



FEJLŐDÉSÜNK ZÁLOGA: A FÉLVEZETŐ-TECHNOLÓGIA

KEY TO PROGRESS: THE SEMICONDUCTOR TECHNOLOGY

Bársony István

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet,
Budapest, Magyarország. barsony.istvan@hun-ren.ek.hu

Abstract

Future progress in our life is unthinkable without semiconductor technology. Below is a brief survey of the development facilitated by the integration of silicon devices since the discovery of the transistor 75 years ago, hinting also at the limitless future opportunities. In all sectors of everyday life integrated circuits are fundamental components in our instruments, their role in the industrial food-chain and their accessibility is of global-political importance, as witnessed today.

Keywords: *semiconductors, IC, complexity, functionality.*

Összefoglalás

Életünk további fejlődése elképzelhetetlen a félvezető-technológia nélkül. A 75 éves tranzisztor apropóján futólag áttekintjük azt az utat, amelyet a szilíciumtranzisztorok integrálásával a mai napig megtettünk, kitekintést adva a jövőben várható korlátlan lehetőségekre is. Az integrált áramkörök életünk valamennyi területén eszközeink alapvető alkatrészei, az ipari táplálékláncbeli szerepük, hozzáférhetőségük globálpolitikai jelentőségű, ahogy napjaink fejleményei bizonyítják.

Kulcsszavak: *félvezetők, IC, komplexitás, funkcionalitás.*

1. Bevezetés

Az eszköz, amely mindent megváltoztatott, a 75 évvel ezelőtt a Bell Laboratóriumban szabadalmaztatott, pontkontaktusos, bipoláris működésű Ge-tranzisztor volt, John Bardeen, Walter Brattain és William Shockley Nobel-díjas találmánya. A következő forradalmi áttörést a technológiában Jack Kilby, majd Robert Noyce felismerése jelentette 1958-ban. Kimutatták, hogy az egyedi, aktív félvezető-erősítő, ill. -kapcsolóelemeket passzív áramköri elemekkel egyetlen szubsztráton huzalozva komplett integrált áramkört is meg lehet valósítani. Noyce igazi monolitikus, azaz egy szilíciumlapkán Al-huzalozással kialakított, integrált eszközt készített. A fizikai Nobel-díjat végül Kilby kapta ezért 2000-ben, mert az Intel-alapító Noyce ezt már nem érhetette meg. 1960 táján tehát elindult a szilíciumalapú, digitális, integrált áramköri technológia máig tartó diadalútja [1].

2. Miért éppen szilícium?

Az elemi félvezető Si tilos sávja ($E_g = 1,12$ eV) és a termikus zajt meghatározó sajátvezetése éppen a földi, emberi tevékenység hőmérséklet-tartományában (-40 – 140 °C) teszi alkalmassá a (termosztálás nélküli) megbízható (digitális) működés megvalósítására.

A szilícium oxigéntartalmú közegben nagy hőmérsékletre hevítve természetes oxidot képez, amely kiváló szigetelő és „maszkoló-réteg” a Si-szubsztrát adalékolása során. Ez az integrált-áramkör-gyártásban mindmáig uralkodó, két-dimenziós építkezés, az ún. planáris technológia alapja.

Indirekt tilossávszerkezete folytán hatékony fénykibocsátásra ugyan nem alkalmas, kristályhiba-mentessége és töltéshordozó-mozgékonyága folytán csökkentett méretekkkel a fizikai-technológiai korlátok eléréséig viszont predesztinált a nagyfrekvenciás működésre.

Bioinert anyag, azaz toxicitási szempontból alkalmas beültetésre az élő szervezetbe biokompatibilis módon [2].

3. Moore jóslata digitális IC-k-re

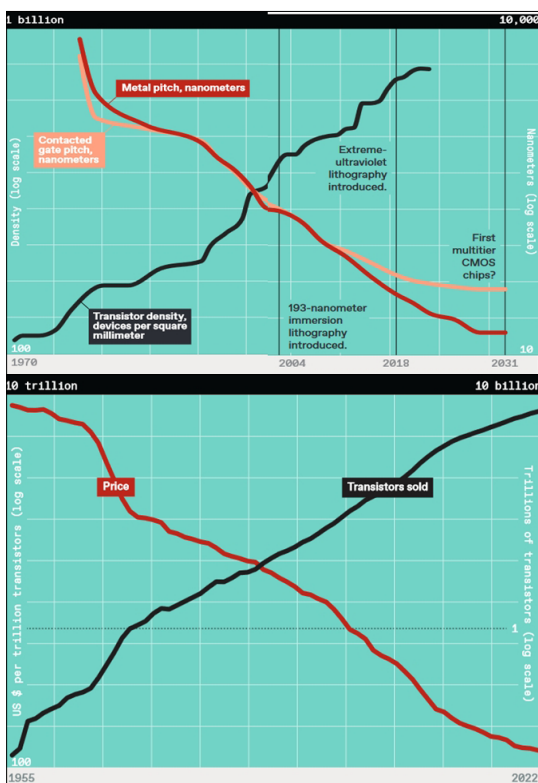
1965-ben Gordon E. Moore, az Intel egyik vezetője felállított egy tapasztalati „törvényt” [3].

A „Moore-jóslat” szerinti exponenciális kapacitásnövekedés (az egy csipen integrált tranzisztorok száma) (1. ábra) a csipgyártásban csupán középtávú megfigyelés volt a technológia hajnalán, gazdasági előrejelzés, ami viszont eddig hatvan éven át önbeteljesítő jóslattá, azaz önként követett útitervvé vált! Különleges érdeme volt az Intel szerint, hogy segítette a koordinációt: a szoftverházak fejleszthettek már előre a majd két év múlva megjelenő csipekre, ami megteremtette az

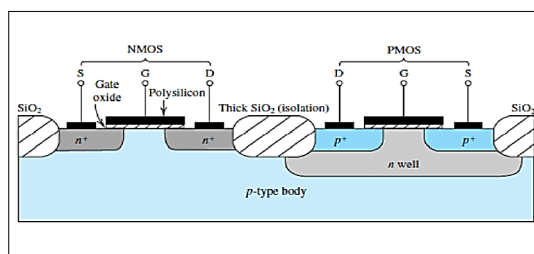
új eszköz piacát. A planár technológiában hamar uralkodóvá vált a komplementer fém-oxid-szilícium (C-MOS) áramkör-architektúra (2. ábra).

Az integráció fejlődése azonban nem volt mindig zökkenőmentes (3. ábra). 1980-ra a csipenkénti teljesítményfelvétel kezelhetetlen szintet ért el, így a tápfeszültséget fokozatosan 5 V-ról 1 V-ra csökkentették, amivel az ipar 30 éven át töretlenül fejlődhetett. 2010 táján újra a teljesítmény-disszipáció vált problémává. Szimulációs előrejelzések szerint a négyzetcentiméternyi csipfelületen kialakuló hőviszonyok „hamarosan elérnék a nukleáris erőmű magjában uralkodó hőmérsékletet!”

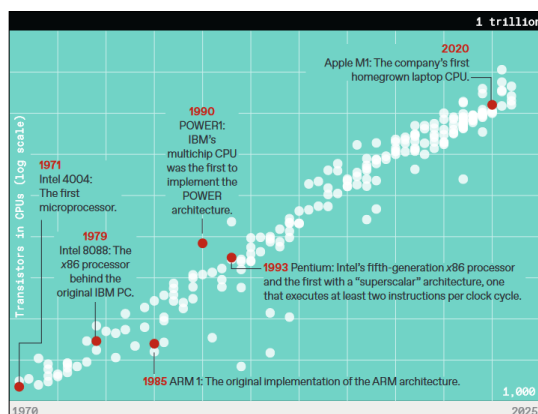
Megoldást a háromdimenziós, vékony szubszt rátón kialakított, ún. FinFET (cápauszony-térvezérlés) (4. ábra), valamint a többmagos pro-



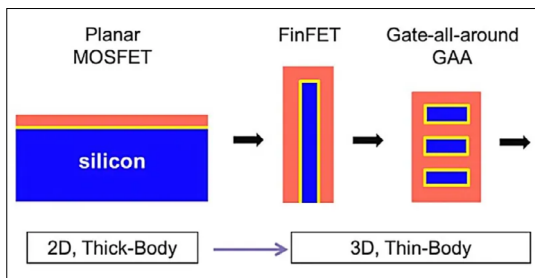
1. ábra. A Moore-törvény exponenciális növekedést ír elő tranzisztorok sűrűségére (fent, fekete görbe a bal ordinátán), ami csakis a karakterisztikus méretek csökkentésével érhető el (piros görbe a bal ordinátán). Az alsó ábra szerint ez a csipenként eladott tranzisztorok számának exponenciális növelésével (fekete görbe a jobb ordinátán) és fajlagos árának exponenciális csökkenésével (piros a bal ordinátán) jár



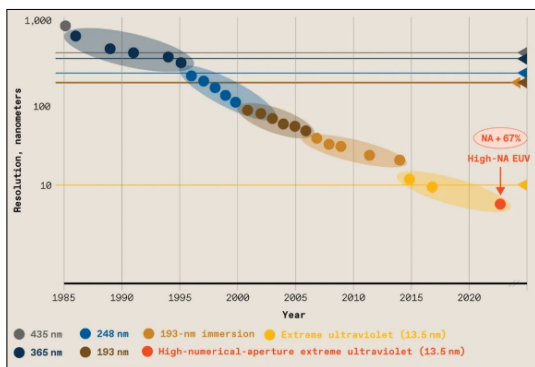
2. ábra. A planár szilíciumtechnológiában máig uralkodó komplementer MOS inverter alapkapcsolás keresztmetszeti képe



3. ábra. Az Intel mikroprocesszorainak megjelenése nagy lendületet adott az áramköri komplexitásnövekedésnek. 1985-re érték el az 1 millió tranzisztor/cm² elemsűrűséget. Az alkalmazás-specifikus igények hajtották a CPU-architektúra-fejlesztést, így ma a processzorcsipek elemsűrűsége már meghaladja a 100 millió tranzisztor/mm²-t [3]



4. ábra. Áttérés a kétdimenziós planáris tranzisztor kialakításról a 3D-s FinFET és a körkörös vezérlőelektródás, vékony szubsztrátos szilíciumtechnológiára



5. ábra. Az UV-fotolitográfiai léptető-megvilágítók hullámhosszának csökkenése 35 év alatt

cesszorarchitektúra alkalmazása jelentett, ami biztosítja a további méretcsökkentésen (1. ábra) alapuló komplexitásnövelést. A vékony szubsztrát adott esetben egy 2D-s félvezető vagy grafén is lehet a jövőben [4].

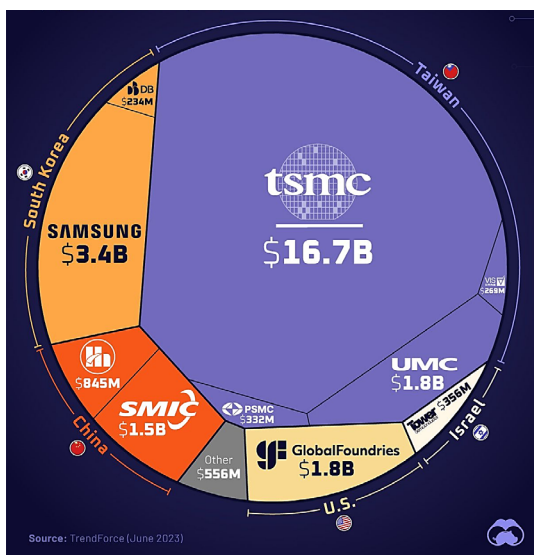
4. Átrendeződés az ellátási láncban

A termelékenységre, azaz a szeletmegmunkálás átbocsátóképességének folyamatos növelése alapvető gazdasági szempont. Tulajdonképpen ez hajtja a szeletátmérő növelését és a kritikus méretek csökkentését. A fotolitográfia máig uralkodó ábrakialakítási eljárás maradt az iparban. Viszont az egyre kisebb méretek optikai leképezését csak az UV-megvilágítás hullámhosszának 435 nm-ről 13,5 nm-re csökkentésével és a numerikus apertúra növelésével lehetett, ill. lehet majd elérni (5. ábra). [5]

Az ezt megvalósító, szobányi vákuumberendezés értéke >200 millió USD, ez ma a finommechanika-optika, robotika és vezérléstechnika abszolút csúcsteljesítménye, ami csak az űrtechnológiához fogható (6. ábra). [6]



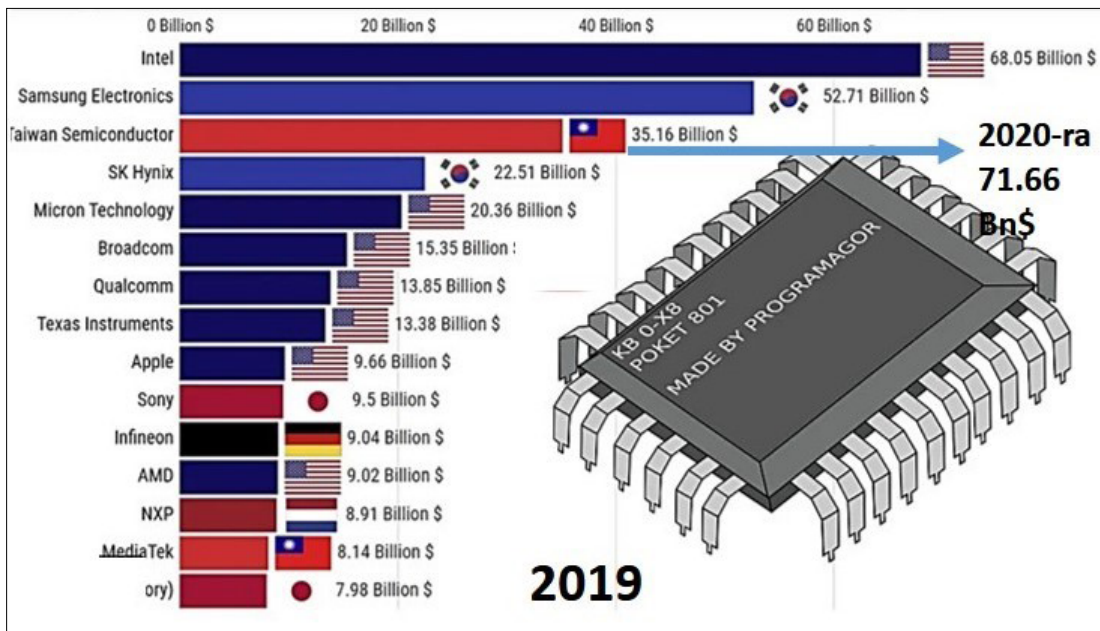
6. ábra. Az ASML EXE:5000 nagy numerikus apertúrájú, extrém UV-litográfiai, tekintélyes méretű berendezése (forrás: ASML) az UV-sugármenetek szemléltetésével [6]



7. ábra. A 10 legkorszerűbb IC-gyártó Foundry, az ASML megrendelőinek megoszlása, jól szemléltetve Ázsia dominanciáját [7]

Mára a korszerű litográfiában az egyedüli berendezésszállító a holland multinacionális cég, az ASMLithography. A fejlesztés tehát európai, jól lehet a tőkeerős megrendelők jobbára Ázsiában működő cégek (7. ábra).

A legnagyobb intellektuális hozzáadott értéket képviselő áramkörtervezés a nagy, USA-beli IC-gyártóknál és részben Európában működik, amelyek a sorozatgyártást, a Foundryk gyártókapacitását kihasználva, Ázsiában végeztetik



8. ábra. A világ élenjáró áramkörgyártó vállalatai éves forgalmuk szerint 2019-ben. 2020-ra már a tajvani TSMC vezette a listát a Samsung előtt [7]

(8. ábra). Különösen konfliktusos gazdasági helyzetben kockázatos a töredezett ellátási lánc.

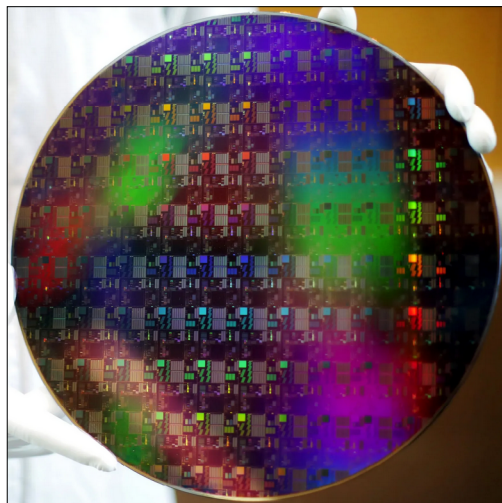
1986-ban 5 japán és 3 amerikai gyártó mellett még 3 európai cég (Philips, Siemens, SGS-Thomson) is képviseltette magát az első tízben.

5. Mi várható 25 éven belül?

A digitális áramkörök alapelemének, a tranzistoroknak a működési elve várhatóan egészen <1 nm méretéig a tervezéssel kapcsolt töltésvitel marad. Előtérbe kerülnek viszont a speciális, adott alkalmazásra optimalizált integrált konstrukciók.

A merőlegesen pozicionált csatornák révén (3. ábra) szilícium-alapanyagon is még tovább növelhető az elemsűrűség – esetleg új anyagokkal, valószínűleg egymásra rétegzett 3D-s szerkezetekkel. [4]

A ma még zömmel 30 cm átmérőjű Si-szeleteket (9. ábra) a gyártásban felváltja a 45 cm-es szelétátmérő, ami a teljes gyártósor átszerszámozását igényli, különös tekintettel a litográfiára. Az 5. ábra szerinti kritikumérlet-csökkenés csupán a numerikus apertúra növelésével lesz elérhető. Ekkora felületen a megfelelő felbontás melletti levilágítás megkívánja a nyalábszög manipulálását. Egy ilyen FAB-beruházás mai árak mellett



9. ábra. A GlobalFoundries Dresden egy 300 mm átmérőjű, processzált Si-szelete

több száz milliárd USD, és csak a legtokeerősebb gyártók engedhetik meg maguknak (8. ábra).

Az extrém vékony szigetelő- és félvezetőrétegek fellépő óriási térerősségek miatt ($1 \text{ V} / 1 \text{ nm} = 1 \text{ GV/m!}$) az áramkörökben preferált a kisebb feszültségszinteken történő működés. Domináns probléma marad az IC-k teljesítményfelvételének kordában tartása!

Egy-egy új működési elv bevezetése a tapasztalatok alapján 20–25 év is lehet. Mai elképzeléseink szerint a kvantumtechnológia fejlődése nem lesz elég gyors ahhoz, hogy egy negyedszázadon belül veszélyeztesse a tranzisztorokra épülő IC-technológia egyeduralmát a hétköznapi számítástechnikában. Mire alapozható ez a kijelentés?

6. A kvantumszámítógép-technika

A kvantumállapotokkal (qubit) operáló számítástechnika alapproblémája a termikus zaj kiiktatása, ami még abszolút 0 K közelében is <20 μ s alatt lerombolja a két logikai alapállapot közötti különbséget.

Az IBM új krio-CMOS-vezérlőcsipje (10. ábra) 14nm-es fin-FET technológiával durván 4K (–269,15 °C) hőmérsékleten működik. A korábbi 100 W/qubit teljesítményigényt sikerült 10 mW/qubit-re csökkenteniük. Ezzel lehetett a csipenkénti qubitek számát növelni. [8]

A kvantumtechnológia elsősorban a felhőszolgáltatások révén fogja a mesterséges intelligencia (AI) számítástechnikai háttérét biztosítani (11. ábra). Becslések szerint teljes elterjedése esetén a mindenki számára hozzáférhető AI-szolgáltatás folyamatos működtetése mintegy 100 TWh energiát igényelne, ami megfelel egy fejlett gazdaság, pl. Hollandia vagy Svédország éves energiaszükségletének. Ezek az adatok józanságra intenek, és egyben kijelölik a jövőbeni fejlesztés irányát, ami elsősorban az energiafelhasználás csökkentése.

A kvantumkomputer-technológiai fejlődése feltehetően nem lesz elég gyors ahhoz, hogy még 25 évig veszélyeztesse a szilícium-IC-technológia hegemoniáját a számítástechnikában és az automatizálásban.

7. Következtetések

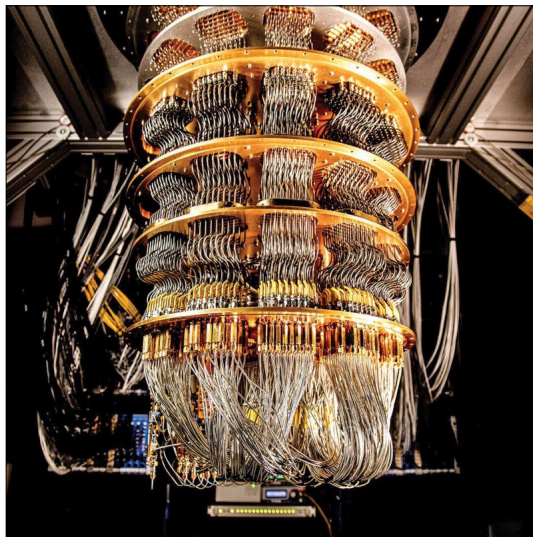
A tranzisztorok a hétköznapi életünket minden területen befolyásolják az ipari folyamatok vezérlésétől a közlekedésen, szállításon, mezőgazdaságon, egészségügyi szolgáltatásokon, hírközlésen át az oktatás és kultúra támogatásáig.

Már most kijelenthető, hogy a következő negyedszázadban is az érzékelőkkel kombinált integrált áramkörök fogják az emberiség jövőbeni problémáit megoldani, beleértve a klímaadaptációt is!

Az elmúlt évek globálpolitikai eseményei, a Covid-krisis és a háborús fejlemények, rámutattak azonban ennek a tökéletesen kiépült, globális ellátási láncnak a sérülékenységre. A nagy gyártócégek profitmaximalizálási törekvései miatt az elmúlt évtizedekben az élő munkaerőt foglal-



10. ábra. Az IBM 2016 óta 5 qubit szintről fejlesztett kvantumcsip családjá



11. ábra. A Google kvantumcsip hűtésére fejlesztett kriogenerátor. Qubitek lehetnek ionok, fotonok és atomok egyaránt. A Google qubit szupravezető fémlemezekből épül fel, melyek alacsony energiaállapota a logikai 0, a magasabb az 1 állapot. Mikrohullámmal bármelyik állapotba, ill. egyszerre mindkettőbe vezérelhetők. A nagyobb algoritmusok futtatásának biztonsága szempontjából kritikus a termikus zaj [8]

köztató folyamatokat olcsóbb bérű országokba, nevezetesen Ázsiába, szervezték ki. Előrelátó gazdaságfejlesztésükkel elsősorban az ázsiai kis-tigrisek, Dél-Korea, Tajvan, Szingapúr, Hongkong és Kína nem csak felzárkóztak a korábban vezető Japán mögé (7. és 8. ábra), de az európai és amerikai ipar mikroelektronikai beszállítóiként megkerülhetetlenné váltak. Különösen igaz ez a legkorszerűbb technológiát birtokló tajvani TSMC cégre, amelyik a fenti intézkedések eredményeként mára globálisan a legnagyobb integráltságú áramköröcsipek 70%-ának gyártója!

Amikor a járvány, ill. a háborús szankciós politika intézkedései miatt a szállítási útvonalakban zavar lépett fel, az európai és amerikai gépkö-

csiggyártóknak és egyéb kulcs-iparágaknak alkatrészhiány miatt hetekre kellett leállniuk. Ez élesen rávilágított az IC-ellátásban a szuverenitás megteremtésének szükségességére. Napjainkban mind az USA-ban, mind az EU-ban az ún. Chips Act-támogatásokkal ösztönzik a hazai gyártókat, és próbálják a jelenlegi teljes kiszolgáltatottságot felszámolni. [9]

Az USA mindamellett szeretné gazdasági fejlettségi előnyét hosszabb távon fenntartani. Mindenáron meg kívánja akadályozni, hogy a népi Kína Tajvant mint országa részét bekebelezze. Egy lokális háború viszont egyik Tajvanra utalt félnek sem érdeke, paradox módon ez a patthelyzet a „béke” záloga. Ezért az USA szankciós intézkedésekkel tiltja meg az európai monopolhelyzetű gyártónak a legkorszerűbb ASML litográfiai berendezések (6. ábra) exportját a Kínai Népköztársaságba. Ezzel a legkorszerűbb technológia alkalmazásában megmutatkozó mintegy 6–7 éves lemaradás konzerválását remélik fenntartani.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Cressler, J.D.: *Silicon Earth. A Historical Perspective on the Invention/Discovery of the Transistor*. IEEE Electron Devices Magazine, June 2023, 16–24.
- [2] Bársony I.: *Szilíciumtechnológia – és amit neki köszönhetünk*. Székfoglaló előadások a Magyar Tudományos Akadémián, Magyar Tudományos Akadémia, Budapest, 2021, 7–11.
- [3] Crass S.: *The Transistor's Amazing Evolution from Point Contacts to Quantum Tunnels*. Spectrum, IEEE.org, December 2022, 30–31.
- [4] Radosavljevic M., Kavalieros J.: *Taking Moore's Law to New Heights, When Transistors Can't Get Any Smaller, the Only Direction Is up*. Spectrum, IEEE.org, December 2022, 32–37.
- [5] Moore S. K.: *The Transistor of 2047*. Spectrum, IEEE.org, December 2022, 38–39.
- [6] Schoot J. van: *This Machine Could Keep Moore's Law on Track*. IEE Spectrum, April 2024, <https://spectrum.ieee.org/high-na-euv>
- [7] Révész B. Á.: *Íme,ők a legerősebb katonák a globális chipháborúban*. <https://mandiner.hu/makronom/2023/11/legerosebb-katonak-globalis-chiphaboruban>
- [8] Adrian Cho: *Quantum computers take key step toward curbing errors*. https://www.science.org/content/article/quantum-computers-take-key-step-toward-curbing-errors?utm_source=sfm-c&utm_medium=email&utm_campaign=DailyLatestNews&utm_content=alert&et rid=581465878&et_cid=4612861
- [9] <https://www.european-chips-act.com/>