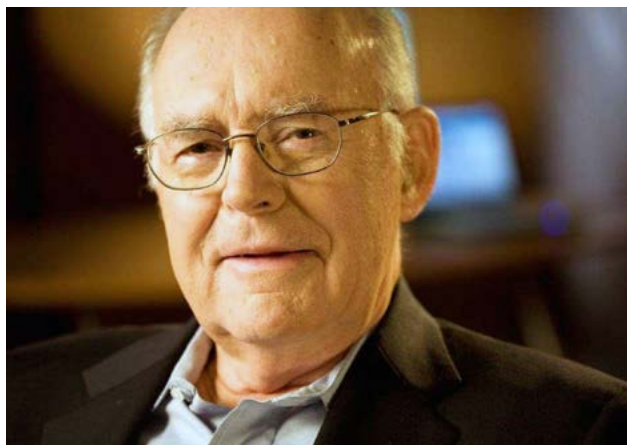


GORDON MOORE ÖRÖKSÉGE

Fűrjes Péter¹, Simon Ferenc^{2,3}, Volk János⁴¹HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet; furjes.peter@ek.hun-ren.hu²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Természettudományi Kar; simon.ferenc@ttk.bme.hu³HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont⁴HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet; volk.janos@ek.hun-ren.hu

Gordon E. Moore

(1929, San Francisco, California – 2023, Waimea, Hawaii)

Gordon Earle Moore amerikai kutató mérnök és üzletember. Tanulmányait kémia szakon végezte a Kaliforniai Egyetemen, Berkeley-ben, majd fizikát tanult és kémiából doktorált a Kaliforniai Műszaki Egyetemen (Caltech), Pasadénában. Dolgozott a Nobel-díjas William Shockley félvezető-laboratóriumában, majd az „áruló nyolcakkal” megalapította a Fairchild Semiconductor vállalatot. 1965-ben Moore és Robert Noyce létrehozta az Intel Corporationt (eredetileg NM Electronics), majd csatlakozott hozzájuk a magyar származású Andrew Grove is. Az Intel mutatta be és dobta piacra az első DRAM (dynamic random-access memory), EPROM (erasable programmable read-only memory) memória, majd CPU (central processing unit) mikroprocesszor (Intel 4004) chipet. A cég technológiai dominanciáját mutatja, hogy a 21. század elején a nagy teljesítményű szervergépek kivételével gyakorlatilag minden személyi számítógép Intel – vagy azzal kompatibilis – mikroprocesszorral működött.

Gordon Moore neve mára az általa kimondott Moore-törvény miatt vált közhírtté – amellett, hogy a chipgyártó óriás, az Intel Corporation egyik társalapítója volt. A Moore-törvényt többféle alakban szokták emlegetni; például, hogy a számítógépek alapvető eszközei, a tranzistorok mérete exponenciálisan csökken, vagy hogy a számítógépek számítási kapacitása exponenciálisan nő. Maga Moore jegyezte meg egyszer, hogy „mindenki azt gondolja, hogy én találtam ki az exponenciális függvényt” [1]. 1965-ös eredeti cikkében egy megfigyelést vetett papírra, nevezetesen, hogy az alkatrészek száma évente duplázódik a mikroprocesszorokban [2]. Később, 1975-ben ezt a megfigyelést korrigálta és két-évente történő duplázásra módosította [3].

Moore eredeti megfigyelése önbeteljesítő jóslattá vált a félvezetőipar számára: a résztvevők az alapján hozták a fejlesztési döntéseiket, hogy kövessék az empirikus trendet – feltételezve, hogy a vetélytársaik is ennek mentén dolgoznak. Ha egy cég elmaradni látzott a fejlesztési eredményekben Moore megfigyelésének extrapolációjától, akkor igyekezett felgyorsítani kutató-fejlesztői tevékenységét, míg ha a fejlesztésbe sokat investálva „túllőtt” Moore jóslatán, akkor adott esetben késleltette eredményeinek piacra vitelét. Mivel az eredeti megfigyelés így hosszú időn át érvényes



Simon Ferenc egyetemi tanár, a BME TTK dékánhelyettese. Érdeklődési területei: szilárdtest-spektroszkópia, spintronika, félvezetőfizika és a fizika népszerűsítése. Legfontosabb eredményei: az itineráns elektronok mágnesesrezonancia-jelének felfedezése új fémekben, a spinrelaxáció egyesített elméletének kidolgozása, spinnel nyomjelzett szén-nanocsövek előállítása és triplet optikai állapotok felfedezése nanocsövekben.



Fűrjes Péter a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem mérnök-fizikus, és MBA szakán végzett, majd fizika tudományterületen szerzett PhD fokozatot. Fő kutatási területe komplex mikrorendszerek – BioMEMS, Lab-on-a-Chip, Organ-on-Chip eszközök – fejlesztése analitikai, orvosi diagnosztikai, terápiamonitorozási alkalmazásokhoz. A HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont (HUN-REN EK-MFA) Mikrorendszerek Laboratóriumának vezetője, a BME címzetes egyetemi docense, meghívott előadója. Eurosensors Fellow, a Eurosensors konferenciák irányítótisztületének tagja, az Európai Nanoelektronikai Társaság (AENEAS) tudományos bizottságának tagja.



Volk János, PhD, 2001-ben végzett mérnök-fizikus, a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont Nano-Érzékelők Laboratóriumának vezetője. Dolgozott Japánban a Nemzeti Anyagtudományi Intézet Nanoelektronikai Anyagok Kutatócsoportjában, illetve az Egyesült Államokban a szélessávú félvezetők témájában. Számos hazai és nemzetközi projektnek volt vezetője vagy hazai koordinátora. Az MTA Elektronikus Eszközök és Technológiák Tudományos Bizottságának titkára. Fő kutatási területei a nanoelektromechanikai rendszerek, a fázisváltó, illetve piezoelektromos vékonyrétegek, autonóm szenzorok.

maradt, mint Moore-törvényre kezdtek rá hivatkozni. A „törvény” érvényességén alapulva megszületett az ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors – A félvezetők nemzetközi technológiai úti terve) – rávilágítva az annak fenntartásához szükséges technológiai kihívásokra.

Így a korai hetvenes évek óta a félvezetőipar törekvése a Moore-törvény követésére egy soha nem látott – és számos területet érintő – gazdasági robbanás motorjává vált. A kialakuló fejlődési spirál mentén a tranzisztorok méretcsökkenése folyamatosan javítani tudta az eszköz teljesítmény–költség-viszonyát, ami viszont a félvezetőpiac exponenciális bővüléséhez vezetett. Ez újabb és újabb befektetési hullámot indukált, ami ismét az innovációs potenciál javulását segítette elő.

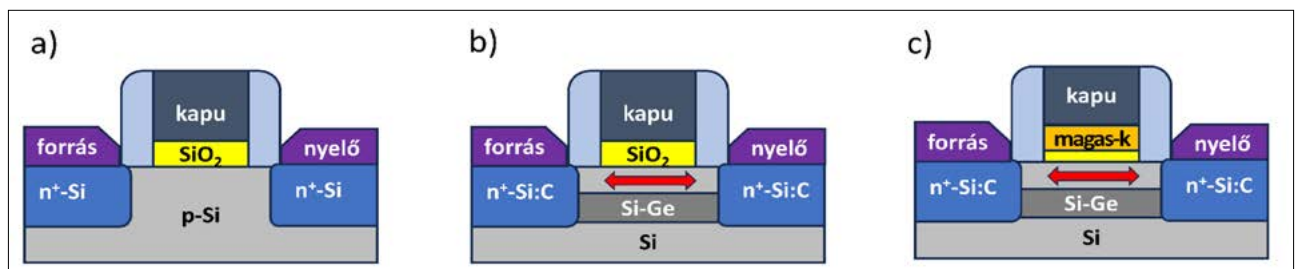
Folyamatosan felmerült, hogy a Moore-törvény által megjósolt fejlődés nem tartható fenn, mégis az ipar újabb és újabb innovációkkal cáfolta rá az aggodalmakra, és a méretcsökkentés töretlenül folytatódott 4 nagyságrenddel keresztül – a tranzisztorok számát tekintve 9 nagyságrenddel át –, ami egészen bámulatos technológiai fejlődés. Míg a 70-es évek elején az Intel 4004-es chipje 2300 tranzisztorból épült fel, ma a 13. generációs Intel i9 chipjének 24 magja, vagy az Apple M2 chipjének 8 magja már több mint 20 milliárd tranzisztort tartalmaz. A 90-es években, e cikk szerzőinek fiatalkorában, amikor először találkoztak a Moore-törvénnyel, Daniel Reed (University Iowa) még nyugodtan jelentette ki: „Fogadni mernék, hogy előbb futunk ki a pénzből, mint a fizikából” [4, 5].

Jelenleg, amikor már látszik a méretkorlátok esetleges elérésének lehetősége, még mindig érvényesnek tekintjük a Moore-törvényt bizonyos közelítésekkel – bár az ezt lehetővé tevő technológiai megoldások már messze nem tisztán a méretcsökkentésen alapulnak. Az elektronikus eszközök teljesítményének növekedése a fizikailag kezelhető és jóslható méretkorlátok megközelítésével sem lassul, vagy áll meg, habár ezt a fejlődést már a teljesítménydisszipációval skálázva, ahhoz arányosítva kell értelmeznünk. Ez a fejlődési útvonal azonban már eddig nem alkalmazott anyagok és merőben új tranzisztorarchitektúrák megjelenését használja ki – így ezt a klasszikusnak tekinthető miniatürizáción túli érárt már a „More Moore” trend kezdetének aposztrófálhatjuk.

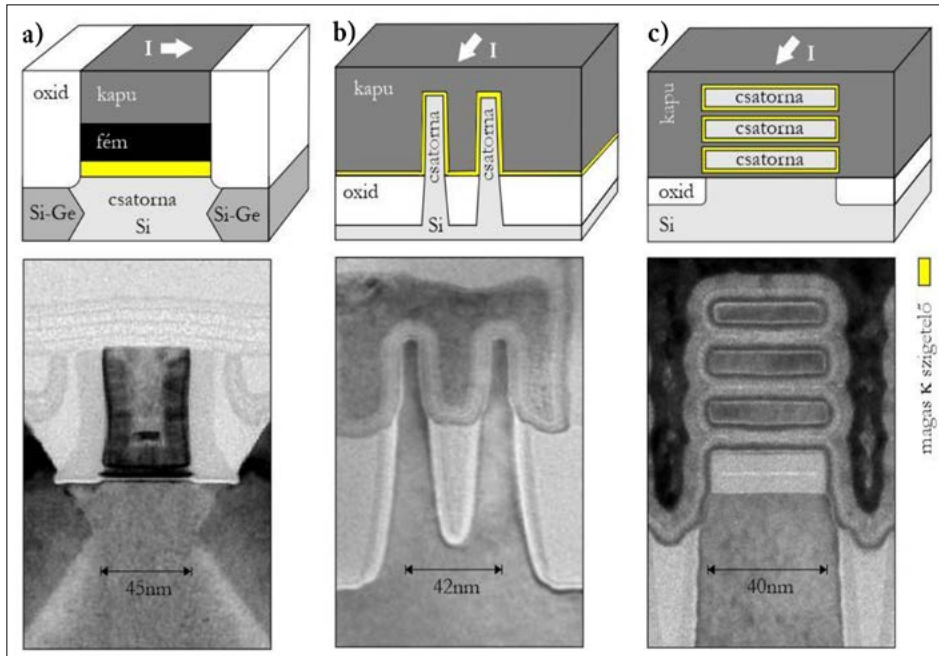
More Moore – az extrém miniatürizáció korszaka és megoldásai

Az integrált elektronika legfontosabb komponensének tekinthető fém-oxid–félvezető tervezérlésű tranzisztor (*1a. ábra*, MOSFET – metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) folyamatos miniatürizálásának két fő hajtóereje volt: az egy tranzisztorra eső költségek csökkentése és a működési teljesítmény folyamatos javítása. Ez a fejlődés a korai évtizedekben a szilícium (Si) kristályon kialakított planáris MOSFET eszköz méretének folyamatos csökkentésével volt megoldható. Az ezredforduló körül a tranzisztorok elérték azt a méretet, melynél a korábbi skálázás már nem volt elégséges, többek között a tranzisztor több pontján is jelentkező szivárgási áram, az elméleti határig csökkentett kapcsolási feszültség és a megnövekedett hődisszipáció-sűrűség miatt. A Moore-törvény érvényessége ezért a karakterisztikus méretek csökkentése mellett több anyagtudományi innováció segítségével volt csak fenntartható.

Míg a tranzisztor csatornájában vezetett töltéshordozók mozgékonyágát a kristályban ötvözéssel előidézett mechanikai feszültséggel sikerült növelni (*1b. ábra*), addig a tranzisztor kapuelektrodája és csatornája közötti szilícium-dioxid rétegen keresztül jelentkező alagútáramot nagyobb dielektromos állandójú, így vastagabb formában alkalmazható fém-oxidok bevezetésével sikerült kiküszöbölni (*1c. ábra*). Emellett egy sokrétegű, planarizált, rézalapú fémezési technológia kidolgozására is szükség volt az exponenciálisan növekvő számú tranzisztor közös chipen való szinkronizált működéséhez. Szintén forradalmi újítás volt, hogy az eredetileg felületi technológiákkal kialakított tranzisztorcsatornát (*2a. ábra*) sikerült a síkból kiemelve kapuelektrodákkal három oldalról (fin-FET – a fin az angol uszony szóra utal az elektróda speciális alakja miatt, *2b. ábra*), majd – a legkorszerűbbnek számító eszközökben – minden oldalról körülveve vezérelni (*2c. ábra*, GAA – gate-all-around). A 13,5 nm hullámhosszúságú extrém ultravioleta (EUV) sugárzást alkalmazó litográfiai módszer kidolgozásának és az egyre inkább a síkból kilépő, 3D architektúráknak köszönhetően ez a trend még egy ideig fenntartható. Azonban egyre jobban közelítjük a méretből adódó fizikai korlátokat, amelyek elérése után a ha-



1. ábra. Új anyagok alkalmazásának hatása az *n*-csatornás MOSFET fejlődésére: hagyományos (a), kristályráccsal feszített csatornás (b) és magas dielektromos állandójú (magas-k) kapu-oxiddal ellátott változat (c)



2. ábra. A MOSFET-architektúra fejlődése: planáris egycsatornás szerkezet – Intel 45 nm fémkapus p-csatornás MOSFET (a), három oldalról kapuelektrodával ellátott duplacsatornás fin-FET – Intel 14 nm (b) és minden oldalról vezérelt háromcsatornás GAA-FET – IBM 2 nm (c) [4–7] (sematikusan szerkezet és transzmissziós elektronmikroszkópos kép). Az ábrán vegyük észre, hogy az áram iránya (nyílal jelezve) más az eszközökben

gyománys – két ellentétes vezetési csatornát magában foglaló – komplementer tranzisztor (CMOS – complementary metal oxide semiconductor) helyett merőben új működési mechanizmusra lesz szükség, ami elvezet minket a CMOS-on túli (beyond CMOS) korszakba. Egy ilyen forradalmi megoldást jelenthet, ha a logikai áramkörökben az információt nem az elektron töltése, hanem annak spinje hordozza.

Bár a Si – mint aktív félvezető és chiphordozó alapanyag – továbbra is domináns marad, a közeljövőben egyre nagyobb jelentősége lesz a kedvezőbb fizikai tulajdonságokkal bíró, ún. széles tilossávú félvezető anyagoknak, mint például a SiC, a GaN, illetve a gyémánt. A belőlük készített félvezetőeszközök lényegesen gyorsabb működést és nagyobb elektromos teljesítmény vezérlését teszik lehetővé. Előbbi tulajdonságuknak köszönhető, hogy a szélesávú félvezetők nélkül nem jöhetett volna létre a legújabb telekommunikációs technológia, az 5G sem. A nagy teljesítmény-tűrőképességnek és magas letörési feszültségnek köszönhetően pedig szintén nagy szerepük lesz az elektromos járműiparban, illetve a megújuló energiát hasznosító erőművekben. A szilíciumhoz hasonlóan, ezekben a félvezetőeszközökben is értelmezhető a Moore-törvény, ráadásul itt lényegesen messzebb állunk a méret okozta fizikai határoktól, nagyobb teret adva ezzel a világ vezető félvezetőgyárain (ún. „fab”) kívül dolgozó kutatóknak és technológiai mérnököknek. Ezt a trendet időben felismerve több európai vállalatnak, például a német Infineon Technologies-nak is sikerült a területen vezető pozíciót kialakítania.

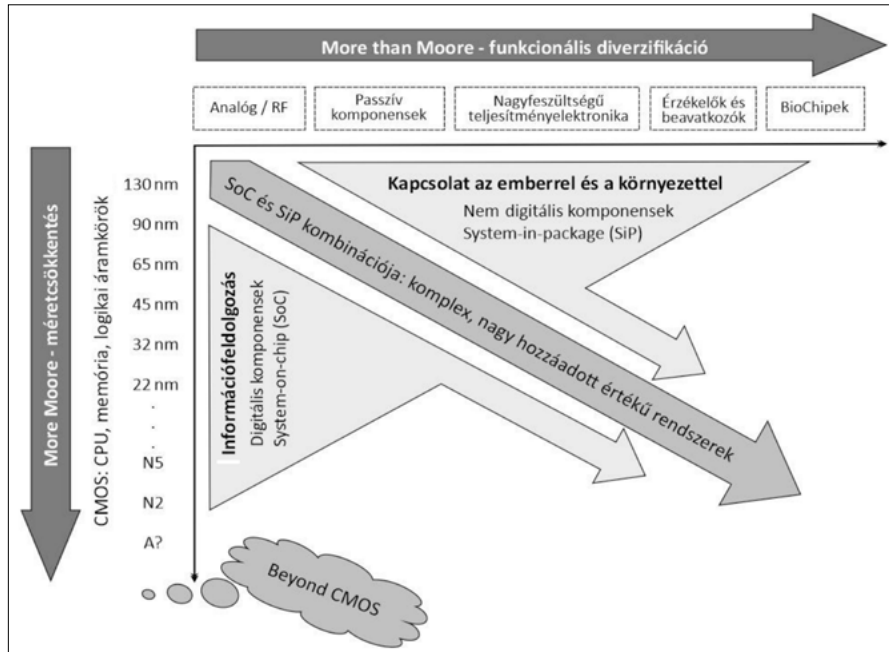
More than Moore megközelítés – a funkcionális diverzifikáció

Az egyre nagyobb teljesítményű félvezetőeszközök a számítástechnika és informatika (világháló) mellett olyan társadalmi-technológiai területek forradalmasításához járultak hozzá, mint az egészségügy (Humán Genom Projekt, robotsebészet, molekuláris analitika), az űrkutatás és kommunikáció (optikai és mobil távközlés, okostelefonok), az autóipar (motorvezérlés és diagnosztika, elektromos és önzvezető autók), a média (digitális képfeldolgozás, kijelzőpanelek), ener-

giaszektor (napelemek) vagy a repülés és a haditechnika.

Ennek megfelelően, az elektronikai rendszerekkel szemben támasztott elvárások között – a növekvő számítási kapacitás (digitális funkciók) mellett – megjelent a bővülő analóg funkciók (érzékelés, beavatkozás) integrálhatóságának – vagyis a környezetükkel való fejlett interakció biztosításának – igénye. Az egyre szélesebb körű funkcionális elvárásokkal szembesülő elektronikai ipar az új, egyre fontosabbnak tűnő, diverzifikációra épülő trendet „More than Moore” megközelítésként aposztrofálta, amit sematikusan a 3. ábra összegez. Ez a filozófia az eszközök teljesítményének és kereskedelmi potenciáljának növekedését már nem a „Moore-törvény” szerinti méretcsökkentésben, hanem a kiegészítő funkciók fejlesztésében és integrálásában látja. Ilyen funkciók: a kommunikáció (rádiófrekvenciás modulok – RF), a jelfeldolgozás (passzív alkatrészek), energiaellátás (tárolás és energiatermelés), érzékelés, beavatkozás, biológiai funkciók (biochip – Lab-on-a-Chip, mikrofluidika, implantálható és viselhető eszközök).

Az elektronikai eszközök és rendszerek (ECS – electronic components and systems) funkcionális diverzifikációjára épülő „More than Moore” trend a nem digitális funkciók digitális elektronikai alkatrészekkel történő kapcsolódását, integrációját helyezi előtérbe. Mivel az analóg eszközök méretcsökkentésének sebessége nem kell, hogy megfeleljen a Moore-törvénynek, ebben az esetben az integrációs technológiák fejlesztése kerül a teljesítménynövelést jelentő célok középpontjába, lehetővé téve, hogy az elektronika analóg funkciói beépüljenek a tokok (System-in-Package, SiP)



3. ábra. Az elektronikus eszközök és rendszerek fejlődési trendjei a Moore-törvényen túl [7]

vagy akár a chip (System-on-Chip, SoC) szintjén is. A merőben eltérő anyagcsoportokból változatos gyártástechnológiával előállított komponensekből mint építőkövekből felépülő komplex rendszerek létrehozását a heterogén integrációs megoldások gyorsuló fejlődése teszi lehetővé.

Kimondhatjuk, hogy ettől kezdve az ITRS mikro- és nanotechnológiai fejlesztésekre vonatkozó iránymutató szerepét átveszik a komplex elektronikai rendszerekre vonatkozó tanulmányok: IRDS (International Roadmap for Devices and Systems – Az eszközök és rendszerek nemzetközi útiterve), ECS-SRA (Strategic Research Agenda for Electronic Components and Systems – Az elektronikai komponensek és rendszerek stratégiai kutatási terve).

* * *

Gordon Moore öröksége mind a mai napig meghatározó: olyan különleges technológiai fejlesztések katalizátora és hajtóereje, mint az EUV-litográfia, a 3D/2D/1D tranzistor-architektúrák (fin-FET, nanosheet – nanoréteg, nanoribbon – nanoszalag, nanowire – nanoszál), vagy a komplex érzékelő rendszerek és integrációs technológiák. Az ikonikus jóslat aktualizált formái tehát újra és újra iránymutatást adnak az elektronikus eszközök és rendszerek fejlesztői számára.

Moore a feleségével közösen a 2000-ben létrehozott alapítványa (Gordon and Betty Moore Foundation) révén aktív filantróp tevékenységet is folytatott – többek között környezetvédelmi, egészségügyi és egyéb tudományos területen dolgozó fiatal feltalálókat támogatva – egészen a 2023. március 24-én bekövetkezett haláláig.

Köszönetnyilvánítás

A cikk elkészültét a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatta a K137852, TKP2021-EGA-02, TKP2021-NVA-03 és TKP2021-EGA-04, valamint a V4-Japán programok (2019-2.1.7-ERA-NET-2021-00028) által, illetve a Kulturális és Innovációs Minisztérium a Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium projekt (2022-2.1.1-NL-2022-00004) keretében.

Irodalom

1. G. E. Moore: Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38 (8) április 19, 1965
2. D. J. Yang: On Moore's Law and fishing: Gordon Moore speaks out. *U.S. News Online*, 2000 (7/10/2000).
3. G. E. Moore: Progress in Digital Integrated Electronics, Technical Digest 1975. In: International Electron Devices Meeting, *IEEE*, 1975, 11–13.
4. K. Mistry, et al.: A 45 nm logic technology with high-k+metal gate transistors, strained silicon, 9 Cu interconnect layers, 193 nm dry patterning, and 100% Pb-free packaging. In: 2007 IEEE International Electron Devices Meeting, Washington, DC, USA, 2007, 247–250. <https://doi.org/10.1109/IEDM.2007.4418914>
5. S. Natarajan, et al.: A 14 nm logic technology featuring 2nd-generation FinFET transistors, air-gapped interconnects, self-aligned double patterning and a 0.0588 μm^2 SRAM cell size. In: 2014 IEDM, *Tech. Dig.*, 71–73.
6. N. Broekhuijsen: Prototypes first ever 3 nm GAAFET semiconductor. 2020, *Tom's Hardware News*, <https://www.tomshardware.com/news/samsung-prototypes-first-ever-3nm-gaafet-semiconductor>
7. <https://research.ibm.com/blog/2-nm-chip> [utolsó megtekintés 2023. 11. 04.]
8. M. Waldrop: The chips are down for Moore's law. *Nature*, 530 (2016) 144–147.
9. D. Burg, J. H. Ausubel: Moore's Law revisited through Intel chip density. *PLoS One*, 16 (8) (2021) e0256245.
10. W. Arden, M. Brillouët, P. Coge, M. Graef, B. Huizing, R. Mahnkopf: More than Moore – White Paper. *ITRS – International Technology Roadmap for Semiconductors*. http://www.itrs2.net/uploads/4/9/7/7/49775221/irc-itrs-mtm-v2_3.pdf