

Szilíciumtechnológia – és amit neki köszönhetünk

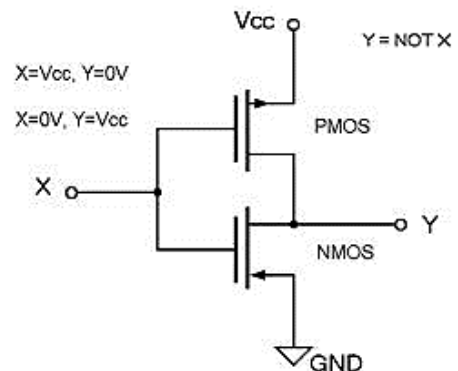
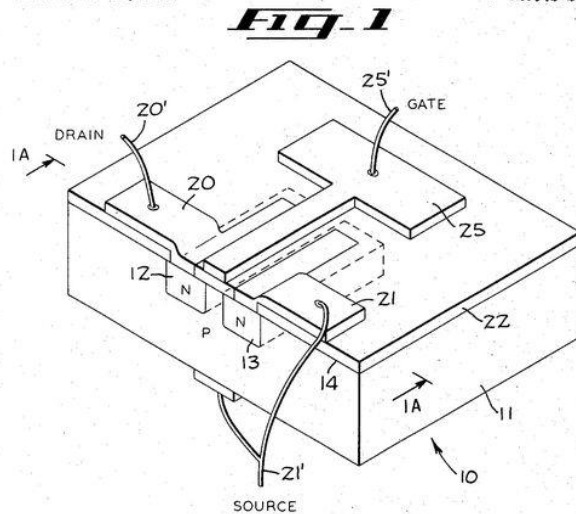
Bársony István, az MTA rendes tagja székfoglaló előadása
MTA Székház Felolvasóterem, 2017. január 18. 14.00

Motto: “Új világunkban nem a nagy hal eszi meg a kicsit, hanem a gyors hal végez a lassúval!”

Klaus Schwab, World Economic Forum

Az elmúlt bő félévszázad a mikro/nanoelektronika egyre gyorsuló fejlődésének jegyében telt el. Ötven éve annak, hogy Frank Wanlass, a Fairchild Semiconductor kutatómérnöke megkapta a szabadalmi védeltséget a „Low Stand-by Power Complementary Field Effect Circuitry” c. 1963-ban benyújtott találmányára. A találmány szerint a p- és n-csatornás MOS tranzisztorok együttes alkalmazásával felépített logikai alapelem, az inverter fogyasztása azáltal minimalizálható, hogy működése során csak tranziensteljesítményfelvétel lép fel. Ez is nő ugyan a működési frekvenciával, viszont alapállapotban csak az egyik lezárt tranzisztor szivárgási árama okozza a disszipációs veszteséget. A töltéstranszporton alapuló tranzisztorműködést hasznosító komplementer MOS logika, közismert nevén a CMOS technika, máig egyetemes technológiája a digitális világ alapvető integrált mikroeszközeinek, a processzoroknak és a memória áramköröknek, de a képalkotó és egyéb jelfeldolgozó áramköröknek is.

Dec. 5, 1967 F. M. WANLASS 3,356,858
LOW STAND-BY POWER COMPLEMENTARY FIELD EFFECT CIRCUITRY
Filed June 18, 1963 5 Sheets-Sheet 1

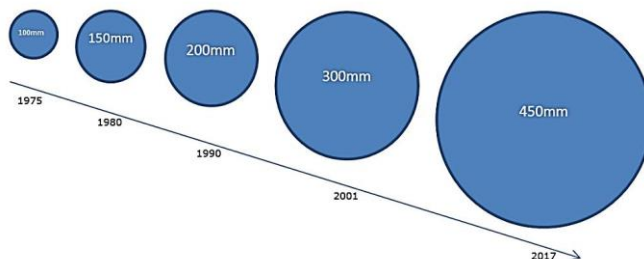


A szilícium alapú chipgyártó ipar termelési értéke mára meghaladta a 350 milliárd US\$-t. Folytonos csúcstechnológiai igényeivel több, mint ötven éve ez, a világ legkiforrottabb technológiáját hasznosító iparág hajtja a mikroelektronikai kutatás-fejlesztést, beleértve az anyagtudomány és –technológia komplex területét. Még lényegesebb, hogy a csillagászati összegeket felemésztő kutatásokat a megtermelt profitból finanszírozza is. Ezzel tudta biztosítani azt a töretlen méretcsökkentést, aminek következtében az egy-egy tranzisztorra eső költség az időközben már milliárdnyi tranzisztort integráló áramköri chipekben ötven éven át exponenciálisan csökkent. Most azonban fordulóponthoz érkeztünk; a szakadatlan méretcsökkentés történetében először tapasztalunk fajlagos tranzisztor-költségemelkedést a csúcsáramkörökben.

Joggal merül fel a kérdés, hogy *miért éppen a szilícium* vált korunk meghatározó technológiájának alapanyagává?

A szilícium a periódusos rendszer 14. rendszámú félfémes eleme, ami az oxigén és a hidrogén után a harmadik leggyakoribb elem a Földön. Bolygónkon gyakorlatilag minden hatodik atom, azaz 16,6 at% szilícium. Ez teszi ki a Földkéreg tömegének több mint egynegyedét (27,7 tömeg%), kvarc és szilikátok formájában, homokként a legfontosabb talajalkotó elem, viszont a természetben tiszta állapotban nem fordul elő. Alapvető technológiai fontosságát azonban nem ez indokolja.

- A gyémántrács szerkezetű egykristályos Si az az elemi félvezető anyag, melynek tilos sávja és sajátvezetési tulajdonságai éppen a Földön végzett emberi tevékenység hőmérséklettartományában (-40°C - $+140^{\circ}\text{C}$) garantálja a belőle készült elektronikus eszközök megbízható működését. A Si szobahőmérsékleten érvényes $E_g=1,12$ eV-nyi tilos sáv energiája, valamint a termikus zaj szempontjából kritikus alacsony intrinsic koncentrációja ($n=1,4 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) *predesztinálja a digitális szilícium áramköröket a külön temperálás nélküli, normál környezeti körülmények közötti működésre.*
- Indirekt sávszerkezete miatt a szilícium ugyan hatékony (IR) fénykibocsátásra nem alkalmas, viszont kristályhiba-mentessége és megfelelően nagy töltéshordozó mozgékonysága egészen a fizikai korlátok eléréséig csökkentett méretekkel is *kiváló nagyfrekvenciás áramkörműködést* tesz lehetővé.
- Technológiai szempontból kiemelkedő jelentősége van annak, hogy oxigéntartalmú közegben magas hőmérsékletre hevítve a szilíciumon kiváló szigetelő tulajdonságú természetes oxid képződik. Az oxidrétegben a Si technológiai megmunkálása során használt adalékatomok diffúziós állandója a Si-ban érvényes diffúziós állandóknál nagyságrendekkel kisebb. A termikus oxid megfelelő vastagságban így kiváló “maszkoló-réteget” képez a Si szubsztrát adalékolása során is. *Ennek a tulajdonságnak köszönhetően alakult ki a Si-technológiában mindmáig uralkodó “planáris technológia”.*
- A szilíciumnak újabban egyre fontosabbá váló előnyös tulajdonsága, hogy *toxicitási szempontból bioinert anyag*, ezért az élő szervezetbe is beültethető biokompatibilis eszközök alapanyaga lehet. Ez óriási távlatokat nyit *a chiptechnológia és a biológiai szervezetek integrálása szempontjából.*



A tiszta szilícium előállítására tekintélyes kémiai-mechanikai háttérpar kifejlődését igényelte. Az integrált áramköri ipar az egykristályos alapanyagot szeletek formájában hasznosítja, a chipgyártás kiemelkedő termelékenysége az ún. *csoportos-szeletmegmunkálással* biztosítható - a javuló minőséggel

párhuzamosan egyre növekvő szeletátmérő mellett. A termelékenységi követelmények által hajtva a félvezetőiparban ma általánosan használt 200 és 300 mm-es méreten túl az alapanyagipar már a 450 mm-es szeletátmérőt is gyártja. A szeletgyártás rendkívül összetett és meglehetősen költséges folyamat; orientált egykristály-húzási, ingot megmunkálási, szeletelési, polírozási, tisztítási lépéssorozat végterméke. IC gyártási célra ez a gigantikus háttérpar 1,6 millió tonnányi egykristályos szilíciumot állít elő, csaknem 7,2 milliárd \$ értékben, ami szelet formában 6,8 km² –nyi területet fedne le! Ennél olcsóbb gyártási technológiával készülnek napelem célra az ún. „solar-grade” polikristályos Si alapanyagok. Mára a szilícium-gyártás is szinte kínai monopóliummá vált (>85%).

A tömegpiacot jelentő napelem-felhasználás területén óriási a növekedés, hiszen világszerte napi félmillió fotovoltikus panelt helyeznek üzembe. Az International Energy Association szerint a következő öt év globális energiatermelő-kapacitás bővülését már 60%-ban a megújuló források (benn a napelemek) teszik majd ki, melyek összkapacitása 2021-re 7600TWh lesz. Ez az USA és Európa mai teljes villamosenergia termelésének felel meg!



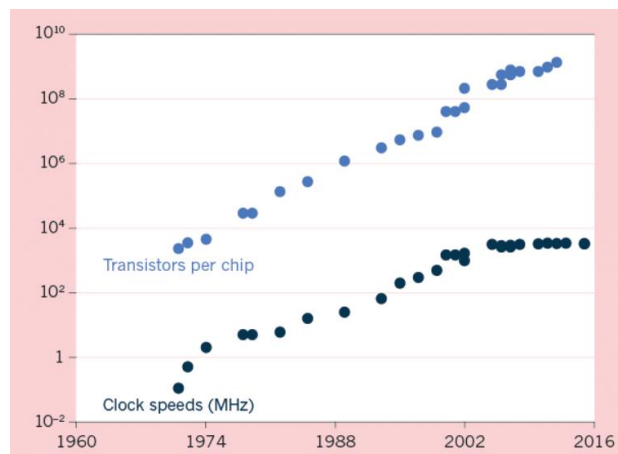
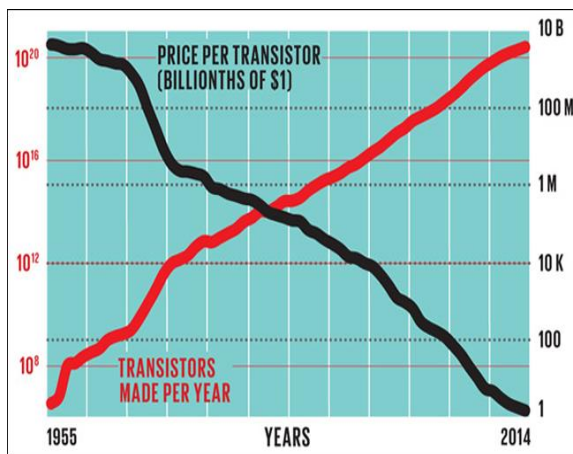
A kínai Lungjanghszia gátnál épült meg a világ legnagyobb napelem-erőműve 2014-ben. 4 millió napelempanelt szereltek fel egy 26 négyzetkilométeres területen. Az úrfelvételen látható erőmű <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=89668> 850 MW kapacitása 140 ezer háztartás áramellátását képes biztosítani.

Előrejelzések szerint 2030-ra nyerünk majd több energiát megújuló energiaforrásokból, mint fosszilis tüzelőanyagokból. A cél elérésében sokat segít majd a napelemeknél várható gyors *energia-konverziós hatásfok növekedés*. A laboratóriumban pillanatnyilag már igazolt rekord hatékonyság értékek:

- a *kristályos + amorf kombinált Si-cella* (180cm²) esetében: 26,3%;
- a Si alapú, de prizmás fénybontással és *dedikált szín-elnyeletéssel készülő, négyrétegű 28 cm²* –es celláié: 34,5%;
- a flexibilis hordozóra készülő olcsó, de még instabil *perovszkit-alapú napelemeknél*, ami a jövő nagy ígérete 16 cm² méretben: 12,1%.

2015-ben ünnepeltük az ötvenedik évfordulóját a Gordon E. Moore, Intel-alapító által publikált előrejelzés megjelenésének <http://www.nature.com/news/the-chips-are-down-for-moore-s-law-1.19338>. Az azóta „Moore-törvényként” ismert jóslat a Si-technológia hajnalán végzett középtávú megfigyelésen alapult. Moore azt állította, hogy a tranzisztorok száma az integrált áramkörökben évente megkétszereződik, ezért *az egy eszközre (tranzisztorra) vetített költség szintén exponenciálisan csökken*. A komplexitás növekedése a költséghatékonyság növekedése mellett ráadásul az órajel-frekvencia, azaz az áramköri működési sebesség exponenciális növekedését is jelentette.

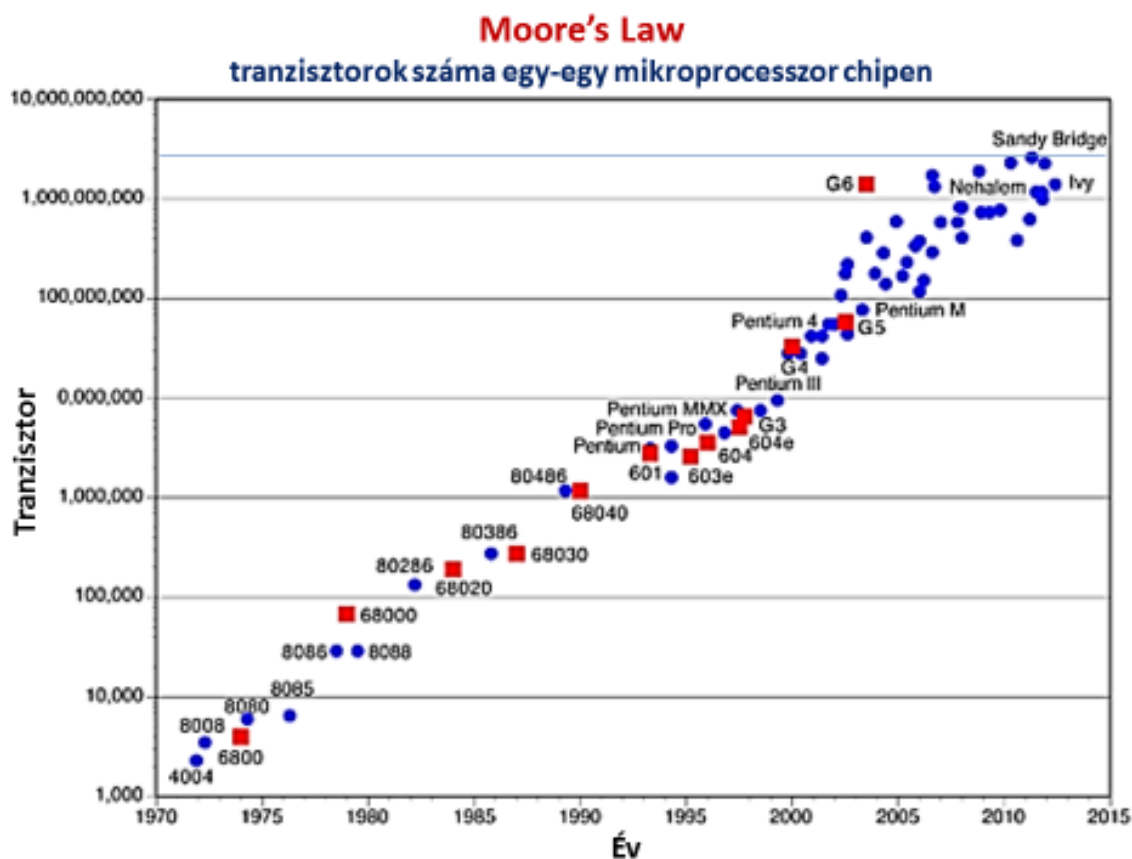
Ez a *gazdasági előrejelzés* ötven éven át *önbeteljesítő jóslatként* diktálta az IC ipar fejlődési ütemét és az ezt biztosító célokat előíró „útiter” (International Technology Roadmap for Semiconductors https://www.semiconductors.org/main/2015_international_technology_roadmap_for_semiconductors_itrs/) megvalósulását. Joggal emelték ki a legnagyobb gyártók, hogy *Moore legnagyobb érdeme a koordináció segítése volt*, hiszen a fejlődési trendek világos ismeretében a szoftverházak a következő évekre előre jelzett specifikációjú chipekre fejleszthettek, ami aztán meg is teremtette a biztos, kalkulálható piacot a HW-SW termékekre.



http://www.semiconductorscentral.com/moores_law.html

<http://www.nature.com/news/the-chips-are-down-for-moore-s-law-1.19338>

Miközben az egy-egy processzor chipen integrált tranzisztorok száma mára 2-4 milliárdra nőtt (ld. alább az INTEL mikroprocesszorchipjei esetében), *a digitális világ máig döntően az 1946-ban megalkotott zseniális von Neumann-féle univerzális számítógép-architektúrát használja!* Ezek az integrált eszközök biztosították számítástechnika generációváltásait a mainframe-computerektől a minikomputeren, a személyi számítógépeken, a laptopokon át a mai beágyazott processzorokig, digitális világunk mobil internet-összeköttetésű, zsebben hordható eszközeiig. Az integráció növekedésével az egyes ciklusokban ráadásul a felhasználók száma is nagyságrendekkel nőtt.

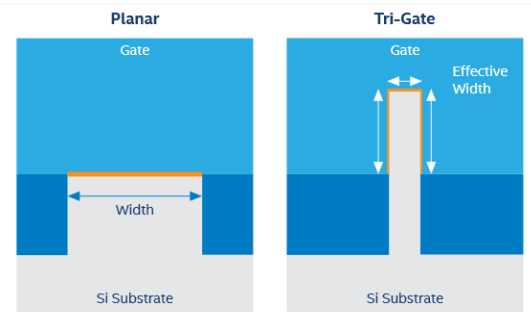
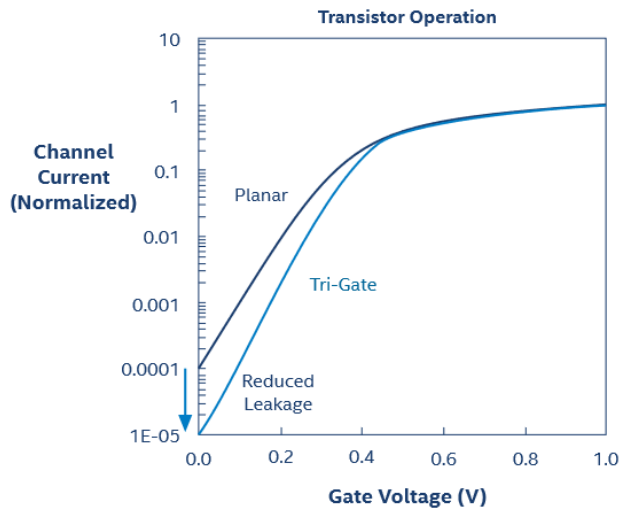


<http://pointsandfigures.com/2015/04/18/moores-law/>

Most azonban megtorpanni látszik az áramköri integrációban a Moore-törvény szerinti folyamatos költségcsökkenés. A ma gyártott legkorszerűbb processzorok a vírusoknál kisebb, 10 nm-es kritikus méretekkel épülnek fel. A fizikai korlátokat előreláthatólag 2020 táján érjük el 2-3 nm-es méreteknél, ami már csupán 10 atom mérete! Ha gigászi erőfeszítéssel és költségárfordítással sikerülne is technológiailag kiaknázni ezt a mérettartományt, az elektron kvantumbizonytalansága miatt a töltéstranszporton alapuló tranzisztorműködés, azaz a digitális kapcsolat reménytelenül megbízhatatlanná válik.

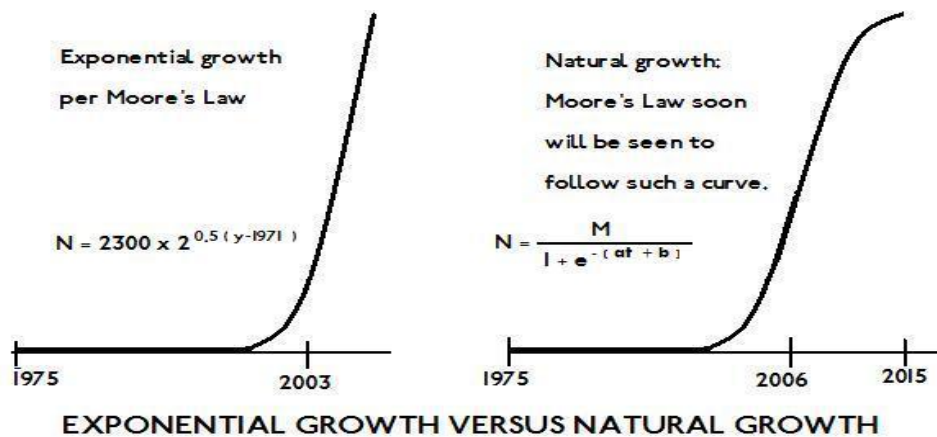
Ma még kijelenthetjük, hogy a komplexitás növelésében a korlátait feszegető szilícium technológiának nem mutatkozik kézenfekvő „utóda”, egyelőre tehát folytatódik a méretcsökkentés. Csakhogy a nagy integráltságú, kis fogyasztású áramkörök elemszám-függő szivárgási és termikus problémái miatt ez már nem oldható meg a hagyományos kétdimenziós síkbeli építkezéssel, azaz a „planáris technológiával”. Háromdimenziós építkezésre van szükség, ahogy azt a Nature 2016. februári számában bejelentették, és ezzel a Si-technológia nem követi tovább a Moore-törvény előírásait.

A 2015-ös ITRS menetrend ugyan 2030-ig megadja a különféle elnevezésű, „fin-FET”, azaz a szubsztrát síkjából kiemelkedő „uszony” segítségével kialakított tranzisztor-gatekkel felépülő, egymásra rétegelt tranzisztorokat is tartalmazó 3D megoldások műszaki igényeit, de a méretcsökkentési előírások (http://www.semiconductors.org/clientuploads/Research_Technology/ITRS/2015/5_2015%20ITRS%202.0_More%20Moore.pdf) követése, követhetősége egyre bizonytalanabbá válik



<http://www.realworldtech.com/intel-22nm-finfet/>

A Moore-törvény szerinti „exponenciális” feljutást tehát - akárcsak a természetes növekedési folyamatok esetében - hamarosan a telítésbe hajló „logisztikai S-görbével” kell helyettesítenünk.



https://thenextwavefutures.files.wordpress.com/2009/08/end_of_moores_law_growth_curves.jpg

A folyamatos beruházási kényszer (technológiafejlesztés és gyárépítés) már az elmúlt évtizedek során alaposan megrostálta a globális szereplők névsorát. A piac növekedése, elsősorban a „felhő technológia” és az okos telefonok kis-fogyasztású IC tömegigénye miatt a félvezető ipar most kénytelen lesz az eddigi legnagyobb tőkeinvestícióját végrehajtani. A gazdaságossági okokból szükségesnek látszó 450 mm-es szeletátmérőre való áttérést és a 10-7 nm-es csomóponttól a gyártóberendezésekre szükséges \$3-8 milliárdos beruházást már csupán néhány USA-beli és ázsiai gyártó (IBM, Intel, Samsung, TSMC) lesz képes finanszírozni!

Túlzás nélkül kijelenthető, hogy a szilícium technológia, a világ legfejlettebb csúcstechnológiája. A szilícium technológia teremtette meg a digitalizáció teljes eszközrendszerét - szűkebb és tágabb értelemben is. Eljárásait, az itt kialakult gyártási kultúrát ugyanis más iparágakban is sikerrel hasznosítják.

A digitalizáció árnyoldalaira hívta fel viszont a figyelmet Vinton V, Cerf, az internet és a TCP/IP protokollkészlet atyja. Szerinte „az internet őskorának fontos dokumentumait már most szinte lehetetlen megtalálni. Lassan jobban kutatható a XX. század közepe, amikor még minden papíralapú volt, mint a vége, amikor lezajlott a digitalizáció térhódítása”. Az állítás igazsága kézenfekvő, hiszen az adathordozók gyors fizikai és erkölcsi elavulása valamennyiünk személyes napi tapasztalata. Az „örökkévalóságnak” szánt kompakt adatkódolást alighanem csak az evolúció során kifejlődött legmegbízhatóbb információkódolással, a biológia segítségével sikerülhet megvalósítani. Egy zürichi csoport 83kbájtnyi adatot 4991 egyenként 158 nukleotid hosszúságú DNS szakaszra kódolt így fel, amiket 150 nm-es szilika nanogömbökkel izoláltak a környezettől. A kiolvasás a nanogömbök leoldása után viszont szilícium szekvenáló chippel oldható meg. [R.N. Grass et al.; Robust Chemical Preservation of Digital Information on DNA in Silica with Error-Correcting Codes, Angew. Chemie, Volume 54, Issue 8, February 16, 2015, pp. 2552–2555].

A számítási kapacitás bővítése a szilíciumtechnológia fizikai-technológiai korlátainak elérése után is folytatódni fog. Akármelyik is legyen a befutó a ma látható alternatív megoldások közül:

- a szupravezető kvantum-chipek;
- a fotonikai, nano-megoldások a kvantumszámítógépekben;
- esetleg a 2D-anyagok (grafén) elméleti lehetőségeinek a kiaknázása;

ezek mindegyike a szilícium technológia eredményeire alapozva, annak módszereit, know-how-ját és gyártóbázisát kihasználva tud csak kifejlődni!

Az ITRS (International Technology Roadmap of Semiconductors) félvezető-útiterv 2015-ben követi http://www.semiconductors.org/clientuploads/Research_Technology/ITRS/2015/5_2015%20ITRS%202.0_More%20Moore.pdf először az ún. „More than Moore” stratégiát. Most először tehát *már nem a technológiai lehetőségek kínálata hajtja az alkalmazást, hanem az alkalmazások követelményei diktálják a chiptechnológia fejlesztésnek irányát* (ld. szuperkomputerek, felhő-technológia az adattárolásban, okostelefon, stb.). A meghatározó felhasználói igények korunk aktuális társadalmi kihívásaiból vezethetők le:

- Biztonság: személyi (terrorfenyegetettség), adatkezelési, élelmezési, környezeti, háztartási, stb.
- Egészség: diagnózis, terápia, rehabilitáció, gerontológia, epidemiológia, fertilitás
- Mobilitás: közlekedési, autonóm hajtás, drónok,
- Gyártástechnológia: robotizáció, mesterséges intelligencia
- Energiatakarékosság, környezettudatosság

A fenti területek eszközeivel szemben általános követelmény a *kis fogyasztás*:

a hordozható, viselhető, olcsó, flexibilis, beültethető, vezeték nélkül kommunikáló, autonóm tápellátású érzékelők fejlesztése kerül előtérbe!

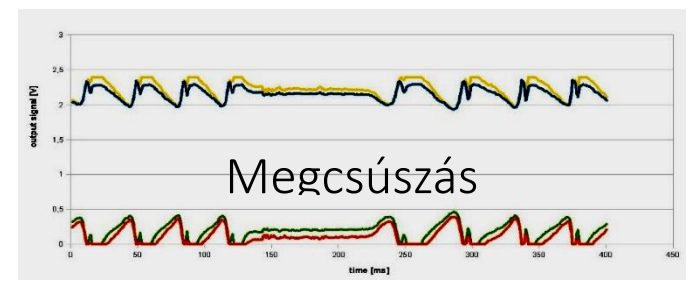
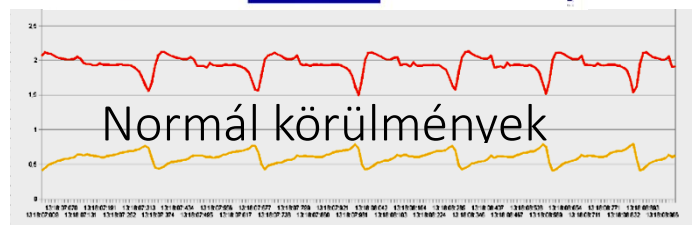
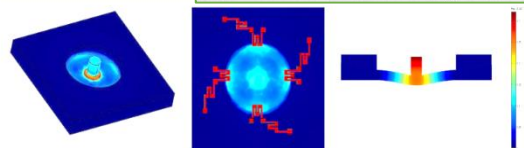
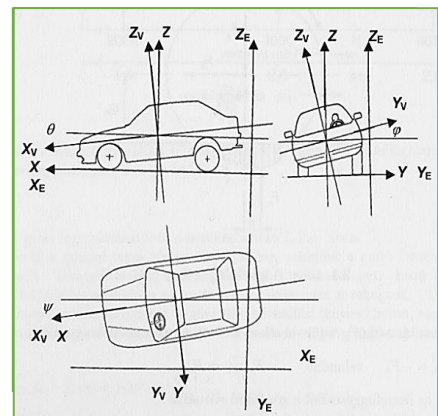
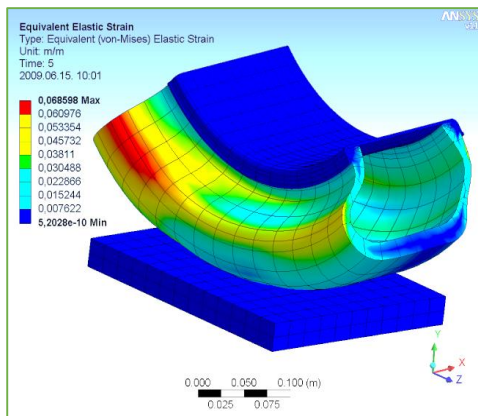
Kutatóhelyem, a *Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet* a szilícium technológiai területen több, mint négy évtizede folytat K+F tevékenységet. Az utóbbi két és fél évtizedben a mikro-elektromechanikai-rendszerek (MEMS) kutatása állt a középpontban. A 3D megmunkálás, az ún. tömbi mikrogépészet, a korszerű anyagok és nanoszerkezetek alkalmazásával született hazai teljesítmények tették lehetővé, hogy a fenti kiemelt szilícium technológiai alkalmazási területeken is bekapcsolódva a nemzetközi együttműködésekbe, értékes hozzájárulást tudunk nyújtani.

Az ENIAC *Intelligent Catheters in Advanced Systems for Interventions (ICITE)* Philips vezette európai projekt <http://www.incite-project.eu/> keretében a korábban kifejlesztett piezorezisztív vektoriális erőmérő chipünket használjuk egy robotkarral vezérelt katéter hegyén, ill. a megfogó csipeszben az aktuátor bemeneti tapintás-érzékelőjeként, amivel az operátor „taktilis visszajelzést” kap a beavatkozásról. Az erőmérőben a piezorezisztív ellenállásokat tartalmazó membrán és joystick a már említett tömbi mikrogépészetrel, *mély reaktív ionmarás segítségével* készül.



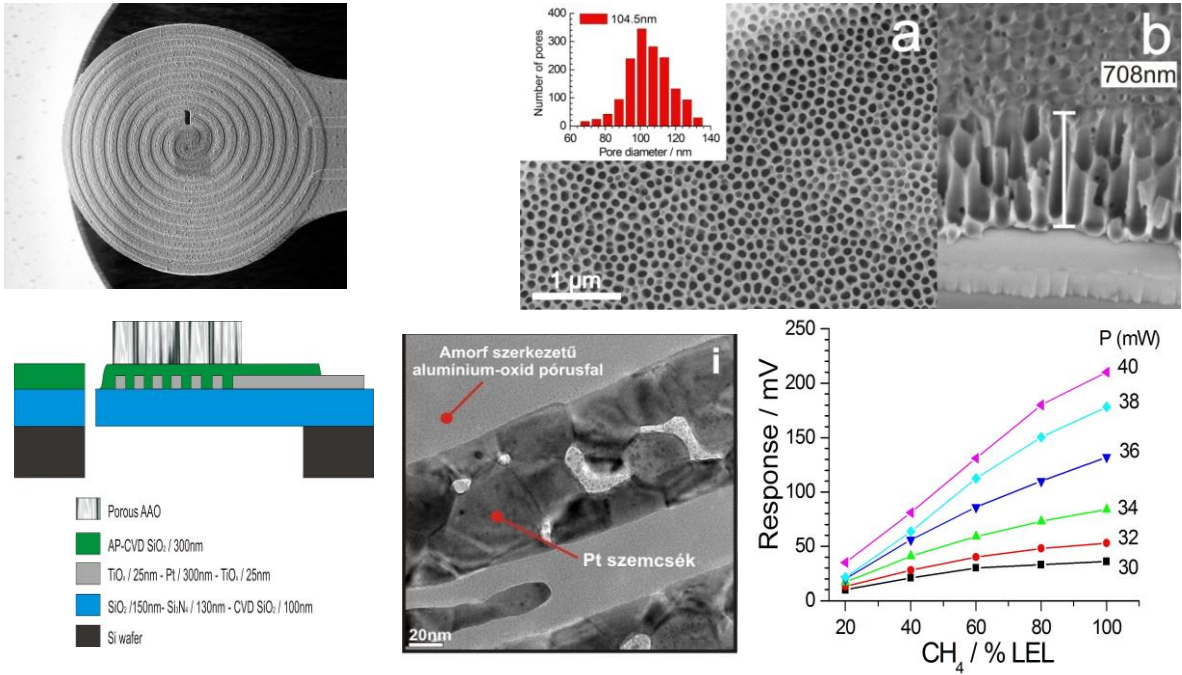
A robotsebészeti területen piacvezető daVinci Surgery készülékeinek képességeivel ugyan nehéz versenyre kelni, de egyszerűbb beavatkozásnál az MFA chip segítségével felépített visszajelző rendszerrel igen flexbilis műtéti lehetőséget tudtak kialakítani a lengyel partnerek robotjára alapozott katéter-fejlesztéssel.

A robosztusabb kialakítást igénylő, *autóabroncsba integrált erőmérő alkalmazás* ugyancsak a vektoriális detektálás lehetőségeinek kiaknázására épül. Ebben a *közlekedésbiztonsági alkalmazásban* a kerék és az útfelület közötti tapadás monitorozása és az esetleges megcsúszások, kipörgések azonnali visszajelzése a cél, hogy a vezetést támogató (augmented driving), vagy automata hajtás (autonom driving) vezérlés számára használható bemenőjelet szolgáltatson.



Az autóabroncs keresztmetszeti szimmetriája a kerékre ható tangenciális (menetirányra metróleges irányú) erők következtében torzul. Ennek a deformációnak mérésére az erőmérő szerelvényt a stratégiailag kritikus pozícióban rögzítjük a gumiköpeny belsejében. Az egység tartalmazza a fellépő vektoriális erő-komponensek jeleinek kiolvasó egységét, a vezetékmentes jelátvitel rádióadóját, ill. antennáját, amelyen keresztül a forgó abroncon kívülről az egység táplálása is megoldott. A normál körülmények között, egyenletes menetsebesség mellett detektált periodikus jelsozort az abroncs és az út felület közötti tapadás megszűntekor (bármilyen is legyen ennek az oka) azonnal megszakad, ami pontosan jelzi a beavatkozás (fékezés, vagy gyorsítás) szükségességét a vezérlésnek. [J.Radó, G. Battistig, S. Kulinyi, R. Végvári, I. Bársony, Monitoring the tyre deformation on a vehicle on the run, EUROSENSORS 2016, Budapest, Sep. 4-7, 2016]

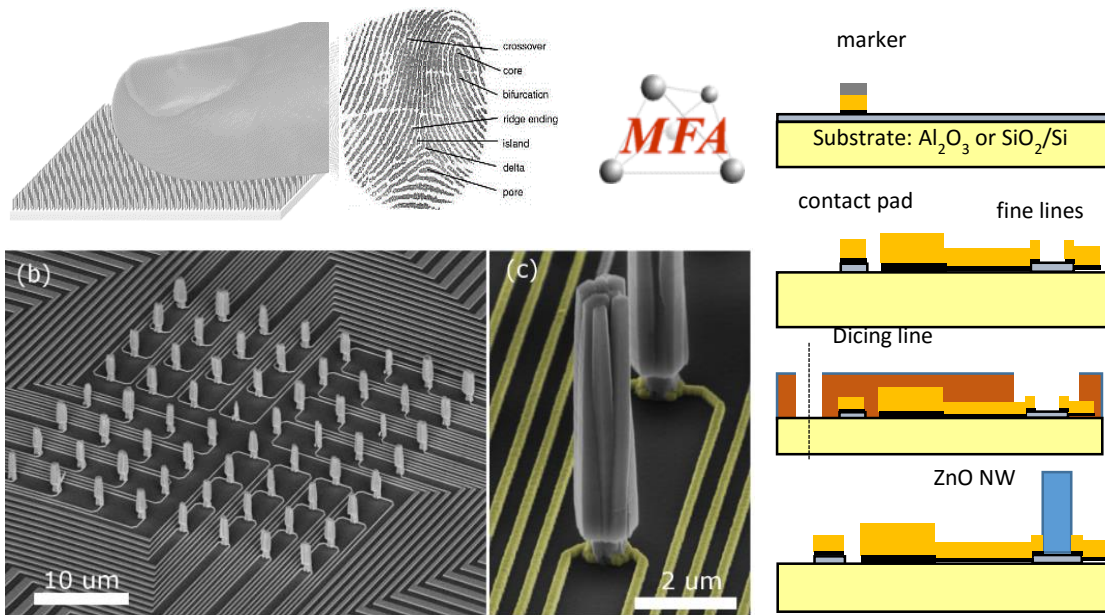
Fontos biztonságtechnikai követelmény a *robbanógázok, -gőzök és oxidálható komponensek (pl. CO) kis koncentrációjának detektálása riasztás céljából*. Legkritikusabb a metán jelenlétének a robbanásbiztos kimutatása, ami oxigén jelenlétében magas hőmérsékletű heterogén katalitikus égetéssel történik. A rendszerbe táplált energiámnységnek ugyanakkor olyan kicsinek kell lennie (esetünkben <40mW), hogy még zárlati szikra esetén se legyen képes a gázelegyet felrobbantani.



A komplex membrán-technológiával létrehozott mikro-fűtőtestre nagy fajlagos felületű porusos alumíniumoxid mátrixot integrálva ALD (atomi rétegleválasztás) módszerrel most sikerült először kellő borítottságban Pt-nanokatalizátor szemcséket leválasztani, hogy az egzoterm égetés során keletkező hő érzékelésével az alsó robbanási határ alatt, ppm-tartományban érzékeny metán szenzort készítsünk.

[F. Biró, Gy.Z. Radnóczy, M. Takács, Zs. Baji, Cs. Dücső, L. Bársony: Pt deposition techniques for catalytic activation of nano-structured materials, EUROSENSORS 2016, Budapest, Sep. 4-7, 2016; Ferenc Biró, Csaba Dücső, György Z. Radnóczy, Zsófia Baji, Máté Takács and István Bársony, ALD nano-catalyst for micro-calorimetric detection of hydrocarbons, Sensors and Actuators Chemical]

Az EU FP7 PiezoMat „High-Resolution Fingerprint Sensing with Vertical Piezoelectric Nanowire MATrices” projektben, amit a grenoble-i CEA LETI koordinál, célunk felületi mintázatok nagy térbeli felbontású akár 3D módú érzékelése piezoelektromos ZnO nanoszálak integrálásával.



A szilícium kiolvasó áramkörre megfelelő mag-réteg alkalmazásával egykristályos, nedves kémiai növesztésű ZnO nanohuzalok kialakítására nyílik lehetőség. A 22 lépéses technológiai folyamat 6 elektronsugaras litográfiai műveletet tartalmaz 50 nm illesztési pontossággal. Időközben az MFA már ezzel a technológiai képességgel is rendelkezik. [Volk et al., Integrated piezoelectric nanowire arrays for high resolution tactile mapping, EUROSENSORS XXX, Budapest, Sep 4-7, 2016]

A fenti példák igazolják azt a tudományos-technológiai színvonalat és eredményességet, amit az MFA az utóbbi két évtizedben a szenzorkutatás és MEMS területen elért. Ennek a nemzetközi sikerességnek és reputációnak volt köszönhető, hogy 2012-ben az EUROSENSORS konferencia-sorozat nemzetközi irányítótestületétől megbízást kaptam a 30. jubileumi konferencia megszervezésére Budapesten.



Az MTA Műszaki Tudományok Osztálya támogatásával 2016.szeptember 4-7. között a Kongresszusi Központban rendeztük meg a konferenciát 521 fizető résztvevővel. A programban négy plenáris, 8 meghívott és 127 szakmai előadásra, valamint 329 poszter előadásra került sor 12 szekcióban. A konferencia két kiemelt területe - a hazai gazdasági prioritásokhoz igazodva - az orvosi szenzorika és az automotív szenzoralkalmazások voltak. Az elfogadott előadások open access formában az Elsevier Procedia Engineering sorozatában (ISSN:1877-7058) jelentek meg.

A szilícium technológia gyors fejlődése a most 42 éves mobil-telefóniából is kiszorította a vegyület-félvezető GaAs áramköröket. Martin Cooper, a celluláris telefon atyja joggal jegyezte meg találmányáról, hogy bár csupán tíz éve jelentek meg az okos telefonok, „*a vezeték nélküli összeköttetés potenciálisan forradalmasíthatja az egészségügyet és az oktatást, legnagyobb hozadéka azonban magának az együttműködés koncepciójának az átalakulása lesz!*”

A mai okos telefonok zömében a mikroérzékelőknek egész arzenálja működik:

- 2 kamera-chip
- 3 mikrofon (ultrahang-érzékelés)
- Fényérzékelő (UV)
- Közelítésérzékelő
- Tapintásérzékelő (ujjlenyomat)
- Pozícióérzékelés: GPS, WiFi, celluláris, Bluetooth
- Gyorsulásérzékelő
- Magnetométer (Föld mágnesség)
- Giroszkóp
- Nyomásmérés
- Hőmérséklet
- Nedvesség, kémiai érzékelő

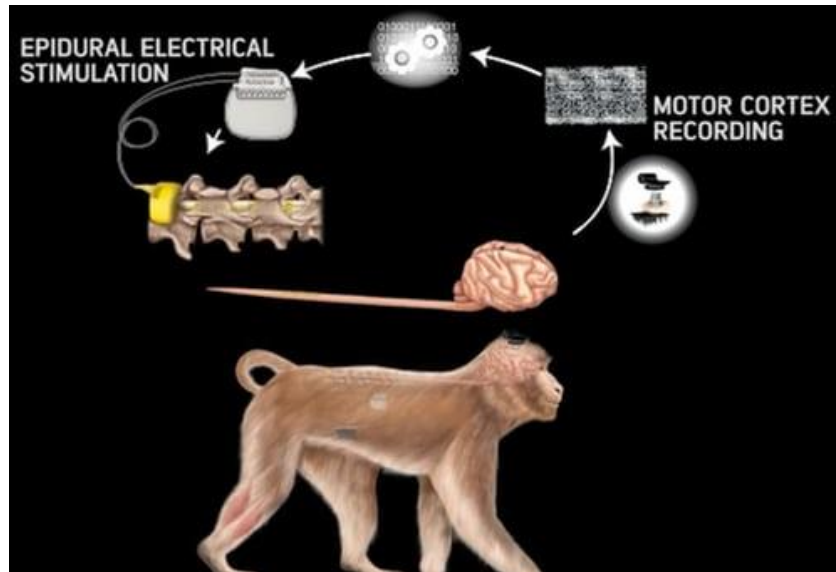
Egy karperec segítségével ezeket további, az életfunkciók monitorozására, biometriai mérésekre alkalmas funkciókkal lehet kiegészíteni.

2020-ig a vezeték nélküli összeköttetésű eszközök száma a 2014-es 6,2 milliárdról óvatos becslés szerint is 21-40 milliárdra nő! Ez már az *Internet of Things*, mi több, az *Internet of Everything* korszaka, ami az intelligens eszközök milliárdjait képes a zsebünkben hordott mobil eszközről irányítani a világítóeszközöktől az ajtózárákig. Ennek természetesen előfeltétele a kis méret, alacsony fogyasztás és ár.

A kihívás elegendően nagy külső hajtóerő ahhoz, hogy az elektronikai ipar jelentős részét, különösen a vezeték nélküli összeköttetést és a szenzorikát teljesen új alapokra helyezzük!

A biológiai és elektronikus rendszerek együttműködése pár évtizede már az érdeklődés homlokterébe került. Intenzíven kutatott terület a mozgásukban, érzékelésükben akadályozott páciensek életfunkcióinak javítása, pótlása. Az IC és MEMS technológia lehetőségei ezen a területen is gyors ütemben fejlődnek. A képernyők előtt ülők meggyőződhetnek a Duke University “*Walk again*” projektjének eredményéről, amikor a braziliai futball VB-n 70.000 néző előtt a kezdőrúgást egy járásképtelen mozgássérült végezte el. Agyhullámaival vezérelte a végtagjait pótló elektromechanikus „exoskeleton” és a mozgássorozatot a beépített érzékelők visszajelzései alapján gondolataival irányította.

A kiesett mozgásszervi funkciókat rekonstruálja a gerincsérülés során megszakadt *vegetatív ingerátvitel helyettesítése* elektronikus implanttal. Itt tehát nem az autonóm működésre programozott, *szívritmus-szabályzó jellegű* beültetett elektronikáról van szó, hanem a pácienst „akaratával” irányított eszközökről. Az agyhullámmal vezérelt, mesterségesen gerjesztett epidurális stimulussal a saját végtagok mozgatása valósítható meg, amit sikeres állatkísérletek már igazoltak és a technika humán kipróbálása is folyamatban van. Ez a kézzelfogható lehetőség reménysugár lehet a kerekesszékekbe kényszerült baleseti sérültek tízezreinek.



http://newatlas.com/wireless-neurosensor-paralyzed-monkeys-move/46361/?utm_source=Gizmag+Subscribers&utm_campaign=28f6c7f6a7-UA-2235360-4&utm_medium=email&utm_term=0_65b67362bd-28f6c7f6a7-89748266

A Biohax Sweden cég használja azt az apró szilícium mikrochip-implantátumot, amit injekcióval ültetnek a kézbe – hasonlóan a kutyák regisztrációra szolgáló mikrochipekhez. Pl. a svéd Epicenter digitális innovációs központ munkatársai közül is sokan beoltatták magukat vele, hiszen személyi azonosításra és jogosultságok automatikus kezelésére kényelmi szempontból igen előnyösnek találták. Aligha tévedünk, mikor rohamos elterjedést jósolunk a hasonló megoldásoknak dacára a “személyiségi jogok érvényesülésével” kapcsolatos aggályoknak!



www.biohaxsweden.com



<https://www.cyborgnest.net/north-sense>

A gondolatainkkal, ill. agyáramokkal vezérelt eszközök integrációja a humán organizmussal már több évtizede izgatja a kutatókat. Számos lehetőség nyert mára kísérleti bizonyítást is, és több cég kifejezetten erre a fejlesztési irányra specializálódott. Ezzel a módszerrel érzékszerveink képességét megtöbbszörözhetjük, ill. újakkal bővíthetjük. A Cyborgnest cég elektronikus iránytűje pl. a nyak alá piercinggel rögzítve olyan érzékelési funkciót biztosít az ember számára, amit az evolúció során valószínűleg elvesztettünk. A mesterséges égtáj-ismeret állítólag új „szervként” funkcionál, és a többlet-információ idővel megváltoztatja, hatékonyabbá teszi érzékszervi tájékozódásunkat.

Ennél sokkal messzebb ment Kevin Warwick, a Reading University kibernetika professzora, akit *Cyborg Scientist*-ként aposztrofálnak.



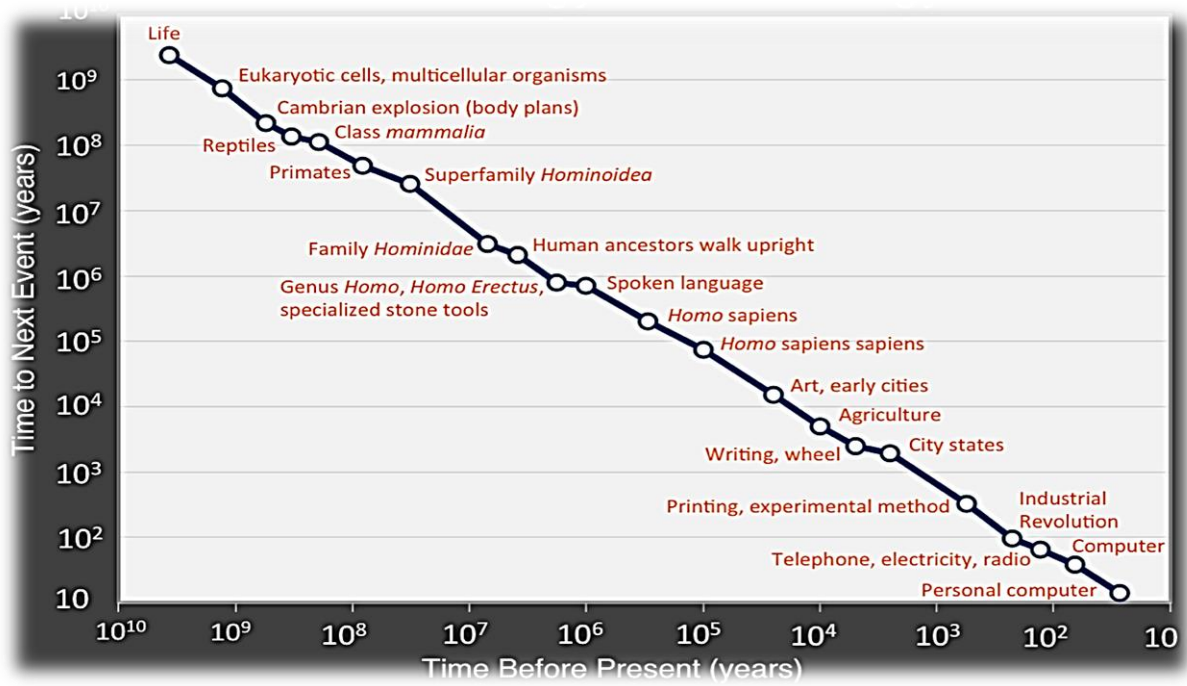
<http://physicscentral.com/explore/action/project-cyborg.cfm>

Bal alkarjába a megfelelő mozgatóideg-végződések csatlakoztatásával sebészetileg egy 100 elektródás mikrochipet implantáltatott már 1998-ban. Kezdetben egy mesterséges robotkar mozdulatait tudta így saját keze mozgásával vezérelni, miközben „érezte” a megfogás erősségét is. Később feleségét is ellátta egy az idegrendszerét a külvilággal összekapcsoló implantált chippel, amin keresztül a házaspár kommunikáció nélküli, „telepátias érzésátvitelt” tudott megvalósítani – egyikük érzékelte a másik mozdulatait, mi több, szándékait is.

Ha viszont ez lehetséges, miért ne lehetne az emberi agy képességeit megtöbbszörözni azáltal, hogy agyunkat óriási adatbázisok, számítási kapacitások lehetőségeivel kibővítetten működtessük? A Neuralink cég tervezett termékével ez már napjaink mikroelektronikai lehetőségeinek birtokában is valósággá válhat, ahogy a napokban az alapító, Elon Musk bejelentette. A „neural lace” az agyba, agyra integrálható agy-komputer interfész, ami a biológiai intelligenciát a digitális intelligenciával köti össze.

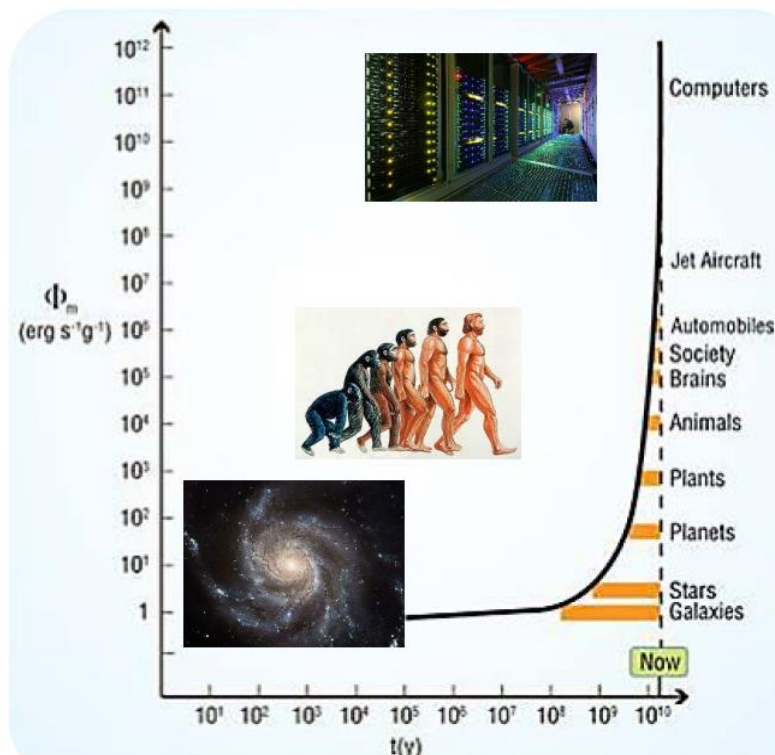
A technológia fejlődéstörténete és az abból levonható tanulságok elsősorban a jövőkutatók fantáziáját mozgatta meg. A technológiai fejlődésnek a Moore-törvény által a szilícium technológia példáján, ismertté tett exponenciális sebessége sokakat elgondolkodtat... Következtetéseiket, jóslataikat a tudományos világ vitatja, részben cáfolja, mi több, esetenként a bulvár tudomány birodalmába is sorol.

Ray Kurzweil, a Google vezető technológusa állította fel azt a tézist, hogy az élet megjelenése után a Földön az információátadás folyamatos tökéletesedése révén hozott létre a biológiai evolúció egyre fejlettebb lényeket egészen a gondolkodó, művészeti-tudományos, társadalmi teljesítményekre képes emberig. A biológiai evolúció megelőző 3 milliárd évében az információátadás tökéletesedésének állomásai szintén jól ábrázolhatók egy exponenciális idő-skálán, amelyik töretlenül folytatható immár az emberi intellektuális tevékenység eredményeként kitalált, ill. tökéletesített információ-átadási lehetőségek (írástól a személyi számítógépig) időbeni megjelenésével. A biológiai evolúció tehát mintegy folytatódik az emberi intelligenciának betudható „technológiai evolúcióval”.



Ray Kurzweil: The singularity is near www.singularity.com

Ha a fenti felfogást követve az exponenciális időskálán ábrázoljuk a kozmológiai evolúciótól kezdve az egyes lépcsőfokok kialakulásához befektetett fajlagos energiáfordítást, ugyancsak megdöbbentő eredményt kapunk.



A galaxisok, csillagok, égitestek létrehozásához szükséges kozmológiai és a biológiai evolúciót jelentő gigantikus energiabefektetés a Földön évmilliárdok során hasznosult. Ugyanakkor az exponenciálisan

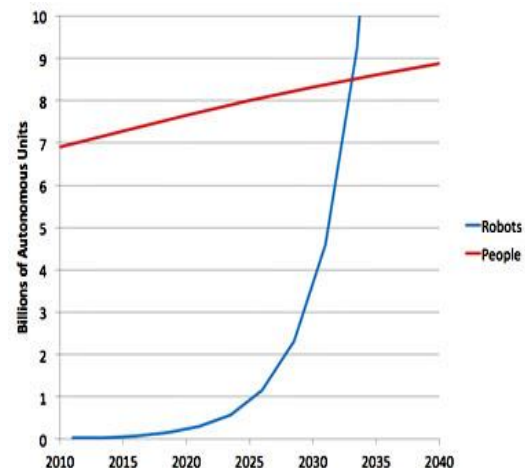
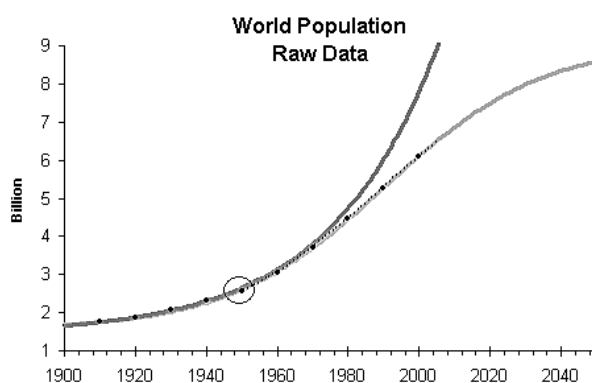
felgyorsult technológiai fejlődés nagyságrendekkel nagyobb fajlagos energiát igényelt, amit viszont csupán néhány száz év alatt szabadítottuk fel! Egyébként az ember által alkotott ún. „technoszféra” tömegét ma 30 billió t-ra, azaz 30 Teratonna teszik, aminek létrehozásához az emberiség *megdöbbentő rablógazdálkodást folytatott és folytat az erőforrásokkal, anyaggal, energiával.*

Az exponenciális fejlődési sebesség feltételezése implikálja, hogy egy-egy új, korszakalkotó műszaki eredmény megjelenése közt csökken az idő. A robotika forradalma az emberi intelligenciát meghaladó, nem biológiai eredetű mesterséges intelligencia (MI) kiteljesítését jelenti. A nanotechnológia forradalma az anyag molekuláris, atomi szintű manipulációjának eredménye. A genetikai forradalom saját biológiánk átprogramozását (betegségek kiiktatását, öregedés lassítását) teszi lehetővé. Az *akceleráció kétségtelen tény*, az utóbbi évtizedek új technológiai vívmányainak kifejlődése és tömeges elterjedése, a 100%-os penetráció elérése is egyre rövidülő időt vesz igénybe.

A szilícium technológiából ismert Moore-törvény szerint a számítógépek teljesítménye lebegőpontos műveletvégzés/s (flops) egységekben mérve 18 havonta kétszereződik meg. Az emberi agy ekvivalens számítási teljesítményét ma 10×10^{15} , azaz 10 Petaflops-ra taksálják, bár a legutóbbi hírek szerint akár ennél két nagyságrenddel nagyobb is lehet. Kérdés, hogy mikorra érik el a komputer az emberi agy számítási teljesítményét?

Kurzweil vitatott elmélete szerint a biológiai és technológiai fejlődés közötti zökkenőmentes exponenciális előrehaladás csak egy szingularitásig folytatható, amin túl az emberiség elveszti az ellenőrzést az általa létrehozott „mesterséges intelligencia” felett. Jelenleg a kisméretű agyának ekvivalens számítási kapacitását állítottuk már elő mesterségesen, 2023-ra várható az emberi agy kapacitásának meghaladása. 2015-ben a Lawrence Livermore Laboratórium IBM Blue Gene/Q szuperkomputere már elérte a 16,3 Petaflops számítási teljesítményt.

A Kurzweil által prognosztizált szingularitás, vagyis a teljes akkori emberiség kumulált agyi számítási képességének mesterséges meghaladása 2045-ben „fenyeget”. Szerinte mostanában értünk el az „exponenciális fejlődési görbe könyökpontjára”, ahonnan a robbanásszerű fejlődés megállíthatatlanná válna...



<http://www.growth-dynamics.com/articles/Kurzweil.htm>

<http://earlywarn.blogspot.hu/2012/04/global-robot-population.html>

Csak hogy a természetes növekedési folyamatokban tapasztalható exponenciális időfüggések csupán kezdeti szakaszai egy logisztikus görbének! Így a prognosztizált adatok szerint 2040 körül kb. 9 milliárdos szinten telítődik a világ népessége. Theodor Modis, Kurzweil legnagyobb kritikusának szerint

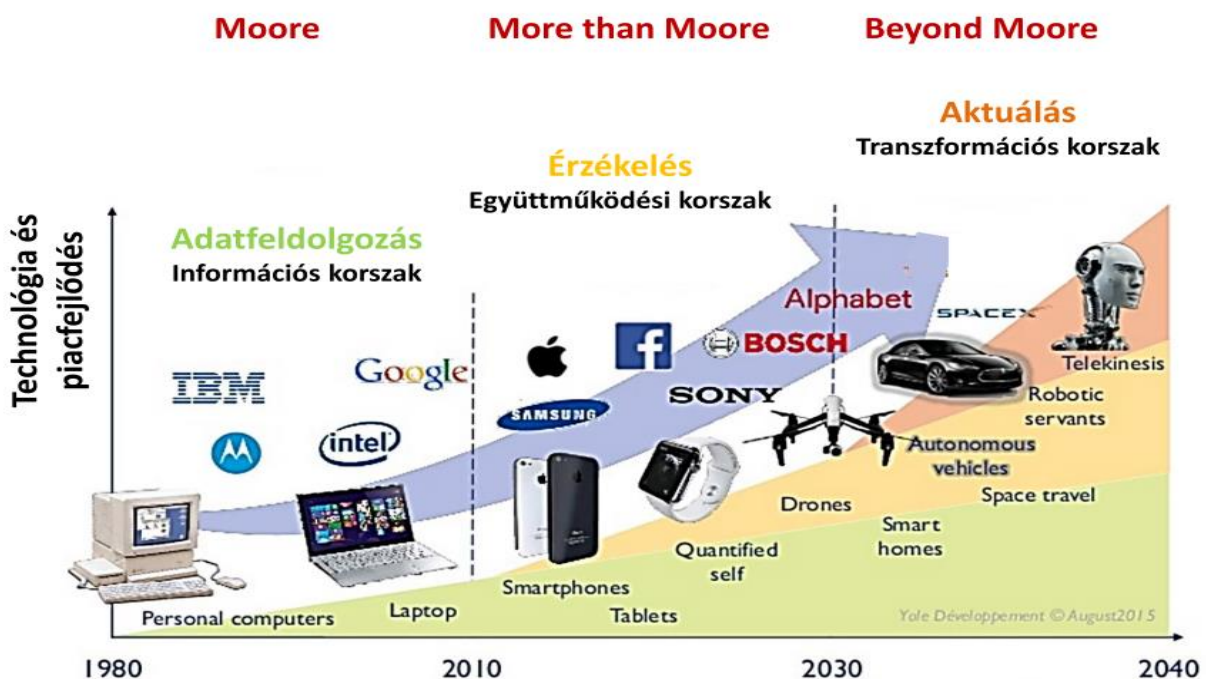
ma a technológiai szigmoid görbének a kezdeti szakaszán járunk csupán, ezért a „könyökponthoz” képest a fejlődés max. két nagyságrenden belül szaturációba hajlik majd. *A ma tapasztalható képest egyre ritkábbak lesznek a technológiai áttörések, azaz „a Kurzweil-féle szingularitás-jóslat” mellett nem szólnak tudományos érvek!*

A robotizációt nem csak a gyártástechnológiában, hanem a személyes használatú eszközeinkben is forradalmasítja majd a mesterséges intelligencia gyors fejlődése. Japán előrejelzés szerint kb. 2030 -35 között haladja majd meg a MI robotok száma a Föld akkori populációját.

A mesterséges intelligencia alkalmazását Charles Rosen, a Stanford Research Institute (now SRI International) Gépi Tanulási Csoportjának vezetője már 1964-ben javasolta. Az első önállóan gondolkozó, működő mobil robot “Shakey “ mégis csak 1972-re épült meg. A tanulási képességekkel felruházott MI már bizonyított: a kognitív képességgel ellátott gépek sorra döntötték meg a rekordokat egyebek közt a stratégiai játékokban:

- 1997-ben az IBM Deep Blue gépe legyőzte a sakkvilágbajnok Gari Kasparovot;
- 2016-ra már a legkifinomultabb stratégiai játékokban, a go-ban is a Google MI nyert Lee Sedol go-zsenivel szemben;
- a nyelvi fordítási feladatokat lassan átveszik a fordító programok (Google Translate);
- a Google-car sofőr nélküli gépkocsi MI vezetéssel már félmillió balesetmentes km-t abszolválta a forgalomban;
- a Rubik-kocka kitekerési világrekordját (4,9s) nyolcszorosan múlta felül az Infineon MI robotja;

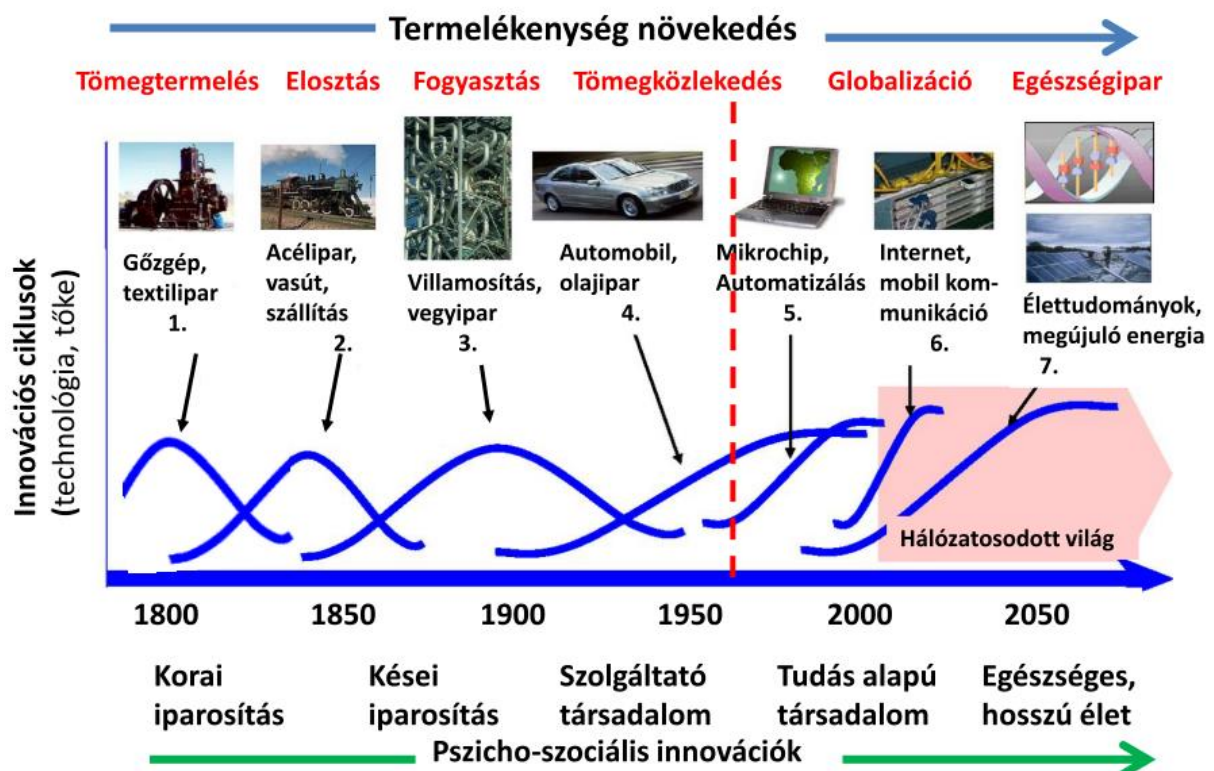
A mesterséges intelligencia kreatív gondolkodásával szembeni ellenérv, hogy csak racionális feladatmegoldásra képes, „művészeti téren” nem versenyképes az emberrel. Ezt is cáfolni látszik a Google Deep Gene MI egy „festménye”, ami nyilvános aukción kelt el, vagy pl. az oxfordi start-up cég, az IntelligentX kereskedelmi forgalomba került sőre, amit a fogyasztói visszajelzések alapján MI szintetizált.



A Yole technológiai előrejelző cég összefoglalása szerint 2040-ig extrapolálható a technológiai piac fejlődése. Lezárult a Moore-törvény diktálta méretcsökkentési szakasz, ami a digitális adatfeldolgozás eszközeit eredményezte az *információs korszak* számára. Az integrált érzékelők általánossá válásával jellemezhetjük a méretcsökkentést meghaladó „More than Moore” érárt, ami a *kooperáció korszakába* vezetett. Lassan átlépünk a Moore utáni fejlődéssel (Beyond Moore) jellemzett *transzformációs korszakba*, ahol a MI robotok térhódításával a beavatkozás (aktuálás) válik meghatározóvá.

A modern *tudomány* 400 éves fejlődésével szemben a felismert törvényszerűségeket az emberiség javára hasznosító *mérnökségnek* csupán 200 éve volt a bizonyításra. Már a *technológiai fejlődés* korai szakaszában megnyilvánultak a gyakorlatban a kísérő “*társadalmi-gazdasági összefüggések*”. Nikolai D. Konratyev (1892-1938) ismerte fel a korszakalkotó technológiai vívmányok megjelenése által indukált gazdasági ciklusokat. A konjunkturális szakaszokat a ciklusokon belül rendre recesszió, sőt depresszió követte, mígnem egy forradalmian új technológia megjelenése a kilábalással el nem indította a következő ciklust. A technológia fejlődése ugyan folyamatos GDP növekedéssel járt, de a *gazdasági-társadalmi problémák egyre magasabb szinten is ismétlődve jelentkeztek*. Ma az ipari hőskor és a gépesítés korszaka után a *hatodik Konratyev-ciklusban, az információs-automatizációs korszakban járunk*. Némi zavar jelentkezik ugyan a ciklikusságban: a ciklusok összetorlódnak a már említett korszakalkotó vívmányok megjelenési gyakorisága miatt.

Kondratyev ciklusok: Meghatározó – innovációk, melyek az ipari és társadalmi fejlődés új szakaszait indítják el



<http://time-price-research-astrofin.blogspot.hu/2012/04/6th-kondratieff-cycle.html> nyomán

A technológiai eszközök hasznosítása a pszicho-szociális innovációkhoz és a társadalmi fejlődés új szintjeihez vezetnek, melyek újabb követelményekkel lépnek fel a technológiai fejlődéssel szemben.

Mindenesetre leszögezhetjük, hogy **a digitalizációnak és a mára uralkodóvá vált hálózatosodott világnak, azaz a globalizációnak valamennyi eszközét elsősorban a szilícium technológia fejlettsége tette lehetővé.** A folytonos termelékenység-növekedés óriási versenyt indított el a társadalmak között és ebben a mókuserékben nem szabad lemaradni. Történelmi tapasztalatunk, hogy az ipari forradalom idején a gépi munka általánossá válásával tömeges munkanélküliség és nyomor alakult ki. Ma a számítógépek már megismerő, tanuló-képességgel is rendelkeznek. A napjainkban kibontakozó *digitális forradalomban a kognitív intelligenciájú (MI) robotok emberi beavatkozás nélküli autonóm működésre készülnek!*

A digitalizáció alapvető és folyamatosan megújuló társadalmi dilemmákat vet tehát fel:

- Mit kezdünk majd a munkájukat veszített milliókkal, akik folyamatosan és gyorsuló mértékben szorulnak majd ki a munkaerőpiacról?
- A gyorsuló fejlődésben milyen új adaptációs és innovációs képességgel kell rendelkezniük és a nevelés során hogyan fejlesszük ki ezeket a fiatalokban?
- Hogyan vértessük fel a mai diákokat a 15-20 évvel későbbi helyzetben érvényes és értékes tudással (alapismeretekkel)?
- Miért képezünk olyan „szakembereket”, akikre vélhetően semmi szükség nem lesz, mire alkalmazásba kerülnének?

A robotizáció rohamos fejlődése már az Európai Parlamentet is akcióra sarkallta. *„A robotok és a MI máris befolyásolják az oktatást és a foglalkoztatást. Ennek tudatában elengedhetetlen a munkaerő piac szoros monitorozása, hogy elkerüljük a foglalkoztatásban fellépő nemkívánatos visszaesést.”*

DRAFT REPORT with recommendations to the Commission on Civil Law Rules on Robotics (2015/2103 (INL)) Committee on Legal Affairs (Initiative –Rule 46 of the Rules of Procedure)

A robotikai három 1950-ben megfogalmazott törvénye a 25 éve elhunyt Isaac Asimov “I, Robot” c. művében lényegében változatlanul érvényes:

1. A robotnak nem szabad emberi lényben kárt okoznia, vagy tétlenül túrnie, hogy bármilyen kárt szenvedjen.
2. A robot engedelmeskedni tartozik az emberi lények utasításainak, kivéve, ha ezek az utasítások az első törvény előírásaiba ütköznének.
3. A robot tartozik saját védelméről gondoskodni, amennyiben ez nem ütközik az első vagy második törvény bármelyikének előírásaiba.

A kognitív képességű autonóm robotokra vonatkozó felelősség etikus szabályozása kapcsán viszont az is éles vitát váltott ki az EU parlamentjében: *„hogyan lehet a robotok ”elektronikus személyiség”-éből eredő törvényes jogait összhangba hozni a „vészkipcsoló” tervezett kötelező alkalmazásával...”*

2015. januárjában *nyílt levél* (<https://futureoflife.org/ai-open-letter/>) jelent meg több tucat mesterséges intelligencia szakértő aláírásával, szorgalmazva a MI elterjedésével várható veszélyek, társadalmi problémák kutatását! Rámutatnak, hogy *“a mesterséges intelligencia potenciálisan katasztrofálisabb hatással lehet az emberiségre, mint a nukleáris fegyverek, ha az ember lassú (biológiai) evolúciója nem tart lépést a technológiával és alulmarad!”*

Citálva néhány mértékadó szaktekintély véleményét:

Stephen Hawking:

„A mesterséges intelligencia megszületése az emberiség legnagyobb eseménye lehetne. Sajnos, talán az egyik utolsó eseménye is, ha nem tanuljuk meg, hogyan kerüljük el a kockázatokat.,,

Elon Musk:

„A cél olyan mesterséges intelligencia létrehozása kell, hogy legyen, amelyből az emberiség csak profitálhat, hogy ne váljunk a legnagyobb egzisztenciális fenyegetés, a mesterséges intelligencia 'ostoba háziállataivá'”.

Bill Gates:

„Aggaszt a szuperintelligencia perspektívája. Ha jól menedzseljük őket, az okos gépek feladataink jó részét átveszik. De pár évtized múltán intelligenciájuk fenyegetéssé válhat!”

Csányi Vilmos:

„Már ma is szabályokat, köteleket határoz meg számunkra a technológia. Így nem feltétlenül lesz megrendítő, ha a jövőben ugyanezt az egész világ fölött uralkodó szuperintelligencia teszi”.

(Csányi Vilmos: *Ő ott bent*, Libri 2016)

A fentieket összegezve leszögezhetjük:

- Az innováció technológiai-gazdasági motorja belátható időn belül továbbra is a döntően szilícium alapú nanoelektronika marad.
- Csak a nanoelektronika, a korszerű nanoméretű anyagok, a biotudomány és az energia-hatékony technológiák interdiszciplináris házassága teremti meg a jövő gazdasági-társadalmi fejlődésének lehetőségét.
- Az emberiség előtt álló ökológiai és társadalmi kihívásoknak csak a teljes értékláncot felölelő, világméretű K+F együttműködésben van esélyünk megfelelni!

Legyen igaz Akadémiánk alapítójának prófécija:

„A múlt elesett hatalmunkból, a jövődönk urai vagyunk.”

gr. Széchenyi István