

A Moore törvény a mikroelektronikai alkatrészipari innováció fejlesztésében

Dr. Hronszky Imre³ professzor emeritusz
Budapesti Műszaki Egyetem, Gazdaság- és Társadalomtudományi Kar

ABSZTRAKT: A tanulmány az irodalom kritikai elemzése útján azt keresi, hogy ennek az iparágnak milyen, tág értelemben vett menedzsment sajátosságai vannak. Ennek részeként megvizsgálja a Moore törvényről szóló narratívákat. Elhelyezi a Moore törvényt, pontosabban Moore „üzenetét” a mikroelektronikai alkatrészipar meghatározásában, mint iparági ellenőrző változókra vonatkozó ismeretet, amivel a műszaki innováció szabályozódik egy, az iparágra jellemző alapvető ellentmondás újratermelődésében. Az iparág ugyanis tartósan elköteleződött a műszaki fejlődés különös sebességű exponenciális fejlődése iránt. Ez egyrészt azzal jár, hogy az iparágnak különlegesen nagy és egyre nagyobb követelményeket támasztó, nagyon sokféle elágazó és sokdimenziós, elengedhetetlen koordinációs és ütemtartási feladatokat kell megoldania. Tehát gyakorlatilag klasszikusan előreláthatóan és tervezhetően kell működnie. Másrészt a koordináció igényeihez ugyancsak illeszkedő ütemben meg kell oldania a K+F során ismételt és egyre inkább fellépő kockázatok, különösen a „mély bizonytalanság” rendkívül változatos formáinak kezelését. Mindenekelőtt hangsúlyozva a Moore törvény szerepét a történetben, a tanulmány fontos részletekben megerősíti vagy megkísérli módosítani a kialakult narratívákat.

Néhány megjegyzés az iparág fejlődési dinamikájáról

A mikroelektronikai alkatrészipar ötvenöt éve már sajátos, meredek exponenciális fejlődést mutat. Ez a fejlődés az ún. Moore törvény és más, vele rokonságban levő trendek szerint történik. Nagyon ritka kivételektől eltekintve, akik ezt tagadják, konszenzus van arról az irodalomban, hogy a Moore törvény és ezek a trendek az innováció iránymutatójának és ütemezőjének, céljának és normájának is bizonyulnak. Azok eltérései, akik ezt elfogadják, arra vonatkoznak, hogy a szerzők egy része ezeket a trendeket csak leíró összefüggéseknek és hipotetikus extrapolációiknak, más részük ennél komplexebben értelmezi. Az utóbbiak a trendeket olyan célok és normák megvalósulásának tartják, amelyek megvalósítására való tudatos törekvések jelentik az iparág centrális tevékenységét.⁴

³ hronszky@eik.bme.hu

⁴ Az útfüggés – útkötés (path dependence – path constitution) problematika terminológiájával kifejezve az iparág paradox módon fejlődik. „Intelligens eltérések” (intelligent deviation), útteremtések sorozatával törekszik biztosítani, hogy a kezdettől fogva egyedülállóan kedvezőnek megítélt pályán

Az iparági innováció ma már rendkívül változatos együttműködésekben, jórészt szervezetek közötti hálózatok kiépülésének dinamikájával folyik. (Müller-Seitz 2011, Sydow 2012) Hosszú ideje tipikus már az iparágban, hogy az innováció megvalósítására konzorciumok jönnek létre hosszú évekig tartó projektfeladatok megoldására.⁵ (Sydow 2011) Úttérképek készülnek projekt, vállalati és iparági szinten e feladatok, megoldásaik és a hozzájuk vezető utak kijelölésére.⁶ Folytonos fejlesztésük létfontosságú minden iparági szereplő részére. Az iparág kétévenként elkészíti globális prekompetitív technológiai úttérképét, már 1999-től (ITRS 1999, ITRS 2011, Schaller (2004)). Ezek az úttérképek felölelik, koordinálják, összhangba hozzák a rövidtávú (néhányéves) és a hosszú távú (nyolc–tizenöt éves) feladatokat, és ha vannak már, elképzelt megoldásaikat. A feladatok működő technológia fejlesztési utak optimalizálásától gyökeresen új technológia fejlesztési utak megtalálásáig terjednek.

Az egész ötvenöt éven átívelő orientáció magját a miniatürizálás folytatása jelenti az integrált áramkörök fejlesztése útján, ami csak az utóbbi, úgy tizenöt évben bővült egy, egyre jelentősebb másik iparági orientációval. Az integrált áramköröknek az egész korszakon átívelő műszaki jellegzetessége az un. MOS, illetve továbbfejlesztett változata, a CMOS áramkör építési technológia és a litográfia, az integrált áramkör minták felvitelének módja a lapkákon található érzékeny anyagokra. Az integrált áramkörök fejlesztésének folytatása jelenleg megköveteli már mind a CMOS technológia meghaladásának kikutatását (beyondCMS), mind az új generációs litográfia (NGL) és további eljárások kikutatását és ipari megvalósítását is. Ugyanakkor az iparág továbbfejlődési horizontján már régebben megjelentek más, nem a szükségszerűen kimerülő miniatürizálási lehetőségek irányában való rendkívül radikális továbbfejlődési lehetőségek keresése, mint például a ma még a tudományos fikciók területére tartozó kvantumelektronika.

A mikroelektronikai félvezetőipar egy meredek exponenciális növekedést megvalósító iparág első történeti példája. Ez az iparág eddig tartósan kínálati dominancia által hajtottnak bizonyult. A magyar származású Andy Grove, az Intel egyik első munkatársa, aki sokáig az Intel rendkívül sikeres CEO-ja volt, rendszeresen ismételte, hogy olyan chipseket fejleszteni ki a fogyasztóknak, amelyeket azok még csak később fognak keresni. Ebben a tartós kínálati dominanciára alapozott dinamikában a „folytonos előre esés hatékony megvalósítása”, az új kereslet rendszeres megelőzése az új kínálatlaltal volt az iparági fejlődés minden csomópontján

tudjon megmaradni. Az úttérképek vizsgálatának kezdetei megtalálhatóak Garud és Karnoe nagyon jelentős könyvében. (Garud, Karnoe 2001). Az úttérképek, mint útfüggés és útteremtés (path creation) egységének értelmezése nagyrészt Sydow és iskolája eredménye. (Sydow 2011)

5 Talán a világon első átfogó projektfeladat megoldására létrehozott konzorcium volt a Japánban az un. VLSI technológia megoldására 1975-ben kialakított óriási projekt.

6 Az úttérképek mibenlétét illetően hasznos eligazítást nyújt (Phaal 2004), illetve (Phal et al. 2011).

periodikusan visszatérő sajátosság és feladat. Rendkívüli függés jött létre ezzel és határozza meg tartósan azt a, mindenekelőtt a K+F sikeréből táplálkozó iparági fejlődést, ami a hitel felvétel-K+F-ipari megvalósítás-eladás rendkívüli ütemben egyre bővülő körökben megvalósuló ciklusainak dominanciájával valósul meg (Brillouet 2012). Erre a rendkívüli ütemű műszaki fejlesztésre alapozva, az iparág nemzetközi technológiai úttérképe (ITRS) szerint, az iparágnak egész fejlődése során lényegében sikerült az, hogy a műszaki fejlődéssel állandóan elérje, hogy az iparág története során a termékek költsége adott funkcióra vetítve állandóan 25-29%-al csökkenjen. Ez történetileg az integrált áramkörök kb. évente 17% piacnövekedéséhez vezetett. Ez adta meg a legfontosabb iparági műszaki fejlesztési kérdés háttérét. Ez a kérdés így szól: milyen műszaki fejlődésre van a következő szakaszban szükség, hogy ez a trend fennmaradjon? (Minden erőfeszítés ellenére az utóbbi években ez a trend lassult.) (ITRS 2011)

Ilyen ütemű fejlődéshez, csak a műszaki oldalt véve is, az iparágnak periodikusan, adott időhatárra meg kell valósítania egy technológiai, műszaki rendszerek seregéből összeálló műszaki oldalt, annak bizonyos csomópontokat kell elérnie. Ebben a kutatásban és fejlesztésben nagyon szoros kölcsönös összefüggéseket megvalósító technológiák együttműködésére van szükség. (Ha külön nem jelzem, a technológia szót az angol értelmezésében használom.) Az iparág, fejlődése során sokdimenziós és sok-szintű komplex „műszaki rendszereket” (system technology) alakított és alakít ki és fejleszt tovább. (Linden et al 2000) Kikutatásuk és megvalósításuk az iparág egészében, mint komplex technológiai rendszerben és több szinten „leszállva”, annak egyre „kisebb” elemeiben, mint még mindig komplex technológiai rendszerekben is egymás előfeltételeiként szolgáló, nagyon gyorsan és elég szabályosan ismétlődő kis és nagy ugrások sorozatát megvalósító trajektóriák, technológiai paradigmák, technológiai vektorok fejlődése és paradigmák, vektorok megváltozása mentén megy végbe. (Dosi 1982, Hronszky 2014)

Az lehet egy jó mai példa erre a rendkívül összetett és nagy sebességgel egyre összetettebbé váló folyamatra, amelyben olyan technológiai rendszereket kell tudni kiépíteni, amelyben minden kritikus elem megfelelően funkcionál, hogy a félvezető alkatrészipari műszaki rendszer egészének továbbfejlődéséhez meg kell, most már nagyon sürgetően találnia egy lényegi elemét, az új generációs litográfia (NGL) megoldását. Ebben az új generációs litográfia számos, kritikus jelentőségű „kisebb műszaki elem” fejlesztési problémái megoldásának van döntő jelentősége az új generációs litográfia egésze és ezzel az egész ipari műszaki rendszer megfelelő működése szempontjából. A jelenleg folyó domináns új generációs litográfia kutatás, az extrém ultraibolya (EUV) kutatás részeként, mivel a megoldás egyre késik, középpontba kerül a maszkok ún. felületi hibái megbízható detektálásának és kijavításának problémája is. Ez is hozzájárul ahhoz, hogy az egész új generációs litográfia probléma megoldása lassan évtizedes késésben legyen. Annak megoldatlansága viszont az egész elektronikai alkatrészipar továbbfejlődésének ütemét,

az un. „Moore görbén maradásnak megfelelő ütem” betarthatóságát veszélyezteti. Másik, talán még súlyosabb probléma az EUV technika fejlesztésében a megfelelő erősségű és stabilitású fényforrás megtalálása a megcélzott nagyon kis mérettartományokban, aminek a megfelelő megoldása még szintén várat magára. Az átfogó nagy ugrás a litográfiában viszont ma, a közel tizenöt évvel ezelőtt kialakult iparági elköteleződés miatt az új generációs litográfiának (NGL) az EUV technikával való megvalósítása lenne. Az elért alapvető eredmények ellenére az EUV fejlesztése nagy kérdésben van.⁷ Ezzel függ össze, hogy a „partvonalon” felmerül már az a gondolat is, hogy az EUV-ba már vagy tizenöt évig belepumpált, más alternatívákhoz képest aránytalanul nagy források ellenére, esetleg más technológiai alternatíva számára kell megfelelő segítséget nyújtani arra, hogy a háttérben fejlődés helyett az iparág domináns új generációs litográfiai K+F-je legyen.⁸ Erre elsősorban az úgy másfél évtizeddel ezelőtt háttérbe szorított elektron projekciós litográfia lehetne megfelelő jelölt, noha annak is megvannak a sajátos problémái. Melléállással, átsorakozással, a számára megteremtendő szükséges források és tág értelemben vett menedzselési feltételek kialakításával ez esetleg gyorsabban elvezethetne az új generációs litográfia problémájának egyre sürgetőbb megoldásához. (ITRS 2013)) Fontos látni, hogy annyira megnövekedtek a K+F kiadások, hogy az iparág nem gondolkodik alternatívák egyforma súlyú fejlesztésén, nem képes ezt az utat felvállalni, hanem jelek alapján kialakítva a várakozásokat, megpróbálja a „legvalószínűbb” sikerhez vezető utat kijelölni és rajta maradni, noha ez a gondolkodásmód ki nem számítható bizonytalanságok esetén aligha igazolható. Ugyanakkor nagyon fontos menedzsment innovációk állapíthatóak meg. Ilyen például, hogy a három nagy alkatrészgyártó, egymás legnagyobb riválisai, az Intel, a Samsung és a TSMSC együtt nyújt egy jóval milliárd dolláron felüli finanszírozást annak a holland litográfiai vállalatnak, amelyiktől leginkább remélik, hogy fel tudja gyorsítani az égető EUV probléma megoldását. (Lange 2013) Tehát kiterjesztik az iparági K+F dinamikájában az összefogást a rivalizálással szemben, prekompetitívnek újradefiniálják az adott K+F területet.

Minden műszaki rendszer akkor és csak akkor jó működőképes, ha minden kritikus eleme megfelelően funkcionál. Így egész története során a gyorsan változó termék- és gyártástechnológiai generációk megvalósításához a kutatásnak és a műszaki tervezésnek, rendkívüli időkényszer nyomasztó terhe mellett kell megtalálnia az egymással jól összeegyeztethető megoldások seregét, amelyek lehetővé teszik a számos technológiai rendszerszinten megkövetelt működésmódok kis tűrészatáron

7 Az iparág egyedülállóan fontos K+F támogató szervezete, a SEMATECH 1997-ben, amikor az EUV felé fordulás megkezdődött, az ipari megvalósíthatóságig terjedő szakaszt nyolc-tíz évre tette. (Linden et al. 2000)

8 Útfüggés-útalkotás terminusokkal kifejezve a problémát, felmerül már, hogy az EUV fejlesztés az iparág által, egy rossz döntéssel önmagát egyre erősebb útfüggésbe, végül bezáródásba (lock-in) kergető trajektóriának minősüljön. Ezzel teljes átértékelésre kerülne az EUV-nek az elsősorban az Intel által erőltetett domináns technológiai alternatívának minősítése, ami az ezredforduló körül ment végbe.

belül koordinált megvalósulását, a „rendszerkockázat”, helyesebben „rendszer bizonytalanság” lehető legerősebb visszaszorítását. Ezt a K+F-et megfelelő, széles értelemben vett „menedzsment” kifejlesztése segíti elő. Azt hiszem, nem tévedek, ha intuitív alapon, benyomásként azt állítom, hogy a menedzsment feladatoknak a műszaki feladatokkal összemérhető komplexitása és komplexitás növekedése van. (Ennek hangsúlyozásáról nem csak a széles közvélemény, hanem sokszor bizonyos szakértők is hajlamosak elfelejtkezni.) Megoldásukhoz, a műszaki oldal problémáinak megoldásához hasonlóan, szükség van kis és nagy ugrásokban, menedzsment paradigma váltásokban, időben megvalósuló, koordinált, az iparág egészét átfogó menedzselés innovációra. Mindezt egy rendkívül gyors emelkedésű exponenciális növekedési pálya mentén kell az iparágnek, mint a műszaki fejlődés lehetőségeinek kikutatását és kiaknázását biztosító gazdasági-társadalmi-menedzsment feltétel-rendszert kikutatnia (felfedeznie) és kiaknázni.⁹

A mikroelektronikai félvezetőipar már viszonylag korán úttörő szerepet töltött be a K+F menedzselés innovációjának területén. Amíg a kockázati tőke és a start-up cégek szerepe viszonylag közismert, sokkal kevésbé közismert olyan prekompetitív együttműködést megvalósító szervezetek működése mint a SEMATECH, ami először a Japán fejlődésre adott amerikai válaszként jött létre, viszont ma már globális együttműködést tesz lehetővé. Számos szerepe közül teszt lehetőségeket nyújt prekompetitív kísérleti eredmények kipróbálására, vagy K+F konzorciumok és kollektív pénzügyi támogatásuk megszervezésében vesz részt. A nemzetközi technológiai úttérkép rendszeres elkészítése is az iparág K+F menedzselésének úttörő eredményei közé tartozik. Az először 1992-ben a SEMATECH támogatásával amerikai úttérkép elkészítésének elindult iparági úttérkép 1999-re már globális együttműködésben valósult meg. Így az iparág úttörőként létrehozta a nemzetközi úttérképet, amelynek megfontolásai a legfontosabb általános műszaki fejlődési útmutatók az egész iparág számára a prekompetitív K+F területén.¹⁰ Ezzel az iparág versengését egy viszonylag széles prekompetitív, globális együttműködésben kialakított tudásbázisra építheti. Ezek az úttérképek megmutatják azokat a kritikus kutatási hiányokat, amelyek megszüntetése nélkül az úttérképeknek, pontosabban az iparágnek az általános műszaki fejlesztési célja nem valósítható meg. Ezt a gazdaságilag is optimális műszaki célt fogalmazza meg a Moore törvény, tágabban Moore „üzenete”.

9 Adott komplex technológiai rendszer jó működését lehetővé tevő, tág értelemben vett menedzsment környezet megteremtődésének-megteremtésének úttörő, de máig alapvető jelentőségű vizsgálatára Chandlernek a *The visible hand* című könyve szolgálhat, amiben kifejtette az amerikai vasúthálózat kiépítéséhez és sikeres működtetéséhez elengedhetlenné vált menedzsment innovációt, a tulajdonos és a menedzsment, a vezetés szétválását. (Chandler 1977)

10 A magyar irodalomban az úttérkép jelentőségének felbecslése megtalálható Hronszky 2013-as tanulmányában.

A sokdimenziós, sokszintű komplex gyártási rendszerek kiszámítható, a rendszerösszetevők csak nagyon kis hibatűrésű koordinált működésének biztosítása az egyik legalapvetőbb jellemzője a mikroelektronikai alkatrésziparnak. Ez determinisztikus, nagy megbízhatóságú, csak kis kockázatokat eltűrő rendszer működés kidolgozását jelenti, mint célt. Ugyanakkor a mikroelektronikai félvezető iparág az egyik első modellje a „tudomány alapú”, szélesebben: kutatás alapú fejlesztésnek. Ebben a lehető legalapvetőbb jelentőségű, hogy az iparág sajátos viszonyban van a kockázattal és a (mély-), (extrém-) bizonytalansággal. Ez utóbbin, egyezően az irodalommal, a lehetséges események részleges vagy teljes nem ismeréséből előálló, ki nem számítható (!) kockázatot értem. A legalább is kezdeti, akár mély bizonytalanság ugyanis alapvető sajátossága annak a K+F-nek, amelynek nemcsak egy egészen nagy megbízhatósággal működő gyártástechnológiai folyamatokhoz és termékekhez kell elvezetnie, hanem, ami ezzel szinte egyenlő fontosságú, a megoldásokat adott időre kell kidolgoznia, hogy azok a műszaki fejlődés elvárt csomópontjának megfelelő műszaki elemként tényleges ipari funkciót kaphassanak.¹¹ Rendkívül vázlatosan utalok a (mély-) bizonytalanság megjelenési formáira.

1. táblázat Mély bizonytalanság fajtái és jellemzésük

| Mély bizonytalanság | | |
|---------------------|---|---|
| Kontextus | sok plauzibilis jövő lehetőség | ismeretlen a jövő, amiben pl. un. lehetetlen szcenáriók is megvalósulhatnak |
| Rendszer modell | különböző struktúrájú rendszer modellek | ismeretlen a rendszer modell |
| Rendszer kimenetek | ismert a kimenetek tartománya | ismeretlen a kimenetek tartomány |
| kimenetek súlya | ismert a súlyfaktorok tartománya | ismeretlen a súlyok tartománya |

Forrás: Cox (2012)

Tekintetbe véve a fellépő, kiszámíthatónak feltételezhető kockázatok mellett a mély bizonytalanságot is, az iparági technológiai úttérképek a megoldandó feladatokat a kutatások előrehaladottsága alapján négy osztályba sorolják (ITRS 2011):

¹¹ A bizonytalanság közgazdasági szerepének első elemzése Frank Knight PhD disszertációjában található, amit 1915-ben védett meg (Knight 1921). Tanulságai sokszor még ma sem tekinthetők megfelelően beépültnek a „kockázatokról” való gondolkodásba.

- *Gyártható megoldások léteznek és optimalizálásuk folyik*
(A jelenlegi technika és eszközök elégségesek)
- *Gyártható megoldások léteznek*
(További fejlesztések szükségesek, de feltehetően időben megvalósulnak)
- *Interim megoldások léteznek*
(A hozzáférhető megoldások korlátai nem fogják késleltetni a termelés megindítását, kerülő megoldást kell megtalálni. Megfelelő javítások remélhetően kitöltene minden hézagot)
- *Gyártható megoldások nem ismertek*
Az utolsó terület az, ahol „vörös téglafal“, azaz végleges határ is felléphet. Az ITRS-ek két kategóriába osztják a „vörös” paramétereket. Az elsőben meggyezéses vélemény van arról, hogy a keresett értéket, lehet, hogy későn, de végül el fogják érni. Viszont az iparnak nincs sok bizalma egyetlen jelenleg javasolt megoldás iránt sem. A másodikban az a konszenzust elért szakértői várakozás, hogy a keresett értéket soha nem fogják elérni. Eredményhez az első kategóriában eredményhez áttörésre van szükség a kutatásban. Ez azzal a reménnyel jár, hogy a probléma végül, a fenti lépcsőfokokon átmenve, a bizonytalanság redukció ismert útjának megfelelően az első kategóriába kerül át, ahol a gyártható megoldások ismertek és optimalizálásuk folyik. (ITRS 2011) Zárójelben megjegyzem, hogy a kutatások áttörésre vezető eredményessége csak utólag állapítható meg, ahol a helyesen megállapított „utólag” időpontja maga is felbecslés tárgya. Ez az alapvető különbség megbontó (disruptive) innovációk és radikális innovációk között. (Viszont a megbontó jelleg meg lehet állapítani az innováció bevezetésekor.)

Azt mondhatjuk, végül is minden innovatív iparág a problémák e négy osztályával találkozhat, így mindenütt fellép a negyedik kategória is. Ez igaz. A döntő különbség azonban abban van, amit két tényező, a komplex műszaki rendszertechnológia sokirányú és sokszintű összetettsége és az időkényszer együttesen, egészen extrém módon megkövetel a mikroelektronikai alkatrésziparban. Az iparágban, minden lényegesen új műszaki részfeladat megoldásának kikutatásában is számítani kell tudni, nemcsak mély bizonytalanság váratlan megjelenésére, hanem arra is, hogy képes a rendszerkényszerek miatt annak megfelelő időben való megoldására is. (Másképpen az innovációs próbálkozás az ipari alkalmazás szempontjából ugyanúgy értelmét veszti, mintha fel se találták volna.) Az innováció ebből a szemszögből az elvállalt bizonytalanság kikutatásnak a rendelkezésre álló időben kiszámítható kockázattá átalakítását, „megszelídítését” jelenti. Az iparágban meghatározott, gyorsan egymásra következő időszakokban, egy-egy újabb csomópont eléréséhez

kis ugrásokra van szüksége.¹² Ezeket váltja fel az, hogy meghatározott időszakokban egészen új ötletekre van szükség a paradigmaváltást jelentő továbbhaladáshoz. Ezek megtalálására és megvalósítására is érvényes az időkényyszer.

Az iparág fokozatosan megtanulta az itt megjelenő mély bizonytalanság változatos eszközökkel való viszonylag jó menedzselését. Egyrészt fokozatosan eljutott odáig, hogy messzire előre tekintve (önkényesen tizenöt évben rögzítve a várakozás horizontját) kísérletezzen már gyökeresen új technológia jelöltekkel, lásd az előbbi táblázatban a „Gyártható technológiai megoldások nem ismertek” probléma osztályt. De ennél sokkal tovább megy a „küldetés orientált alap kutatás” (mission oriented basic research) egyik fajtájában, amikor felteszik azt a kérdést, hogy lehet-e olyan tudományos víziókat megalkotni a mikroelektronika számára, amelyekről fel lehet tenni, hogy lehetővé teszik esetleg nem csak az iparági termelékenységi görbe fenntartását, de akár összemérhetetlen tovább javítását is. (Az utóbbi szempontnak felel meg például a kvantumelektronika már több évtizedes víziója.) Így, szinkron metszetben nézve a K+F struktúra sokrétegű. Azonnali problémák kis innovációt igénylő megoldásának és csak tudományos fikcióként feltehető műszaki forradalmak tudományos alapjainak keresése jelöli ki a két határát annak az innováció seregnek, amelyik egymás mellett működővé teszi a lehető leghosszabb időtáv és részstádiumjai kikutatási stratégiáit. Az iparág számos innováció menedzselési eredményének egyike volt, hogy elsőnek alakított ki ilyen dinamikát. Ugrások viszont szinte bizonyosan magukban foglalják még ismeretlen mély bizonytalanságok, ha nem is egyformán nehezen megoldhatóvá váló sorozatainak váratlan későbbi felbukkanásait is. Akár azt is, hogy a feltételezett lehetséges út később, már hatalmas fejlesztési út bejárása után bizonyul zsákutcának, legalább is abban az értelemben, hogy nincs már olyan hálózata az eléggé potens szereplőknek, amelyik, még bízva benne, kitartóan megpróbálná a feltételezett lehetséges utat a cél eléréséig végigjárni, hiszen nem támaszkodhatnak a bejárhatóság biztos előzetes, legalább valószínűségi tudására.

A rendkívüli fejlődési ütem fenntartásához az iparág megtanulta, hogy „kettős képességű”, kétkezes (ambidextrous) iparfejlődést és K+F-et valósítson meg.¹³ Ez is

12 Vita folyt az iparágban és az elemzők között az elmúlt évszázadban, hogy a mikroelektronikai alkatrészipar elsősorban radikális ugrásokkal vagy folytonos kis innovációval és kumulatív fejlődött-e. Schaller hatásosan érvelt a radikális innovációk jelentőségét hangoztatókkal szemben, hogy az iparági fejlődésre elsősorban a folytonosság jellemző. (Schaller 2004) Azt hiszem azonban, hogy rossz a szembeállítás, mivel a csomópontból csomópontra haladás mindenképpen megbontó innovációkat követel, ha kisebbeket is mint egy-egy nagy paradigmaváltásnál. Az ismétlődő átszámazási nehézségek vagy a kis, de ugrást jelentő megbontó innovációk időbeni megtalálásának hiányából eredő fejlesztési késések jól mutatják meg a minőségi, nemcsak a mennyiségi jellegét a megtalálendő innovációknak. Így egy csipet sóval értendő a sokat hangoztatott történetileg folytonos egymásra épülés a mikroelektronikai alkatrészipari innovációban, az újnak a korábbi tapasztalatokra való ráépülésében. Folytonosság és ugrás egyformán jellemzi a kis innovációk tartományát is.

13 Ma gomba módra szaporodik a kettős képességű szervezetek fejlesztésének irodalma. A terminus magyarítását a közgazdaságtanban alkalmazott magyar nyelvű szakirodalomból vettem át.

az iparág egyik alapvető menedzsment innovációjának tekinthető. Ez szemben áll Christensen (Christensen 1997) nagy sikerű, nagyon jelentős problémafelvetésével, az innovátor dilemmájával, aki bizonyos csomópontokon mérlegelni kényszerül, hogy lényegesen új pályát kezdjen el kikutatni, felfedezni vagy inkább a régi kiaknázását folytassa. Szemben ezzel a dilemmával ugyanis a mikroelektronikai alkatrésziparban iparági szinten az jellemző, mutatis mutandis egyre kevésbé az egyre kevésbé jelentős iparági szereplők szintjén, hogy miközben az előző paradigma kiaknázása még folyik, már teljes erővel folyik az új paradigma keresése, a felfedező, kikutató kutatómunka is. Ez az egyidejűség, párhuzamosság egy nagyon fontos szükségszerűség, a kettős képességű ipar típus fejlesztése stratégiai jelentőségének felismerését jelenti egy rendkívüli sebességgel fejlődő kutatás alapú iparágban. Elemzését megtaláljuk például Appleyard és munkatársai, illetve Sydow és munkatársai tanulmányaiban. (Appleyard et al. (2008), Lange et al. (2013))

Sőt, a gyakorlat azt mutatja, hogy nem csupán egy kiszámítható párhuzamos-ságról lehet szó, ahol tudni lehet, hogy mikor veszi át a régi helyét az új paradigma. Egy példát hozok erre. Mint már többször utaltam rá, kb. tizenöt éve folyik az un. új generációs litográfia megfelelő megoldásának keresése, óriási költségű, milliárd dolláros K+F programokkal. A megoldandó mély bizonytalanságot jelentő tudományos és műszaki problémák megoldásának késése oda vezet az ismételt, de előre nem látott elmaradások fellépése miatt a tervezések alapjául szolgáló várakozásokhoz képest, hogy egyszerre folyik pl. a litográfia területén a régi, nagyobb hullámhosszú fény alkalmazásán alapuló eljárás, korábban fel sem merült, mert lehetetlennek tartott, a korábban feltételezett határokhoz képest további kiterjeszhetőségének (!) kikutatása és kifejlesztése a régi, immerziós litográfia területén és az új generációs litográfia kikutatása és kifejlesztése. A régi kiterjesztését kereső ilyen „kétkezesség” ebben az esetben nem jól előrelátható választás kérdése, hanem elengedhetetlen követelmény ahhoz, hogy az iparág az átmeneti időszakban is, az új paradigma kifejlesztésében váratlanul felbukkant alapvető nehézségek ellenére az iparág rendkívüli sebességet megkövetelő történelmi termelékenységi görbéjén tudjon megmaradni. Ezzel ez a fajta, a régi paradigma érvényességének kiterjesztésére való próbálkozás az iparág további rendkívül fontos menedzselési innovációját hozta létre. Mellékesen jegyzem meg, hogy a litográfia már korábbi szakaszokban is egy nagyon érdekes és fontos jelenséget mutatott fel. Ez a rendszeres sikeres túlhaladás az adott technológia korábban kiszámított, felbecsült határain. Sajnos, semmilyen hely nincs itt annak a tudósi és mérnöki ügyességnek az ismertetésére, amely számos ilyen, „megkerülő megoldáshoz” vezetett el. Logikai szempontból arról van szó, hogy a kutatók találtak olyan hallgatóságos előfeltételezést, aminek a „megkerülhetősége” érvénytelenítette a technológia alkalmazhatóságának végső korlátjára tett korábbi bizonyítást. A

litográfusok között gyakori szólar szerint a litográfusok „ismételten megtanultak olyan vékony vonalakat festeni, amelyek vékonyabbak, mint az ecsetjük.”¹⁴

A sikeres tudás-intenzív ipari szektorok mintapéldájaként elsőnek általában a mikroelektronikai alkatrészipar jelenik meg. Az iparág története maga nagy volatilitást mutat, nyolc nagyobb válságon ment sikeresen keresztül. (Brown, Linden (2009)) Ugyanakkor az innováció vonatkozásában Schumpeter teremtő rombolásának inkarnációját vehetjük észre egy meglehetősen stabilitást, nagyobb volatilitást nem mutató innovációs trajektória mentén, ahol a dinamika részben szabályosan ismétlődő kis ugrások, részben nagyobb ugrások formájában ment és megy végbe. Ez a tartós, de bizonyos mértékig stabilizálható egyensúlytalanság a kínálati oldalon az új alkatrész termékek nagy meredekségű exponenciális ütemű, a megfelelő mértékű fogyasztást megelőző megjelenéséből jön létre. Ez párosul a termékek ezzel összevethető ütemű elértéktelenedésével, árcsökkenésével,¹⁵ miközben az új termékek és gyártástechnológiák K+F-je és különösen a nagyipari tömeggyártásukat biztosító néhány évente elengedhetetlen gyártástechnológia váltással járó (újra) felszerszámozás költsége is nagyon meredeken exponenciálisan növekszik. A saját maga által ismételten kezdeményezett innovációs ciklusokban az iparág rendkívüli ütemű, állandóan ismétlődő megújulásra kényszerített. De eddig ezt meg is tudta valósítani.

Az integrált áramkörök fejlesztésén alapuló alkatrészipari fejlődés, történetének első, kb. harminc-harmincöt évében az un. digitális információ kezelési képesség fejlesztése mentén ment végbe. (Ezt a trajektóriát a „több Moore” terminussal szokták jelölni.) Egy utolsó bevezető megjegyzéssel csak utalok arra, bár egészen alapvető jelentőségű az iparág jövője szempontjából, de sajnos még a Moore törvény története szempontjából is releváns vonatkozása sem fér be a jelen tanulmány kereteibe, hogy ma már ezzel összemérhető erővel indult meg a fejlődés egy másik, az un. funkcionális diverzifikáció irányába is. Nem-digitális funkcionális megvalósításával ezek az eszközök a digitális továbbfejlődés mellett további értéket hoznak létre a végfogyasztóknak. Gyakori már, hogy ezek a működésmódok például a chip szintre, system-on-the chip (SoC) kerülnek át. (Ezt a fejlődési irányt a „több-mint-Moore” terminussal jelölik.) A „több-mint-Moore” technológia fejlődés nem mindig mutat gyors exponenciális növekedést.

A Moore törvényről

A mikroelektronikai alkatrészipar technológiai fejlődésének dinamikájára vonatkozó legalapvetőbb tudás, hogy ezt a folyamatot legáltalánosabb szinten az un. Moore törvény írja le, mi több ez szolgál az iparág fejlődésének általános normaként és

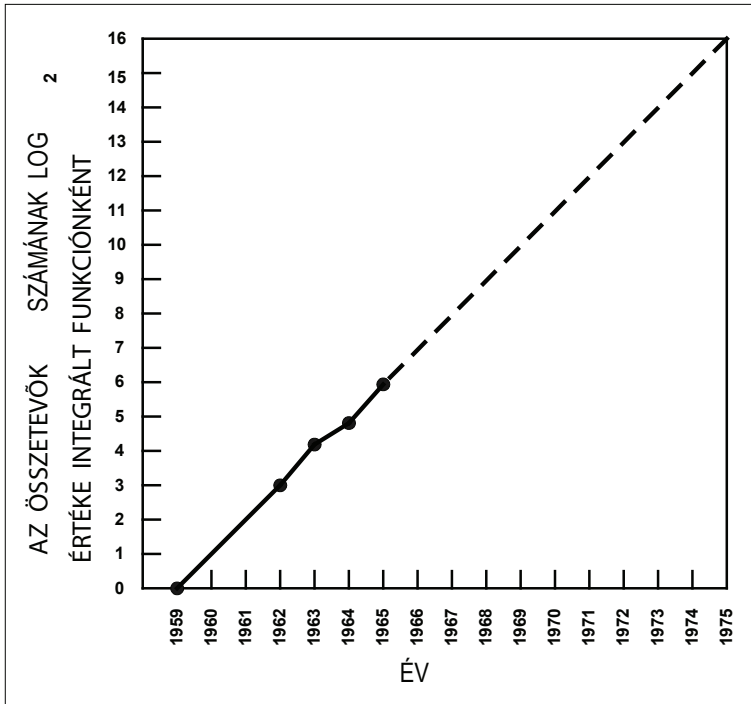
14 Ebben a tekintetben nagyon jól eligazít a kiváló menedzsment kutató, Henderson elemzése. (Henderson 1995)

15 Ehhez kapcsolódik az Intel hajdani eladási innovációja Noyce ötlete alapján, hogy piac generálás céljából az új alkatrészeket áron alul kezdték el értékesíteni.

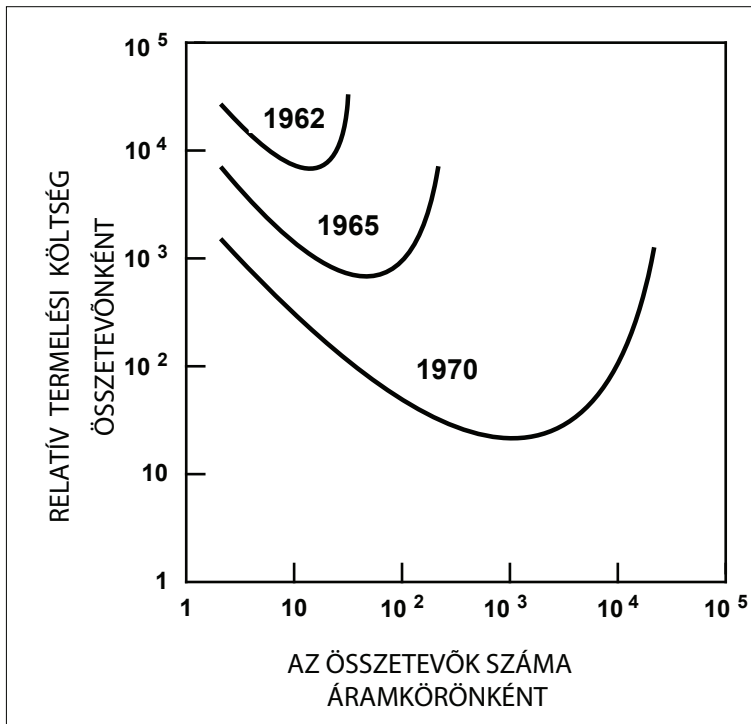
célként. Mi a Moore törvény? A tanulmányírás bizonyos szabályai szerint most a Moore törvény leírásának, majd működésmódja megismertetésének kellene következni. Azonban, ha a Moore törvény körüli, ma is újratermelődő alapvető félreértéseket el akarjuk kerülni, akkor elengedhetetlen először egy történeti levezetés. A történetnek a kezdeteit elsősorban két kiváló iparág történész, Lécuyer és Brock évtizedes munkája után meglehetősen biztonsággal ismerjük. (Lécuyer, Brock) E vonatkozásban az értelmezés előtt állnak még további alapvető feladatok. A Moore törvény és, amit Moore „üzenetének” nevezek, történetének további szakaszaira vonatkozó ténytudásunk viszont meglehetősen hézagos, így az interpretáció, bármennyire szükséges is, elkerülhetetlenül impresszionista jellegű.

Az iparág általa beláthatónak ítélt jövőjéről érvelve, Gordon Moore, az integrált áramkörök fejlesztésének egyik legelső úttörője, az Intel egyik megalapítója 1967-ben, 1965 márciusában egy tanulmányt jelentetett meg, amelyben megfogalmazta, hogy az integrált áramkörökben az optimális költséggel előállítható alkotóelemek száma exponenciálisan növekszik (Moore 1965). Ezt nevezték el nem sokkal később Moore törvényének. Moore egyéves periódust figyelt meg és extrapolált 10 évre.

1. ábra Moore törvénye



2. ábra A relatív termelési költség csökkenése összetevőnként az áramkörben található összetevők számának függvényében



Ugyanakkor leírt egy másik megfigyelt összefüggést is. Eszerint az optimális fajlagos költséggel előállítható maximális számú elemet tartalmazó integrált áramkörök fajlagos költsége időben exponenciálisan csökken. A két megfigyelés összekapcsolásából, s a háttérüket alkotó eljárás, a miniatürizálás megfigyelt sajátosságaiból és folytathatóságából arra következtetett, hogy 10 év múlva az iparág elő is fogja állítani az alkotóelemek exponenciális növekedését extrapoláló görbe szerinti integrált áramkört, hiszen gazdasági szempontból is érdemes ezt célá tennie.

Moore rámutatott, hogy a megfigyelt trendek alapja a miniatürizálás sajátos jellege, amit az integrált áramkörök fejlesztése különösen ki tud használni. Ez további előnyök megvalósulásával is jár, pl. a működési sebesség növekedésével. Ugyanakkor a miniatürizálásnak, az általa belátható tartományban alig van ellentételezése negatív terminusokban. Extrapolációját az vezette, ameddig megoldhatónak látta a fejlődést pusztán mérnöki képességek bevetésével a műszaki fejlesztésbe. Az általa akkor beláthatónak ítélt szakaszt tíz évnél kockáztatta meg.

Moore ezzel állást foglalt a hat évvel korábban, először 1959-ben előállított integrált áramkörök, tágabban az integrált elektronika jövőjével kapcsolatban.

Ennek jövőjét azonosította az egész elektronika jövőjével. Természetes volt, hogy jövő víziókat, várakozásokat és extrapolációkat próbáltak tenni a kialakuló iparág szakemberei. Ez döntő jelentőségű volt saját maguk számára és a keletkező új termék marketingjéhez is. Moore víziója és extrapolációja egyrészt az integrált áramkörök és az individuális tranzisztorok (és elektroncsövek) között az integrált áramkörök javára való választás megalapozottságára hívta fel a figyelmet. Másrészt rámutatott az integrált áramkörökre koncentráláson belül a lapkán elhelyezett elemek sűrűsége növelésének más utakhoz képest összehasonlíthatatlan korrelációban levő előnyére, a rendkívül meredek teljesítménynövekedésre és a fajlagos árcsökkenésre. Brock, a mikroelektronika története e korszakának egyik legkiválóbb történetírója joggal értékeli „egy tiszta hangnak” Moore, kevesebb, mint négyoldalas tanulmányát (Brock 2006). Hely hiányában nincs lehetőség arra, hogy foglalkozzak azzal, hogy a tanulmánynak mégis viszonylag kis közvetlen hatása volt.

Ma a Moore törvényt a tranzisztorszámra vonatkoztatjuk. Moore eredetileg nem tranzisztorokra, hanem az összes, a lapkára rávitt elemre fogalmazta meg a mondanivalóját. Ezek száma akkor kb. kétszerese volt a tranzisztorokénak. Megfigyelése a hetvenes évek elejére a szakmai figyelem középpontjába került. (Carver Mead nem sokkal korábban nevezte el törvénynek, bár természetesen nem természettörvényt értett a terminus alatt.) A japánok 1975-ben az integrált áramkörfejlesztés, a rendszerintegrálás következő szakasza, az un. VLSI (Very large system integration) problémáinak megoldásához felállítandó, az iparág történetében korszakalkotóan új és Japán történeti sajátosságainak legjobban megfelelő együttműködési forma, az állam erőteljes irányító szerepén alapuló, és számos nagy japán mikroelektronikai alkatrészipari vállalat együttműködésében megvalósítandó K+F szervezet felállításához Moore törvényére már jusztfikációként (elméleti igazolásként) és legitimációként hivatkoztak. (Sakakibara 1983)

Ugyanakkor 1975-ben Moore maga módosította saját előretekintését, és bizonyos tényező, a lapkán rendelkezésre álló terület jobb kihasználásának kimerülésére hivatkozva, laposabb jövődöbéli görbét feltételezett, mint tíz évvel korábban és az új csomópontok megjelenésének ütemét 2 évre módosította (Moore 1975). A Moore törvény a hetvenes évek közepétől megkérdőjelezhetetlen tekintély lett, de a nyolcvanas évek vége felé mindjobban elterjedt a szakmai közvéleményben, hogy a tapasztalatokat általános, iparági szinten a másfél éves periódus jobban leírja. A nyilatkozatok ugyanakkor sokszor hangsúlyozták a trend és extrapolációjának szerintük hihetetlen pontosságát.

Az elmondottak alapján is sejthető már, hogy kissé részletesebben kell megvizsgálni, hogy mi a Moore törvény, milyen változatai, milyen funkciói vannak, és milyen kontextusokba került története során. Mire vonatkozik? Az optimális költséggel felvihető elemekre vagy tranzisztorokra? A meredekség megváltozásai (egy év, két év, másfél év) is megjelennek problémaként. Tovább bonyolította a helyzetet, hogy az integrált áramkörök fejlődése DRAM memóriában illetve

processzorokban felhasználásra kerülő áramkörök alosztályaiban ment végbe, s ezek egymástól eltérő fejlődési ütemet mutattak. Ez a problémakör később tovább bonyolódott. Továbbá például kérdésessé vált az elmúlt évezred fordulójára, hogy az iparág műszaki fejlődésének szintjét megfelelően jellemzi-e az adott időben legnagyobb tranzisztorszámú termék előállítására. Ez a Moore törvénnyel kifejezett maximális tranzisztorszám indikátor jellegének megváltozására kérdez rá.

Moore maga kettősen viszonyult a Moore törvényhez. Egyrészt kitartott amellett, bizonyos értelemben mindig csak egy papírlapra írt extrapolációnak tekintette, ahogy extrapolációja ténylegesen megszületett, a maga szükségszerűen korlátozott pontosságával. Másrészt az iparág legalapvetőbb összefüggésének tekintette, azon trajektória megfogalmazásának, amelyen megmaradás az iparág legalapvetőbb célja. Trend extrapolációt látott benne, amit céllá kell tenni, s amit, hogy jobban kifejezze az iparági $K+F$ -ben végbement változásokat, s jobban megfeleljen a tapasztalható eltéréseknek, szükség esetén módosítani kell, akár az iparág egészét tekintve, akár valamelyik terméke esetén. (Moore 1997) Másrészt az összefüggést a lehetséges pontosságnak megfelelően kell kifejezni. Így pályafutása végén megengedett magának olyan megfogalmazást is, hogy „az lehet a várakozásunk, hogy a processzoraink megkétszereződnek minden 18-24 hónap alatt legkevesebb hét évig.” (Moore 1997)

Azt hiszem, hogy Moore számára a döntő az a komplex információ volt, amit Moore „üzenetének” nevezek. Ez az, hogy a miniatürizálás kiaknázására való koncentráció adja az iparág egyedülálló fejlődési lehetőségét. Ez megjelenik a tranzisztorszám növelésében. Az optimális költségen a lapkára felvihető tranzisztorszám növekedés a fajlagos költség gyors exponenciális csökkenésével és további paraméterek hasonló gyorsaságú javulásával jár együtt, miközben, legalább egy ideig a „költségek” (trade-off) nem vagy alig lépnek fel.

A Moore törvény, az adott időben minimális költséggel megvalósítható tranzistorok számának időbeni növekedésére vonatkozó exponenciális görbe megmutatja az iparág alapvető műszaki fejlődési tendenciáját, mindaddig, amíg az iparág számára a legfontosabb a tranzisztorszám és az ezzel jól összefüggésbe hozható funkcionalitás növekedése. Ugyanakkor Moore már 1979-ben arról ír, hogy a Moore törvény határ, korlát, amit fejlődésében az ipar nem feltétlenül akar mindig elérni. (Moore 1979) Ami a Moore törvény lehetséges pontosságát illeti, a miniatürizálásról szóló, abszolút fontos stratégiai „üzenetéhez” képest Moore azt másodlagosnak tekintette, hogy a Moore törvény mennyire pontos és a tranzisztorszám növekedés vagy a fajlagos költségszökkenés tényleges trendje mennyire pontosan követi a feltételezett trendet. Továbbá, mint éppen utaltam rá, érdek lehet, hogy ne pontosan kövesse, akár elmaradjon tőlük, akár megelőzze azokat bizonyos csomópontokon. Másrészt, ha az iparág egészének fejlődését jellemzem egy görbével, akkor kérdéses marad, hogy mire vonatkoztatom, a memória vagy a logikai funkciók fejlesztésére. A nyolcvanas évektől általában a memória fejlesztés területén elért számokkal jellemezték az iparág műszaki fejlettségét. A Moore törvény eredeti formája még

sok „barkácsolási problémát” hagyott nyitva a későbbi történet számára fejtörést okozva, a „barkácsolás” a Tudomány – technika tanulmányok (STS) terminológiájával megegyezően értve.

Szerintem teljesen korrekt Moore-nak ez a kettős viszonyulása a Moore törvényhez és a fajlagos költségcsökkenési görbéhez. Teljesen világosan meglátta, hogy egyrészt a Moore törvény különlegesen fontos az egész iparág számára, annak jellemzésére. Ugyanakkor, paradox módon, számos okból legalább is csak többé-kevésbé pontatlan jóslatnak tekinthető, amelynek a pontatlansága egész története során megmaradt, s igazán nem is javítható sokat. Ezzel szemben egyik funkciója éppen az volt, hogy mind az iparág környezetének mind minden iparági szereplőnek, ha csak lehetséges, ne csupán laza orientációt, de lehetőleg pontos előrelátást biztosítson az iparág legfontosabb sajátságáról. A Moore törvény, pontosabban a rendkívüli ütemben folytatható, folytatandó miniatürizálás és a tranzisztorszám gyors exponenciális növekedésének és az ezzel együtt járó fajlagos költségcsökkenésnek a kiaknázása ugyanis az a „tengely”, amely körül az iparág legalapvetőbben megszerveződött. Egyre nagyobb integrált áramkörök megvalósításával a digitális teljesítmény növelésére törekvéssel folytatja tevékenységét, története során lényegében folyamatosan, rendkívüli mértékben, de lényegében szabályosan növekvő kínálatot nyújtva. De felmerül az a kérdés a megismételt extrapolálás minden egyes esetében, hogy mennyire volt teljesen folyamatos ez a növekedés, ahogy a törvény állítja, s mennyire várható el, hogy ugyanilyen folyamatos lesz a jövőben?

A Moore törvény által megfogalmazott trend csomópontjait követve azt találjuk, hogy például 1965 és 1968 között nem állították elő az ide tartozó csomópontoknak megfelelő termékeket. Ennek az oka un. termék meghatározási válság volt. Ez azt jelentette, hogy néhány évig nem volt olyan felhasználás, amihez a nagyobb teljesítményű integrált áramkör kellett volna. Általánosítom a termék meghatározási válság terminust. A termék meghatározási válságok tipikusak. Ismétlődően, bár rosszul predikálhatóan fordulnak elő egy ennyire meredeken fejlődő iparág esetében. Az egyik rendkívüli jelentőségű, kiküszöbölhetetlen koordinációs problémából származnak, abból, hogy a félvezető alkatrészgyártás fejlődésének lehetőleg szinkronban kell lenni azon a termékek kifejlesztésével, amelyekbe beépítésre kerülnek. Ugyanakkor rendszeresen fordul elő, szinte elkerülhetetlenül, hogy itt aszinkronia lép fel. A termék meghatározási válságok azzal jönnek létre, hogy az alkatrészgyártó már képes valamilyen szintű termék ipari előállítására, miközben még nincs megfelelő fogyasztó, nincs olyan mikroelektronikai rendszer, amibe legalább is tömegfogyasztást elérve beépítsék.

Egy hasonló folyamat tipikus, rendszertelenül ismétlődve jelenik meg az alkatrészgyártók beszállításai esetében is. Érdeemes beszállítási meghatározási válságokról is beszélni. Sokszor mindkét típusú esetben a felfokozott koordinálási és szinkronizálási igény és a mély bizonytalanság rendszertelen, de „törvényszerű” fellépéséből adódó összeütközésről van szó. (De az aszinkronia előállításának lehet

például iparpolitikai, vállalatpolitikai oka is.) Az alkatrész előállítási és fogyasztói alkalmazási trendek tehát elég valószínűen szabálytalanul szaggatottak lesznek. Bizonyos csomópontok hiányoznak vagy a trend jóslathoz képest eltolódva, korábban vagy később valósulnak meg.

Fontos látni egy további összefüggésrendszert, dimenziót. A Moore törvény keringő variációi összefüggésben vannak azzal az is, hogy az iparág technológiai fejlődését a legalapvetőbb szinten kifejező trend-jóslat ideológiaként is működik, és a szakpolitizálás sajátos eszköze, ahogy például a szabadalmi bejelentések „politikája” is. Ideológiaként a Moore törvény, mint különlegesen pontos jóslás az iparág ikonikus jellemzője szerepet kapta meg. A hetvenes évek közepén mind a Texas Instruments egyik vezetője, Lester Hogan mind Bob Noyce az Inteltől a törvény bámulatosságot pontosságú érvényesüléséről kezdtek beszélni, miközben a tények komoly barkácsolására és némi „varázslásra” volt szüksége Moore-nak, hogy 1965-ös predikcióját összhangba hozza az 1975-re végbement tényleges technológiai fejlődéssel. A Texas Instruments és az Intel vezetői viszont az iparág közös érdekét fejezték ki - sajátos módon. A valóság viszont, ahogy legalább jeleztem már, sokkal bonyolultabbnak bizonyult. A tényleges tranzisztorszám növekedés csak „barkácsolások” után volt összhangba hozható a Moore törvénynek megfelelő adatokkal és pl. a meredekség korrekcióit ismételtelen el kellett végezni. A Moore törvényre hivatkozások egyik csoportja szerint viszont a Moore törvény különlegesen pontos. (Ekkor érdemes utánanézni, hogy a háttérben ideológiáról, szakpolitizálási fogásról vagy elméleti leegyszerűsítésről lehet-e szó?) Más állásfoglalás szerint pedig csak olyan információt tartalmaz, amit csak nagyjából, vagy bármely gyakorlati célra elégtelenül lehet pontosnak tekinteni. (Ekkor viszont érdemes annak utánanézni, hogy nincs-e szó Moore „üzenete” jelentőségének eléggé el nem ítéhető alábecsüléséről?)

Elengedhetetlen még kitérni valamire. A Moore törvény, féllogaritmikus alakjában egy nagyjából diagonálisan futó egyenes, egyrészt a tényleges empirikus valóság számos részletétől elvonatkoztatott idealizáció, „kisimított” információ, aminek a fenntartása célként, normaként funkcionál. Természetes, hogy az általános elméleti megfontolásokban leíró extrapolációként és normaként szolgáló Moore törvény féllogaritmikus alakja egyenes (néha töréssel), ha csak nem éppen az ettől eltérést szeretnénk előtérbe állítani és megmagyarázni. Viszont az is természetes, hogy a valóságos változások mikro-módosulásokat mutatnak, például csomópontok kiesése, meredekség változások kis tartományban is előfordulnak. (Az Intel bemutat egy, az ő értelmezésében a tapasztalatokat legpontosabban követő Moore törvényt (Intel 2002). Az idealizált görbéknek ezekkel a tapasztalati görbékkel való összevetése fontos, de itt nincs rá hely.

Fontos észrevenni, hogy kettős magatartás található meg nemcsak az elemzők, hanem az iparág szereplői között is a Moore törvénnyel szemben. Ez abból fakad, hogy az egyrészt valamennyire kielégíti az olyannyira nélkülözhetetlen általános,

iparági szintű orientációs szükségletet, de semmiképpen nem tekinthető olyan előrejelzésnek és normának sem, amit pontossága alapján lehet követni. Ezt tovább bonyolítja, ahogy már jeleztem, hogy a Moore törvény, ahogy a ráépülő iparági úttérkép is az iparágon belüli szakmapolitika hatékony eszköze is.¹⁶

A helyzet bonyolultságát csak fokozza, hogy kisebb vállalatok számára tényleges élet-halál kérdése lehet a lehető legpontosabb, elsősorban rövidtávú előrelátás a rendkívül szoros koordinációs kényszerek és a hitelfelvételek miatt. Hiszen hitelből fejlesztve még úgy is járhatnak, hogy éppen a sikeresen, de a tervezettnél korábban megvalósított fejlesztés okozza a csődjüket, mert nincs még meg a fogyasztó, vagy vonakodik, hogy átvegye a beszállítótól a korán érkezett terméket, nem beszélve a még többször tapasztalható késésekről, ami a beszállítótól való elfordulással, ugyancsak piacvesztéssel, akár csőddel járhat. Ezért alakul ki ambivalens magatartás a mértékadó intézmények által megfogalmazott, az egész iparágra jellemzőnek tekintett Moore törvénnyel és úttérképpel kapcsolatban. Olyan gyakorlat terjedt el, hogy a kisebb vállalatok, pl. az ITRS által érvényesnek tekintettek ügyes olvasására és értelmezésére koncentrálnak, orientálódnak, de nem tekintik „kötelezőnek” és kötelezően elhithetőnek azokat. A kisebb iparági szereplők inkább hisznek a pontosabbnak megíjósolhatóknak tekintett részfolyamatokra értelmezett exponenciális görbéknek, amelyek a konzorciumokon belüli szerződés-kötések alapjául szolgálnak. (Schubert 2007)

A Moore törvény olyan műszaki lehetőségre, a miniatürizálásra koncentrálnak, és fogalmaz meg azzal kapcsolatban információt, amiért az iparágnak érdemes volt mindent megtenni, hogy a tendencia folytatódjon. Az ITRS ezt tömören így fogalmazza meg minden, első kiadása (1999) óta két évenként kiadott úttérképében: „A mikroelektronikai alkatrészgyártás olyan iparág, amely a Moore törvényt követve, annak ismételt megvalósítására elköteleződve fejlődik.” (ITRS 1999, ITRS 2011) Az alábbi idézet az ITRS-től megmutatja, hogy a globális úttérkép készítői, ahogy a szakmai praxis is, a Moore törvényt és a rokon trendeket nem egyetemi gyakorlatnak tekintik, amelyben öncéllá válhat a pontosság állandó növelhetőségének megkövetelése. „Az úttérkép abban a szellemben kerül összeállításra, hogy meghatározza, hogy milyen műszaki képességeket és mikorra kell az iparágnak kifejleszteni, hogy Moore törvényén és a többi trenden megmaradhasson. Így az ITRS nem annyira előrejelzési (forecasting) gyakorlat, mintsem egy mód annak indikálására, hogy a kutatásnak hova kell fókuszálnia, hogy Moore törvényét folytathassa.” (ITRS 2011) A Moore törvény és a rokon trendek leginkább félkvantitatív

16 A legnagyobb vállalatok egyrészt sokszor tudatosan lassítják vagy éppen gyorsítják a Moore görbék aktuális részével összevethető fejlődést, nem csak a fejlődés szerencsés vagy szerencsétlen epizódikus tényezői okoznak elmaradásokat vagy megelőzéseket. Másrészt alkalmanként elhítetik, hogy bizonyos szereplők gyorsabban vagy lassabban haladnak előre, mint ahogy az a Moore törvényből következne. Tudás látszatának keltése is hatalom. Mindez a versenytársakban nyugtalanságot kelt/het, s téves reorientációra ösztönözhet.

információnak tekintendők, informálnak a görbe típusáról, s bizonyos játékkal, túrés határral a konkrét alakról.

Az iparág ezzel egy kettős benchmarking funkciót fejlesztett ki és a Moore törvényt, illetve Moore „üzenetét”, mint az információcsere legáltalánosabb elemét és eszközét használja. Külső benchmarkingként gondoskodik a környezettel való legáltalánosabb kapcsolattartásról. Az eddigi fogyasztók eddig tapasztalták e „törvények” érvényesülését. Általában az új fogyasztók sem hajlandók erről, különösen a fajlagos költségcsökkenésről sem lemondani, ez az elvárásuk egyik szilárd pontja, állapítják meg az ITRS-ek. Az iparág viszont mindent megtesz a tendencia folytatódásáért. Másrészt belső benchmarking valósul meg. Az iparág szereplői legáltalánosabban ehhez a szinthez mérve minősíthetőek és minősítik magukat, alakítják szerepüket a versenyben.

Természetes, hogy csak egy változó nem lehet igazán mérték egy egész iparág technológiai fejlettségi szintjének felbecslésére. Az ITRS hat változót vesz figyelembe. Ezek az integrációs szint, amire a Moore törvény vonatkozik, az ár, a működési sebesség, a felhasznált energia, a kompaktság /méret és súly/, és a funkcionalitás, amikor meghúzza a fejlesztéssel szemben alkalmazott normát. Az ITRS legfontosabbnak a Moore törvényt és a fajlagos költségcsökkenés trendjét tekinti. Nem világos, azonban, hogy az ITRS milyen módszerrel, hogyan jut el az igazán fontos összefüggéshez, ezek komplex figyelembevételéhez, ami a lehetséges leginformatívabb összefüggés lenne.

Ki kell még egyszer röviden térni arra, hogy a Moore törvény megfogalmazása interpretációs „játékok” lehetőségét engedi meg. Ilyen volt már az is, hogy mivel mérjük az iparág műszaki fejlettségét, ha a DRAM-ekben alkalmazott integrált áramkörök száma gyorsabban nő, mint a mikroprocesszorokéban. De tovább lehet menni. Milyen termékállapotra vonatkoztatjuk a Moore törvényt? Pl. Moore maga 1975-ben, hipotézise érvényességét ellenőrizve egyrészt olyan terméket választott ki 1975-ös adatnak, ami soha nem került nagy volumenű termelésre. (A továbbra is megmaradó lényeges eltérés felett pedig egyszerűen átsiklott. Ahogy az egyik kritikus elemző mondta, az adott esetben „elővarázsolta” a megegyezést a tapasztalattal.) Az ITRS ebben a kérdésben is előrelépett, tovább pontosítva, hogy milyen állapotú termékekre vonatkozó adatokat kell relevánsnak tekinteni.

Nagyon fontos még kiemelni, Tuomi mutatott rá erre, hogy van egy alapvető különbség a Moore törvény első megfogalmazása, vagy akármilyen más, például a mikroelektronikában ma használatos meghosszabbítása között. „ Moore törvénye explicit módon alapult azon a megfigyelésen, hogy a predikált fejlődésének nem voltak ismert technikai akadályai. Szemben ezzel az ITRS sajátosan azt mutatja ki, hogy nincsenek ismert megoldások arra, hogyan ériék el az úttérkép mérföldköveit. Valóban, az ITRS 'vörös téglafalról' beszél, amibe bele fog ütközni az ipar, ha nem lesz képes gyökeresen új eszmékkel előjönni.” (Tuomi 2003 7. old.) Valóban, Moore 1965-ben addig extrapolált, tíz évre, amely pontig feltevése szerint a további

fejlődéshez csak mérnöki képesség latba vetése kellett. A Moore törvény, illetve a már többször említett hat trend extrapolációja viszont már elég régóta azt a célt fejezi ki, amiért az iparágban érdemes dolgozni, amelynek megvalósításához kell felbecsülni az akár alapkutatóviszont, rendkívül bonyolult K+F, minden bizonnyal számos mély bizonytalanságot rejtő folyamatot.

A Moore törvény, mint a mikroelektronikai alkatrészipari innováció irányának és ütemének meghatározója

Milyen szerepet kap Moore „üzenete” a mikroelektronikai műszaki innováció ütemezésében? Dan Hutcheson, a mikroelektronika egyik sikeres gazdasági és gazdaságpolitikai elemzője az elmúlt évtized közepén lényeges vonatkozásban hozzájárult ahhoz, hogy tisztábban lássuk a Moore-féle predikció általános innováció-elméleti jelentőségét.¹⁷ (Hutcheson, 2005, 2009) Hutcheson rámutatott, hogy Moore egyszerre szólította meg a mérnököket, a közgazdászokat és a fogyasztókat és konszenzusra jutásukat egy mindegyikük számára egyszerre vonzó perspektíva megfogalmazásával segítette elő. A mérnökök számára az volt döntő jelentőségű, hogy folytonos fejlesztésekkel az integrációs szintek rendszeresen és rendkívül gyorsan növelhetőek egy széles körben elérhető gyártástechnológiával. Gyártás-gazdaságtani szempontból döntő volt a fajlagos költségcsökkenés és az, hogy ez a költségelőny ugyancsak folytonosan és rendkívül gyorsan növekedni fog, ahogy a technológia nagyobb és nagyobb áramkört funkciók megvalósítása felé fejlődik adott chipen. Ez megnyitotta és egyre szélesítette az utat a felhasználói, fogyasztói piac felé. A fogyasztók, felhasználók számára viszont a működés vonatkozásában az előrelátás megbízhatóságot és további paraméterek rendkívül gyors javulását ígérte. Moore tehát a kölcsönösen előnyös kapcsolat egyre gyorsabb fejlődését vetítette előre, mint egy alapvető iparági üzleti modell alapját. „A Moore törvény” ... „előrelátható üzleti modelltől gondoskodott. Bizalmat nyújtott az ipar jövőjét illetően, mivel az predikálható volt. Lehetővé vált tervezni és beruházni azon az alapon, hogy az integrációs skála évente vagy kétevente mindig nőni fog.” (Hutcheson 2005, 20. o.)

Hutcheson rámutat, hogy Moore két törvényt tételzett fel egyszerre. Az egyik a komplexitás (a teljesítmény) növekedéséről szól:

$$C_t = 2C_{t-1}$$

Ahol C_t a t időben, C_{t-1} pedig a $t-1$ időben a minimális gyártási költséggel előállítható komponens szám, komponens sűrűség.

Ez önmagában gazdaságtani szempontból nem lenne túlzottan érdekes, de Moore rámutatott egy másik összefüggés szimultán létezésére is. Eszerint a minimális

¹⁷ Ez a fejezet, lényegében megfogalmazását tekintve is megegyezik a Hronszky 2013-ban erről leírtakkal.

fajlagos gyártási költség közel fordítottan arányosan csökken a komplexitás minden lépésének növekedésével.

$$M_t = 0.5M_{t-1}$$

Ahol, M_t a t periódusban, M_{t-1} pedig a $t-1$ periódusban fennálló komponens költség. (Hutcheson 2005 12. old, Hutcheson 2009)

A Moore törvény tehát idealizált formában megfogalmazta az iparági innováció legalapvetőbb ütemét: a termelékenységet a megtalált technológiai paradigma, technológiai vektor fejlesztése és kiaknázása hosszútávon megjósolható módon rendszeresen növeli meg. Ez követelményt állít fel a beszállítói oldallal és a felhasználói oldallal szemben is.

„A Moore törvény, mint idealizáció éppen azzal az információval szolgálja ki az innováció megszervezését az innováció - szükséges és elégséges - üteméről a félvezetőiparban, amire, annak periódikusan szüksége van. Ez, egyebek mellett, a technológia és a szervezeti forma összehangolt fejlődési ütemét jelenti.” (Hutcheson 2009) Ezzel azt mondhatjuk, hogy Moore arra mutatott rá, hogy ebben a rendkívül gyorsan növekvő iparágban az innovációban megvalósítható „a sürgősség válság nélküli kultúrája”, ahogy ezt a Nemzetközi technológiai úttérkép (ITRS) kifejezi.

Hutcheson azt az ITRS-ek által található „történetinek” nevezett korrelációt hangsúlyozza, hogy Moore törvénye azért olyan fontos az innováció számára, mert az adott idő alatt létrejövő komplexitás megkétszereződés alig követel meg hozzáadott költséget. A gazdaságtani megfontoláshoz, mondja Hutcheson, Moore hozzátette a megvalósítás alapjául szolgáló technológiai vektort. Ez az integrált áramkörök esetében eddig a litográfia és a MOS, majd a CMOS technológia volt.

A Moore törvény tehát iparági koordináló és szervező tényező, ami szabályozza az iparági innováció ütemét, a verseny természetét, mint ellenőrző változó,

- hivatkozva annak az előrelátásnak a megvalósulására, amely előrelátás érvényessé válását, érvényesnek maradását maga ellenőrzi és normatívan elősegíti.
- A minimum költségen előállítható termékek gyártásához szükséges innovációs erőfeszítések szabályozója, s így a
- feladata egy sajátos technológiai út kikényszerítése folytonos termelékenység növelés megvalósítása céljából.

Hutcheson fejtegetése elegáns, mint sok, egyedül a leglényegesebbre koncentráló idealizáló fejtegetés. Azonban néhány kifogást mindenképpen meg kell tenni. Az első az, amit már jeleztem, hogy gyakorlatilag semmilyen technológia nem jellemezhető megfelelően csak egy tényezővel. Ezt korrigálandó, a már többször hivatkozott iparági úttérképek hat változó esetében megvalósuló trendet próbálnak meg követni. Másrészt az integrált áramkörök fejlesztése már több mint ötven éves. Jól jellemzi-e még a mindenkori legnagyobb teljesítmény az iparág műszaki fejlődését?

További probléma Hutcheson fejtegetéseiben annak sajátosan absztrakt jellege, hogy nem utal lehetséges alapvető gazdasági korlátra a Moore törvény érvényességének

további kiterjeszhetőségével kapcsolatban. Pedig a csak a Moore törvényre és a fajlagos termékköltség csökkenésre koncentráls természetesen csak feltételesen jogos. Hiszen ezzel az iparág műszaki fejlődésének gazdasági vonatkozásai egészét nem veszik figyelembe, vagy csak „futólagosan”, ahogy ezt maga Moore is tette 1965-ben. Addig jogos ugyanis, amíg a miniatürizálás nem vezet el olyan fizikai folyamatok hangsúlyossá válásához, amelyek költséges kikutatást és kezelést követelnek meg, és amíg a tervezés és a gyártásnál elkerülhetetlen ismétlődő felszerszámozás ugyancsak meredeken exponenciálisan növekvő költségei kezelhetőek maradnak. Pedig ennek az iparág története során kialakult eszközei maguk is problematikusá válnak jelenleg.

Ma már a miniatürizálás további sikeres folytatása keresésénél felbukkanó fizikai és a szorosan vett műszaki problémák sokszorozódása mellett az előbb említett költségek rendkívül meredek exponenciális növekedése is alapvető aggályokat kelt a trend hosszú távú folytathatósága iránt. Csak egészen röviden utalok egy elemzésre, amelyben a két problémakört együttesen veszik figyelembe, mint jövő alakító tényezőt.¹⁸ A Moore törvény jövőjével, pontosabban a miniatürizálás jövőjével kapcsolatban a MacKinsey néhány munkatársa négy műszaki fejlődési scénáriót állított fel. (Bauer 2013) Leegyszerűsítve a Moore törvény további követésén alapuló, referencia scénárió mellett ezek arról szólnak, hogy esetleg megmarad a teljesítménynövekedés üteme, de elveszik a relatív árcsökkenése a termékeknek, vagy éppen fordítva fog a dinamika végbemenni és a teljesítménynövekedés szűnik meg. (A negyedik scénárió szerint egyik sem válik folytathatóvá.) Mindkét eset oda vezethet, hogy a fellépő műszaki fejlesztési, majd gyártási költségek meghaladják a gazdaságilag eltűrhető határt és az iparág nemsokára drasztikus átalakuláson megy keresztül. Legvalószínűbb scénárióként a szerzők mégis azt várakozzák, hogy a Moore törvénye szerinti fejlődés még folytatódni fog. A műszaki alapokat tekintve abban bíznak, átvéve az uralkodó műszaki véleményt, hogy az új generációs litográfia időben megszületik az EUV technikával.

E tanulmányban csak arra van hely, hogy néhány pontban utaljak az ITRS és a tanulmány szerzőinek, bizonyos kérdésekben ellentétes véleményére és hozzáállására. Az ITRS a költségekhez való viszonyt, amit bizonyos vonatkozásban az ITRS, vállalt feladata szerint nem vesz figyelembe, azzal intézi el, hogy egyszerűen érvényesnek tekinti a Moore törvényt és a fajlagos árcsökkenést, és azt, hogy a „fogyasztók” nem lennének hajlandók attól eltárgítani, hogy a termékek ára ennek megfelelően csökkenjen. Ezzel szemben a MacKinsey tanulmány írói differenciáltabban gondolkodnak, négy scénáriót vázolnak fel.

Az ITRS 2012 Update felveti, hogy magának az ITRS feladat felállítási módjának alapvető kiszélesítésén is el kell gondolkodni. (ITRS 2013) Izgalmas, sokat ígérő,

18 Megköszönöm Pataki Bélának, a BME docensének, hogy felhívta a figyelmemet erre a nagyon értékes tanulmányra.

nagy úttérkép alkotási erőforrás növeléseket kívánó döntés lenne, ha az ITRS a közeljövőben már helyet adna a technológia fejlesztési utaknak a szenárió módszer szerint pluralizált felbecslése módjának. (Az ITRS, fejlődése során, 2007-től már befogadta témái közé a Több-mint-Moore műszaki innovációs problémák tárgyalását is.) Ugyanakkor az ITRS, szemben a MacKinsey-hez tartozó szerzőkkel, felveti, hogy az EUV kutatás dominanciája megszűnhet, akár a közeljövőben. Az utóbbi szerzők viszont az EUV-t látják továbbra is legígéretesebbnek.

Összefoglalás

A tanulmány arra próbált rámutatni, hogy a mikroelektronikai félvezetőipar a miniatürizálással (és a lapkaméret növeléssel valamint a mikro-architekturális tervezéssel) olyan komplex trajektória lehetőségére talált rá, ami, feltételes érvényességgel, az iparágak rendkívüli sebességű exponenciális növekedést, hosszú távú rendkívüli sikert tett lehetővé. Ez akkor és csak akkor tudott megvalósulni, ha meg tudta oldani a fellépő rendkívüli és egyre komplexebb műszaki K+F (és egyéb, az ebben a tanulmányban alkalmazott leegyszerűsítő érvelésnél eltekintett tényezők) által megkövetelt rendkívül erős és erősen növekvő koordinációs kényszereknek gyakorlatilag jó szabályszerűséggel, időben való megfelelést. Ennek a tevékenységnek az eddigi sikere azt jelenti, hogy az iparág képessé vált, képes volt és képes még a rendkívül feszített tempójú K+F-ben szükségszerűen, de szabálytalanul jelentkező mély bizonytalanságok meghatározott ütemben való kikutatásának és feloldásának, kiszámítható kockázattá alakításának sorozatosan visszatérő feladata megoldására. A mikroelektronikai alkatrészipar eddigi fejlődésének hasonló ütemű folytathatósága gazdasági okokból is akár kérdésessé is válhat, ahogy nincs kizárva gyökeresen új, gazdaságosan kikutatható és kiaknázható technológiai paradigma, technológiai vektor felfedezése-feltalálása sem. Viszont mindenképpen szükség van a műszaki oldal és az annak megfelelő fejlődését lehetővé tevő gazdasági-társadalmi, a szélesebb értelemben vett menedzsment oldal átfogó innovációjának folytatására is.

Irodalom

- Appleyard, Melissa, M., Wang, Clara Y., Liddle Alexander J., John Carruthers (2008): *The innovators non-dilemma: the case of next generation lithography*, Managerial and Decision Economics, v. 29, issue 5, 407-423
- Bauer Harald, Jan Viera, Florian Weig (2013): *Moore's law: Repeal or renewal?* MacKinsey and Company
- Yan Borodovsky: *Marching to the beat of Moore's Law*. San Jose, SPIE Microlithography plenary talk slides, Url: http://download.intel.com/technology/silicon/Yan_Borodovsky_SPIE_2006.pdf.

- Brillouet M. (Ed.) (2011): *Towards a "More-than-Moore" Roadmap*. Report from the CATRENE Scientific Committee.
- Brock D. (Ed.) (2006): *Understanding Moore's Law: Four Decades of Innovation*. Chemical Heritage Foundation.
- Brown C-Linden G. (2009): *Chips and Change, How crisis reshapes the semiconductor industry*. MIT Press, Cambridge/Mass.
- Chandler Alfred. (1977): *The Visible Hand*. Harvard Univ. Pr., Cambridge Mass.
- Cox Luis A.(2012: *Risk Analysis*, v32. issue 10, Oct 2012
- Giovanni Dosi. (1982): *Technological paradigms and technological trajectories, A suggested interpretation of the determinants and directions of technological change*. Research Policy, V.11, Issue 3, June 1982, 147-162
- Hronszky I.-Fésüs Á. (2007): Von der Vorsicht zur Vorsorge – Abschied von der Moderne im Unsicherheitsmanagement. In *Hans-Joachim Petsche, Monika Bartikova, Andrzej Kiepas (Hg): Erdacht, gemacht und in die Welt gestellt: Technikkonzepte zwischen Risiko und Utopie*. Trafo, Berlin, 2006.
- Hronszky I: *Expectations and visions in industrial practice. On the case of modern biopharmaceutics*. Science, Technology and Innovation Studies, June 2012
- Hronszky I. (2014): *Technological Paradigm Conceptions in the 80s*. Proceedings of the 14th CLMPS, Nancy 2014 megjelenés alatt
- Hutcheson D. G.(2005): *Moore's Law: The History and Economics of an Observation that Changed the World*. The Electrochemical Society INTERFACE Vol. 14, No. 1 (Spring 2005) pp. 17-21.
- Hutcheson D. G. (2005a): The Economic Implications of Moore's Law. In: Huff H.R.-. Gilmer D.G.:*High Dielectric Constant Materials. Springer Series in Advanced Microelectronics*,V.16., Springer, NY.
- Hutcheson D. G. (2006): *Forty Years of Moore's Law: Ever smaller transistors and ever larger wafers*. ECS Trans. 2006, V. 2, I. 2, 3-9 o.
- Hutcheson D. G. (2009): *Innovation Economics: Why Moore's Law is about more than semiconductors*. weSRCH.com 7/20
- Intel: <http://www.intel.com/research/silicon/mooreslaw.htm>
- Intel (2002a): *Expanding Moore's Law: The exponential opportunity*. Publication TL_001. Intel Corporation: Santa Clara, CA.
- Knight Frank (1921): *Risk, Uncertainty and Profit*, Chikago
- Korcynski E.(1997): *Moore's Law Extended: The Return of Cleverness* (interview with Gordon Moore). Solid State Technology, V. 40, No. 7, July 364. o.
- Lécuyer Chr.-Brock D. (2010): *Makers of the Mikrochip* MIT Pr. Cambridge/Mass.

- Linden, G., Mowery, D.C., Ziedonis, R.H., 2000. *National technology policy in global markets: developing next generation lithography in the semiconductor industry*. Business and Politics 2, 93–113.
- Mack Chr. (1996): *Trends in Optical Lithography*. Optics and Photonics News, Apr., 29-33
- Mack, Chr. (2003): *The end of the semiconductor industry as we know it*. Proceedings of Optical MicroLithography, 2003 XVI SPIE, V 5044, XVI-XXXI o.
- Mack Chr (2011): *Fifty years of Moore's Law*. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, V. 24, No. 2. May 2011 202-207 o.
- Mollick E Establishing Moore's Law, IEEE Annals of the History of Computing, 2006 V28., Issue 3,
- Moore G. E. (1965): *Cramming more components onto integrated circuits*. Electronics, V. 38, No. 8.
- Moore G. E. (1975): *Progress In Digital Integrated Electronics*. IEDM Technical Digest Caltech Conference on VLSI, 1979 Január, kézirat
- Moore G. E. 1995): *Lithography and the Future of Moore's Law*. Proceedings of SPIE, V. 2437.
- Moore G.E. (1995): *Are we really ready for VLSI?* Caltech Conference on VLSI, Jan. 1979, kézirat
- Moore's Law: *An Intel Perspective*. a video transcript, 1996
- Moore G. E. (1996): *Some Personal Perspectives on Research in the Semiconductor Industry*. In Rosenbloom R. - Spencer W. (eds.): *Engines of Innovation: U.S. Industrial Research at the End of an Era*. Harvard Business School Press. Boston
- Moore Interview. (1997): *In Scientific American*. September
- Moore G. E. : *An Update on Moore's Law, Intel Developer, From Keynote*, 30. September 1997, letölthető a <http://www.intel.com>-ról
- Müller-Seitz, Gordon, Sydow, J (2011): *Open innovation at the interorganizational network level – Collaborative practices in a semiconductor industry consortium*
- Müller-Seitz, G. - Sydow, J. (2012): *Maneuvering between networks to lead – A longitudinal case study in the semiconductor Industry*. In: *Long Range Planning* 45 (2-3), S. 105-135.
- Phaal, R. et al. (2004). *Technology roadmapping—A planning framework for evolution and revolution*. *Technological Forecasting & Social Change*, V. 71.
- Phaal, R. (2011). *Public-Domain Roadmaps*. http://www.ifm.eng.cam.ac.uk/ctm/trm/documents/public_domain_roadmaps.pdf
- Sakakibara, K. (1983): *From imitation to innovation, the Very Large Scale Integration (VLSI) semiconductor project*. WP Alfred Sloan School of Management, MIT Library, kézirat
- Schaller R. R. (2004): *Technological innovation in the semiconductor industry: A case study of the international technology roadmap for semiconductors(ITRS)*, PhD Dissertation, George Mason University.

- Schubert Cornelius: *Technology Roadmapping in der Halbleiterindustrie. Das Hier und Jetzt technologischer Zukünfte am Beispiel der International Technology Roadmap for Semiconductors*, TUTS_WP_2_2007Technology Roadmapping in der Halbleiterindustrie.
- Schulz, S. (1999): *New ITRS Roadmap Portends Massive Design Changes Ahead*. ISD Magazine, December
- Swanson, Bret (2013): *The NSA, Net Dynamics, and Moore's Law, Entropy Economics, The International Technology Roadmap for Semiconductors*, 2009 Edition.
(<http://www.itrs.net/Links/2009ITRS/Home2009.htm>).
- The International Technology Roadmap for Semiconductors*, 2009 Edition. (<http://www.itrs.net/Links/2009ITRS/Home2011.htm>).
- Sydow, J. - Müller-Seitz, G. (2011): Practicing uncertainty in R&D networks – Explorative evidence from a semiconductor industry network. In: *Academy of Management Best Paper Proceedings*, San Antonio, Texas.
- Sydow, J. Windeler, A. Schubert Cornelius, Guido Möllering (2011a), *Organized R&D Consortia for Path Creation and Extension: The Cse of Semiconductor Manufacturing Technologies?* Organization Studies, 2012, 33. 907-936. old,
- Tiberius, V. (2011): *Towards a „Planned Path Emergence” View on Future*. Genesis Journal of Futures Studies, June, 15(4): 9 – 24 o..
- Tuomi I. (2003): *Kurzweil, Moore, and Accelerating Change*, EC Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies Working paper, 27
- Wagner Christian, Noreen Harned: *EUV Litography, Litography gets extreme*, Nature Photonics, 24-26 2010

