mérésekre alkalmas felületanalitikai technológiánk (LIBS) segítségével az üvegvizsgálatokat akár a helyszínen is el lehet végezni így az az együttműködés új dimenzióját nyithatja meg.

**NIMS** (National Institute for Materials Science) Japán: a nanotechnológia területén is világszerte elismert neves japán kutató intézettel néhány éve egyre szorosabbra fűződő BME-s kapcsolatok eredménye a NIMS-nél ösztöndíjas doktoranduszi és poszt doktori munkák számának növekedése.

A **University of Tokyo** Alkalmazott Fizika Tanszékével együttműködésben új funkcionális anyagcsaládok szintetizálásán és minősítésén dolgozunk együtt. A ritka földfémeket tartalmazó anyagok kivételes mágneses optikai tulajdonságaik illetve transzport viselkedésük kísérleti vizsgálatában veszünk részt. A közös kutatómunka, a háttérben rejlő egzotikus spin- és pályarendeződések megértését célozza, és új funkciójú anyagok tervezését teszi lehetővé.

## 7.5. A KIEMELT KUTATÁSI TERÜLETEK KAPCSOLATRENDSZERE

A nanofizika, nanotechnológia, anyagtudomány kiemelt kutatási terület (NNA KKT) a többi négy KKT-vel szoros kapcsolatban van, hiszen a NNA új anyagok és technológiák kifejlesztése révén hozzájárul:

- a megbízhatóbb energia szállításhoz-raktározáshoz-ellátáshoz (Fenntartható energetika KKT),
- a járművek biztonságosabb üzemeltetéséhez és élettartamának növeléséhez (Járműtechnika, közlekedés és logisztika KKT),
- a fenntartható környezet kialakításához, az életminőség növeléséhez és az élővilág megóvásához (Biotechnológia, egészség-, környezetvédelem KKT),
- az infokommunikációs technológiák elterjedéséhez, gyors ipari bevezetéséhez (Intelligens környezet és e-technológiák KKT)

A kiemelt kutatási területekhez fűződő horizontális kapcsolatok néhány elemét az alábbiakban részletesebben is kifejtjük.

### *A Nano és az IKT projektek kapcsolódási pontjai:*

#### *Az IK technológiák segítik a Nano eszközök piacra jutását*

A Nano kutatások eredményeként létrejövő eszközök önmagukban sok esetben nem alkalmazhatók a közvetlen gyakorlatban, csak akkor, ha intelligens környezetben, korszerű informatikai rendszerrel integráltan – beágyazva - valósulnak meg. Ilyen alkalmazás a *nanotechnológiával ellátott intelligens szenzorrendszer*.

A Nano projekt egyik kitérési lehetősége a szenzorika (lásd: 6.1.3, 6.2.3, 6.3.2, 6.3.3). Nanotechnológiai eljárások alkalmazásával különbözőképpen módosíthatjuk egy szenzor fajta karakterisztikáját. Például gázszenzorok esetében a megfelelően választott felületi nanostruktúrák szelektíven változtatják meg a szenzorok érzékenységét a különböző gázokra. Az így létrejött szenzorcsaládot rendszerbe fűzve, jeleiket szimultán lekérdezve és korszerű informatikai eljárásokat (mesterséges neurális háló-ANN, fuzzy logic) alkalmazva a fellépő keresztjeffektusokat ki lehet küszöbölni, és a rendszert be lehet tanítani a valódi gázösszetétel precíz meghatározására. Az ilyen beágyazott rendszereknek óriási jövőjük van.

#### *Az Nano anyagok kiválóan jelenleg bonyolult IKT eljárásokat*

Intelligens környezetek kialakításának jelenlegi gyakorlata a mérés és beavatkozás elvén működik. Sok esetben a *Nano* kutatások eredményeként létrejövő anyagok kiválthatják az ilyen rendszereket. Jó példa erre az üveg felületén kialakítható öntisztuló, szupernedvesítő réteg (félvezető nanobevonat), vagy az épületek fényviszonyainak automatikus beállítása megfelelő nanostruktúrák alkalmazásával. Az ilyen kutatások az EU-nál is preferáltan vannak jelen (pl. FP7-ClearUp).

### Atomi szintű modellezés, kvantum-informatikai kutatások

A *Nano* projektben kutatott új nanoelektronikai struktúrák (lásd: 6.1.1, 6.1.2, 6.1.3) az IKT területén forradalmian új számítástechnikai eszközökhöz és technológiákhoz vezethetnek. A grafén alapú elektronika mára elérhető közelségbe került, a nanoméretű memrisztorok kiválthatják a tranzisztorok funkcióit, a spin-állapoton keresztül megvalósított qubit a kvantum számítógépek alapegysége lehet. Ezek elméleti és kísérleti vizsgálata a fizika és a műszaki tudomány fejlődése között olyan pozitív visszacsatolást eredményezhet, amihez hasonlót a mikroelektronika elmúlt 30 évének fejlődése során már megtapasztalhattunk.

### *A Nano és a FE projektek kapcsolódási pontjai:*

#### Hatékonyabb energia termelés, szállítás, raktározás nanoanyagok és nanotechnológia segítségével

A projektek közötti együttműködés egyik lehetséges területe a nanoanyagok meglévő és újonnan kifejlesztésre kerülő energia termelési, szállítási és raktározási eszközökben való felhasználása. Jelenleg is számos kutatás folyik például szén nanocsövek energiatermelésre történő felhasználására. Ezen nanorészecskék a ruházat szövetébe illetve kisméretű személyi generátorként képesek lehetnek a test természetes mozgása során villamos energiát előállítani, így kiválthatják a jelenleg akkumulátorral üzemeltetett személyes eszközök energiaellátását. További lehetőség a nanorészecskék üzemanyagcellákban történő alkalmazása. Az üzemanyagcellák egyik kulcsfontosságú eleme a féligáteresztő membrán, ezen membrán megvalósításához is magas potenciállal rendelkeznek a különböző nanorészecskék.

A nagyfeszültségű villamos távvezetékek korszerű, növelt teherbírású maganyagai készülhetnek olyan speciális polimer kompozitból, mely a nanoadalékolásnak köszönhetően biztosítja az előírt tulajdonságokat.

#### Fenntartható fejlődés nanoanyagok segítségével

A fenntartható fejlődés egyik alappillére lehet a különböző nanoanyagok akár mindennapi termékekben való használata. Nanokompozitok használatával jelentős mennyiségű alapanyag takarítható meg, a javuló mechanikai tulajdonságok, magasabb teherbírás miatt, e mellett ezen anyagok reciklálása is jóval hatékonyabb lehet, mint a hagyományos kompozitoké. A modern, megújuló energiát felhasználó erőművek, mint a szélturbinák jelentős mértékben támaszkodnak ma is kompozit anyagokra, a nanoanyagok e téren történő használata is rendkívül kedvező lehet: a szélkerekek tömegének csökkentésével hatékonyságuk tovább javítható, megbízhatóságuk tovább növelhető.

### *A Nano és a JKL projektek kapcsolódási pontjai:*

A járműtechnikai alkalmazások és az NNA KKT hatékonyan és kölcsönösen segítik egymást. Például, egyes nanorészecskékkel elérhető, hogy a hagyományosan beépített anyag tűzállóvá váljon, ami a járműtechnikában (repülőgépek, gépkocsik stb.) nyer potenciális alkalmazásokat. A nanoszerkezetű

anyagok, és az ilyen irányú kutatások révén létrejövő technológiákkal megnövelt szilárdságú anyagok hozhatók létre. A megnövelt szilárdság pedig a teherviselő szerkezetek súlyának csökkenéséhez vezet. Nanoszerkezetű anyagok körütekintő beépítésével tehát csökkenthető a járművek fogyasztása, ezáltal károsanyag-kibocsátása is. A nanoszerkezetű anyagok tehát ilyen értelemben a fenntartható fejlődés és fenntartható energetika, mint kutatási területtel is szoros kapcsolatban állnak. További lehetőséget kínálnak a nanostruktúrált felületi bevonatok. Ilyen bevonatok segítségével például biztonságosabb, karcmentes szélvédőket, nagyobb terhelhetőségű és élettartamú csapágyakat, kisebb súrlódási veszteségű motorokat lehet előállítani, ami mind-mind nagyobb élettartamú, biztonságosabb, kisebb fogyasztású járművekhez vezet. A járműiparban napjainkban is rendkívül sok elektronikai eszköz kerül felhasználásra, a nanoelektronika ezen eszközöket (pl. motorvezérlés, menetstabilizáló elektronika, különböző szenzorok) is forradalmasíthatja. A nanoelektronikai eszközök megjelenése egyre közelebb vihet az intelligens gépjárművek megalkotásához.

#### *A Nano és a BIO projektek kapcsolódási pontjai:*

A nanotechnológiai és az élettudományok területén végzett kutatások rendkívüli mértékben összefonódtak. Tulajdonképpen a legkomplexebb funkcionalitású nanoszerkezetek és nanogépezetek, amelyek működését biokémiai folyamatok nehezen utolérhető pontossággal szabályozzák, biológiai eredetűek. Ennek megfelelően a biológiai nanorendszerek sok esetben inspirációt szolgáltattak nanotechnológiai fejlesztéseknek. Ugyanakkor a nanotudományok vizsgálati arzenálja nélkül, pl. a nagyfelbontású mikroszkópiás módszerek, a nanoméretű biológiai rendszerek működésének megértése nem lett volna lehetséges. Jelenleg a NANO kutatások egyik legátütőbb alkalmazási területét képezik az orvostudományok (nanosebészet, célzott gyógyszer leadás, implantumok, orvosi diagnosztika, stb.) illetve a környezetvédelem (talaj és víz remediálás). Azaz a nanotudományok és a biotechnológia, egészség-, környezetvédelem területén folyó kutatások összefonódását sok esetben az orvosbiológiai vagy környezeti alkalmazások szolgáltatták. Emellett azonban a biológiai eredetű komponensek felhasználása új funkcionalitású nanoszerkezetek szintézisére is jelentős kapcsolódási pont lehet az említett kiemelt területek között.

A nanotudományok és a biotechnológia, egészség-, környezetvédelem területén folyó kutatások kapcsolódása jól jellemezhető a nanobioszenzorok fejlesztésén keresztül. A szenzorok szelektív molekuláris felismerési funkcióját sok esetben biológiai eredetű receptorok biztosítják. A biológiai receptorok funkcionalitását nanoméretű jelátalakítókkal összekapcsolva a legérzékenyebb, akár egy molekula detektálására is alkalmas, analitikai módszerek és érzékelők kifejlesztéséhez vezetett. Ezek segítségével viszont további ismeretek nyerhetők élettani folyamatokról akár in vivo körülmények között, illetve új lehetőség nyílnak diagnosztikai információt hordozó biomarkerek meghatározására.

Az egyetem NANO és BIO kiemelt kutatási területeinek jelentősebb kapcsolódási pontjai:

- Biokompatibilis és hatóanyagleadó bevonatok
- (Bio)Kémiai érzékelés funkcionalizált nanoszerkezetekkel
- Funkcionális és rezponzív nanoanyagok szintézis

## 8. FORRÁSIGÉNY, FINANSZÍROZÁS, PÉNZÜGYI TERV

### 8.1. A TERVEZETT FEJLESZTÉSEK KÖLTSÉGEINEK BECSLÉSE

A nanotechnológia és anyagtudomány világszinten kiemelkedő kutatóközpontjai a nagy, nagyságrendileg 500.000 € értékű berendezések számára egy különálló, ún. közös használatú laboratóriumot vagy –hálózatot (angol kifejezéssel *core facility*) tartanak fenn.

Ebben a szervezeti modellben a központi laboratórium különálló szervezeti egység, amelynek célja, hogy a legmodernebb eszközökkel és szakszerű személyzettel kiszolgálja az egyes kutatócsoportok igényeit. Az ilyen megoldás előnyei közül csak a legfontosabbakat kiemelve:

- csekély redundancia az eszközállományban,
- nincs preferencia a partner tanszékek, kutatócsoportok között, így versenyhelyzet helyett a kooperációt erősíti,
- a partner tanszékek a laboratórium stabil hátterére mint kompetenciára hivatkozhatnak,
- szakértő, kizárólag a laboratóriumi feladatokat ellátó személyzet,
- átlátható működés.

Ilyen modell működik például a Semmelweis Egyetemen (pl.: Microarray Core Facility, <http://www.dgci.sote.hu/microarray>), melynek sikeressége követendő példaként szolgálhat más egyetemeknek, intézeteknek.

A nanotechnológia esetében egy ilyen modern laboratórium felépítéséhez, felszereléséhez kb. 1,5 Mrd Ft szükséges. Ekkora összeget az Egyetem Önállóan Gazdálkodó Szervezeti Egységei külön-külön nem képesek előteremteni, ezért központi forrásból, egyetemi szintű összefogással és pályázat benyújtásával válik lehetségessé ennek a távlati célnak a megvalósítása.

## 8.2. A LEHETSÉGES FORRÁSOK AZONOSÍTÁSA

A Nano kutatási terület tervezett fejlesztéseinek forrásai az alábbiak lehetnek:

- Nemzetközi pályázatok;
- Hazai pályázatok;
- Ipari megrendelések teljesítése;
- Költségvetési támogatás.

A nemzetközi pályázatok jelentősen hozzájárulhatnak az innovációs potenciál és az erőforrások fejlesztéséhez. Elsődlegesek az EU K+F keretprogramjai: a nyertes pályázatok fedezetet adnak fiatal kutatók alkalmazásához, eszközbeszerzésekhez, biztosítják továbbá a nemzetközi tudástranszfert. A *Nano kiemelt kutatási terület* középtávú célkitűzéseit jelentősen támogatja a 7. Keretprogram két sikeres ERC grantja<sup>66</sup> összesen 2.73 millió Euro támogatással a 2011-2016 időszakra. Az ugyancsak EU forrású ENIAC projekt<sup>67</sup> BME része 648 ezer Euro. Az EU következő, 8. Keretprogramjának Nanotech-Material-Manufacturing kutatási prioritása a terület számára további újabb lehetőségeket jelent.

A rövidebb futamidejű hazai pályázatok közül számos kifejezetten a K+F potenciál fejlesztésének támogatására irányul. Támogatás szerezhető laborfejlesztésre, a kutatói utánpótlás időleges foglalkoztatására. A tematikus kiírások keretében pedig egy-egy konkrét részterület műveléshez kapcsolódva fedezhető a kutatás működési költsége, illetve kisebb mértékben az eszközbeszerzés. A *Nano kiemelt kutatási terület* rövid távú OTKA támogatásai közül kiemelkedő a „Gazdaságban hasznosuló innovációt megalapozó alap kutatás támogatása” fordulóban elnyert 137 MFt támogatás.<sup>68</sup>

A legrugalmasabb forrásfelhasználást a külső megrendelések teljesítése biztosítja (ha vannak ilyenek): a bevételek az egyetemi és a kari hozzájárulást követően – a gazdálkodási szabályok betartásával – szabadon felhasználhatók. Nyilván tekintetbe kell venni, hogy az ilyen bevételek elsősorban a munkát végzőkre költendőek, mégis itt jobban adott (értsd: nem korlátozott) az átcsoportosítás lehetősége, vagyis a fejlesztések is finanszírozhatók.

Költségvetési K+F fejlesztési céltámogatásokkal – a kutatóegyetemi TÁMOP pályázaton túl – egyelőre nem nagyon lehet számolni. Ennek keretében a 2010-13 időszakra a *Nano* szakterületen a humán erőforrás fejlesztésre 190 MFt, míg beruházásokra 206 MFt áll rendelkezésre.

---

<sup>66</sup> CooPairEnt (témavezető: Dr. Csonka Szabolcs), <http://nano.bme.hu/coopair.html> ,  
Sylo (témavezető: Dr. Simon Ferenc), <http://nano.bme.hu/sylo.html> .

<sup>67</sup> ENIAC – Nanoelektronikán alapuló diagnosztikai platformok (BME koordinátor: Dr. Gyurcsányi E. Róbert)

<sup>68</sup> OTKA CNK 80911 (témavezető: Dr. Mihály György) [http://nano.bme.hu/otka\\_spintronika.html](http://nano.bme.hu/otka_spintronika.html) .

## 9. ÜTEMEZÉS

A *Nano* kiemelt kutatási területen a legfontosabb általános *rövidtávú cél (1-3 év)* a különböző tanszékeken működő infrastruktúrák összehangolása, valamint a BME Nanotechnológiai Laboratóriumi Hálózatot keretében minél szorosabb együttműködés kialakítása az egyes kutatási területek és laboratóriumok között. Szintén ezen az időskálán tervezzük a TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 pályázatban szereplő nanotechnológiai beruházások megvalósítását, az új műszerek beüzemelését és rutinszerű használatuk kialakítását, valamint az infrastrukturális fejlesztés segítségével elért első eredmények publikálását. *Középtávon (3-6 év)* az egyes kutatólaboratóriumok működésének összehangolása mellett szükségesnek tartjuk egy nanotechnológiai központ kialakítását, melyre kiváló lehetőséget nyújtana egy BME-MTA közös laboratórium kialakítása a Q2 épületben. A rövid és középtávú célok sikeres megvalósítása egyúttal megalapozza, hogy *hosszútávon (6-10 év)* a nanotechnológiai kutatások széles palettáját lefedő kutatási infrastruktúra alakuljon ki, és a BME néhány a területen felzárkózzon a világ vezető nanotechnológiai központjaihoz.

A fenti általános célkitűzések mellett az egyes kutatási területeken az alábbi célok megvalósítását tervezzük:

### Nanoelektronika:

Ezen kutatási területen *rövid távon* különböző építőelemekből (félvezető nanovezetékek, szén nanocsövek, grafén, szerves molekulák, szupravezető és ferromágneses fémek, funkcionális magnetooptikai anyagok) nanoszerkezeteket gyártunk kialakítva az optimális mintaelőállítási módszereket. Ezzel párhuzamosan kiépítünk egy olyan alacsony hőmérsékletű mérőrendszert, melynek segítségével elkezdődhet a nanolitográfiaival előállított vagy egyéb (pl. atomi szintű nanopozicionálási) módszerekkel létrehozott nanoszerkezetek elektrontranszportjának részletes vizsgálata. A kutatás párhuzamosan több rendszeren folyik különös tekintettel a félvezető nanovezetékekből és grafénből kialakított egyelektron-tranzisztorok kialakítására, spintronikai működést ellátó rendszerek fejlesztésére és komplex szerves molekulák megbízható kontaktálási technikáinak kifejlesztésére. *Középtávon* a perspektivikus rendszerek kiválasztásával célzott, közvetlenül a felhasználás irányába mutató kutatásokat végzünk konkrét spintronikai, kvantumelektronikai és molekuláris elektronikai eszközökön. Erre alapozva *hosszútávon* koncepcionálisan új, atomi méretskálán működő, széles körben hasznosítható nanoelektronikai eszközök kerülnek kifejlesztésre.

### Felületi nanostrukturák:

A felületi nanostrukturák vizsgálatát, vizsgálati eljárásait magában foglaló kutatási terület *rövid távon (1-3 év)* olyan mérési eljárások alkalmazását célozza meg, amelyek alkalmazhatók a legkülönbözőbb feladatokra, de elsősorban a félvezetők minőségét, és elektronikus készülékek hibajelenségeit befolyásoló folyamatok azonosítására. Ilyen mérési módszerek például a pásztázószondás és elektronmikroszkópia, a felületanalitikai eljárások (pl.: Auger-elektron spektroszkópia), valamint az

optikai módszerek közül a LIBS (lézerindukált letörési spektroszkópia) és a fotomodulált reflexiómérő. Ezen műszerek egy része beszerzésének anyagi forrását a TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 pályázat biztosítja. **Középtávon (3-6 év)** elsődleges cél a jelenleg is aktívan kutatott hibajelenségek és az elektronikus eszközök működésének kritikus paramétereinek felderítése.

**Hosszú távon (6-10 év)** a jövő elektronikus készülékeinek, valamint a félvezető eszközök jövőjét jelentő molekuláris eszközök gyártási megbízhatóságát és minőségét (megfelelően hosszú élettartamát, hibamentes működését) biztosító mérési eljárások kerülnek kidolgozásra és/vagy sor kerül a jelenlegi technológiák továbbfejlesztésre a jövő követelményei szerint.

A mérési eljárásokhoz köthető altemák minden időtávon mérés technikai háttérrel szolgálják a stratégiai dokumentumban szereplő egyéb témákat is.

#### **Szerkezeti és funkcionális anyagok:**

A kutatás fő iránya rövid távon (1-3 év) arra irányul, hogy a nanoadalékok tulajdonságjavító (elsősorban mechanika, tribológia, lángállóság, diffúzió és optika terén) potenciálját feltérképezzük és ennek ismeretében alkalmas hibridizációs eljárásokat dolgozzunk ki. A "hibridizáció" mind a polimerekre, mind pedig az adalékokra (nano/mikro) kiterjedne. A másik rövidtávú fő kutatási irány azon funkcionális tulajdonságok feltárására irányul, amelyek a nanoadalékolás révén egyediek (például törésmutató), vagy általa a legcélszerűbben beállíthatók, szabályozhatók. A fém és kerámia bioanyagok szakterületén a nanoszerkezethez kapcsolódó, a biofunkcionalitást fokozó felületmódosítások új összefüggéseit kutatjuk, új eljárásokat és azok optimális alkalmazási feltételeit dolgozzuk ki. A felületmódosítási eljárásokat elektrokémiai, gyorshevítési és mikroforgácsolási eljárásokra alapozzuk.

Középtávon (3-6 év) a szerkezet és tulajdonságok közötti összefüggések feltárása és előrejelzése a cél. Ehhez – egyebek között – a neuronális hálószerkezetek és a molekuláris dinamikai szimuláció adta lehetőségeket figyelembe kívánjuk venni. Ezen túlmenően középtávon nanoadalékolással optimált szerkezeti műanyagok gyártását kívánjuk – alkalmas kooperációban – megvalósítani. A fém és kerámia bioanyagok esetében az endovaszkuláris, az ortopédiai és a fogászati implantátumok és bevonataik mikroszerkezetének szerepét és az élő szervezettel való kölcsönhatását tanulmányozzuk. Elemezzük a mikromegmunkálással végzett felület-előkészítés hatását a polimer bevonatok és a kerámiabevonatok tapadására és a bevonatok tartósságára. Külön figyelmet szentelünk az implantátumok és a terápiás eszközeik mikrohegesztett kötéseinek.

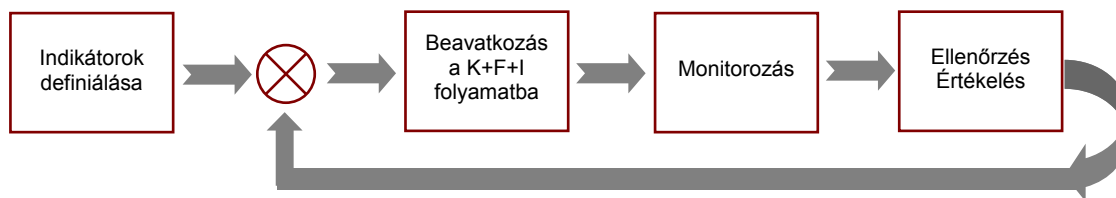
Hosszú távon (6-10 év) a jelen program keretében kifejlesztett új anyagok ipari és orvosi alkalmazását (pl. külső igénybevétel hatására alakját változtató anyagok sztentként való bevezetése) tekintjük feladatunknak. Ezen kívül célunk a kidolgozott kompozit rendszerek szerkezeti anyagként és optoelektronikai alkatrészként való alkalmazása is. A felületkezelt vagy bevonatos endovaszkuláris implantátumok körében az alkalmazást teljes körben biztosító, a tanúsítvánnyal rendelkező hazai gyártás teljes körű biztosítása a cél. A mikro/nanokompozit, biokerámia implantátumok és az élő szervezet közötti kölcsönhatás jellemzőinek átfogó meghatározásával a szóban forgó implantátumok növelt szívósságú és élettartamú új generációjának kifejlesztésére törekszünk.

## 10. MONITOROZÁS

A teljesítmények mérése és az elvárások számonkérése megfelelő informatikai háttér mellett<sup>69</sup> a tanszéki, kari és egyetemi szint mellett a Kutatóegyetemi Program kiemelt kutatási területeire bontva is elvégezhető. A monitorozás a három egyetemi alaptevékenység objektív mérőszámok alapján történő értékelésén keresztül történik:

- **oktatás:** kontakt óra, témavezetés, tananyagfejlesztés,
- **kutatás:** publikáció, szabadalom, műszaki és művészeti alkotás,
- **pályázatok, ipari kapcsolatok:** projekt (vezetés, részvétel), szerződéses bevétel.

A stratégia megvalósítása konkrét futamidejű kutatási projektek keresztül történik, melyek nyomon követésére a BME egységes eljárást alkalmaz. Minden projektnek (pályázati vagy külső megbízási) van egy indikátor-rendszere, ami a teljesítési ellenőrzés alapjául szolgál. A projektek működésének ellenőrzési folyamatát a 19. ábra szemlélteti.



19. ábra  
A K+F+I projekt ellenőrzési folyamata

A monitorozási rendszer alkalmazása garantálja a minőségi teljesítést és a tanulságok alapján egyúttal lehetővé teszi a rendszer továbbfejlesztését a későbbi projektekben. A monitorozás szükségessége egy adott projekt életciklusában több ponton és több tekintetben merül fel:

- Átláthatóság biztosítása finanszírozó felé a beszámolási kötelezettségek teljesítésének formájában.
- A monitorozás alapozza meg az intézményi K+F+I politika irányvonalak feltérképezését, kialakítását és fejlesztését.
- A projekt teljesítésére vonatkozó kockázatok kezelése a minőségi kontrollon valósul meg, megeremtve a lehetőséget a beavatkozásra.
- Új folyamatvezérlési kultúrát és fürgébb változásmenedzsmentet eredményez.
- Az intézményi „policy” megerősítése, a program célok eléréséhez, valamint a projektmunkához kapcsolódó kultúra kialakításának illetve változtatásának elősegítése.

<sup>69</sup>NEPTUN rendszer, BME Publikációs Adattár, <http://www.mycite.omikk.bme.hu/>, valamint a projektek gazdasági nyilvántartása

- Az eredmények megismertetése, bemutatása.

A stratégiában megfogalmazott célkitűzések és feladatok eredményes teljesülését többféle indikátorral lehet jellemezni, mely indikátorokat rendszeresen célszerű vizsgálni. Indikátornak olyan mennyiségeket, mutatókat célszerű választani, melyek könnyen számszerűsíthető és a projekt sikeres megvalósulásának objektív mutatószámai.

A **Nano projekt** szakmai sajátosságai – az erős alapkutatási háttér, high-tech technológiák kifejlesztése, széles körű alkalmazási lehetőségek – az alábbi következő indikátorok folyamatos (éves gyakoriságú) monitorozása látszik célszerűnek, mindaddig, amíg egy újabb stratégia más indikátorokat és monitoring rendszert nem határoz meg:

- 1) publikációs tevékenység:
  - a) nívós (szakterülettől függően magas impaktú<sup>70</sup>) nemzetközi publikációk száma,
  - b) publikációk összegzett impakt faktora,
  - c) a publikációkra történő hivatkozások száma;
- 2) innovációs tevékenység:
  - a) benyújtott és megvalósult szabadalmak,
  - b) új kísérleti berendezések,
  - c) üzemi, félüzemi berendezések;
- 3) infrastrukturális fejlesztés: új beszerzésű, a Nano terület kutatási-fejlesztési tevékenységét szolgáló eszközök értéke
- 4) K+F aktivitás: a Nano területen elnyert pályázatok, és szerződések volumene
- 5) humán erőforrás-fejlesztés és tehetséggondozás:
  - a) a területhez kapcsolódó szakok képzéseiben részt vevő BSc és MSc hallgatók száma
  - b) a releváns doktori iskolák<sup>71</sup> képzéseiben részt vevő doktoranduszok száma
  - c) A Nano kiemelt kutatási területen született BSc és MSc diplomák száma,
  - d) A Nano kiemelt kutatási területen született PhD értekezések száma,
  - e) a Nano kiemelt kutatási területen dolgozó tudományos fokozattal rendelkező főállású oktatók és kutatók száma,
- 6) kapcsolatépítés: K+F tevékenységbe bevont együttműködő partnerek száma, az együttműködések volumene.

Az évenkénti gyakorisággal tervezett önértékelések a fenti mutatók alapján minősítik a projekt egészének előrehaladását, illetve az egyes résztémák teljesítményét. Középtávon célszerű egy nemzetközi Tudományos Tanácsadó Bizottság (Advisory Board) létrehozása, amely nemzetközi környezetbe ágyazva is értékelné a projektet. A bizottság az eredmények/hiányosságok alapján javasolhatja a kutatási témák átformálást, új stratégiai kutatási irányok bevonását, a nemzetközi trendekhez való illeszkedést, az erőforrások koncentrálását egy-egy sikeres fókuszterületre.

<sup>70</sup> Impakt faktor határok: műszaki tudományok: IF>0, fizika: IF>1, kémia: IF>2, biológia: IF>3.

<sup>71</sup> [http://doktori.bme.hu/doktori\\_iskolak.htm](http://doktori.bme.hu/doktori_iskolak.htm)

## 11. HATÁSELEMZÉS

### 11.1. KUTATÁS ÉS OKTATÁS

A BME tevékenysége három pilléren alapszik: oktatás, kutatás és fejlesztés. Az oktatás terén középpontban van a képzés színvonala, illetve a végzett mérnökök az iparban hasznos elméleti és gyakorlati felkészültségi és tudás szintje. A kutatás terén alapvető a minősítési minőség és mennyiség a doktori programjaiban, illetve a színvonalas publikációkban. Ez a mérőrendszer a fejlesztésben jórészt a született know-how és alkalmazási halmaz számában és innovatív minőségében mérhető. A kutatási projekt hatására az eredmény látható lesz egyén, kutatócsoport és egyetemi, továbbá hazai, európai és nemzetközi szinteken, természetesen más és más formában.

Egyetemi szinten várt hatás:

- Egyetemi fórum létrejötte a *Nano* kutatási eredmények bemutatására
- A *Nanotechnológiai Laboratóriumi Hálózat* hatékony működtetése
- Nemzetközi színvonalú tudományos eredmények
- Ipari kapcsolatok bővülése, új bevételszerző tevékenységek megjelenése
- EU szinten is versenyképes pályázati potenciál

Stratégiájánkban kiemelt helyet foglal el az utánpótlás nevelés, melyet abban az esetben lehet hatékonyan megvalósítani, ha az elért kutatási eredményeket fokozatosan beépítjük az oktatásba. Ennek eredményeképpen a hallgatók korszerű ismeretekhez jutnak, így megalapozzák a jövőbeni hatékony és eredményes kutatási és fejlesztési tevékenységet. Az ipari megrendelők felé a BME ez elért kutatási eredményeket felhasználva lényegesen magasabb szintű K+F+I szolgáltatások nyújtására lesz képes, hatékony megoldásokat és korszerű módszereket tud majd kidolgozni.

A kutatási terület sikerét hosszabb távon a megfelelő mennyiségű és minőségű utánpótlás biztosítja. Ennek három szintje:

- középszintű képzettséggel rendelkező, az új megoldásokra és innovációra nyitott szakembereket megfelelő létszámban kibocsátó BSc szintű képzés,
- magas szintű képzettséggel rendelkező, önálló tervezői-fejlesztői tevékenységre alkalmas, az innovációra nyitott mérnököket, megfelelő létszámban kibocsátó MSc szintű képzés,
- önálló kutató-fejlesztő tevékenységre alkalmas szakembereket kibocsátó doktori és szakirányú továbbképzések.

A kutatási projektben résztvevő karok összefogása lehetővé teszi – hazánkban elsőként – a kutató-fejlesztő szakmérnöki képzések keretén belül a *Nanotechnológus szakmérnöki képzés* beindítására.

## 11.2. INNOVÁCIÓS LÁNC

A kutatási projektek eredményeképpen létrejövő korszerű megoldások, új eszközök és berendezések, valamint tervezési módszerek és tudásbázis létrejöttének eredményei a teljes nemzetgazdasági innovációs láncban éreztethetik majd hatásukat. A kifejlesztett új megoldások gyártásba illesztése, ill. az új módszerek alkalmazása révén nyert tapasztalatok új kutatási irányok megfogalmazását teszik/tehetik szükségessé, ill. lehetővé, így érvényesítve a kutatóhelyek és az alkalmazók közötti visszacsatolási lehetőségeket. A gazdasági szereplőkkel folytatott folyamatos párbeszéd, új megoldások kifejlesztésére sarkall, mely fő mozgatórugója a K+F+I tevékenységnek. A kutatási projekt legfontosabb hatása a *versenyképességet és hatékonyságot növelő nanotechnológiai termékeken* keresztül jelenik meg.

Az ipari együttműködés hatékonyságának növelésére a projekt keretében tervezzük egy időszakosan *nanotechnológiai börze* létrehozását (7.4 fejezet). A börze lehetőséget biztosít arra, hogy az ipari döntéshozók naprakész információhoz jussanak a nanotechnológia aktuális trendjeiről, és ezen belül *Nano projekt* keretében elért eredmények hasznosítási lehetőségeiről. Ez a fórum lehetőséget ad arra, hogy a konkrét példákon mutassuk be az alapkutatástól, az alkalmazott kutatáson keresztül az ipari hasznosulásig tartó folyamatot.

## 12. FOGALOMTÁR

Mérési és preparációs módszerek (rövidítések)

AFM, ill. STM	atomi erő, ill. pásztázó alagút mikroszkóp
ALD	atomi réteg leválasztás
LIBS	lézeres gerjesztéssel létrehozott kisülési (letörési) spektroszkóp
(FE)SEM	(Téremissziós) pásztázó elektronmikroszkóp
HT-XRD	magas-hőmérsékletű röntgendiffrakció
LB-technika	Langmuir-Blodget-technika
LBL	layer-by-layer, azaz rétegenkénti építkezés
Py-GC-MS	pillanatpirolizátorhoz kapcsolt gázkromatográfiás pirolízis-gázelemzés tömegspektroszkópiás detektorral
SPM	Pásztázószondás mikroszkóp
TEM, ill. HRTEM	Transzmissziós elektronmikroszkóp, ill. nagy felbontású változata
SIMS	Szekunderion-tömegspektroszkóp
TG-FTIR	termogravimetriás analizátorhoz on-line csatolt Fourier-transzformációs infravörös spektrometriás in situ gázelemzés
TG/DTA-MS	szimultán termogravimetriás és differenciál termoanalitikai berendezéshez on-line csatolt in situ fejlődőgáz-elemzés
XPS	Röntgensugaras fotoelektron-spektroszkópia
AES	Auger-elektron spektroszkópia
TOF	Repülési idő (spektroszkópiában)
MOKE	magnetooptikai Kerr-effektus

„Buzzwords”

nano	SI előtag, az egész $10^9$ -ed része. A dokumentumban a Nanofizika, nanotechnológia, anyagtudomány Kiemelt Kutatási Terület rövidített neve is.  Tudományterület előtagjaként azt jelenti, hogy az adott nano tudományág a nanométeres mérettartomány hatásait vizsgálja. Pl.: nanomedicina, nanoelektronika stb.
nanotudomány	A nagyságrendben nanométeres mérettartomány, és az ilyen skálán lejátszódó folyamatok vizsgálatát célul kitűző, nagyban interdiszciplináris tudományág.
nanotechnológia	Olyan technológiák összefoglaló neve, amelyek felhasználják a nanotudomány eredményeit, abból a célból, hogy előremutató eszközöket, eljárásokat fejlesszen ki.
anyagtudomány	Az (elsősorban szilárd és élettelen) anyagok vizsgálatával, tulajdonságaik módosításával, tervezésével és célorientált létrehozásával foglalkozó komplex tudományág.
sztent	Emberi érbe ültetett implantátum.
whisker	Mikrométer nagyságrendjében fejlődő, fém felületből kiinduló túkristály
kompozit	Olyan összetett anyagok, amelyek két vagy több különböző szerkezetű és makro-, mikro- vagy nanoméreteken elkülönülő anyagkombinációkból épülnek fel a hasznos tulajdonságok kiemelése és a káros tulajdonságok csökkentése céljából.
lab-on-chip	Olyan eszköz, amely több laboratóriumi feladatot egyetlen chipen valósít meg.
litográfia	Felületi mintázatkészítési eljárások gyűjtőneve.
GMR	Óriás mágneses ellenállás (Giant Magneto-resistance)
spin-szelep	Vékony fémréteggel elválasztott 2 nanoméretű mágneses domén. A rajtuk keresztül folyó áram lecsökken, ha a domének mágnesezését egyirányúból ellentétesbe kapcsoljuk.
DNS	dezoxiribonukleinsav, genetikai információt hordozó óriásmolekula
MEMS és NEMS	mikro-elektromechanikus rendszer vagy nano-elektromechanikus rendszer.
qubit vagy q-bit	kvantum-bit, a kvantuminformatica alapegysége.

önszerveződés	Olyan folyamat, mely során egy kezdeti állapotban rendezetlen rendszer rendezetté válik külső hatás közreműködése nélkül. Az energiamegmaradás alapvető törvényének kézzelfogható megtestesülése.
CNT, SWCNT, MWCNT	Szén nanocső (carbon nanotube) – egyfalú (single-walled), vagy többfalú (multi-walled). A nanotudomány és – technológia perspektivikus anyaga, szén atomokból álló (grafén) síkok csővé tekeredett változata.
LED, OLED	Fénykibocsájtó dióda (light emitting diode) és szerves fénykibocsájtó dióda (organic light emitting diode)
mágneses domén	Az anyag jellemző irányítottágú mágnesezettséggel rendelkező tartománya.
Cooper-pár	Szupravezető ellentétes spinű elektronpárjai
memriszor	Olyan áramköri elem, amelynek az ellenállása a rajta átfolyt töltés mennyiségétől függ.
More than Moore	Új nano-funkcionalitások bevonása a félvezető nanoelektronikai megoldások mellé.
Ionimplantáció	Adalékolási eljárás félvezetőknél, melynek lényege, hogy az adalékot ionizált formában, nagyfeszültségű gyorsítás útján lövik a félvezető felületbe
CMOS	Komplementer fém-oxid félvezető (Complementary Metal-Oxide Semiconductor), egy digitális integrált áramkör építési technológia
Vékonyréteg	Bevonatok, melyeknek 100 nm és a néhány mikrométer közötti tartományban van a vastagságuk
TIM	Termikus határfelületi (interfész) anyag (Thermal Interface Material)
MRAM	Magnetorezisztív, véletlen hozzáférésű memória (Magnetoresistive Random Access Memory)
Alagút effektus	Kvantumjelenség, melynek eredményeként elektronok átjuthatnak ultravékony szigetelő rétegeken akkor is, ha ehhez energiájuk a klasszikus tárgyalásban nem elegendő.

Egyetemek, intézetek, intézmények

BME	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
MTA	Magyar Tudományos Akadémia
MFA	Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet (MTA)
KKKI	Kémiai Kutatóközpont (MTA)
SZFKI	Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet (MTA)
RMKI	Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet (MTA)
SOTE	Semmelweis Egyetem
ELTE	Eötvös Loránd Tudományegyetem
NIMS	National Institute for Materials Science (Japán)

## 13. FORRÁSOK

Richard Feynman “Plenty of Room at the Bottom” című 1959. Eredeti szövege megtekinthető: <http://www.its.caltech.edu/~feynman/plenty.html>

G.Q. Zhang and A.J. van Roosmalen (editors): „More than Moore”, Springer (2009), ISBN 978-0-387-75593-2

A National Nanotechnology Initiative 2010. márciusi jelentése az „Elnök és a Kongresszus” részére: <http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast-nano-report.pdf>

EU Nanotechnológiai honlapja: <http://cordis.europa.eu/nanotechnology/>

Nano-Initiative – Aktionsplan 2010, [http://www.bmbf.de/pub/nano\\_initiative\\_aktionsplan\\_2010.pdf](http://www.bmbf.de/pub/nano_initiative_aktionsplan_2010.pdf)

A francia nanotechnológiai kutatások áttekintő kiadványai: International Journal of Nanotechnology, Vol. 5, No. 6/7/8 (2008) and Vol. 7 No. 4/5/6/7.  
[http://www.inderscience.com/www/news/ijnt\\_special.html#01](http://www.inderscience.com/www/news/ijnt_special.html#01)

Anglia stratégiai dokumentuma: <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+/interactive.bis.gov.uk/nano//>

Integrált Mikro/Nanorendszerek Nemzeti Technológia Platform, <http://www.imntp.hu/>

Magyar mikro- és nanoelektronikai kutatás-fejlesztési stratégiai terv, [http://www.imntp.hu/\\_user/IMNTP\\_MNstrategia\\_20100409.pdf](http://www.imntp.hu/_user/IMNTP_MNstrategia_20100409.pdf)

MFA: <http://www.mfa.kfki.hu/> és [www.nanotechnology.hu](http://www.nanotechnology.hu)

KKKI: <http://www.chemres.hu/#intezetek.3.0>.

BAY-NANO: <http://www.bayzoltan.org/bzaka/bzaka.head.page?nodeid=22>

BME Doktori Iskolák: <http://doktori.bme.hu/>