

# Nanoelektronikai eszközök és rendszerek fizikai realizálhatóságának feltételei 38345

## Nano-áramkörök realizálhatóság-elmélete Zárójelentés

A nano-áramkörök 1994-ben megkezdett realizálhatóság-elméleti vizsgálataihoz [1, 2, 3] kapcsolódva, a TS 38345 számú kutatási program keretében azt elemeztük, hogy kizárólag elektromágneses kölcsönhatásokkal (tehát nem vezetékekkel, huzalokkal) csatolt nano-részecskéből (ezek lehetnek molekulák, nano-mágnesek, vagy fém nano-részecskék) áramkörök megvalósíthatók-e vagy sem. A kérdés az volt, hogy

- (i) molekulák,
- (ii) nano-mágnesek, valamint
- (iii) jól vezető fém-nano-részecskék (metal-dot-ok, nanoantennák)

síkbeli sejt-struktúrái milyen elektronikus áramköri feladatokat láthatnak el, azaz melyek a nano-áramkörök megvalósíthatóságának feltételei és korlátai. A kutatás tárgya tehát az elektromágneses kölcsönhatással csatolt nano-áramkörök (nanocircuits) realizálhatóság-elméleti kérdései voltak.

Korábban kétséges volt, hogy lehet-e ezekből az „alkatrészekből”, egyáltalán vezetékekkel történő huzalozás nélkül, azaz kizárólag Coulomb-erővel, mágneses erővel, illetve elektromágneses kölcsönhatással (foton-csatolással) áramköröket építeni. A fenti „alkatrészek” nem hagyományos elektronikus építőelemek. De a már ismert nano-eszközök (nano devices, pl. félvezető rezonáns alagútdióda, nanotranzisztor, stb.) vezetékekkel történő integrálása is erősen korlátozza a sikeres áramkör-építés lehetőségeit.

Vizsgálataink szerint, melyeket a University of Notre Dame Center for Nano Science and Technology (ND-CNST) laboratóriummal együttműködve végeztünk, nincs elvi korlátja annak, hogy

- (i) Coulomb erővel csatolt molekulákból [4, 5, 6], illetve
- (ii) mágneses erővel csatolt nano-mágnesekből [7, 8],

bármely digitális rendszerfunkciót megvalósítsunk, ugyanis megmutattuk, és a ND-CNST kutatásai kísérletekkel is alátámasztották [9], hogy a fenti elektromágneses térrel csatolt nano-részecskéből a bináris jelvezeték, a logikai invertert, az univerzális logikai kaput (majority gate) meg lehet valósítani, ha gondoskodunk a működéshez szükséges energia elektromágneses csatolással történő beviteléről is (ezúton aktivvá téve az architektúrát);

- (iii) fém nano-részecskékről nem sikerült megmutatnunk, hogy a digitális rendszerek univerzális építőelemei lehetnének. Viszont a fém nano-részecskéknek egy másik alkalmazásában, nevezetesen az infravörös és THz-es érzékelők realizálhatósági feltételeinek elemzésében értünk el eredményeket. Tanulmányoztuk a fém nano-részecskéből építhető fém-szigetelő-fém alagútdiódákat (MIM diódák) és az infravörös illetve THz-es sávban vevőantennaként működő nano-antennákat. E szerkezetekkel ugyanis nagy sebességű, szobahőmérsékleten is működőképes és CMOS áramköri lapkára integrálható érzékelők építhetők [10, 11, 12].

A nanoantennák elméleti elemzésének valamint az új tervezési módszerek szimulációval illetve kísérletekkel történő ellenőrzéséhez megkezdtük egy szerveren működő szoftverrendszer telepítését. A programcsomag csak 2006. januárjában érkezett be, ezért a munka e fázisának teljesítése áthúzódik a 2006. év első felére.

Az elektromágneses térrel csatolt nano-részecskék tanulmányozása és szerkezeteik működésének áramköri modellezése, illetve a realizálhatóság lehetőségeinek és korlátainak megismerése, nem azt mutatja, hogy ezek az új architektúrák versenytársai lennének a vezetékkel huzalozott mikro- és nano-tranzisztorokból integrált memóriáknak vagy processzoroknak.

Ennek ellenére a 2005 International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) az Emerging Research Devices fejezetben már foglalkozik a tér-csatolt áramkörökkel [13] is. A nanoáramkörök és a mikroelektronikai áramkörök integrálása ugyanis olyan feladatok megoldási lehetőségeit igéri, amelyek kizárólag mikroelektronikai áramkörök építésével nem oldhatók meg. Fontos szerep vár a mikroelektronikai lapkákra épített nano-szenzoroknak, és a nano-bio interface-eknek.

A nano-mágnesekből építhető áramkörök kutatását is nagy figyelem kíséri. Az egy-domain-es nano-mágnesek áramkörelmélete alapján Notre Dame-ben 2005-ben sikeresen realizált majority-gate közlését a SCIENCE folyóirat 2006 január 13-i számában [11] például, „Where have all the transistors gone?” című – az eredménynek nagy jelentőséget tulajdonító – szerkesztőségi cikkben méltatták [14].

A kutatás eredményei nemcsak – és talán nem is elsősorban – a nagy-integráltságú nano-áramkörök tervezését és építését segíthetik. A nano-eszközök és a közöttük fellépő fizikai csatolás modelljei jól használhatók egyes bio-szenzorok, nanorészecske-biomolekula hibridek dinamikájának megértésében is. De az ezekkel kapcsolatos munkálatok már túllépnek a TS 38345 projekt keretein [15].

## **Előzmény publikációk**

[1] Arpad I. Csurgay, Wolfgang Porod, and Craig S. Lent, “Signal Processing with Near-Neighbor- Coupled Time-Varying Quantum-Dot Arrays,” IEEE Transactions on Circuits and Systems I 47 (8), 1212-1223 (2000).

[2] Csaba Gy., Csurgay A. I., Porod W., “Computing architecture of next-neighbor-coupled optically pumped nanodevices”, Int. J. Circuit Theory and Applications, Vol. 29, No. 1, pp. 73 – 91, 2001

[3] Árpád I. Csurgay, Wolfgang Porod, “Equivalent circuit representation of arrays composed of Coulomb-coupled nanoscale devices: modeling, simulation and realizability”, Int. J. Circuit Theory and Applications, Vol. 29, No. 1, pp. 3 – 35, 2001

## **Publikációk jegyzéke**

[4] W. Porod, G. Csaba, and A.I. Csurgay, "The Role of Field Coupling in Nano-Scale Cellular Nonlinear Networks", Special Issue on Cellular Neural/Nonlinear Networks, International Journal of Neural Systems 13 (6), 387-395 (2003)

[5] Á. I. Csurgay, W. Porod, B. Rakos, “Signal Processing By Pulse-driven Molecular Arrays”, Int. J. Circuit Theory and Applications, Vol. 31, No. 1, pp. 55 – 66, 2003

[6] Csurgay Árpád, Áramkörelmélet a nanoelektronikában, The Circuit Paradigm in Nanotechnology (in Hungarian), Magyar Tudomány, 2003/9, 1090, 2003.

- [7] G. Csaba, W. Porod, Á. I. Csurgay “A Computing Architecture Composed of Field-Coupled Single Domain Nanomagnets Clocked By Magnetic Field”, *Int. J. Circuit Theory and Applications*, Vol. 31, No. 1, Pp. 67 – 82, 2003
- [8] G. Csaba, P. Lugli, A. I. Csurgay, W. Porod, “Simulation of Power Gain and Dissipation in Field-Coupled Nanomagnets”, *J. Computational Electronics* 4(1/2), 105 – 110, 2005
- [9] Alexandra Imre, G. Csaba, L. Ji, A. Orlov, G.H. Bernstein, W. Porod, Majority Logic Gate for Magnetic Quantum-Dot Cellular automata, *SCIENCE*, Vol. 311, pp 205 – 208, January 2006
- [10] G. Matyi, Nanoantennas for Uncoupled, Double-Band, CMOS-Compatible, High-Speed Infrared Sensors, *Int. J. Circuit Theory and Applications*, Vol. 32, pp. 425 - 430, 2004
- [11] B. Hegyi, A. I. Csurgay, W. Porod, Computer simulations on the DC I-V characteristics of metal-insulator-metal (MIM) diodes with double insulator layer, Paper submitted to the International Workshop on Computational Electronics – IWCE, May 25 – 27, Vienna, 2006
- [12] G. Matyi, A. I. Csurgay, W. Porod, Nanoantenna Design for THz-Band Rectification, Paper submitted to the International Workshop on Computational Electronics – IWCE, May 25 – 27, Vienna, 2006

### **Egyéb referenciák**

- [13] International Technology Roadmap for Semiconductors – 2005, Emerging Research Devices, Architectures, p. 67, SIA – ITRS, 2005
- [14] R. P. Cowburn, Where Have all the Transistors Gone? *SCIENCE*, Vol. 311, pp. 183 – 184, January, 2006
- [15] W. Porod, F. Werblin, L. O. Chua, T. Roska, Á. Rodriguez-Vazquez, B. Roska, P. Fay, G. H. Bernstein, Y.-F. Huang, and Á. I. Csurgay, Bio-Inspired Nano-Sensor-Enhanced CNN Visual Computer , *Annals New York Academy of Sciences*, 1013: 92-109, (2004)