

ÁRAMKÖRELMÉLET A NANOELEKTRONIKÁBAN

Csurgay Árpád

az MTA rendes tagja, egyetemi tanár

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Elméleti Villamosságtan Tanszék
Pázmány Péter Katolikus Egyetem, Információs Technológia Kar

Bevezetés

Nanos görögül törpét jelent. Egy *nanomé-
ter* a méter egymilliárdnyi (10^{-9} -ed) része. A
néhányszor tíz nanométer nagyságú fém és
félvezető *nanorészecskéket* a kémikusok és
a fizikusok már közel száz éve tanulmányoz-
zák. Mivel az atomok átmérője tized nanomé-
ter, a molekuláké pedig nanométer nagyság-
rendű, így a kémia mindig is *nano-kémia*
volt, az atom- és molekula-fizikát illetve a
mezoskopikus fizikát pedig *nano-fizikának*
is nevezhetnénk. A közelmúltig csak nanoré-
szecske sokaságot és azt is csak statisztikai
módszerekkel lehetett kísérlet tárgyává tenni.

Az 1980-as és 1990-es években a nano-
kémia és nano-fizika megkezdhetette az *egye-
di* nanorészecskék és *egyedi* molekulák vi-
lágának birtokba vételét, mivel újfajta mikro-
szkópok és eljárások egész sora jelent meg.
A pásztázó alagútmikroszkópok (Scanning
Tunneling Microscope –ST) és az atomerő
mikroszkópok (Atomic Force Microscope
–AFM) már nem csak bepillantást engednek
ebbe a világba (Sarid, 1994; Rohrer, 2000),
hanem kialakulóban vannak eljárások az
anyag nanométeres finomságú megmunká-
lására is. Évről évre új mérési eljárások és
műszerek, valamint új megmunkológépek
születnek, új nanotechnológiai laboratóriu-
mok épülnek.

A nanotechnológus még a mikroelektro-
nikában is törpének számító építőelemek-

ből szeretne gépeket szerelni. Szakmájának
határait az elemek mérete alapján jelöli ki.
Minden olyan eljárást a nanotechnológia
tárgykörébe sorol, ami 50 nm-nél kisebb
elemeket állít elő, ezeket vizsgálja, illetve
használja valaminek az építésére. A nano-
technológus végső célja az, hogy egyedi
atomokból, illetve molekulákból szerelje
össze gépeit az élő természet tudományát
ellevve. Gyulai József e folyóirat egyik koráb-
bi számában elemezte a nanotechnológiák-
nak az elektronikus elven működő gépek
bonyolultságára, a mikroelektronika fejlő-
désére és az alternatív nanoelektronika ki-
bontakozására gyakorolt hatását (Gyulai,
2003; *The 1999 Internat. Tech. Roadmap*).

A biokémiai folyamatok is a nanomé-
terek világában zajlanak. Szemünk előtt bon-
takozik ki a nanotechnológia, a biotechno-
lógia, az információs technológia és a
kognitív tudomány egyre szorosabbá váló
kölcsonhatása és e szakterületek konver-
genciája. A National Science Foundation
2002 júniusában megrendezett *Converging
Technologies for Improving Human Per-
formance – Nanotechnology, Biotech-
nology, Information Technology and
Cognitive Science (NBIC)* konferenciáján az
ebből fakadó szinergiákat elemezték. A na-
notechnológia kibontakozását az Amerikai
Egyesült Államokban nemzeti program
ösztönzi (H. R. 766; Roco – Bainbridge,
2002).

Felmerül a kérdés, hogy miként állíthatók az ember szolgálatába a kibontakozó nanotechnológiák? Vajon hozzásegítenek-e a Nap energiájának jobb hatásfokú *leáratásához* (energy harvest), különböző gép-bio csatlakozók (interfészek) éptéséhez, újabb és újabb intelligens anyagok és nano-robotok kidolgozásához? E kérdésekre ma csak részleges válaszok adhatók, mert nincs elég ismeretünk magukról a törpékről, és még kevesebb az ismeretünk a törpék egymáshoz kapcsolásának módjairól, valamint az elképzelések szerint hasznosan működő törpe-csoportok építésének lehetőségeiről és korlátairól. Vagyis keveset tudunk még a törpékből építhető egyszerűbb és bonyolultabb felépítésű, kisebb vagy nagyobb szabású hasznos feladatokat ellátó nanogépek megvalósíthatóságáról.

Annýt tudunk, hogy

(I) a nanorészecskék belsejének dinamikája a *kvantummechanika* törvényeit követi,

(II) az elektronok dinamikája mindig együtt jár az atommagok *mechanikus* mozgásával is,

(III) a nanorészecskék között az *elektromágneses kölcsönhatás* a kizárólagos kapcsolatlétesítő erő.

A következőkben azt szeretném érzékeltetni, hogy megkezdődött a nanorészecskékből építkező géptervezés metodikájának kidolgozása is. E munka egyik iránya az elektronikában nagy hagyománnyal rendelkező és bevált *áramkörelméleti paradigma* nanoelektronikai alkalmazása. Ennek keretében az elektromágneses erőkkel csatolt nanoeszközök és a belőlük felépíthető integrált rendszerek áramköri modelljeit kell tudnunk meghatározni.

Elektromágneses csatolású nanoáramkörök

A nanoelektronika eszközeinek egy része, különösen az 30-50 nm méretű eszközök – így a tervezérelt nano-tranzisztorok, a rezo-

náns alagút diódák (RTD) és az ún. egyelektoron-tranzisztorok (SET) – fém kontaktuson keresztül kapcsolódnak a külvilághoz. Ezek az eszközök hagyományosan áramkörre *huzalozhatók*. A kontaktusok és a huzalok hőtartályként viselkednek, ekvipotenciálisnak tekinthetők, így az áramkörökben a töltés- és energiamegmaradás Kirchhoff-egyenletei érvényesülnek. Az áramköri paradigma értelmében a nanoeszközök áramköri modelljeinek meghatározásához az eszközök belső kvantumjelenségeit kell modelleznünk, mert az eszközmodellek birtokában már az integrált rendszer modellje építhető fel a Kirchhoff-egyenletek segítségével. Az architektúra és a rendszertervezés pedig az elektronikai tervezés hagyományos áramkörelméleti módszereire építhető.

Az eszköz méreteinek csökkenése esetén azonban egyre nehezebb a fém kontaktusok kialakítása és az eszközök rendszerré huzalozása. Elkerülhetetlen, hogy a huzalokban folyó áramok energiavesztést okozzanak, így a huzalozás válik a rendszerintegráció szűk keresztmetszetévé.

Alternatív megoldásnak kínálkozik a nanoeszközök erőtereinek csatolása. Minél kisebbek az eszközök és minél közelebb kerülnek egymáshoz, annál természetesebb megoldás az erőter segítségével történő csatolás, ami egyben hozzájárul az energiavesztések lényeges csökkentéséhez is.

De az elektromágneses csatolású nanoeszközök – például félvezető *kvantumpöttyök*, nanomágnesek, molekulák vagy fém nanorészecskék – áramköri modelljeinek az eszközök közötti elektromágneses kölcsönhatását is le kell írniuk.

Nanomágnesek esetén maguknak az eszközöknek a mágneses tere kapcsolhatja egymáshoz a nanoeszközöket. Molekulákat az intermolekuláris erők – a molekulák Coulomb-erőtere – integrálhatják rendszeré. Parányi *nanoantennákkal* optikai

nanoeszközök is rendszerre integrálhatók. Megoldandó feladat az elektromágneses térrel csatolt és a hagyományosan huzalozott részáramkörök csatolásának modellezése is.

A nanoelektronika néhány részterületén már rendelkezünk a rendszertervezéshez szükséges áramköri modellekkel. Erőtérrel csatolt nanoelektronikai rendszerek architektúrája a közeli szomszédok csatolására épülő celluláris neurális/nemlineáris hálózatként (CNN) (Chua – Roska, 2002) építhető fel.

Az erőtérral csatolt nanoeszközök modelljeit azzal a feltevéssel kerestük, hogy a nanorészecskék belső dinamikája a kvantumfizika törvényeit követi, de a részecskék közötti kölcsönhatás klasszikus elektrodinamikai modellekkel jól leírható.

A nanoeszköz (molekula vagy félvezető *kvantum-pöttyökből* [quantum dot] kialakított ún. *mesterséges molekula*) belső dinamikáját hőtartályhoz csatolt nyitott kvantum-rendszer állapotegyenleteivel írtuk le (May – Kühn, 1999; Stone, 1996). Feltételeztük, hogy a szomszédos eszközök hullámfüggvényei között nincs átlapolódás, így a közöttük fellépő kölcsönhatásokat az eszközök multipólusai (dipólusai, illetve kvadrupólusai) közötti erők leírhatók. A kidolgozott áramköri modell figyelembe veszi a rezonáns külső elektromágneses tér hatását is, így például jól írja le a molekula-dinamika optikai vezérlését is (Csurgay et al., 2000; Csurgay – Porod, 2001).

A modellben a nanoeszköz állapotát az elektronok (egy esetben a protonok) sűrűségmátrixa, illetve a vele egy-egy értelmű kapcsolatban lévő *koherencia vektora* jellemzi, míg a magok mechanikus rezgéseit a hely- illetve impulzus-koordináták adják meg, így az eszköz belső dinamikáját kevert, kvantum-klasszikus nemlineáris differenciálegyenletek írják le. Ha a koherencia vektor dimenziójához hozzáadjuk a magrezgés hely- és impulzus-koordinátáinak számát,

akkor megkapjuk a nanoeszköz belső dinamikáját leíró nemlineáris áramkör állapotváltozóinak számát. A modell-áramkörben a koherencia vektor elemeit kondenzátortöltések, a mag-rezgéseket rezgőkörök jelenítik meg.

Két kvantumállapotú elektronikus és egy szabadságfokú mechanikus rezgést megjelenítő áramkör három, vezérelt generátorokkal csatolt kapacitásból és egy rezgőkörből áll. A belső dinamikus állapotváltozók száma tehát öt. Ha a kvantumállapotok száma n , és a magrezgések szabadságfoka f , akkor a nanoeszköz nemlineáris dinamikai állapotváltozóinak száma (n^2-1+2f) .

Az eszközök közötti kölcsönhatás áramköri modelljeit klasszikus elektrodinamikai modellek alkotják.

Sikerült áramköri modellt adni tér-csatolt és fémkontaktussal ellátott eszközök közötti kölcsönhatás leírására is, és a modelleket sikeresen alkalmaztuk nanoelektronikai logikai kapuk és jelfeldolgozó processzorok tervezésére (Chua – Roska, 2002).

Az áramköri modellel jó közelítéssel leírható és szimulálható az eszközökön belüli exciton-, elektron- és proton-dinamika, beleértve az eszközön belüli alagutazásokat is. Szimulálható optikai pumpáló jellel megvilágított nanoáramkör is (Csurgay et al., 2000).

Az áramköri modellek hierarchikus felépítése lehetővé teszi, hogy az új nanoeszközökből felépített nagy bonyolultságú integrált rendszerek viselkedését is szimulálni tudjuk, ami nagyban elősegíti a nanoelektronikai integrált áramkörök fejlesztését.

Nanomágnesekből épített áramkörök

Az elektronsugaras litográfia lehetővé teszi, hogy egy szigetelő lapkán néhányszor tíz nanométeres mágneskorongokat mátrixszerűen helyezzünk el, és a korongok alakját, méretét, illetve egymástól mért távolságát céljainknak megfelelően alakítsuk.

Ferromágneses anyagokban az atomok elemi mágnesei – a spinek – négy erő hatására rendezkednek el és alakítják ki a kívülről is érzékelhető mágneses erőket. A négy különböző erő:

- a spinek mágneses dipólusai között ható erő,
- a kvantumfizikai eredetű kicserélési erő,
- az anizotrop erő és
- a külső mágneses erő.

A mágneses dipólusok között ható erő az elemi mágneseket ellentétes irányba (az északi pólushoz húzva a délit és fordítva) igyekszik beállítani. Ez az erő a dipólusok közötti távolsággal lassan (harmadik hatványal) csökken. Az elemi mágneseket egy irányba tartani akaró kicserélési erő kis távolságok esetén nagyon erős, de a távolság növekedésével sokkal gyorsabban csökken, mint a dipólusok között ható erő. Az egymáshoz közeli spinek a kicserélési erő hatására egy irányba állnak be, *mágneses domén*thozva létre. Külső mágneses erőter hiányában az egyes doménekben a mágnesezettség iránya véletlenszerűen alakul ki. Az anizotróp erő a mágnesezettséget kitüntetett irányba próbálja beállítani. A külső mágneses erőter hozzáadódik a fenti három erőhöz, és így a spinre ható négy erő eredője fogja meghatározni az anyag belső mágnesezettségét. Amennyiben a mágneses részecske 1 nm-nél kisebb, a mágnesezettség dinamikája csak kvantummechanikai modellekkel írható le. Ha a méretek 1 nanométer és 1 mikron közé esnek, akkor a kvantummechanikai kicserélési erők is fenomenologikus erőkné tekinthetők, a doménfalak kialakulását és a mágnesezettség dinamikáját pedig térbeli mágneses kontinuum-egyenletekkel – a *mikromágnesség* Landau-Lifschitz-Gilbert-egyenleteivel – nagy pontossággal írhatjuk le (Hubert – Schafer, 1998; Aharoni, 2000; Oti, 2000). A kicserélési erő kvantumfizikai eredete következtében e modellek kevert, kvantum-klasszikus dinamikát követnek.

Ha a nanomágnesek méretét olyan kicsire választjuk, hogy a kicserélési erő legyen a domináns, és így egy nanomágnesben csak egyetlen domén alakulhasson ki, ugyanakkor a korongok közötti távolság már elég nagy legyen ahhoz, hogy két korong között viszont a dipólus erő határozza meg a kölcsönhatást, akkor klasszikus mágneses erővel csatolt egydoménes nanomágnes-strukturákat készíthetünk.

E kétdimenziós strukturákban egy-egy nanomágnes kapcsolóként működhet (Csaba et al., 2003a). Ha a nanomágnesek méretét 10 és 60 nm közöttinek alakítjuk ki, akkor már elég kicsik ahhoz, hogy egydoménesnek legyenek tekinthetők, de még elég nagyok ahhoz, hogy a hőingadozásokkal szemben szobahőmérsékleten is stabilak maradjanak. A nanomágneseket áramszállal előállított mágneses tér vagy a szomszéd nanomágnes mágneses tere gerjeszti. A nanomágnes-mátrix kimeneteinek állapotát a kimenetnek kijelölt nanomágnesek mágneses terét érzékelő magnetorezisztív szenzor jeleníti meg.

A nanomágnes-áramkörök építőkövéje egyetlen, téglatest alakú nanomágnes, amelyben két áramhurok egymásra merőleges mágneses teret gerjeszt, és amelynek dipólus terét szenzor méri. A téglatest szándékosan *anizotrop*, ami azt jelenti, hogy sokkal könnyebben mágnesezhető a hosszabb oldala irányában, mint arra merőlegesen. A hosszabb oldal irányú mágneses teret generáló áramot tekintjük jelnek, az arra merőlegest generáló áram adhatja a külső *pumpáló* energiát, illetve digitális működés esetén az órajel.

Csaba György kollégánk mutatta meg (Csaba et al., 2003b), hogy a nanomágnes, felhasználva a pumpáló teljesítményt, jel-erősítőként működhet. E felismeréshez és a nanomágnesekből felépített logikai áramkörök tervezési metodikájának kidolgozásához a nanomágnes áramköri modellje vezetett el. A Landau-Lifschitz-Gilbert-egyenle-

tekből kiindulva sikerült megadni a kétdimenziós mátrixot alkotó nanomágnesek áramkörü modelljét, mégpedig úgy, hogy a modell nem függ attól, hogy a nanomágnese környezetében hol és milyen nanomágnesek, illetve áramhurkok helyezkednek el.

A nanomágnesek áramkörü modelljében a mágnesezettség vektorának komponenseit három nemlineáris induktivitás jeleníti meg. A külvilágot hat áramkörü kapun keresztül látja a nanomágnese. E kapuk és a mágnesezettség vektora közötti kapcsolatokat, ill. az indukált feszültségeket a Landau-Lifschitz-Gilbert-egyenletekből származtatott vezérelt generátorok és nemlineáris induktivitások jelenítik meg. A nemlineáris áramkörü modell hűten írja le az egydimenziós nanomágnesek hiszterézis dinamikáját, és a külső mágneseztér változása nem változtatja meg a modellt, függetlenül attól, hogy a külső teret áramhurkok vagy szomszédos nanomágnesek hozzák-e létre.

Az egydimenziós nanomágnesekből integrált nanoáramkörök építhetők. Az áramkört alkotó nanomágnesek számától függetlenül, a rendszerszimuláció alapját képező rendszermodellt az egyes nanomágnesek áramkörü modelljeinek egyszerű összekapcsolásával nyerjük.

Au – Ag nanorészecskék: nanoantennák

A nanotechnológia új lehetőségeket nyit az integrált optikában is. Ugyanis a 10 és 50 nm közötti méretű nemesfém nanorészecskékben a vezetési sáv elektronjai kollektív rezgést végezve *plazmonokat* alkothatnak.

Megfelelő optikai gerjesztés esetén a nanorészecskék közeli erőtere a megvilágító tér sokszorosára nő, a szomszédos részecskék között erős csatolás alakul ki, így hullámterjedés indul meg a nanorészecskelánc mentén (Salerno et al., 2002). Meglepetést okoz, hogy a láncot alkotó nanorészecskék mérete sokkal kisebb, mint a lánc mentén terjedő optikai jel hullámhossza, a lánc sugárzási vesztesége és diszperziója

nem jelentős. A lánc menti disszipációs energiaveszteség ugyan jelentős – előzetes becslések szerint hullámhosszanként a terjedő teljesítmény fele hővé alakul –, ennek ellenére e nemesfém nanorészecskéktől sokat vár az integrált optika. Nanorészecskeláncokból nemcsak optikai hullámvezetőt, de memóriacellát és kapcsolót is építettek (Brongersma et al., 2000).

A nanorészecskék felületén az elektromágneses térerősség „drámai” megnövekedése azt eredményezi, hogy a plazmon rezonanciája érzékennyé válik a nanorészecskék közelében megjelenő idegen mikrorészecskékre. Ez a jelenség új szenzorok építésében hasznosítható (Haes – Van Duyne, 2002). Áramkörü modellek segíthetik az új szenzorokkal megvalósítható funkciók feltárását, intelligens szenzorok tervezését.

Utószó

A bevezetőben utaltam arra, hogy a kibontakozó nanotechnológiák hasznosítási lehetőségeiről és korlátairól ma még keveset tudunk. Nem tudunk eleget a törpékből építhető egyszerűbb és bonyolultabb felépítésű, kisebb vagy nagyobb szabású hasznos feladatokat ellátó nanogépek megvalósíthatóságáról. A nanokémia és nanofizika viszont egyre többet tud magukról a törpékről, egyre mélyebben tárja fel az e világban uralkodó törvényeket.

Ahhoz, hogy a törpék világát az embercsalád szolgálatába állítsuk, ez nagyon fontos, de *nem elég*. Szükség van a tervezés és építés metodikájára is, szükség van nanotechnológusokra, nanomechanikusokra, nanoelektronikusokra is, és szükség van a realizálhatóság és a tervezés elméleti megalapozására is. Ebbe az irányba próbál egy lépést tenni a nanoelektronikai áramkörök elmélete.

Kulcsszavak: *nanotechnológia, nanoelektronika, molekuláris áramkörök, elektromágneses kölcsönhatás, nanoantennák*

IRODALOM

- Aharoni, Amikam (2000): *Introduction to the Theory of Ferromagnetism*. Oxford University, Oxford
- Brongersma, Mark L. et al. (2000): Electromagnetic Energy Transfer And Switching In Nanoparticle Chain Arrays Below The Diffraction Limit. *Physical Review B*, 62, **24**, December 2000, 16356-16359.
- Chua, Leon O. – Roska Tamás (2002): *Cellular Neural Networks and Visual Computing – Foundations and Applications*. Cambridge University Press
- Csaba György – Imre A. – Bernstein, G. – Csurgay Á. I. – Porod, W. (2003b): *Circuit Simulations for Field-Coupled Single-Domain Nanomagnets*. Proceedings of the European Conference on Circuit Theory and Design. ECCTD'03. Krakow, September 2003
- Csaba György – Porod, Wolfgang – Csurgay Árpád I. (2003a): A Computing Architecture Composed of Field-coupled Single-domain Nanomagnets Clocked by Magnetic Fields. *International Journal of Circuit Theory and Applications*. 31, 67-82
- Csurgay Árpád I. – Porod, Wolfgang – Lent, Craig S. (2000): Signal Processing with Near-neighbor Coupled Time-varying Quantum-dot Arrays. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. 47, **8**, 1212-1223
- Csurgay Árpád I. – Porod, Wolfgang (2001): *Equivalent Circuit Representation of Arrays Composed of Coulomb-Coupled Nano-Scale Devices: Modeling, Simulation and Realizability*. *International Journal of Circuit Theory and Applications*. Special Issue on Nanoelectronic Circuits. January–February 2001, 3-37
- Gyulai József (2003): Bonyolultság az elektronikában és a nanoelektronikában. *Magyar Tudomány*. 3. 300-307
- H. R. 766, the Nanotechnology Research and Development Act of 2003, <http://www.house.gov/science/press/108/108-054.htm>
- Haes, Amanda J. – Van Duyne, Richard P. (2002): A Nanoscale Optical Biosensor: Sensitivity and Selectivity of an Approach Based on the Localized Surface Plasmon Resonance Spectroscopy of Triangular Silver Nanoparticles. *Journal of the American Chemical Society*. 124, 10596-10604.
- Hubert, Alex – Schafer, Rudolp (1998): *Magnetic Domains*. Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg
- May, Volkhard – Kühn, Oliver (1999): *Charge and Energy Transfer Dynamics in Molecular Systems*. Wiley-VCH, Berlin
- Oti, John O. (2000): Micromagnetics. in Webster John G. (ed.): *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronic Engineering Online*. John Wiley.
- Roco, Mihail C. – Bainbridge, William Sims (eds.) (2002): *Converging Technologies for Improving Human Performance – Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science (NBIC)*, Workshop organized by the National Science Foundation and Department of Commerce (DOC), Arlington, Virginia, June 2002.
- Rohrer, Heinrich (2000): *Nanotechnology: back to the future of mechanics*, Plenary talk at the IEEE International Symposium of Circuits and Systems, ISCAS 2000, Geneva, May 28-31.
- Salemo, Marco et al. (2002): Plasmon Polaritons in Metal Nanostructures: The Optoelectronic Route to Nanotechnology. *Optoelectronics Review*. 10, **3**, 217-224.
- Sarid, Dror (1994): *Scanning Force Microscopy: with Applications to Electric, Magnetic, and Atomic Forces*. Oxford University Press, New York
- Stone, Anthony J. (1996): *The Theory of Intermolecular Forces*. Clarendon Press, Oxford
- The 1999 International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), and its 2000 Update*. They are available at the International SEMATECH INTERNET web site <http://public.itrs.net>. Technology roadmap for Nanoelectronics, European Commission IST Programme, *Future and Emerging Technologies*, MELARI NANO, 1999.

