

A prekompetitív innováció iparági szintű megszervezhetőségéről a Moore törvény története alapján

Hronszky Imre

A tanulmány megvizsgálja az ún. Moore törvény történetét, s a Moore törvényt, mint a miniatürizálás, egy technológiai paradigma kiaknázási lehetőségeinek műszaki és gazdasági jelentősége felismerését és érvényesítését azonosítja. A Moore törvény tudatos önmegvalósító jóslat lett, ami alapvető szerepet kapott a prekompetitív innováció iparági szintű megszervezésében. Ezt ma már globális iparági technológiai úttérkép elkészítése segíti elő. A tanulmány megvizsgálja Hutcheson rekonstrukcióját a Moore törvény innováció-elméleti jelentőségéről, mint az iparágilag optimális innováció ütemének kijelölőjét, illetve a CATRENE projekt által 2011-ben elvégzett elemzést az úttérkép készítéshez szükséges előfeltételekről. Rámutat, hogy a prekompetitív innovációs közösség kialakulása, az úttérkép készítés rendkívül jelentős lépések az iparági innováció sikerében. De arra is, hogy általánosabban érvényes esetben az úttérkép készítést össze kell tudni hangolni a scenárió módszerrel.

Kulcsszavak: Moore törvény, iparági technológiai úttérkép, önmegvalósító jóslat, iparági szinten szervezett prekompetitív kutatás és innováció

1. Bevezetés

A szektorális, különösen a tudásintenzív innovációs rendszerek sajátosságainak kutatása Franco Malerba 2004-ben megjelent könyve óta a gazdaság- és menedzsmenttudományi kutatás középpontjába került (Malerba 2004). A mikroelektronika innovációs rendszerének fejlődése a kutatások klasszikus tárgya lehet. A mikroelektronikai félvezetőipar egy félévszázada exponenciális növekedést mutat. Ami az intézményi és szervezeti oldalról illeti, a kilencvenes évek elejére a mikroelektronika egészen különleges fejlődést ért el. Ennek talán legkiemelkedőbb eleme az innováció prekompetitív szakaszának menedzselésében elért fejlődés, és az ezt elősegítő, globális szintre emelkedett úttérkép készítés.¹ A mikroelektronikai félvezetőgyártó iparág fokozatosan kialakította és rendszeresen megújítja globális úttérképét. Ezzel először hozta létre és folyamatosan fejleszti egy iparágban a globálisan megszervezett innováció prekompetitív szakaszának integrált tudásbázisát.

A modern félvezetőipar, a mikroelektronika és még tágabban a számítástechnika hihetetlen fejlődésében alapvető jelentőségű a Moore törvény felismerése és

¹ Az innováció prekompetitív szakaszában az innováció közjavakat termel. A kompetitív szakaszban az innováció adott vállalat piaci előny szerzésére irányul.

ismételt érvényesnek bizonyulása. Legegyszerűbben, bár egyoldalúan megfogalmazva a Moore törvény az iparág fejlődési trendjének hosszútávú predikciója. Szerepe többféle: benchmark (szintmérő), „barométer”, illetve hajtóerő. Joggal merül fel a kívánság, hogy hasonló törvényeket keressenek meg más iparágakban is. A hosszútávú előrejelzések általában nagyon megbízhatatlanok. Ritka kivételként, a Moore törvény már lassan ötven éves, termékgenerációk hosszú során áthúzódó érvényességre tekinthet vissza (tágabban tekintve, a mikroelektronika és a számítástechnika fejlődését számos, egymással összefüggésben levő, egymást kölcsönösen befolyásoló, meglehetősen stabil exponenciális összefüggés jellemzi). Ez a félévészadon áthúzódó érvényesség abból adódik össze, hogy a rövidebb, adott időben belátható távolságokra, először 10 majd 15 évre tett újabb és újabb extrapolációk bizonyos mértékig újra meg újra érvényesnek bizonyultak. A félvezetőipar különleges sajátosságainak együttes működése kellett ehhez a sikerhez. Ennek a fizikai alapja a miniatürizálás. Ebben az iparágban létezett, még ma is létezik egy műszakilag és gazdaságilag egyaránt különleges opció. Ahogy Moore 1965-ben felismerte, az iparág fejlődésével, a miniatürizálás előrehaladásával, a félvezető termékek teljesítménye exponenciálisan növekszik, miközben a termékek fajlagos előállítási költsége exponenciálisan csökken. Ezt a dinamikát az ipari tervezés és az ipari gyakorlat képes volt először spontánul létrehozni, majd sorozatosan megismétlődő műszaki, intézményi és szervezeti innovációval tudatosan fenntartani, Moore kifejezésével: „a megmaradást a Moore törvény által meghatározott görbén.”

A Moore törvény értelmét és szerepét a mikroelektronikai félvezető ipar kínálati és keresleti viszonyai kölcsönhatásának dinamikájában tisztázhatjuk. Ebben a dinamikában a kínálati hajtóerőként működő termékek és technológiák alapjául szolgáló fizikai rendszerek különleges inherens sajátossággal rendelkeznek. Egyrészt sorozatos méretcsökkentések (voltak) lehetségesek szinte végleges határ nélkül. A méretcsökkentések lényegi korrelációként szinte minden műszaki paraméter, a teljesítmény, a súly, a működési sebesség, az áramfogyasztás, a megbízhatóság fenntartható exponenciális javulásával járnak. E javulások „ára”(trade-off), mint más műszaki paraméterek szükségyszerű romlása vagy a kutatás és a gyártás összköltségének ugyancsak exponenciális emelkedése bizonyos ideig nem jelent meg az összmérlegben, csak legfeljebb kis hangsúllyal. A miniatürizálás minden további kiaknázhatóvá tételéhez a kutatók és a mérnökök mindig megtalálták az adott történelmi fejlődési szakaszban elengedhetetlen, ipari méretekben is megvalósítható műszaki innovációkat. Természetesen ez csak a nélkülözhetetlen „menedzsment oldal” megfelelő fejlődésével valósulhatott meg. A műszaki fejlődés mindenkor elérhető üteme mindenütt a technikai terület inherens „fizikai” sajátosságainak és az azt feltáró és kiaknázó intézményi-szervezeti keretnek a kölcsönhatásából adódik, beleértve természetesen a mérnöki erőfeszítéseket, mint az intézményi-szervezeti keret részét. Ennek az intézményi-szervezeti keretnek a része a félvezetőiparban egy iparági technológiai, az egész iparágat átfogó prekompetitív innovációs közösség kialakulá-

sa. A fokozatosan globálissá fejlődött közösség a nyolcvanas évektől létrehozta az iparági technológiai úttérképeket.

Ebben az iparágban az iparági innovációt a Moore törvény jellemzi és szervezi legáltalánosabb szinten. Ez, lényegében a legalapvetőbb mikroelektronikai alkatrész termékek, az integrált áramkörök, fokozatos miniatürizálásával elérhető teljesítmény időbeli növekedésének exponenciális jellegét mondja ki. Moore rámutatott az integrált áramkörök előállítására fajlagos költségének egyidejű exponenciális csökkenésére is. Mint nem pusztán „akadémikus”, hanem megvalósulásra igényt tartó, a gyakorlatban elvégzett jövő extrapolációk, a Moore féle jóslatok is kettős jellegűek, részben feltételes predikciók, részben normák, előíró jellegűek. A megfelelő oldal a történeti időponttól és a perspektívától és viszonyulástól függően kerül előtérbe. A Moore törvény egyrészt sokszorosán megismételt trendextrapoláció, egy, a jövőre vonatkozó hipotetikus leírás. De a mikroelektronikai félvezetőipar kiemelkedő személyiségei jól látták a másik oldalt is. Ahogy például Steve Schulz (1999) megfogalmazta, a Moore törvény megismételt „javaslat” is az adott ütemű fejlődés megvalósítására. Ezzel a felfogással rokonságban Carver Mead azt emelte ki a Moore törvény szerepéről az iparág fejlődésében, hogy az olyan „hit”, amiért az emberek hajlandóak cselekedni, hogy az meg is valósuljon.² Ehhez illeszkedik, amit Chris Mack hangsúlyozott, hogy a Moore törvény bizonyos vonatkozásban „tartós akarat” kifejezése (Mack 2003). Predikciók joggal csak feltételes érvényességgel megfogalmazottak lehetnek. A nélkülözhetetlen feltételek egyike a szereplők felsorakozása és együttműködése a predikció által kijelölt nyomvonalon. A predikció érvényesnek bizonyulása alapvetően függ attól, hogy mennyire sikerül akarattá tenni, mennyiben sikerül mozgósítani és fenntartani a megvalósulásához elengedhetetlen cselekvéseket. Fordítva, az akarat tartósságához alapvető feltétel, hogy felállítható legyen egy olyan hihető jövő-extrapoláció, amire a szereplők érdemesnek látják bevetni az akarat mobilizáló erejét. Az iparági műszaki fejlődés és a szervezett innováció dinamikájának némi megvilágítására a tanulmány e kettősséget, a predikció és a norma felállítás, előírás kettősségét figyelembe véve tesz kísérletet. A megértés központi mozzanata a Moore törvény e kettős szerepe az iparág termelékenységi görbéjének, mint az innováció ütemezőjének leírásában és normatív megfogalmazásában (Hutcheson 2009).

A mikroelektronika története a műszaki miniatürizálás folytonos, a gyártástechnológiai és a termék generációk megújításának lélegzetelállító tempójú története. A kínálati oldal különös, hosszú ideig döntő jelentőséggel bírt ebben a folyamatban. Ez a periodikusan megismétlődő új opció felismerési és realizálási törekvés az iparág számára speciális innovációs kényszert is jelentett szinte az egész történet során. Az iparág gazdasági problémái megoldásához részben mindig a következő műszaki generációt jelentő innovációkhoz menekült el. Dinamikája megőrzéséhez az iparágban meghatározott periódusokban, időben kellett megtalálnia a mindenkori

² Moore's Law: An Intel perspective 1996.

továbblépéshez, a fejlődési ütem fenntarthatóságához a szükséges termék- és gyártástechnológiai innovációkat és az azok megtalálásának és kiaknázásának lehetőségét biztosító pénzügyi, szervezési, vagy jogi és egyéb konstrukciókat.

A félvezetőipar egy különlegesen feszített dinamikájú kínálati dominanciájú rendszer, amely sajátos műszaki/gazdasági virtuális ciklusok sorozatában fejlődik. Ezekben a ciklusokban az új félvezető termékek, mint mikroelektronikai és más berendezésekbe beépíthető alkatrészek rendszeresen lehetőséget teremtenek új alkalmazások, új berendezések feltalálására is. Ezek lehetőséget teremtenek új piacok megjelenésére. Ezzel sajátos tanulási dinamika alakul ki. A megnövekedett bevétel megnövekedett része rendszeresen felhasználásra kerül az újabb ciklusokat beindító termék és gyártástechnológiai K+F elvégzésére. A sikeres K+F alapján viszont ismét újabb termékek vihetők egy kiterjedő piacra. Ebben az állandóan bővülő körforgásban különös jelentőségű a hitelesség és a bizalom. Az iparág a kialakult és bővítetten újratermelt hitelessége alapján az új ciklus beindítását megalapozó, megnövekedett költségű K+F-hez rendszeresen képes további forrásokat bevonni (Brillouet 2011). De e dinamika töretlen folytatása több mint egy évtizede különös nehézségeket mutat. Mivel az összgyártási költségek exponenciális növekednek, ez már csak nagyon kevés résztvevő számára teszi lehetővé a verseny folytatását biztosító különleges nagyságúvá megnőtt, periódusokként szükségszerűen megismételt beruházásokat (az iparág a kihívásra például a kilencvenes évek végére kialakuló munkamegosztással válaszolt. Ebben szétváltak a tervezést és fejlesztést végző intézmények. Azóta ez, további tanulás alapján ismét módosult). A gyártástechnológia még mindig a fotolitográfia továbbfejlesztésén alapul.³ De az exponenciális teljesítménynövelés folytatásának ma már, a még folytatódó miniatürizálás mellett alapvető új útjai alakulnak ki.

A félvezetőipar kínálati dominanciájú fejlődési útjának tézisének legalább két tekintetben fenntartással kell kezelni. Egyrészt szükségszerűen kialakultak egymást erősítő kölcsönhatások a szélesebben vett műszaki területen. A kínálati dominanciája a mikroelektronika egészére vonatkozik, miközben a mikroelektronika részterületei egymás számára jelentenek hol kínálati, hol keresleti dominanciájú oldalt. Ebből a legfontosabb talán, hogy a félvezetőipar kínálatának mind a memóriagyártás mind az adatfeldolgozás területén megvalósuló exponenciálisan növekedésével a számítógépiparban elengedhetlenné vált az erre alapuló berendezésgyártáshoz szükséges másik összetevő, a szoftver megfelelő ütemű fejlődése is. Miután a szoftverfejlesztés sokszor képes volt meghaladni a hardverfejlesztés ütemét, „mozgató” (driver) hatása alakult ki a félvezetőipar felé. Másrészt, végül, alapvetően minden a fogyasztói piacon dől el (a hadiipar módosító hatása mellett). Ennek megfelelő ütemű fejlődése is

³ A mikroelektronikai termékek gyártásánál a /foto/litográfia az egyik legalapvetőbb eljárás. Ennek során az alaplapkán létrehozni kívánt szerkezetet annak megvilágításával alakítják ki bonyolult eljárással. Legelőször látható fényt használtak, majd a miniatürizálás folytatásában a csökkenő hullámhosszú fény újabb és újabb tartományainak technológiailag alkalmazhatóvá tételével mára fokozatosan eljutottak az extrémibolyántúli tartomány lehetséges hasznosításának kikísérletezéséhez is.

elengedhetetlen, s alkalmanként előtte járt a mikroelektronikai félvezetőipar fejlődésének. A mikroelektronikai alkatrészgyártás sokáig volt úgy jellemezhető, hogy egyre nagyobb teljesítményű alkatrészeket gyártott olyan berendezésekhez, amelyek mintegy egyre nagyobb teljesítményű számítógépeként működtek. A fogyasztás fejlődése viszont fokozatosan kiterjedt nem csak a számítási képesség exponenciális növekedése, hanem a fejlődés sokszínűvé válása, a fogyasztóra, új lehetséges fogyasztókra szabott, egyre változatosabb termékek kínálata felé is. E termékek fejlesztése optikai, mechanikai és más funkciók fokozatos miniaturizálásához és a mikroelektronikai alkatrészekbe beépítéséhez vezetett el. A chipek maguk is egyre inkább olyan összetett műszaki mikrorendszerekké alakulnak, amelyek ún. nem-digitális funkciókat is ellátnak. A nem-digitális funkciók fejlesztésének dinamikája egyrészt nem feltétlenül írható le exponenciális görbékkel, másrészt jobban mutat a végfogyasztók által dominált piac és műszaki fejlesztés lehetősége felé, mint a puszta digitális teljesítőképesség növelésére tett erőfeszítések (Brillouet 2011). Így a mikroelektronikai eszközgyártás ebben a vonatkozásban is a korábbinál összetettebb dinamikát kezd megvalósítani

2. Egy különleges technológiai paradigma

Bizonyos távolságból nézve a mikroelektronikai félvezetőipar gyártástechnológiai alapját adó fotolitográfia, és más alapvető technológiák sorozatos megújítása ugyanazon alapvető technológia újabb és újabb generációja megvalósításának szükségszerűen egyre hatalmasabb és egyre komplexebb kutatási és fejlesztési erőfeszítéseket igénylő sorozata. A történet első szakaszának gondos dokumentációja található meg Christoph Lécuyer és David Brock könyvében (2010). Már Giovanni Dosi mérnököt jelentő tanulmányai óta szokás úgy ábrázolni a mikroelektronikai félvezetőipar történetét, hogy annak során, egy „technológiai paradigma” felismerése és „normál technológiai” fejlesztése megy végbe (Dosi 1982; Hronszy 2014).⁴ Más szerzők a technológiai paradigma értelmével szoros rokonságban használják a technológiai vektor terminust. Ha megfelelően alkalmazzuk, az analógia a tudomány fejlődésével valóban működik, és jó heurisztikát nyújt. A félvezetőipar vizsgált szakaszának elemzése azt mutatja, hogy az átfogó paradigmán, pl. a fotolitográfián belül ismételtelen több szinten kényszerülnek ki kisebb paradigmatis ugrások. Ezek kiaknázása maga is csak további kis ugrások sorozatával lehetséges. Tehát, ami kiakná-

⁴ A tudományos paradigma fogalma alapján különböző szerzők alkották meg a technológiai paradigma fogalmát 1980 körül. A tudományos paradigmák dinamikája ún. normáltudományos és forradalmi szakaszt mutat (Kuhn 1962). A normáltudományos szakaszban a létező paradigma részletes kikutatásával, a tudás kis lépésekben való fejlődésével megy végbe az új ismeretek megszerzése. A normáltudományos szakasz viszont előbb-utóbb eléri teljesítőképessége határához. Az így kialakuló válság megoldása egy új paradigmához vezető „forradalom”. A „forradalom” után ez a dinamika megismétlődik. Megfelelő óvatossággal a paradigma dinamika koncepciója alkalmazható a technológia fejlődésére is.

zás az átfogóbb szinten, az alsóbb szintű radikális innovációk sokszorosán összetett rendszere lehet.

A paradigma analógia nagyon hasznos, de egyszerű átvitelének a tudományról a technológiára mindenképpen figyelembeveendő korlátai is vannak. Egy ilyen korlátot jelent a félvezetőiparban, hogy a folyamat egészét tekintve „normál technológiai” fejlődéshez szükséges műszaki ugrások sorozata a fotolitográfia fejlesztésében számos esetben megkövetelt egy-egy részterületen a litográfián belül maradó, de hatalmas ugrásokat jelentő mérnöki teljesítményeket lehetővé tevő, előzetes, akár sokszor a legmagasabb tudományos kitüntetésekhez vezető tudományos teljesítményeket is. Az ezek alapján elvégzett műszaki innovációk beleilleszkedtek az átfogó paradigma, a tág értelemben vett félvezető-ipari gyártástechnológia ún. normális fejlődésébe (így van ez más, a mikroelektronikában alapvető technológiák fejlesztésével is). Továbbá, szemben a tudományos paradigmák fejlesztésével, a technológiai paradigmák fejlesztésében az időtényezőnek döntő szerepe van. Hatalmas erőfeszítések történnék állandóan a műszaki tudományok fejlesztésére is, és ezek a kutatások az ipar éppen konkrét műszaki problémáinak vizsgálatától némi távolságot tartani képesek. De a mindenkori műszaki tudásnak, még ha ezeket a tudományokat a lehető legalaposabban ki is aknázza, adott határidőre s más paraméterek szükségszerűen figyelembeveendő követelményrendszere mellett (például az éppen rendelkezésre álló pénz vagy a műszaki rendszer egészének jellege, amelyben a keresett műszaki megoldásnak funkcionálnia kell) működőképes megoldáshoz kell vezetnie. Ez egyrészt azt az alapvető eltérést jelenti a tudományos és technológiai paradigmák normáltudományos szakaszának működése között, hogy a technológiai paradigma esetében, azért, hogy az eredménynek megfelelő gyakorlati jelentősége lehessen, ha fennálló szükségletek kiszolgálására fejlesztik ki, az igényelt „normál technológiai” eredményt általában adott időtartamon belül, s a már jelzett paraméterek korlátozó hatását figyelembe véve kell elérni. A műszaki alkotások, akármennyire drámaian új felismerésekre támaszkodnak, mindig a megvalósításukkor szükségszerűen fennálló korlátozó tényezőknek megfelelő okos „barkácsolások” is.

Ez a kettősség különösen igaz akkor, ha egy rendkívül gyorsan fejlődő iparág számos egymással is szoros interaktív kapcsolatban levő exponenciális görbe mentén, mint követelményeket, olyan egymást nagyon erősen befolyásoló kádenciákat mutat fel, mint a mikroelektronika (a félvezetőipar szempontjából négy legfontosabb, feltétlenül összehangolandó, „belső” interaktív technológiai ütem, kádencia van. Ezek a félvezető-ipari termékfejlesztés és a gyártástechnológia, illetve a szoftver-, és a berendezés fejlesztés elérhető-elérendő üteme. Ezekkel természetesen szoros kölcsönhatásban van például a beszállítás és a piaci kereslet megfelelő növekedésének üteme). A vizsgált iparágban ez az időkénszer egészen specifikus: a meredek exponenciális növekedés extrém időfüggést, nagyon rövid megengedett időtartamot jelent a következő csomópont termékének megtervezésében és technológiai megvalósításában.

Az iparág dinamikájának megvalósulását (ma már globális) úttérképek segítik elő.⁵ Az úttérképek különösen fontosak a stratégiai tervezésben. A mikroelektronikai félvezetőipar fejlődésének első szakaszában, a hatvanas évek elején gyakorlatilag még nem létezett stratégiai tervezés sem vállalati, sem iparági szinten. Az úttérkép készítés viszont már a stratégiai tervezés magasabb szintjére utal. A mikroelektronikai félvezetőipar területén egyes vállalatok vállalati technológiai, műszaki innovációs úttérképeket csináltak már a hetvenes években. Visszatérve a paradigma kiaknázás extrém idő- és más tényezőktől való függésére az iparág azzal is megpróbál segíteni ezen, hogy fejlődésével fokozatosan kitolta a koncepciótól a tömeggyártás megoldásáig vezető időtartamot és a tervezéssel és a kutatással és fejlesztéssel fokozatosan egyre inkább elébe ment a gyártásnak. A kilencvenes évek elejétől az úttérképekben 15 évnyi időtartamot is megcéloznak, más rövidebb idejű feladatok kitűzése mellett, azaz a lehető legkorábban elkezdődik már a távoli generációváltásban megvalósuló stratégiai kutatási és tervezési folyamat is.

A mikroelektronika és ezen belül a félvezetőipar dinamikájának különös fontosságú sajátos „hajtóereje” a miniatürizálás. A miniatürizálással egyre hatalmasabb erőfeszítést jelentő folytonos fejlesztéssel a teljesítmény komplexitásának növekedése jönnek létre. A komplexitás növelésével fajlagos exponenciális árcsökkenés, deflációs hatás alakul ki. Ezzel a legszorosabb összefüggésben az elektronikai termékek exponenciális határhaszon csökkenést mutatnak. A teljesítmény exponenciálisan növekvő és a relatív ár exponenciálisan csökkenő együttes hatásával a miniatürizálás, mint komplex műszaki és gazdasági tevékenység lehetővé tette, miközben a termékek és a gyártástechnológiák rendkívül gyors elértéktelenedése kikényszerítette a gyors termék- és technológiaváltások sorozatát a félvezetőiparban. A mikroelektronikai termékek rendkívül gyorsan csökkenő határhasznával az iparág egész történeti fejlődésére jellemző, annak lényegéhez tartozó tartós egyensúlytalanság alakult ki. Mind az új generációk rendkívül gyors létrehozásának képessége, mind a rendkívül gyors termék elértéktelenedés és ezzel együtt a gyártástechnológia elértéktelenedése, miközben a gyártástechnológia költsége exponenciálisan emelkedik (ez utóbbi az ún. „második Moore törvény”, pontosabban a Rock törvény), a lényegesen megváltozó jövőt a tranzienssé váló jelen állandó lényegi összetevőjévé tette. A mai kutatások és fejlesztések viszont ezért már több generációra előre készülnek fel, megkísérelve ezzel a lehető legnagyobb biztonságot nyújtani az iparágban. Az iparághoz tartozó vállalatok az extrém kihívásra kb. 1970-ig – az iparágban elterjedt szólásmód szerint – a „mindenre lövéssel” próbáltak meg válaszolni. Moore törvénye viszont a

⁵ Legegyszerűbben megfogalmazva, az úttérképek legalábbis feltételelesen megmutatják az adott célhoz vezető utat. Megmutatják az adott időre elérendő teljesítményt, az elkerülhetetlen áthaladási pontokat és a lehetséges útvariációkat. Optimális esetben egyértelmű választ adnak a miért, mit, mikor és hogyan kérdéssorozatra. Az innovációs úttérképek kiegészülnek a vizsgált dinamika határaitra és a lehetséges továbbhaladásra vonatkozó kérdésekkel és, esetleg, ideiglenes válaszokkal azokra. Az úttérképek sajátosságainak és funkcióinak jó megismertetése található meg Richard Albrightnál (2003) vagy Robert Phaal és munkatársainak tanulmányaiban (Phaal et al. 2004; Phaal 2011; Radnor–Probert 2004).

tudatos stratégia középpontjába a döntő műszaki és gazdasági előnyöket ígérő irányt, a miniatürizálást állította.

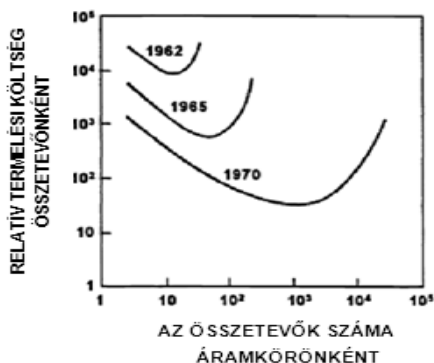
3. A Moore törvényről

Az iparág egésze által a legszélesebb körben osztott meggyőződés vezeti ezt a tanulmányt, hogy a Moore törvény a lehető legalapvetőbb szerepet tölti be ennek az iparágak fejlődésében. Ezt egészíti ki az a meggyőződés, hogy az iparág fejlődésének általánosítható jellemzői más iparágak fejlődésének alapvető elősegítői lehetnek. Eljutottunk most oda, hogy kissé részletesebben megnézzük, hogy mi a Moore törvény. Meglepő lehet, de ennek tisztázását számos tényező nehezíti meg. Ugyanis egyáltalán nem véletlenül, bármilyen egyszerűek is Moore megállapításai, már Moore első, 1965-ös tanulmánya körül is szinte áttekinthetetlenül sok félreértés jött létre. Ezek makacsul reprodukálódnak ma is. Ahogy látható lesz, a félreértések egy része a Moore törvény feloldhatatlan bizonytalanságaival, továbbá a fejlődés által ismételtlen megváltozott helyzetekbe helyezésének elengedhetetlenségével függenek össze. Ezekkel pontosságának, eltolódó határának és relevanciája megváltozásának, sőt értelmes kiterjeszhetőségének kérdései vetődnek fel. A bizonytalanságok felülemlik a Moore-féle előrelátás megfogalmazásait. Ugyanakkor a félvezetőiparban ténylegesen a megjósoltaktól sokszor bizonyos mértékig eltérő meredekségű fejlődési szakaszok valósultak meg. A Moore törvény eltérő megfogalmazásai abból erednek, hogy megoldják azt az egyre nehezebben megoldható feladatot, hogy a legalapvetőbb szinten csak egy univerzálisnak tekintett változóra, az integrált áramkörök komponens, illetve tranzisztorszámának növekedésére koncentrálva megfelelően jellemezzék az iparág műszaki fejlődési dinamikáját. Voltak továbbá szándékos félreértelmezések is. Ezek azzal függenek össze, hogy a Moore törvény, koordinációs és bizalomkeltő funkcióival stratégiai szerepet tölt be mind a saját iparági öntudat, mind a szereplők, támogatók és a versenytársak viselkedésének befolyásolásában. Tehát sajátos „marketing” illetve ideológiai szerepe is van. Mindezek a tényezők oda vezettek-vezetnek, hogy már Moore munkatársai is rendszeresen tulajdonítottak később olyan kijelentéseket Moore tanulmányának, amelyek abban biztosan nem találhatók meg. (Ilyen például, hogy Moore az integrált áramkörök komplexitása növekedésének másfél éves ütemét jósolta volna meg. Ez ellen maga Moore, bár hiába, de rendszeresen tiltakozott). Mindez nagy óvatosságra kell, hogy készítsen a történet legalapvetőbb adatainak kezelésében is, létezésük ellenőrzésében, illetve értelmük tisztázásában (Brock 2006).

Ezért erős kritikai szemmel kell szemügyre vennünk minden dokumentumot. Gordon Moore első, kevesebb, mint 4 oldalas tanulmánya 1965 márciusában jelent meg (Moore 1965). Moore kimondja, hogy az elektronika jövőjét az „integrált elektronika”, az integrált áramkörök elterjedése jelenti. 1965-re az integrált áramkörök gyártása már megállapodott, írta. Miután az egyik alapvető félelem az egészen új

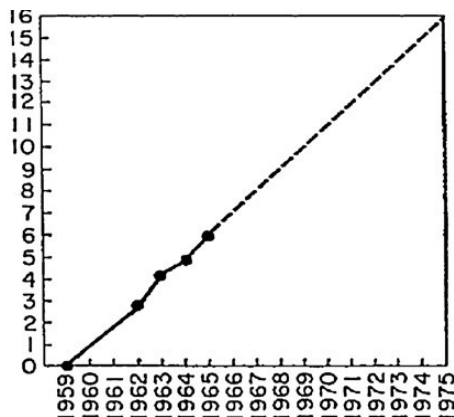
termékkel, az integrált áramkörrel szemben az volt, hogy attól féltek, hogy a hibás működések lehetősége megsokszorozódik az áramkörök komplexitásának megnövekedésével, Moore hangsúlyozta, hogy a tapasztalat szerint, ahogy az Apollo program megmutatja, ugyanakkora megbízhatóságot lehet integrált áramkörökkel is elérni, mint individuális tranzisztorokból felépített rendszerekkel. Meg kell jegyezni, hogy 1965-ben a megrendelők túlnyomórészt még katonai, illetve űrhajózási felhasználók voltak. Számukra a döntő a megbízhatóság megnövelése, illetve a méret- és súlycsökkenés elérése, és nem az ár voltak. Ugyanakkor a verseny kezdett már volumenében eltolódni a fogyasztói piac felé, ahol az ár már sokkal inkább döntő szerepet kap. Tanulmányában Moore azt a megfigyelést és extrapolációt tette, hogy a minimális előállítási költséget mutató komplexitás, amit ő az ilyen integrált áramkörben levő komponensek számával jellemzett, 1959 (az első planáris tranzisztor előállítása) és 1964 vége között „durván évenként egy kettes tényezővel nőtt.” Eközben, mivel a chip előállítási költsége lényegében független attól, hogy hány komponens visznek fel rá, a fajlagos előállítási költség rendkívül gyorsan csökken. Moore hangsúlyozza a tanulmányban, hogy ez a növekedési ütem folytathatónak mutatkozik. Moore tehát észrevette, hogy az integrált áramköröknél a miniatürizálás döntő lényegi műszaki és gazdasági korrelációkat valósít meg. Ezt 1996-ban visszatekintve így írta le: „A technológia sajátos természete miatt a miniatürizálással növekszik a sebesség [...] lényegesen megnő a rendszer megbízhatósága, s ami a legfontosabb, erősen csökken az elektronikus rendszer költsége. Költség alatt különösen arról van szó, hogy nem csak egy adott integrált áramkör költsége csökken, hanem, ahogy a chip komplexitása növekszik, ahogy egyetlen struktúrába mind több funkció kerül integrálásra, termékgenerációról termékgenerációra csökken az adott elektronikus funkcióra eső ár” (Moore 1996a, 56. o.) (1. ábra, 2. ábra).

1. ábra A relatív termelési költség összetevőnként az összetevők áramkörönkénti számának függvényében



Megjegyzés: Moore az ábrát elnevezés nélkül közölte tanulmányában
 Forrás: Moore (1965)

2. ábra Az integrált funkcióra eső komponensek számának logaritmusának az idő függvényében



Megjegyzés: Moore az ábrát elnevezés nélkül közölte tanulmányában
 Forrás: Moore (1965)

Moore tanulmánya fő műszaki-gazdasági megállapítását már tanulmánya első mondatával is jelzi: “Ahogy az egységre eső költség csökken az áramkörre eső komponensek számának megnövekedésével, a gazdaságtan 1975-re azt diktálhatja, hogy hatvanötezer komponenst zsúfoljunk össze egyetlen szilícium chipen” (lehetőséges gazdasági diktátumról is szó van, nem csak leíró megállapításról, amelyik hipotetikusán feltételezi a komponensek elért számát 1975-ben).

Az általa leírt összefüggés más költségtényezők változatlansága, pontosabban mindenkori szétteríthetősége mellett biztosíthatja a mikroelektronikai alaptermék, a chip egyre kedvezőbb árát. Hipotézise érvényességéhez fel kellett tételnie a miniatürizálás folytathatóságát. Ez pedig egy exponenciális dinamika mellett viszonylag gyorsan magával hozta a miniatürizálás fizikai, vagy ami csak később került előtérbe, például pénzügyi határának, az egyéb költségek szétteríthetősége megszűnésének lehetőségét. Hipotézise érvényességét Moore tíz évre kockáztatta meg. Szerinte az ipar egyrészt képes lehet a chipre, a szilíciumlapkák méretének állandó exponenciális ütemű megnövelésére, ahogy a komponenseknek egyetlen szilícium chipre való exponenciális méretű rázsúfolására is. „Világos, hogy az ipar képes lesz arra, hogy előállítson egy ilyen komponensekkel telezsúfolt készüléket, mégpedig csak mérnöki tudás igénybevételével” (Moore 1965, 57. o.). Az elvárt mérnöki munka mögött pedig gazdasági ösztönző van, ahogy rámutatott.

Exponenciális hipotézisét az 1965-ben a kereskedelemben megtalálható három chipre vonatkozó adatra alapozta. Ezt kiegészítette egy további adattal, ami egy, még csak a laborjukban fejlesztés alatt álló chipre vonatkozott. Ami a műszaki fejlesztési oldalt illeti, ahogy ezt egy 1975-ös tanulmányában ismerteti, hipotézisét (ahogy később egy interjúban nevezte: „néhány adat vad extrapolációját”) három tényező

együttes hatásának extrapolálhatóságát feltételezve alapozta meg már 1965-ben is. Ezek egyrészt a chip nagyság, a lapka méret, másrészt az integrált áramkörre rávihető komponensek számának gyors megnövelhetősége, illetve egy „okossági tényező” voltak (Moore 1975). Ez utóbbi az áramkörök legsűrűbb elhelyezhetőségének kikutatására és más, a chipen megvalósítható mérnöki fogások megtalálásának lehetőségére vonatkozott.

Moore 1965-ben tíz év alatt elérhető, lényegében három nagyságrend növekedésre vonatkozó feltételes előrelátást tett. Erről az előrelátásról mindenképpen el kell mondani, hogy nagyon elterjedt annak egy alapvetően félrevezető értelmezése, amihez Moore maga is számos alkalommal elejtett megjegyzéssel járult hozzá. Eszerint Moore „néhány adat vad extrapolációját” végezte volna el (Moore 1996b; Intel 2002). A valóságban viszont az integrált áramkör fő fejlesztési vonalát jelentő miniatürizálás inherens sajátosságát ismerte fel, azt hogy a méretcsökkentéssel a funkcióképesség megnövelhető, miközben a viszonylagos előállítási ár csökken. Másrészt figyelembe vette, hogy mennyire tűnik extrapolálhatónak a lapkaméret megnövelése illetve az „okossági tényező”. Ezeket a tudáselemeket vetette össze a már meglévő adatokkal. Felismerésében természetesen szerepet játszott az, hogy a már létező néhány adathoz exponenciális összefüggést tudott illeszteni. Hipotézisét, ugyanakkor bizonyos mértékig körben forogva, az addigi fejlődés adataival verifikálta, igazolta. Így extrapolációja egyáltalán nem volt tisztán tapasztalati adatok pusztá megfigyelésén alapuló extrapoláció, hanem a miniatürizálás egy döntő jelentőségű strukturális sajátosságának felismerése és alátámasztása a hozzáférhető adatokkal. Ezzel a háttérrel már viszonylag biztosan lehetett jóslatot tenni. Viszont Moore számára minden bizonnyal jóslata egzaktsága volt a legkevésbé fontos.

Ahogy Steve Schulz később kihangsúlyozta, Moore a predikció mellett egyben javaslatot tett arra, hogy az iparág ezt az optimális mértékű miniatürizálási dinamikát állítsa erőfeszítéseinek középpontjába, hiszen ez a műszaki és gazdasági racionalitás optimumát célozza meg. Tanulmányában Moore kitért arra is, hogy a mikroelektronikai félvezetőipar, egy alkatrészgyártó ipar, milyen tényezőket kínál, amelyek kiaknázása az új berendezések tervezőinek érdemessé teszi a gyártás ilyen, gazdaságilag és műszakilag optimális tempójú és nagyságú megnövelését. Azt mondhatjuk, tanulmánya egy tömör műszaki fejlesztési ajánlatot tartalmazott olyan termékek, exponenciálisan növekvő komplexitású integrált áramkörök előállítására, amelyek, mint képessé tevő termékek, ahogy írta 1965-ben, elvontan számos és gyorsan növekvő számú alkalmazási lehetőséget kínáltak. Moore azt vizionálta, hogy az integrált áramkörök felhasználhatósága szinte végtelen lehet. Moore tanulmánya olyan kínálati sajátosságot fogalmazott meg, a műszaki komplexitás extrém növekedését az ár extrém csökkenése mellett, ami extrém iparági növekedési lehetőséget ígért. Ezt kiegészítette azzal az utalással, hogy miért lehet érdemes ezt a jövőben megvalósítani: az exponenciális relatív árcsökkenés is elősegíti, hogy a rendkívül gyors fejlesztési lehetőséget mutató integrált áramkörök szinte bárhol felhasználhatóak legyenek.

Moore tehát az iparág tudatos továbbfejlesztése szempontjából döntő jelentőségű felismerést tett: a mikroelektronikai miniaturizálás különleges sajátosságának kiaknázását állította a mikroelektronikai félvezetőipar, a mikroelektronikai eszközgyártás stratégiájának középpontjába. Mégis, megjelenésekor az eléggé nem hangsúlyozható jelentőségű tanulmánya nem keltett különösebb feltűnést. Dan Hutcheson magyarázatként a szükséges intézmény és kultúra hiányára hivatkozik. Eszerint akkor nem létezett még az iparági tervezésnek az a fajtája, ami éppen a mikroelektronika fejlődésével válik először igazán tudatos feladattá (Hutcheson 2005, 2006). Elismerve ezt, Hutcheson megjegyzéséhez több dolgot kell mégis hozzátenni. Egyrészt 1965-ben sok szempontból nem volt még tény a chipek döntő műszaki fölénye az individuális tranzisztorokból felépíthető rendszerekkel szemben. Másrészt vélt vagy tényleges akkori problémák akadályozták az integrált áramkörök tömeggyártására való áttérést. Továbbá, a memóriagyártás volt ekkor az integrált áramkörök döntő alkalmazási területe. A mágneses memóriák uralták ezt a területet. Noha nem ígértek az integrált áramkörökhöz hasonló meredekecsű funkciónövekedést és relatív árscökkenést, a mágneses memóriák az évtized közepén még sokkal olcsóbbak voltak. Az integrált áramkörök gyártása az első néhány évben viszonylag szűk, rés piacokra folyt még (ezeken viszont rendkívül gyors növekedés ment végbe). Ugyanakkor Moore az integrált áramköröket általános alkalmazhatóságot lehetővé tevő (enabling) műszaki konstrukcióknak mutatta be, szinte végtelen piaci lehetőséggel, de még hiányoztak azok a közbenső termékek, amelyek ezt ugrásszerűen elősegíthették. Az áttörést ebbe az irányba a memória korszerű formájának, a DRAM-nek és a mikroprocesszoroknak a feltalálása jelentette.⁶ Továbbá, amikor Moore tanulmányát megírta, akkor a gyártásköltség szerkezete olyan volt, hogy a „tokozásé” volt a legnagyobb költség. Ez akkor elfedhette a stratégiai extrapoláció jelentőségét. Másrészt feltehetjük, tekintettel Moore üzenetének egyik célcsoportjára, hogy paradox módon az is hozzájárult a viszonylag kis azonnali sikerhez, hogy Moore bizonyos értelemben olyan dolgokat figyelt meg és vetített előre, amelyekkel valamennyire mindenképpen foglalkozniuk kellett azoknak, akik elkötelezték magukat a chipgyártás mellett. Ők egyes elemeket, például az időbeli viszonylagos árscökkenést hasonlóan ítélték meg, mások viszont a gyors komplexitás növekedést vették észre. Ezért, részleteit tekintve nem tűnhetett alapvetően újnak, amit mondott. Moore mondanivalója ugyanis, mint egy egészét alkotó műszaki és gazdasági „üzenet” különösen jelentős. Végül fontos lehetett az üzenet egyik befogadó közege: bár

⁶Az integrált áramkörök általános „képesé tevő” műszaki termékek. Áttörő hatást eredményező alkalmazásuk lehetőségei szinte korlátlanok. A miniaturizálás folytatásával ez csak egyre tovább növekedett. Ugyanakkor az új és új alkalmazások lehetőségeinek megteremtődése és felismerése összetett társadalmi és szakértői innovációs folyamat, számos történeti korlással. Ennek a történeti folyamatnak a világos megértését a visszavetítő (modern minded) gondolkodás alapvetően megakadályozza. Rendkívül sokatmondó ebben a vonatkozásban, hogy Moore egy interjúban rámutatott, hogy 1980-ban ő még nem tudta volna a személyi számítógép, 1990-ben pedig az Internet elterjedését előrelátni (Intel 2000). Pedig, mint tudjuk, az Internet őse a hatvanas évekből, a személyi számítógép őse pedig a hetvenes évek elejéről származik.

a lap hatvanezer helyre jutott el, a lap olvasóközönsége elsősorban mérnökökből állt. Sokan közülük empiricista hozzáállással az extrapoláció alapját semmi másnak, mint nagyon kevés adaton alapuló „puszta megfigyelésnek” tekinthették.

A páratlan miniaturizálási potenciál a félvezetőiparban jelen volt már a diszk-rét tranzistorok fejlesztésénél is, de az integrált áramkörökkel bontakozott ki igazán. A miniaturizálás, már felsorolt hihetetlen előnyei mellett tömegtermelési kiaknázhatóságot is ígért. Az ipari tömegtermelésként megvalósítható mikroelektronikai miniaturizálás meginduló kiaknázása egy exponenciális görbe mentén az időt a legfontosabb tényezővé tette. Az eredeti Moore-féle hipotézis szerint az idő tagoltságát az egyéves periódussal exponenciálisan egymást követő komplexitás növekedések, illetve a relatív árcsökkenések üteme adja. A meginduló Intel megértette egyik vezetőjének, Moorenak az iparági stratégiai normára tett felhívását és megpróbált koncentrálni a generációváltások gyors megvalósításával elérhető stratégiai előny megfelelő ütemű megvalósítására (Brock 2006).

Az exponenciálisan gyorsuló iparági fejlődés Moore extrapolációját néhány év alatt a figyelem középpontjába állította. A tranzisztorgyártásban már az ötvenes években rendkívül éles verseny fejlődött ki. Ez a hatvanas évek végére áttevődött a szilíciumalapú integrált áramkörök gyártására. De a félvezetőipar fejlődésének ebben a szakaszában az iparági tervezés a kutatás és fejlesztés stratégiai tervezése területén is kezdeti állapotban volt még. Az iparág fejlődésének meghatározásában még a hetvenes évek elején is csak a vállalati szinten megszervezett és általában csak a következő generációra koncentrálnó innovációk voltak döntőek. Ebben a folyamatban általában csak elmosódott, intuitív iparági stratégiai meglátások kaptak szerepet. De a rendkívül gyorsan naggyá fejlődő vállalatok, a Fairchild Electronics, majd az Intel, a Texas Instruments és a Motorola tervezéseikben a Moore-féle predikcióra, mint alapvető iparági jellemzőre is támaszkodtak már a hatvanas évek fordulójára. Az iparági jóslat először a hetvenes évek közepén kapott különös jelentőséget. A kiélestedt versenyben a japánok az államilag szervezett és támogatott kutatás elengedhetlenségére hivatkoztak az iparági fejlődés Moore törvénye alapján. A (nemzeti) iparági szinten szervezett innováció kifejlesztésének célja új technológiai generáció kifejlesztésében való stratégiai előny megszerzése volt. Ez a félvezetőiparban először ezzel a japán lépéssel jött létre 1975-ben. Az állam, konkrétan a MITI, a mitikus innovációs minisztérium, a kormány utasítására hatalmas támogatást biztosított az öt legnagyobb japán félvezetőgyártó cégből kialakított konzorciumnak. Az államilag irányított együttműködés szervezetileg egy „együttműködési laboratórium” létrehozásában és működtetésében csúcspontot ért el, a cégek által a laboratóriumhoz delegált kutatókkal. A laboratórium az új technológia-generáció kifejlesztéséhez szükséges alapvető technológiai és alkalmazott technológiai kutatások megvalósítására koncentrált, s a világpiacon stratégiai előnyhöz vezető eredményeket produkált

(Sakakibara 1983).⁷ Az iparági szintű stratégiai tervezés feladata a memóriagyártásban a nyolcvanas években kialakult, az USA számára katasztrofális következményekkel járó japán dominancia fenyegetésére adandó válasz részeként átkerült a nyolcvanas évek közepétől az USA-ba is.

4. A Moore törvény problémái

1975-ben Moore felülvizsgálta hipotézisét. Ekkor már konszolidálódott a rendkívüli sebességű, „Szilícium-völgy dinamika”. A hetvenes évek elején feltalálták már a DRAM-et és a mikroprocesszorokat. Mind a memória mind a mikroprocesszor gyártás hosszú távú stabil termékfejlesztési irányt ígért. Elsősorban a fotolitográfia generációs szintű továbbfejlesztésével, további hosszú távú stabil gyártástechnológiai irányt lehetett megjósolni a kiaknázás alatt levő technológiai paradigma kiaknázásának új szintre emelésével. 1975-ös tanulmányában Moore úgy találta, hogy a szilíciumlapka és a komplexitás növelésének tendenciája változatlanul folytatható. Viszont lényegében kimerült az „okossági” tényező, pl. az elemek egyre kompaktabb elhelyezésének megtalálása a lapkán. Ezért módosította predikcióját és feltételezte, hogy 1980-tól a megkétszereződés csak két évente jön létre.

A megkétszereződés idejének megváltoztatásával olyan kérdéshez jutottunk el, ami meglepőnek tűnhet. Mi is pontosan a Moore törvény és mennyire pontos? A komponens-, illetve tranzisztorszám növekedésével kifejezett Moore törvény empirikusan érvényesnek bizonyuló alakja az idők során változásokon ment keresztül. A Moore törvény érvényességének vizsgálata során természetesen meg kell különböztetnünk a Moore törvényt, mint várakozás kifejezőjét, és az iparág tényleges fejlődése során tapasztalt görbét. A Moore törvény 1965-ös megfogalmazása az exponenciális komplexitás növekedés pontos matematikai alakját tekintve átfogalmazásra szorulónak bizonyult. Részben a fent jelzett megfontolásra (az „okossági tényező” kimerülésének tézisére) támaszkodva Moore 1975-ben azt tételezte fel, hogy 1980-tól a korábbi, meredekebb exponenciális egy kevésbé meredek görbére vált át. Moore az éves periodicitás megjóslását 1975-ben két évesre változtatta meg. A tapasztalati görbénél viszont megállapítható, pl. a hetvenes évek közepétől kb. a kilencvenes évek elejéig, hogy inkább mutatott másfél éves periódust, ami az elterjedt hivatkozássá lett.

Ha a Moore törvény szigorú értelemben vett érvényességét vizsgáljuk meg, akkor fontos észrevenni több további elemet. Moore 1965-ben a „komponensek” számáról beszélt és ezeknek csak a fele volt tranzisztor, míg 1975-ben már csak a

⁷ Egy késői interjúban Moore óvatos választ adott arra a kérdésre, hogy törvényének kimondása nélkül szerinte eltérően fejlődött volna a mikroelektronika. Pozitív példának az eltérő fejlődésre arra hivatkozott, hogy a japánok törvénye megfontolásakor jutottak arra a meggyőződésre a hetvenes évek közepén, hogy a félvezetőipar fejlődése nem véletlenszerű. Ebben az értelemben a törvény felismerése szerinte biztosan befolyásolta az iparág fejlődését (Moore Interview 1997).

tranzisztorokról beszélt. Moore predikciója 1975-re, a „komponensek” számát tekintve kb. 50%, a tranzisztorok számát tekintve kb. 25% pontosnak bizonyult, viszont rendkívüli, három nagyságrend, mint nagyságrendi növekedés helyes megjósolása mellett. Továbbá, a valódi történetben 1966-1969 között nincsenek csomópontok, mert nem gyártottak a dinamikát kifejező ábrának megfelelő komplexitású tranzisztort. További eltérések sorolhatóak még fel, különösen, ha a későbbi történetet is figyelembe vesszük. Az iparág bonyolultabbá válásával újabb és újabb tényezők jelentek meg, amit figyelembe kellett venni, s amit az adatbázis kisebb manipulálására lehetett felhasználni, hiszen kérdésessé vált például, hogy az eltérő ütemben fejlődő fő terméktípusokat tekintve milyen terméktípusokra, memóriákra vagy mikroprocesszorokra értelmezik a Moore törvényt.

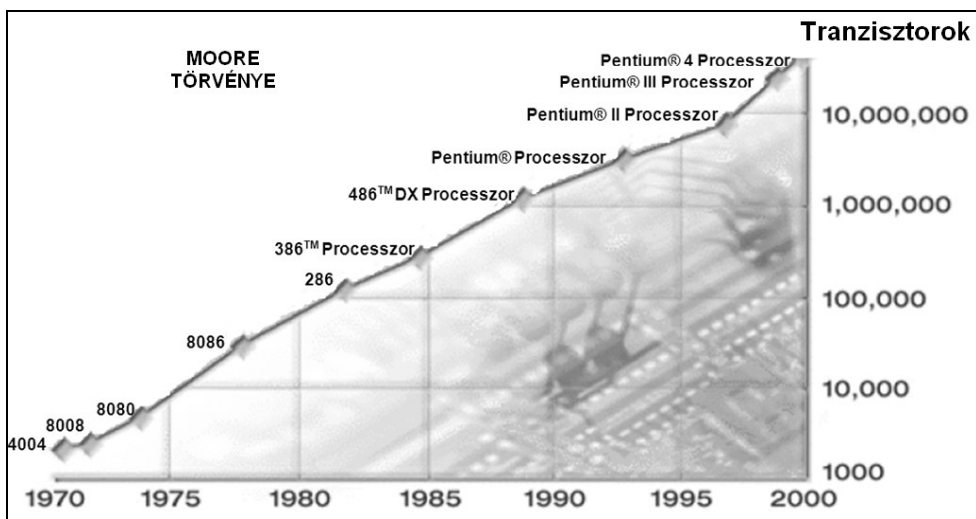
Ezzel jelezni kezdtem a Moore törvény(ek) megalkotásával kapcsolatban két alapvető tudományelméleti problémát. Ezek egyrészt a pontos megfogalmazásának, másrészt az érvényessége változatlanóságának kérdése az egész történet során, az inkonzisztens adatképzés, az exponenciális görbe meredekségének a változása, illetve a terminusokkal kapcsolatos jelentésváltozások, amelyek lehetővé tettek bizonyos „rugalmasságot” a törvény(ek) érvényességének állításában.

Amennyiben azt mondjuk az eddigiek alapján, hogy Moore predikcióiban a lényegi elem a műszaki és a gazdasági elem teljes korrelációja és az exponenciális növekedés volt, kevésbé annak pontos alakja, s erre jó okaink vannak, akkor ennek érvényessége vitathatatlan megőrződéséről beszélhetünk 1965 óta. Ha a konkrét görbe alak és az adatok változtatása (komponensre vagy tranzisztorszámra vonatkoztatunk, stb.) is figyelembevételre kerülnek, akkor a meredekség változása tekintetében eddig két Moore predikcióra hivatkoztunk. Ráadásul Moore 1975-ben rosszul becsülte meg az inflexió időpontját az iparági dinamikának az egyik görbéről a másikra való átmeneténél. A Moore „törvény” számos további változtatáson ment még keresztül története során mind adatait, a görbe konkrét alakját, pontosságát, mind értelmezését tekintve. Kenneth Flamm a tudomány-technika-tanulmányok (angol rövidítéssel STS) alapvető kifejezésével foglalja össze a Moore törvény alakváltozásait: Moore ismételt „foltozásokat” (tinkering) végzett a törvényen. Flamm ugyanezt mondja a később ismertető úttérkép készítésekre: „Ténylegesen az úttérkép bizottság ugyanezt tette a kilencvenes évek végén, megváltoztatva a megkettőződés /ütemét/ minden három évről minden két évre” (Flamm 1996, 23. o.).

Paradox módon Moore hipotézise státusában 1975-re már ellenkező irányú lényeges változás történt. Miközben a törvényen magán megalkotója tett megváltoztatásokat, 1975 körül Moore extrapolációját már elterjedten hívják törvénynek és mind a Texas Instruments egyik vezetője, Lester Hogan mind Bob Noyce az Inteltől a törvény bámulatos pontosságú érvényesüléséről kezdtek beszélni. Nehéz ezt elválasztani gyakorlati megfontolásoktól. Attól ugyanis, hogy a chipgyártásnak elemi érdeke volt, hogy a beszállítókat és a felvevő piacot is meggyőzze arról, hogy az iparágak rendszeres, sőt „törvénykövető” dinamikája van, amire tervezni lehet és kell. Tehát a „törvény” terminus elterjedéséhez vezető számos tényező között érve-

léstechnikai is megjelent: az ipar vezetői biztosították lehetséges ügyfeleiket, hogy iparáguk rendkívüli meredekséget mutató, de bámulatosan pontosan érvényesnek bizonyuló trend mentén fejlődik. Továbbá ez a trend nem esetleges semmilyen értelemben, hanem „törvény”, azaz mind meredekségét, mind periodicitását tekintve pontosan és kivételek nélkül érvényesül. Az ezt követő időszakban az iparág szakadatlan exponenciális növekedésének vitathatatlan érvényessége és a Moore törvény törvényszerű érvényessége ennek megfelelően terjesztett meggyőződés lett, mind az iparág mind környezete részéről. Viszont a Moore törvény matematikai alakja bizonyos értelemben elfogadhatóan összefoltozható, összeegyeztethetőnek bizonyult a kiválasztott adatokkal, ha a törvény alakját is hajlandók voltak megváltoztatni. Fontos látnunk ugyanis, hogy a nyolcvanas években már a szakmai köztudatban is egyre inkább másfél éves periódusra tették a megkétszereződést. Kb. ettől az időtől tehető az az elterjedt, megengedő megfogalmazás is, hogy a „Moore törvény” a periodicitást „18-24 hónap közé” teszi. Ugyanakkor felmerült a kilencvenes évek elején, hogy az exponenciális növekedés lassúbbá vált, majd pedig az évtized végére létrejött az aktuális jóslatban megjósolt meredekségnél, ütemnél gyorsabb ipari teljesítmény (ez a „beat Moore” – haladd meg Mooret ! jelenség). A „lazító” megfogalmazás, hogy az iparág egészére érvényes „törvény” meredeksége bizonyos határok között mozog, megfelel mind az ezredfordulótól bekövetkezett változásoknak mind a változások üteme tartására való, az ITRS-ekben, az iparági úttérképekben kifejezett normának és konszenzusos elköteleződésnek, a tudatos modulációs törekvésnek. 2000 után is folytatódott a 3. ábrán bemutatott, ezredforduló körüli meredekebb növekedés.

3. ábra Moore törvénye az Intel ábrázolása alapján, féllogaritmikus skálán 2000-ben



Forrás: Intel (2000)

A másfél éves periódus feltételezése az eredeti Moore törvény relevanciájának részleges megváltozásával is összefügg. Az iparág egyre komplexebbé váló fejlődése jobb megjelenítésére a Moore törvény átértelmezéseket kapott. A Moore-féle műszaki extrapoláció a funkcióképességet először a komponensek majd a tranzisztorok számával jellemezve mutatta be. Az egyik átértelmezés viszont a mikroprocesszorok adatfeldolgozási teljesítményével kívánta a teljesítménynövekedést jellemezni, a másik a számítógépek számítási teljesítményével. Ezek a próbálkozások a Moore törvény „eltolódásainak” nevezhetőek, amennyiben elsősorban nem a görbe alakját, hanem a benne a funkcióképesség növekedését jellemző változót próbálják meg alkalmasan megváltoztatni.

Természetes, hogy a félvezetőipar hihetetlen gyorsaságú fejlődése során a digitális funkció területén belül is alapvető jelentőségű termék diverzifikációk sora valósult meg. A legalapvetőbb ilyen diverzifikáció a memóriák illetve a mikroprocesszoroké. Fejlődésük lényegesen eltérő a bennük található legnagyobb komplexitású integrált áramköröket tekintve. Ennek megfelelően a félvezetőipar egészére érvényesnek tekinthető Moore törvény bizonyos átlagot fejez ki a hetvenes évek elejétől, mert eltérő görbe meredekséggel mondható ki a gyorsabban növekvő komplexitású DRAM-ek, mint a mikroprocesszorok fejlődésére. A DRAM-ek fejlődésére érvényes, hogy ez a tranzisztorok számát tekintve, 1979-től nagyon hosszú ideig lényegében másfél éves periódust mutatott. Ezt az egész iparág fejlődési görbéjének tekintve viszont, rendszeres hibát viszünk be az iparág egésze fejlődésének jellemzésébe. A helyzetet tovább bonyolította, hogy először a DRAM memóriák számítottak a domináns terméknek s a mikroprocesszorok csak később zárkóztak fel.

A fotolitográfia egyik jelentős alakja, Chris Mack, ismételten számba vette mind a Moore törvény történeti alakváltozásait, mind „bukdácsolásait”, a kimaradó termékgenerációkat. Ezeket tudomásul véve a Moore törvényt eltolódásokat magába foglalóan tekintette érvényesnek. Ő egy másik, az ezredfordulóra végbement, szerinte döntő változásra hívta fel a figyelmet (Mack 2003). Szerinte az ipart akkorra már nem lehetett megfelelően jellemezni a legigényesebb alkalmazásokra kifejlesztendő chipeken elérhető tranzisztorszámmal, a „felfelé törekvéssel”, az optimális funkció lehető legnagyobb megnövelésével. Ugyanis ezt sokszor egyszerűen nem fejlesztették ki a Moore törvény által megkívánt időpontra a memóriafejlesztésben, mivel nem volt iránta elég tömegpiaci igény. Ezzel szemben a miniaturizálás töretlenül folytatódó tendencia maradt. Az ipar pedig a miniaturizálásból adódó gazdasági hasznot nem csak a fajlagos tranzisztorszám növelésével, hanem az egyre kisebb, de egyre nagyobb teljesítőképességű tranzisztorok előállításával is el tudta érni (Mack 2003, 2011). „A Moore törvény, adott exponenciális teljesítmény növekedés gazdaságilag kényszerítő előnyeit az összezsugorodó tranzisztor hozza létre, nem pedig a maximálisan elérhető tranzisztorszám növekedés. Amíg ez az összezsugorodás folytatódik, addig Moore törvénye eleven marad” (Mack 2003, 26. o.). Az ipar rátalált egy másik formára, ami megvalósítja Moore általánosítható „üzenetét”, hogy egyre jobb tranzisztorokat lehet létrehozni egyre alacsonyabb költséggel.

Ismételten emlékeztetek arra, hogy Moore két rendkívül fontos, együtt különösen jelentős állítást fogalmazott meg 1965-ben. Az egyik az adott technológiai szinten elérhető, a fajlagos költséget tekintve optimális komplexitás növekedéséről, a másik a technológiai fejlődéssel együtt járó fajlagos költségcsökkenésről szól. A közgazdasági és a technológiai szempontot egyesítve tulajdonképpen Moore törvénynek a komplexitás-növekedés és a fajlagos árcsökkenés együttes állítását lehetne nevezni, de Moore törvénynek csak a komplexitásnak az optimálisan gyártható tranzisztorszámmal kifejezett exponenciális növekedési görbéjét nevezik. A költség per funkció csökkenése ugyanis erősen függ az 1965-ben érvényes sajátos feltételtől, hogy a gyártásköltség gyakorlatilag változatlan maradt, akármennyi komponenst is vittek fel a szilíciumszeletre illetve attól, hogy minden egyéb költség megfelelően szétteríthetőnek bizonyul-e. Moore fejtegetését a költség per funkció csökkenéséről, pl. az ITRS-ek, a nemzetközi technológiai úttérképek történelmi korroláriumnak, a gyártástermelékenységet javító hajtóerőnek tekintik az első ITRS-től egészen máig (ITRS 1999, 2011). Ez a korrolárium azt sugallja, írja az ITRS Szójegyzék, hogy a versenyképesség megmaradásához a gyártástermelékenységi javulásoknak a költség/funkció megfelelő csökkenését is képessé kell tenni⁸. A Szójegyzék jogosan hozzáteszi: „Meg kell jegyezni, hogy ez a leegyszerűsítő modell a költségek megkövetelhetőségéről, amit az ITRS számára elsőrendű hajtóerőnek használnak, nem veszi figyelembe az aktuális külső piaci környezetek gazdasági kínálati és keresleti piaci komplexitását” (ITRS 2009, 81. o.).

Milyen értelemben működött a Moore törvény, mint „törvény”? Moore megfogalmazta azt a hosszú távú gazdasági és technológiai racionalitást, ami optimálisan elérhető a (digitális) félvezetőiparban, feltéve, hogy a (digitális) komplexitás fejezi ki a termékek funkcionalitását. Ezért, a Moore törvény a racionális döntéshozók számára elérendő legjobb célt, normát biztosított, „törvényt” állított fel, abban az értelemben, hogy a műszaki és gazdasági racionalitást maximálisan megvalósító iparágak ezt kell megpróbálnia érvényesíteni. Ugyanakkor mind az ipar valóban tapasztalható fejlődése, mind ennek a racionalitásnak a megfogalmazása többkevesebb változásokon ment keresztül, bár nagyjából megfeleltek az exponenciális fejlődés valamilyen konkrét alakjának. Az eltérések mind abból adódtak, hogy változott, egyre összetettebbé vált maga az iparág, mind abból, hogy ennek ellenére megpróbálták ezt a bonyolult változó összefüggést leegyszerűsítve kifejezni.

Bár a keletkezett variánsok bemutatását korántsem merítettem ki, összefoglalásul elmondható, hogy számos kísérlet született meg a mikroelektronikai félvezetőipar műszaki fejlődési dinamikájának koncentrált, valamely átfogó alapvető jellemzővel megadható univerzális jellemzésére a kilencvenes évekig. Viszont akármennyire is elterjedt és sokan makacsul ragaszkodnak ma is hozzá, mégis biztosan téves az az állítás, hogy Moore 1965-ben tett jóslata évtizedeken keresztül bámulatosan pontosnak bizonyult. Azonban alapvetően félrevezető, ha a Moore törvény jelentő-

⁸ ITRS Executive Summary, Glossary (2009).

ségét, majd a további változatokét abban keressük, hogy a lehető legpontosabb előrelátást fogalmazzák meg. Azt mondhatjuk, hogy a komplexitás növekedés exponenciális típusú változásának, változó változókkal és görbealakokkal való feltételezése, és az exponenciális relatív árcsökkenés maradt érvényes, mint rendkívüli fontosságú információ, mint leírás, extrapoláció, de mint normatív követelés is, hogy az extrapoláció tényleg megvalósuljon. Moore törvénye két funkcióban jól működött a mikroelektronikai félvezetőiparban. Egyrészt mindenképpen segítette a szinkronizálást az iparágon belül, illetve a beszállítókkal és a piac szereplőivel. Másrészt ettől elszakíthatatlanul, segített bizalmat kelteni az iparág fejlődése iránt, mint aminek hihetetlen sebessége mellett is van leírható szabályszerűsége. A törvény viszont harmadik funkciójában, az egyre több, a mai szakaszban akár négy termékgenerációt is átfogó innováció szervezésben bizonyult a legkevésbé pontosnak. Ez abból adódik, hogy exponenciális összefüggés esetén kis meredekség különbségek is rendkívül gyorsan vezetnek el nagyon nagy eltérésekhez. Ez egy fontos elemző, Ilka Tuomi számára arra is elégséges alapot jelentett, hogy a felsorolt és további pontatlanságok, átértelmezések, az adatokhoz való utólagos hozzáillesztések alapján elvitassa a Moore törvénynek az iparág fejlődésében való bármilyen tényleges jelentőségét. Ő a Moore törvényt olyan prediktornak tekinti, ami egyre jobban félrevezetővé válik (Tuomi 2002, 2003).

De megközelíthetjük a történetet a másik sarokból kiindulva is. Ekkor, ha rétegenként vizsgáljuk meg a Moore által 1965-ben elmondottakat, akkor azt látjuk, hogy Moore 1965-ben egy olyan spontán irányvételre hívja fel a figyelmet az iparág, konkrétan annak szerinte a stratégiai középpontjába törő integrált áramkörök fejlődésében, amely irányvétel, műszaki és gazdasági előnyei miatt a mikroelektronikai félvezetőipar egyedülálló stratégiai alternatívájának kezdett megmutatkozni. Mások korabeli reflexióiból – talán kivéve valamennyire Harry Knowlest (1964) – éppen ez a felismerés hiányzott. Továbbmenve azt látjuk, hogy Moore exponenciálisnak észlelte a műszaki és a gazdasági előnyök megvalósulásának pályáját. Végül pedig tett egy hipotézist, majd később egy továbbit a pálya pontos matematikai alakjáról. Sok minden felróható Moorenak a pálya pontos matematikai alakjával kapcsolatos állításai helytelenségével illetve a tapasztalati adatokkal való, valóban többször elkövetett megengedhetetlen játékok miatt (ez utóbbit jelezheti, hogy a hetvenes években viszonylag önkényesen választott ki adatokat állításai alátámasztására). De, ha így foglalunk állást, akkor az értékelés alapját csak az adja, hogy sikerült-e neki elég pontosan felismerni egy összefüggést.

Az iparág története szempontjából viszont mindenképp az tűnik fontosnak, hogy egy adott, eléggé nem hangsúlyozhatóan fontos fejlődési irány spontán megjelenésére hívta fel erős hangsúllyal a figyelmet, és az adott irány iránti tudatos stratégiai elköteleződésre buzdított, a megvalósítható-megvalósuló optimális műszaki és gazdasági racionalitásnak a cselekvések felsorakozásával való lehető legjobb megvalósítására. Brock metaforikusan, „egy tiszta hangnak” értékeli Moore 1965-ös felépését (Brock 2006, 25. o.). Azt hiszem, igaza van. A megváltoztatandók megvál-

toztatásával mindez érvényesnek tűnik a Moore törvény hivatkozójának későbbi szerepével kapcsolatban is. Ezeknél ugyanis a hivatkozások rendszerint egy csomó zavarosságot tartalmaznak (néhány zavarosságra a tanulmány később rámutat).

5. A Moore törvény, mint önmegvalósító jóslat és az iparági úttérképek

A Moore törvény normatív jellege működésmódjának kihagyhatatlan összetevője. Mint iparági előrelátás soha nem volt csak egy, a gyakorlatot nem érintő, periodikusan megismételt pusztán leíró, „akadémikus” jóslat egy makrotrend mindig meghosszabbított hosszú távú fennállásáról. A trend extrapolálása ezzel szemben mindig célt megfogalmazó normatív jövőhöz viszonyulás is volt. Ahogy Moore már 1965-ben felvetette, ő azt ismerte fel, hogy az általa megfogalmazott trend és annak meghosszabbítása a termékek bizonyos, rendkívül vonzó, különlegesen előnyös inhereus sajátosságán és a technológia megfelelő ütemű továbbfejlesztettségén alapszik. Ezzel pedig megállapításai mindenképpen a megvalósításra legérdemesebb iparági jövőképet nyújtják. Ez az, Arie Rip (2011) kifejezésével a „jövő struktúrára” tett hipotézis, ahogy bármely praxisban, a mikroelektronikában is, az aktoroknak és a struktúráknak a jelenben folyó kölcsönhatásaiba, mint strukturáló harmadik elem lépett be. A gyorsan rendkívül komplexé váló iparágnak iránykeresési és ütemezési feladatai megoldásához arra volt szüksége, hogy mint egész, iparági szinten egyrészt hosszú távú alapvető termék- és technológiafejlesztési szabályszerűséget próbáljon meg megállapítani, hogy annak alapján orientálódhasson. Moore két megfontolása együtt megmutatta a kiválasztandó célt, s Moore feltételezte, hogy a piac fogadókészsége esetén, amit a termékek szinte korlátlan általánosságú felhasználhatóságára alapozott, az iparág ezt a két görbét meg is valósítja.

Brock (2006) a Moore törvény negyven évét a következőképpen periodizálja. Először az iparági szereplőknek a kiélezett versenyben kialakuló spontán viselkedése kezdett ennek a törvénynek megfelelővé válni. Eszerint vállalatok közötti koordinálódás jött spontánul létre, minden közös tervezés nélkül. Majd a Moore törvény útmutatásával figyelve meg a két tendenciát a gyakorlatban, az egyes vállalatok egyre inkább tudatosan lettek készek a jövő alakítására, először csak saját tevékenységüket tudatosan igazítva a trendhez. Ez a hozzáállás a megfigyelt tendenciák, Rip és munkatársai kifejezését felhasználva, iparági szintű modulálására törekvésekké fejlődött a kilencvenes évek elejére. Különleges performatív szerepe volt és van a Moore törvénynek, ahogy azt, az érvényesnek tekintett tudás gyakorlatformáló, performatív szerepét vizsgáló szociológiai iskola hagyományának megfelelően David MacKenzie megírta. Az iparág jövőjét „leíró” extrapoláció, mint konstrukció először egyes vállalatok, majd az egész iparág szintjén befolyásolta a történetet, interaktív kapcsolatba lépve azzal (MacKenzie 1996).

Akármit is jelentett éppen Moore törvénye, mint érvényesnek tekintett ismeret, nélkülözhetetlen fogódzót adott egy feltételezett trend alapján a jövőhöz viszo-

nyulásra. Fogódzót adott, amelynek segítségével a szereplők tudatosan felsorakoztak. Erről a normatív oldalról szól bővebben a tanulmány egy további része. Ez arra is kitér, hogy trend és akarat összeegyeztetése mindenkor állásfoglalást jelent két kérdésben a mikroelektronikai iparági jövőképekben és a hozzá vezető út periodikus újrafogalmazásaiban, az iparági úttérképekben. Az egyik az, hogy „a megmaradást az exponenciális görbén” vitathatatlannak tekintett legalapvetőbb feladatnak tekintik az iparág számára. Az iparág fenntartott maximája, törekvéseinek koncentrált kifejezése az, hogy „legalább durván meg kell valósítani a megmaradást a nyomvonalon”. Viszont a kialakult és egyre hosszabb ideig megőrzött exponenciális görbén megmaradás elkötelezett folytatásában a meredekség változásaival, de néhány próbálkozásban akár a függő változó ismételt átfogalmazásaival kell figyelembe venni a feltételek és lehetőségek megújuló kombinációit, az iparág saját differenciálódását és esetleg irányváltását. Ezt a reflexiót a reflexióról, a reflexiót Moore törvényéről, az iparág mindig megvalósította, de úgy tette meg, hogy kommunikációjában ezt sokszor a Moore törvény változatlan jelentésének és érvényességének a valóságtól eltérő látzatába burkolta.⁹

Egy sajátos növekedési trend és egy iparági technológiai közösség, és az iparági közjavak (pl. a szabványosítás) egyre bővülő rendszerének kölcsönös kialakulása és egymást erősítő fennmaradása ment végbe a félvezetőipar vizsgált ötven éves fejlődése során. A kialakuló verseny először nagyrészt spontánul biztosította a trend, bár lényeges eltérésekkel, pl. csomópontok kimaradásával terhelt, érvényesülését. Az Intel, Moore vállalata, már alapításától kezdve tudatosan megpróbált a trend mentén tervezni. De a piaci körülmények, az ún. termék meghatározási válság a hatvanas évek közepén, amelynek során néhány évre a csak néhány kis komplexitású integrált áramkört tartalmazó termékek, pl. karórák, zsebszámológépek gyártása került a fogyasztói piacon előtérbe és a még hiányzó két alapvető innováció, a korszerű memória és a mikroprocesszor hiánya az Intel első három évében, 1967-től ezt alapvetően megakadályozták. De a folytatódó verseny során az egyre komplexebb integrált áramkörök gyártása bizonyos ellenpéldáktól, a 67-68-69-es évektől eltekintve bővítetten újratermelődő virtuális körök sorozatába rendeződött el már a hetvenes évek elejére. Amennyiben egyes vállalatok ezekben a bővítetten újratermelődő vir-

⁹ Tanulságos erről a kommunikációról az, amennyire szabadon kezelik az ITRS-ek, a nemzetközi úttérképek a Moore törvényt és annak eredeti megfogalmazását. A Moore törvényről egyrészt úgy nyilatkoznak, hogy ez a legalapvetőbb iránymutató az úttérkép elkészítésére, ami bizonyosan igaz arra a Moore törvény változatra, amit kiindulópontnak felhasználnak, másrészt elfogadhatatlanul pontatlanul viszonyulnak Moore eredeti állításaihoz. „Moore törvénye – Gordon Moore által tett történeti megfigyelés, [...] amely szerint a piaci szükséglet /növekedése/ (és a félvezető ipari válasz) az egy chipre (bitre, tranzisztorokra) eső funkcionalitás /növekedésre/ 1.5-től 2 évig terjed” (ITRS 1999, Glossary). Ugyanez megtalálható minden további ITRS-ben. Aligha kell felhívni a figyelmet már arra Moore tanulmányainak megismertetése után, hogy ő nem írt a piaci szükségletek megnövekedésére adott félvezető ipari válaszról, nem feltételezett másfél éves periódust, és a periódus időtartamára pontos jóslást tett, egyszer egy, egyszer két évet jósolva meg. Az ITRS-ek szerkesztői viszont visszavetítették az eredeti irodalomba azt, amit ők értettek, értenek Moore törvény alatt.

tuális körökben már Moore jóslatát figyelembe véve vettek részt, akkor Moore predikciója, a már jelzett fenntartások érvényessége mellett, önmegvalósító jóslattá alakult. De ebben a szakaszban ennek a folyamatnak még csak viszonylag alacsony szintje valósult meg. Még csak egyes vállalatok vették tudatosan figyelembe a jóslatot és ezt a tudatosságot ők is csak saját vállalati stratégiájukban hasznosították. Az ezekkel a próbálkozásokkal is még csak szinte érintetlen de facto iparági kormányozódás (governance) először a japán állami beavatkozással ment át a tudatos iparági tervezés által befolyásolt dinamikába, reflexív kormányozódásba, kb. a hetvenes évek közepétől. Ez a reflexív kormányozódás, legalábbis az USA-ban domináló dinamikává először a nemzeti úttérképek kialakításának sorozatával lett a kilencvenes években, majd globalizálódott kb. 1997-re és stabilan továbbfejlődik az azóta eltelt időszakban.¹⁰

A kialakult és újratermelődött struktúrákkal, és mint feltétlenül tartandó cél is, az exponenciális meredekecsű fejlődés egyre erőteljesebb momentummá vált a hosszú történet során. A struktúrák, a szereplők stabil elkötelezettsége és a vitathatatlanul tekintett cél az iparági jövő mintegy determinisztikus jellemzői lettek. Ezzel kölcsönhatásban kapott bizonyos további performatív szerepet a dinamika reflexiója. A meghatározott irányú, nagyságú és ütemű mintegy determinisztikusan végbemenő továbbfejlődés egyben céltudatossá lett.¹¹

A fejlődés újabb szakaszai, a nemzeti, majd nemzetközi úttérképek megalkotása és működtetése. Ezeket jól ismerjük, mert jól és jól hozzáférhetően dokumentáltak. Más a helyzet azzal a korai szakasszal, amikor csak egyes vállalatok kezdték tevékenységüket „a Moore görbén megmaradás” alapján irányítani a hetvenes évek elején. Sokkal elmélyültebben kellene megismerni a történet egészét, hogy pontosan megmondható legyen, mennyire volt a folyamat az iparágban, mint egészben hosszú ideig lényegében a Moore törvény figyelembevétele nélküli kormányozódás, majd mikor, és hol kapott a Moore törvény ismerete orientáló szerepet, legalábbis a vállalati stratégiában, hol, mennyire lett a Moore törvény a vállalati tervezés szerves része az egyes vállalatoknál, illetve mikor és hogyan vált feltétlen érvényességű követelménnyé. A történetírók azonban e vonatkozásban még nem végeztek el a szükséges munkát, hogy ebből a szempontból a dinamika e szakasza, részletekbe menően dokumentálható legyen.¹²

¹⁰ De facto kormányozódás jön számos esetben létre spontán elrendeződés kialakulásával és stabilizálódásával. Komplex folyamatok gyakran vezetnek el ilyen elrendeződésekhez, ahogy felbomlásukhoz is. Reflexív kormányozódásról beszélünk, ha a reflexiót moduláló hatás elérésére használjuk fel. A pálya megfelelő pillanatban való modulálásával alapvető változások érhetőek el.

¹¹ Az az ITRS-ekben, a nemzetközi úttérképekben visszatérő állítás példázhatja a külső tényezőknek tulajdonított szerepet ebben a mechanizmusban, hogy a fogyasztók nem túrnék el a viszonylag kis fajlagos árnövekedést sem, bármennyire is nehéz már az exponenciálisan növekvő gyártási költségek mellett ezt az utat választani (ITRS 2011). A meggyőződés szerint ezért az iparágban meg kell tudni felelni a fogyasztói elvárásnak.

¹² Bob Schaller mintaszerűen dolgozta fel a nemzeti és globális műszaki úttérképek történetét 2003-ig (Schaller 2004). Az egyes vállalatok legkorábbi történetének reprezentatív megírását alapvetően korlá-

Különösen az első szakaszra vonatkozó részletes történet viszonylag ismeretlen. Ezzel szemben nagyjából világos az a mechanizmus, amivel a Moore törvény érvényességében való meggyőződés, a már jelzett összes eltéréssel együtt újratermelődött, újratermelődik. Az iparág először spontánul elkezdett önmegerősítő körökben fejlődni, ahogy verseny alakult ki az integrált áramkörök fejlesztése területén. Az első szakaszban a kialakuló önmegerősítő mechanizmus viszonylag stabilizálódott, mint a kialakuló, kölcsönösen összekapcsolt és egymást kölcsönösen stabilizáló viselkedési rutinok stabilizálódó interakciója. Ezeket az interakciókat nagyszámú, funkcionálisan egymáshoz kötődő és egymást kölcsönösen stabilizáló, megerősítő aktor rivalizáló tevékenysége hozta létre. Tudatos parallelizmus alakult ki, párhuzamos utak követése közvetlen interakció és formális tervezés nélkül (Barnett et al. 2002). Ez a viselkedés rendszer de facto létrehozta az iparág kezdeti, Moore törvényszerű működését. Új szakaszba lépett az iparág fejlődése, amikor megfogalmazásra került és tudatosult a stratégiai várakozás. A CATRENE projekt (ami az úttérképek elkészíthetőségének feltételei tisztázásához is nagymértékben hozzájárult, ld. később részletesebben!) ezzel lényegében megegyezően értelmezi a Moore törvény „törvény” jellegét és „az elvárt haladás törvénye” terminussal illetik: „a folytonos haladás önmegvalósító jóslatához vezethet el, ha explicitté tesszük a trendeket, mint az elvárt haladás ‘törvényeit’” (Brillouet 2011, 15. o.).

A kilencvenes évek elejétől Arie Rip és tanítványai intenzíven kutatják a várakozások szerepét, a várakozások – követelmények ciklusok működését a műszaki fejlődésben (van Lente 1993; van Lente–Rip 1998; Rip 2011). A kutatók és a vállalatok várakozásainak szerepét elemzi egy másik, ugyancsak rendkívül feszített dinamikájú iparágban, a gyógyszergyártásban Hronszky Imre (2012). Rip és munkatársai Antony Giddens strukturálódási elméletét továbbfejlesztve (Giddens 1984) vizsgálják a várakozások, mint „prospektív struktúrák” szerepét. A várakozások irányt tudatosítanak, annak megvalósítására követelményeket tesznek levezethetővé és ideiglenesen legitimálják valamelyik jövőkép megvalósítására törekvést. „Mi tette érvényessé a Moore törvényt? Annak a módnak a hatása, amely szerint a szereplők (iparban, tudományban, kormányban) megítélik saját és mindenki más teljesítményét arra tekintettel, amit a Moore törvény predikál” (Rip–Talma 1998, 224. o.). A szereplők sajátos „játékot” alakítanak ki és erőfeszítéseiket tudatosan abba az irányba fókuszálják, hogy elérjék a törvény által predikált értékeket. „Játék”, a kölcsönös függés egy sajátos módja alakult ki és vált önfenntartóvá. Rip és Talma (1998) szerint a mikroelektronikában antagonisztikus koordináció jött létre és bővítetten termelődik újra, s a reflexív cselekvések hatására ez tudatosult és megerősödött. A jövőbe vetített „fogoly dilemma” gondoskodott-gondoskodik a mechanizmusról. A vállalatok, előbb-utóbb egymást „lökdösve” igyekeztek hozzájárulni a közérdek kialakításához.

tozza az, hogy ha voltak is úttérképek már a hetvenes évek elején, ahogy ezt ma már szinte biztosan tudjuk sok vállalatról, akkor azok szigorúan őrzött, versenyelőnyt biztosító tudásnak számítottak. Ugyanakkor általában nem kerültek ekkor még megőrzésre.

Ez az értelmezés illeszkedik ahhoz, ahogy Moore jellemezte a folyamatot 1997-ben. Eszerint egyrészt le kellett rakni a síneket a vonat elé, hogy a tervnek megfelelően cselekedjenek (Korcynski 1997). Más helyen teszi hozzá Moore: „követték a görbét, a versenytársak követték minket, ezért az egész ipar követte a görbét” (Moore 1996a). Ebben a tanulmányban nincs hely arra, hogy elemzésre kerüljön, hogy „a Moore törvényen megmaradás” és annak konkrét megvalósulásai az egyes történeti szakaszokban, a közérdek mindenkori megfogalmazásai és megvalósításai, mennyire fejezhetek ki egyoldalú vállalati érdeket is egy-egy vállalat esetében, szemben a többiekével. E vonatkozásban évtizedes munkát végzett el néhány német kutató (Müller-Seitz–Sydow 2012). Ők kimutatták, ahogy, egyszerre két hálóban mozogva az Intel képessé vált arra, hogy a mikroelektronikai innováció megvalósításában közérdeknek, annak lehetséges variáció közül a legjobban a saját érdekének megfelelő közérdeket fogadtassa el közérdeknek és előnyöket szerezzen meg ennek kiaknázásában. A formális vezető nélkül működő horizontális hálóban bizonyos technikák megvalósításával elérték a nekik legkedvezőbb technológiai változat kifejlesztése feladatának elfogadását. E változat kifejlesztésében viszont alapvető előnyöket szereztek az Intel vezetése alatt megszervezett vertikális hálózat működtetésével.

Egy rendkívüli sebességgel egyre komplexebbé váló iparágban, ahol az iparágon belüli verseny már kezdettől fogva sokkal erősebb volt, mint a legtöbb más iparágban bármikor, s idővel ez csak fokozódott, egy idő után különösen sürgetővé vált az együttműködés megteremtése, a (tudatos) prekompetitív iparági közösség és a prekompetitív (versenyt megelőző) szakasz kialakítása a dinamikában. Ez a (tudatos) iparági kooperáció megteremtését jelentette, a kooperáció előnyeinek kiaknázására a belső verseny és ezáltal az egész iparág teljesítőképességének állandó fokozása céljából. A prekompetitív iparági közösség egyik döntő jelentőségű feladata az volt, hogy meghatározza, hogy melyik lehetséges teljesítményt kell az iparág technológiai fejlődésének középpontjába állítani, középpontjában tartani, s hogyan kell ezt elérni, szabadon hagyva a közösség tagjainak, hogy versenyben egymással fejlesszék ki és hasznosítsák kapacitásaikat és potenciáljaikat az előzetesen meghatározott közös út mentén. (A „zsugorítás” „szétválasztó terminus”, mondja a CATRENE dokumentum a miniatürizálásról, ami megkülönbözteti az együttműködés és a versengés szakaszát (Brillouet 2011, 14. o.)).

Az iparági összefogás először vállalatok közötti változatos K+F együttműködésekben jelent meg a hetvenes és nyolcvanas években, majd az együttműködés nemzeti szinten is kezdett elengedhetetlennek megmutatkozni. A reflexív aktivitás és ezzel együtt a prekompetitív tevékenység reflexiója fokozatosan átkerült iparági szintre, létrehozva ezzel a tudatos iparági szintű koordinációt. Hasonlóan ítéli meg Randall Isaac a Moore törvényt, mint önmegvalósító jóslatot. Ő azt hangsúlyozza, hogy az iparági technológiai extrapoláció iparági várakozást fogalmaz meg. Ez beleilleszkedik abba az önkonzisztens, bővítetten újratermelődő körfolyamatba, amit a félvezetőipar, mint kínálati dominanciájú iparág ismételtén bejár (Isaac 1997, 58. o).

Az iparági technológiai extrapoláció végső sikere attól függ, hogy mennyire képes ez az extrapoláció, mint hitelesnek elfogadható kezdeményező elem beilleszkedni a körfolyamat minden eleme által interaktívan kialakított dinamikába és mennyire bizonyul a kör végén megvalósíthatónak, megteremtve ezzel mind az extrapoláció további folytatásának esélyét, mind a hihetőségét, mind a momentumát.

6. Intézményi, szervezeti tényezők és a Nemzetközi technológia úttérkép (ITRS) megalkotása és működése

Legalább fel kell vázolni az ITRS-ek, a mikroelektronikai nemzetközi technológiai úttérképek működését és misszióját, hogy jobban megérthető legyen az a kölcsönös előnyökkel járó együttműködés, amit a prekompetitív technológiafejlesztési közösség kialakulása létrehoz. Bármely iparágat tekintünk ugyanis, a mikroelektronikai technológiai úttérképek jelentik eddig a legkomplexebb erőfeszítések sorozatát a prekompetitív innováció globális megszervezésére egy iparágban (először néhány száz szakértő, ma szakértők ezrei készítik el a világ legkülönbözőbb részeiből). Iparági szerepük, az úttérkép alkotással létrehozott, megkonstruált előny nem hangsúlyozható eléggé. Legtömörebben kifejezve azt lehet mondani, hogy feltehetőleg igaz az az iparági közhit, hogy az iparági prekompetitív kutatásnak úttérképek kidolgozásán alapuló koordinálása valószínűleg néhány év állandósult felgyorsulást jelent az iparág számára.

Elvileg már a Moore törvény felismerése 1965-ben utat nyitott az iparági technológiai úttérkép készítésének, a félvezetőgyártásban rejlő miniaturizálás különös kettős sajátossága rendszeres kikutatását-kiaknázását lehetővé tevő „út” részletes meghatározásának is. Paradox módon a Moore törvény szerinti fejlődésprojekciók sorozata ismétlődően egyszerre biztosított bizalmat a folytathatóságban és keltett bizalmatlanságot, nyugtalanságot. Ez az ismétlődő nyugtalanság abból a félelemből fakadt, hogy mind a műszaki megvalósíthatóság, mind a gyártásköltség további kezelhetősége helyett fordított tendencia lép fel, mint alapvető akadály. E félelem szerint a Moore törvény valamelyik határához, a „Moore-falhoz”, a „vörös téglafalhoz” való gyorsuló közeledés és annak rövid idő alatt való elérése lép szükségszerűen be a folyamat éppen előrevetített szakaszába és ideiglenesen vagy véglegesen megállítja az iparág fejlődését. Már a kezdeti szakaszban megjelent a félelem a miniaturizálás lehetséges végleges fizikai korlátjával kapcsolatban. Moore maga először még a mikron tartományban feltételezett át nem léphető akadályt. Az előrehaladó miniaturizálással pedig alapvető korlátozó tényezőként („második Moore törvényként”) megjelentek különösen a gyártásnak az exponenciálisan növekvő költségei. Az éppen adott szakaszban megjelenő, vagy hamarosan megjelenőnek feltételezett fizikai, műszaki vagy gazdasági „Moore-fal” „eltolására” törekvés a félév-százados történet során sokat változott. Egyre inkább elment abba az irányba, hogy fundamentális fizikai kutatásokat is magába foglaljon és a kezdetekhez képest nagy-

ságrendekkel komplexebb és egyre komplexebbé váló műszaki K+F megvalósítása jöjjön létre, mint az extrapoláció folytathatóságának tudás alapja.¹³

Noha a félelem a korlátoktól elkerülhetetlenül az ipárnak állandó kísérője lett, mégis az „aránytalan” nyeresési lehetőség, a siker elvárása vált döntő momentummá a várakozásokban. Az integrált áramkörök rendkívül gyors funkcionővekedése és az ezzel együtt járó relatív árcsökkenés, a termékek rendkívüli deflációs hatása a piac rendíthetetlen elvárása lett. Viszont az eredeti helyzetnek az idők folyamán lassan az ellentettje alakult ki. Olyan gyártást kellett tudni ismételt megvalósítani, amelyben még megfelelően kompenzálható volt a gyártási folyamat egésze árának az exponenciális megnövekedése az előző generációéhoz képest. A legújabb ITRS is rögzítette ezt az elvárást: „az úttérkép egyik alapvető premisszája, hogy a folytatódó elektronikai léptécsökkentés tovább fogja az egy funkcióra eső költséget csökkenteni [...] és továbbra is elősegíti az integrált áramkörök piacának növekedését” (ITRS 2011). Ebben a helyzetben egészen különösen fontossá vált a lehető legátfogóbb iparági stratégiai viszonyulás, beleértve a megszerzhető prekompetitív tudás lehető leggyorsabb és legalaposabb feltárását, koordinálását, és minden résztvevő által való hozzáférhetőségét.¹⁴

Visszatérek a korábbi történehez. Az USA drasztikusan elvesztette piaci pozícióit a memóriagyártásban a hetvenes évek végétől, s ez csak tovább romlott a nyolcvanas évek során. Brown és Linden ezt, az iparágat története során elért nyolc válság közül az elsőnek azonosítják (Brown–Linden 2009). Japánban 1976-tól már működött a már hivatkozott, az iparág egészét kiszolgáló laboratórium. Ez az USA sajátosságainak megfelelően megszervezett válasz kialakításához vezetett el az USA-ban is. Az első szervezet az SIA (Semiconductor Industry Association) lett, amelyet 1977-ben hoztak létre, mint érdekvédelmi szervezetet. Ma a hozzátartozó vállalatok az USA félvezető termék gyártásának 80%-át adják. Az SIA részt vesz az iparági politika befolyásolásában (Schaller 2004). Számos egyéb tényező mellett az is világhosszá vált a hetvenes évek végén, hogy meg kell erősíteni az iparági szintű stratégiai gondolkodást. Hosszú távú perspektívát kell kialakítani, multidiszciplináris részvétellel, s konszenzus alapú jövő tudáshoz kell eljutni. Ekkor már közismert volt, hogy a Motorola saját vállalatának rendszeresen technológiai úttérképeket készít, hogy felkészülten reagáljon a műszaki változás felgyorsult ütemére, a megrövidülő termék ciklusokra, a növekvő technológiai komplexitásra, a globális piac válto-

¹³ Fel kell hívni a figyelmet arra, hogy mind az egyes periódusokat jellemző mind a véglegesnek gondolt műszaki vagy gazdasági falak feltételezése maga is mindig gondolati konstrukció, ami számos hallgatólagos előfeltételezést tartalmaz. Ezek a konstrukciók, ügyes innovációkkal sok esetben bizonyultak meghaladhatóknak, éppen azért, mert a hallgatólagos előfeltételezések szigorúbb vizsgálat alapján érvénytelennek, az adott falak egy ideig „eltolhatóknak” bizonyultak, mert például a mérnökök új fejlesztési utakat ismertek fel (Henderson 1994).

¹⁴ A komplexitás állandó növekedése kihívásának is megfelelően az egymás után következő iparági műszaki úttérképek az egész iparágra jellemző viszonyoknak az egyes részterületekkel, illetve a környezettel, a beszállítókkal, a felhasználókkal trendjeivel és elvárásaival való összhangját biztosítani képes műszaki tudást igyekeznek megfogalmazni.

zásaira, az eszkalálódó beruházási költségekre. 5-10 évre előre termék majd technológiai előrelátást végeztek el és harmonizálták a két előrelátást. Megtanulták, hogy az úttérkép a jövő anticipálásának elengedhetetlen eszköze és csak iteratív folyamatban fejleszthető (Willyard–McClees 1987). Levonták a tanulságot, hogy a vállalaton belül szervezeti változásokat is kell létrehozni, hogy adaptálódni tudjanak a változások üteméhez és a technológiai jövő tervezése a vállalati tervezés más területekkel egyenrangú része lett. Az SIA létrehozta az első iparági kutatási konzorciumot az USA-ban és egy programot, amelyik az első kormányzati kutatási program volt, amit a szilíciumra, mint alapanyagra alapoztak.

1987-ben hozták létre a SEMATECH (Semiconductor Manufacturing Technology) konzorciumot. A lassan már majd két évtizede nemzetközi konzorciummá fejlődött SEMATECH tagjai ma a világ félvezető termelésének kb. 50%-át adják. A SEMATECH fő feladata lett a gyártási problémákat érintő prekompetitív kutatási területek támogatása és koordinálása széleskörű hálózati együttműködés megvalósításával (Schaller 2004). Kezdeményezésére létrehozták először az NTRS-ek, a nemzeti technológiai úttérképek sorozatát. Az első NTRS először 1992-ben jelent meg. A kilencvenes évek elejére az USA visszaszerezte piaci pozícióit a memóriagyártásban is. Ugyanakkor Japánban gazdasági válság volt. A technika fejlődési ütemének kényszere viszont egyre inkább megkövetelte a prekompetitív kutatásoknak a lehető legszélesebb körben való összefogását. 1997-ben elhatározták, hogy a SEMATECH globális szervezet lesz és a nemzeti úttérképek helyett globális, nemzetközi úttérképet, ITRS-t készítenek. 1999-ben jelent meg az első ITRS. Kétévenként jelenik meg egy-egy újabb. A közbenső évben az érvényes ITRS javításait jelentetik meg. Az úttérképek alapjául „a Moore törvényen megmaradás” elve szolgál. Témánk szempontjából ez azt jelenti, hogy az úttérképek a meglévő technológiák prekompetitív fejlesztési stratégiájának a lehető legrészletesebb megtervezésére koncentrálnak. De már az első, 1999-es ITRS is szisztematikusan helyet hagyott olyan hosszútávon jelentkező problémák vizsgálatára is, amelyekhez nem tudtak semmilyen megoldási ötletet. 1999-ben döntöttek úgy, hogy a kimerülő fotolitográfiai generáció helyére az EUV (extraibolyántúli) technológiát fejlesztik ki. A 2001-es úttérképtől kezdve rendszeres hely van az úttérképekben, biztosítva a harminc évig továbbfejleszhetőnek bizonyult, de kimerülő CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) digitális integrált áramkör építési technológia helyére kikutatandó „CMOS-en túli” (Beyond-CMOS), nanoelektronikai technológia kutatásának is.

Témánk, a Moore törvény illetve az úttérképek K+F-et irányító szerepe szempontjából, a nemzetközi úttérképek két témakörre bomlanak. A munkacsoportok döntő többsége (jelenleg már 16 munkacsoport van) a CMOS technológia továbbfejlesztésén dolgozik, ahol a Moore törvény érvényesítésének már viszonylag kitaposott útja van a fejlesztésben. A durván nanoelektronikának nevezhető területen viszont alapvető alapkutatói problémák is megjelennek. A két terület problémái kutatásának együttes figyelembevétele sajátos feszültséget hoz létre az úttérkép készítő

közösség munkájában mind szervezeti szempontból mind a kognitív problémákhoz viszonyulásban. A CMOS területén belüli továbbfejlesztésre stabilizálódott szakértői gárdák megoldásaik időben megtalálhatóságával és szubjektív valószínűséggel jól felbecsülhető kutatási problémákkal foglalkoznak. Ezzel szemben a „CMOS-en túli” kutatás kívülről érkező kutatók integrálását kívánja meg, ún. „igazi bizonytalanságot” magába foglaló témák vizsgálatára. Az újabb ITRS-ek négy területre felosztott kutatási témákkal foglalkoznak. Ezek közül a negyedik az ún. „vörös téglafalak” meghaladhatóságának vizsgálata. Amennyiben továbbra is elengedhetetlenül megoldandó problémáknak minősülnek, a kutatások folytatásával, az iparág fejlődésével az egyes problémák fokozatosan átkerülnek erről a negyedik területről a gyártástechnológiai konkrét problémák területére. A nemzetközi technológiai úttérkép szerkesztői egyértelműen azt hangsúlyozzák, hogy az úttérképek készítésének alapvető irányelve az, hogy éppen érvényes K+F utat mutassanak ki a Moore törvény folytató érvényességének biztosítására.

7. A Moore törvény, mint az innováció ütemének szabályozója a félvezetőiparban

Dan Hutcheson, a mikroelektronika egyik sikeres gazdasági és gazdaságpolitikai elemzője az elmúlt évtized közepén lényeges vonatkozásban hozzájárult ahhoz, hogy tisztábban lássuk a Moore-féle predikciók általános innovációelméleti jelentőségét. E rekonstrukció szerint három tényező együttes hangsúlyozása adta meg Moore extrapolációjának tartós jelentőségét egy különböző vonatkozásokban is exponenciális fejlődést mutató iparág esetében (Hutcheson 2005). Moore egyszerre szólította meg egyrészt a gyártókat, a széles értelemben értett technológusokat, másrészt a közgazdászokat és végül a fogyasztókat, s mindegyikük számára vonzó, győztes-győztes perspektívával segítette elő a konszenzusukat. A gyártók, a technológusok számára az volt döntő jelentőségű, hogy folytonos fejlesztésekre alapozva az extrapoláció szerint az integrációs szintek rendszeresen és rendkívül gyorsan növelhetőek egy széles körben elérhető gyártástechnológiával. Gyártás-gazdaságtani szempontból döntő volt a fajlagos költségcsökkenés és, hogy ez a költségelőny ugyancsak folytonosan és rendkívül gyorsan növekedni fog, ahogy egyre nagyobb és nagyobb áramköri funkciók megvalósítására kerül sor adott chipen. Ez megnyitotta az utat a széles felhasználói, fogyasztói piac felé. A fogyasztók, felhasználók számára az előrelátás megbízhatóságot sugallt és további paraméterek, pl. a sebesség vagy az áramfelvétel rendkívül gyors javulását ígérte. Moore tehát, mintegy alapvető iparági üzleti modellt alkotva meg, a minden résztvevőnek kölcsönösen előnyös kapcsolat egyre gyorsabb fejlődését vetítette előre. Hutcheson kiemeli, hogy Moore már akkor megmutatta hogyan lehet az iparágban a legígéretesebben értéket termelni, amikor a kezdeti sikerek ellenére még alapvető bizonytalanság uralkodott.

Hutcheson elegánsan foglalja össze Moore üzenetét. „A Moore törvény valódi importja az volt, hogy előrelátható üzleti modellről gondoskodott. Bizalmat nyújtott az ipar jövőjét illetően, mivel az predikálható volt. Lehetett tervezni és beruházni azon az alapon, hogy az integrációs skála évente vagy két évente mindig nőni fog. [...] Ez visszacsatolást valósított meg, hogy megerősítse (a folyamatot), mivel a mérnökök erre terveztek és fejlesztettek. [...] Ahogy Moore később mondta, a Moore törvény 'önmegvalósító jóslat' lett” (Hutcheson 2005, 20. o.). Hutcheson rekonstrukciójában Moore két törvényt tételezett fel egyszerre. Az egyik a komplexitás (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. Hutcheson kiemeli, hogy ez önmagában gazdaságtani szempontból nem lenne túlzottan érdekes, ha Moore nem mutatott volna rá egy másik összefüggés szimultán létezésére, a minimális fajlagos gyártási költség közel fordítottan arányos csökkenésére a komplexitás minden lépésének növekedésével. Eszerint:

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

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

A Moore törvény idealizált formában megfogalmazta az iparági innováció alapvető ütemét: a termelékenységet a technológiai vektor fejlesztése és kiaknázása hosszútávon megjósolható módon rendszeresen növeli meg. Ugyanakkor ennek megvalósulása követelményt állít fel a beszállítói oldallal és a felhasználói oldallal szemben is.¹⁵ Hutcheson szerint a Moore törvény nem az iparág egyre növekvő technológiai hatékonyságának az időben való ábrázolása, hanem útmutató az innovációra. „A Moore törvény szépsége abban áll, hogy megoldja azt a problémát, hogy hova illeszkedik az innováció igen tömören a három másik termelési tényezőbe” (Hutcheson 2009). 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 fejlődési ütemét jelenti (korszakonként az iparág egészére és minden egyes iparági összetevőre is ez az összefüggés megfelelően módosul, módosítandó, mint cél). Ezzel a Moore törvény azt állítja, hogy „a sürgősség válság nélküli kultúrája valósítható meg”, ahogy ezt a Nemzetközi

¹⁵ A Moore törvény által megállapított, a félvezető elemek gyártására vonatkozó ütemnek megfelelő nagyon gyors és rendkívül jelentős döntési kényszer rendszer egy korszakos esetét illetően különösen Paul Allen példájára szoktak hivatkozni, aki még jó időben meggyőzte Bill Gatest a félvezető iparéval szükségszerűen hasonló ütemet felvenni képes és kénytelen szoftverfejlesztés üzletbe való azonnali beszállásról akkor, amikor a szoftverfejlesztés egyszerre különösen fontossá vált.

Technológiai Úttérkép (ITRS) a Moore törvénnyel legszorosabb kapcsolatban álló globális úttérkép alapvető funkciójával kapcsolatban kifejezi, akkor tekinthetjük „a sürgősség válság nélküli kultúrája” megteremtését megalapozó felismerésnek Moore üzenetét, ha a teljesítmény exponenciális növekedésének és a fajlagos költség exponenciális csökkenésének kettős üzenetét állítjuk előtérbe. Ebben az, optimista iparági jövőértelmezésben a különböző „Moore falak”, már korábban említett, állandóan kísértő problémáját, mint feltehetően megoldható előfeltételezzük. (A Moore törvény és a „Moore falak” közötti viszony pesszimista értelmezésében a „Moore falak” szükségszerű fellépését és leküzdhetetlenségét, a „válságba torkolló fejlődés” vízióját hangsúlyozzuk).

Hutcheson nem lát alapvető végső gazdasági korlátot a Moore törvény érvényességének további kiterjeszhetőségével szemben. Azt az ITRS-ek által „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. „Lényegét tekintve az innováció értéke a kimeneti egységre eső költség csökkenésével mérhető, a termelékenység növekedésével.” Ezt mutatja meg Hutcheson két egyenlete. A gazdaságtani megfontoláshoz, mondja Hutcheson, Moore hozzátette a megvalósítás alapjául szolgáló technológiai vektort. „Moore sajátos mérnöki utat határozott meg a folytonos termelékenység növekedés fenntartásához.” Ez az integrált áramkörök esetében a litográfia képessége volt. A litográfiában a jobb teljesítményhez szükséges innováció tervezhetővé vált, amelynek során az innováció sajátos mérnöki vektort követhet. Így az innováció predikálhatóvá és tervezhetővé vált. A Moore törvény ebben az értelemben iparági terméktechnológiai előrelátás. 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.

8. Az iparági úttérkép megalkothatóságának előfeltételei

A tanulmány követte azt a folyamatot, amelynek során a vizsgált iparágban fokozatosan kialakult egy globális iparági innovációs közösség az iparág prekompetitív innovációs feladatainak felismerésére és megvalósítására. Az iparág jelenlegi továbbfejlődése elvezetett az úttérkép készítés új területen való kidolgozásának problémájához. Ugyanis az ezredforduló után már egyértelműen előtérbe került a

chipekbe és eszközcsomagokba beépítendő ún. nem-digitális funkciók, „több-mint-Moore” (More than Moore) funkciók rendszeres fejlesztése iparági szintű megszervezésének problémája is.¹⁶

A digitális funkcióképeség exponenciális megnövelésének és egyidejű fajlagos árcsökkenésének tendenciája ma is folytatódik és hatalmas kutatási erőfeszítéseket tesznek a további fenntarthatóságára. E tendencia mellett egy másik vonatkozásban a félvezetőipar piaca robbanásszerűen továbbfejlődött az új évezred első évtizedében. A félvezetőipar a termékeibe korábban független modulokban megvalósított, ún. nem digitális funkciókat egyre rendszeresebben épít be és például rendszereket a chipen (SoC, system on the chip) hoz létre. Ezek egyre növekvő arányt képeznek a digitális funkciók megnövelése mellett. Ezeknek az eszközöknek a gyártása egyre inkább részt vesz az exponenciálisan növekvő iparági hozamban és bővítésük egyre inkább megfelel a keresleti oldal nagyon gyorsan bővülő sokszínűségének. Azt mondhatjuk, hogy ezzel az félvezető iparág fejlődésébe alapvető kritériumként épült be, hogy a keresleti oldal sokszínűsége is alapvető kiindulópontot képezzen a kínálati mellett.

A mikroelektronikai eszközgyártás fejlesztése így két alapirányt kap. Egyrészt folytatódik a digitális funkcióképeség növelése, másrészt az iparági eszközgyártás másik főtendenciája az eszközök Több-mint-Moore jellegű diverzifikálása lesz. A Philips egyik alelnöke joggal állapította meg már 2004-ben, hogy legújabbban a mikroelektronika lehetséges alkalmazásainak vadító sokaságát fedezték fel. Ez felerősítette az innovátor dilemmájának csapdáit. Hogyan egyensúlyozzanak ugyanis az innovátorok egy új alkalmazás, ami egy még-nem-kipróbált technológián alapszik és egy előrelátható technika következő generációja iránti elköteleződés között (van Houten 2004)? Egyik megoldásként van Houten a technológiai partnerség kialakításának fontosságát hangsúlyozta. Ezt a Philips azzal is elősegíti, hogy ipari partnerekkel és fogyasztókkal megosztják hosszú távú alkalmazási és technológia vízióikat, s számos közös K+F programot indítanak. Van Houten azt hangsúlyozta már 2004-ben, hogy a problémák műszaki oldalának kezeléséhez iparági technológiai úttérképet kell megalkotni erre a területre is. Ezzel felvetődött az úttérkép készítésben már elért tudás kiterjesztésének feladata egy lényegesen eltérő területre. Az ITRS által gondozott úttérképek ugyanis csak egy feladattal, a digitális teljesítmény állandó, megfelelő ütemű növelhetőségét biztosító prekompetitív kutatás és innováció megfelelő dinamikájának felvázolásával foglalkoztak.

2008-ban pedig létrejött az EU-ban a nanoelektronikai kutatásokat összefogó, ún. CATRENE kooperáció. Ennek vezetői hasznosnak vélték, hogy először átgon-

¹⁶ Az ilyen eszközök gondoskodnak a digitális és a nem-elektronikai információk kölcsönös konverziójáról. Ez utóbbiakhoz tartoznak a hő, akusztikus, kémiai, mechanikai, optikai vagy akár biológiai információk. Az ilyen mikroelektronikai eszközök gondoskodnak arról a legkülönbözőbb alkalmazási területeken, hogy a mikroelektronikai félvezetőipar által biztosított, exponenciális tempóban növekvő memória és adatfeldolgozó képesség a lehető legjobb kihasználásra kerüljön a mobil telefonozás, az autoelektronika, az Internet alapú szolgáltatások vagy például az egészség gondozás területén.

dolják, hogy miért tudott az iparág magas szintű globális technológiai, innovációs közösséget létrehozni és sikeres úttérképeket kidolgozni a digitális funkciók fejlesztésére (Brillouet 2011). Az általános iparági technológiai úttérkép megalakíthatóságának előfeltételeit öt pontban azonosították (Brillouet 2011, 15-17. o.). Ezek részben műszaki, részben szociológiai illetve gazdasági jellemzők. Együttes fennállásuk biztosítja nézetük szerint a sikeres úttérkép alkotás feltételrendszerét. Az alábbiakban összefoglalom az általuk felállított kritériumokat:

- Találhatónak kell lenni valamilyen általános, alapvető jellemzőnek, amivel az adott technológia jellemezhető. Ennek korlátozott számú változóval kifejezhetőnek kell lennie, olyanokkal, amelyek folytonosan változnak hosszabb időn keresztül. (A „több-mint-Moore” területen nincs olyan jellemző, amivel mindenféle alkalmazás egyaránt jellemezhető lenne. A digitális félvezető területen jelenleg még például a tranzisztorsűrűség és a szilíciumlapka méretnövekedése ilyenek).
- Létezik egy sajátos koherencia. Adott technológia nagy potenciálja mellett az iparág résztvevői olyan közösségként azonosítják magukat, amelyik az adott technológiát ugyanolyan módon akarja fejleszteni. (Ez hiányozhat, ha például ugyanazt a technológiát egymással kapcsolatban nem levő piacokon hasznosítják, s így az iparág résztvevői több, kisebb, szeparált közösséget alkotnak).
- Adott iparág különböző résztvevőinek kölcsönösen az a meggyőződése, hogy közös iparági jövőkép és úttérkép kialakításával mindannyian inkább nyernek, mint vesztenek. Ezért hajlandóság alakul ki a közös tevékenységre. (Miután megegyeztek a miniatürizálásban és a szilíciumlapka méretnövelésében, mint általános célban, a félvezetőiparban ezeken az általános közös célokon belül elég hely maradt a versenyre a versenyzők saját képességeinek és kapacitásainak).
- Az iparágnak szüksége van egy olyan, elég nagy piacra, ami igazolja az erőfeszítések egyesítésének stratégiáját, az erőfeszítéseket és a forrásokat, amelyeket a közös tevékenységbe beleölnék. Ez a piac gondoskodik arról, hogy a beölt források busásan megtérüljenek. (A digitális funkciók esetében a gyártástechnológiát meghatározó alapvető technika költséghatékonysága lehetővé tette, hogy a digitális információfeldolgozás sok piacon megvalósítsa ugyanazt a trendet, megfelelően ezzel a technológiai széleskörű alkalmazhatóságának. A „több-mint-Moore” területen az adott eszköz viszonylagos sajátságosságából, speciális célra való megalkotásából származó korlátozott felhasználhatósága szembemehet ezzel a követelménnyel).
- Konvergenciának kell ismételtelen kialakulni abban a tekintetben, hogy mi lesz – mi legyen a „törvénye” a növekedésnek. A gyakorlatban explicitté kell tudni tenni az elvárt haladást, a termelékenység trend megfogalmazását, ami a folytonos haladás önmegvalósító jóslatává válhat. (A digitális funkciók esetében a közösség egységes abban, hogy valamilyen értelemben érvényes marad a Moore törvény és lehet és érdemes azt követni. Hasonló „törvényt” kell tudni

megállapítani az egyes különböző területekre a „több-mint-Moore” szférában).

Saját problémájukat, a „több-mint-Moore” területre megalkotható egységes úttérképet tekintve, a CATRENE projekt megállapítja, hogy:

- Bármekkora érdeklődés tapasztalható is iránta és bármennyire vannak is nagyon jó műszaki fejlődések, a “több-mint-Moore” világ csak akkor lehet ugyanolyan sikeres, mint a digitális mikroelektronika, ha képes lesz úttérképet kialakítani. A CATRENE projekt megállapítja azt is, hogy jelenleg
- nem lehet egy egységes úttérképet, hanem csak az egyes alkalmazási területeknek megfelelőeket elkészíteni. Hat területen megvizsgálták, hogy milyen elengedhetetlen feltételei és konkrét sajátosságai vannak meg a „több-mint-Moore” úttérképek elkészíthetőségének. Rámutatnak, hogy ezeknél is szükség lenne az úttérképek előnyeinek kihasználására, az egyes alkalmazásoknak megfelelő megalkotásukra és egyesítésükre a digitális elektronika úttérképeivel. Meggyőződésük szerint a mikroelektronikai úttérkép készítés egyik következő feladata, ilyen, diverzifikált úttérképek elkészítése és összhangba hozásuk a digitális teljesítmény növeléséhez szükséges feladatokat rögzítő úttérképpel. Megállapítják azt is, hogy az általuk megvizsgált egyes területeken lehetségesnek tűnik ilyen úttérképek kidolgozása, máshol viszont több esetben hiányzik jelenleg az úttérkép készítés felsorolt öt kritériumának legalább valamelyike, például általános alapvető jellemző, elég nagy piac vagy készség a tudás megosztására.

Egy-egy megjegyzés erejéig három kérdéskörre jut még hely ebben a fejezetben. Egyrészt a tanulmányban korábban utalás történt arra, hogy a mikroelektronikában, egy koncentrikus körökben bővülő műszaki-gazdasági ökoszisztémaként exponenciálisan bővülő önfenntartó rendszer jött létre a hatvanas és stabilizálódott a hetvenes években. Ennek motorja az egy összefüggésre koncentrálás, az egyidejű exponenciális digitális teljesítménynövekedés és fajlagos előállítási költségcsökkenés tartós elérése volt. A funkciók diverzifikálódásával viszont számos új virtuális körökben mozgás jött létre. Ezekben a mozgatóerőt az egyre kiszélesedő, diverzifikálódó működések adják. A növekvő változatosságú működések megvalósulása sokszor csökkenő fajlagos előállítási költséggel is jár, de ez a csökkenés az exponenciálistól eltérő lehet. A mikroelektronika belátható jövőjében a – valószínűleg gyökeresen új technológiai paradigmákkal elérhető, folytatódó, fajlagos előállítási költségcsökkenéssel megvalósuló – digitális teljesítménynövekedés körül, azzal állandó kölcsönhatásban kialakuló és újratermelődő virtuális körökben megvalósuló, egyre újabb teljesítmény diverzifikációkat biztosító számos új, sajátos technológiai paradigma jön létre. Szemben a tömegtermelést kiszolgáló első történeti szakasszal ez a rendszer valószínűleg egyre inkább képes lesz a legváltozatosabb társadalmi szükségletek kiszolgálására és gerjesztésére is.

A második megjegyzés arra vonatkozik, hogy azért vált predikálhatóvá a mikroelektronikai alkatrészipar fejlődése több mint ötven évig, mert:

- bizonyos mértékig elvonatkoztatott a piac és a társadalom igényeinek ki nem számítható fejlődése bizonytalanságaitól. (Bár a ténylegesen megvalósuló Moore törvény időszakos módosulásaiban a piaci kereslet megismétlődő fluktuációinak módosító hatása is tükröződik a műszaki fejlesztésben létrejött késések és további tényezők mellett).
- Másrészt, mivel az iparág rátalált egy egészen különös sebességű tartós növekedést lehetővé tevő, mindenütt alkalmazhatóságra találó technológiai vektorra, az iparág tartósan rendkívüli gyorsaságú fejlődéséhez elégséges volt, hogy egyfajta tömegtermelést valósítson meg, hiszen ez is tartósan képes volt minden növekedéséhez megtalálni a megfelelő nagyságú piacot. Jövőkutatási hozadékát tekintve ebben a szakaszban az extrapoláció, az előrejelzés (forecasting) alkalmas eszköznek bizonyult a dinamika megfelelő vezérlésére.
- Ezzel szemben a mikroelektronikai eszközök iránti szükségletek mai gyors diverzifikálódása egy sokkal bonyolultabb helyzetben jön létre. Ebben a helyzetben a diverzifikációt is hasonló sikerrel megválaszolni kívánó iparági stratégiának körkörösén kell mozognia. Ahogy a CATRENE projekt sugallja, meg kell próbálnia feltérképezni a diverzifikáció iránti jelenlegi társadalmi és gazdasági szükségleteket, illetve a jelenlegi technológiai potenciálokat, majd ezekből kiindulva mindezen vonatkozásokban scenáriókat kell megalkotnia a lehetséges jövőknél a lehető legteljesebb feltérképezésére. Ezek alapján arra kell törekednie, hogy olyan technológiák és termékek kifejlesztésére koncentráljon, amelyek lehetőleg sok scenárióban mutatkoznak felhasználhatónak. Jövőkutatási hozadékát tekintve az új szakaszban a lehető legalaposabb scenárióképzés, az előretekintés (foresight) elengedhetetlenné válik. Viszont alapvető metodológiai problémákat hoz létre ennek szükségszerű valamilyen egyesítése a digitális funkciók folytatódó javításával foglalkozó úttérképpel.

Végül csak egészen röviden térek ki arra, hogy Hutcheson helyesen rámutatott arra, hogy a Moore törvény alapján általánosítva egy iparág termelékenységének görbéje megadja az innováció alapvető ütemezését. De ez az általánosítás eléggé korlátos érvényességűnek bizonyulhat. Ugyanis egy, nem egy termék fejlesztésére koncentrálnó iparág termelékenységének dinamikáját sokkal összetettebb módon lehet csak megfelelően kifejezni, amint ezt a mikroelektronikai diverzifikáció első elemzése is elég egyértelműen megmutatja (az idők múlásával fellépett elbizonytalanodás a Moore törvény megfelelő kifejezése tekintetében jelezte már egy, termékeit azért csak-csak diverzifikáló iparági fejlődésben a diverzifikációnak a fogalomalkotásra való megkerülhetetlen hatását). A feladat az új környezetben sokkal összetettebb, mint a régi volt, de mind az iparági prekompetitív innováció általánosítható modelljének keresése a mikroelektronikában, mind ennek alapján más iparág problémáinak megvilágítása a lehető legfontosabb feladat marad.

9. Összefoglalás

Egy rendkívül agresszív dinamikával fejlődő, egészen különlegesen komplexé vált iparág már története korai fázisában megkísérelte egy összefüggéssel kifejezni a követendő, gazdaságilag is optimális termékfejlesztési dinamikáját. Ez az összefüggés egyrészt újra meg újra módosult, hogy megfeleljen a megváltozó történeti viszonyoknak, másrészt megőrizte alapvető „hajtóerő” szerepét. Az iparági dinamika alapvető technológiai orientációja, a miniatürizálás lehetővé tette az iparág exponenciális termelékenység növelési tendenciájának nagyon hosszú ideig fenntartható és még ma is folytatódó megvalósulását. E tendencia elvárás és a legalapvetőbb maxima lett az iparágon belül és az iparággal szemben is. Ehhez ma már akkor is igazítania kell a kutatási és fejlesztési tevékenységét, ha ez már nagyon nehezen nevezhető pusztán a megtalált technológiai paradigmákban megvalósuló kiaknázásoknak a megkívánt ütemben való megvalósításának. Egyrészt folytatódik a digitális kapacitás egészen új módokon való további megfelelő ütemű megnövelhetőségének keresése. Másrészt az iparág a termékek diverzifikációja felé fordul. A termékdiverzifikáció a kínálatorientált fejlődés átstrukturálódását kívánja meg, a társadalmi kihívásokból és a (lehetséges) gazdasági keresletből kiinduló termékfejlesztési igények harmonizálását a gyors ütemben továbbfejlődő kínálati oldallal.

A tanulmánynak alapvető általánosító megállapításai vannak a közgazdaságtan és a menedzsmenttudomány számára:

- Az iparági innováció lehető legjobb megszervezésének feladata talán szükség-szerűen elvezet az iparági prekompetitív technológiai és innovációs közösség kialakulásához és fenntartásához. Ez a közösség gondoskodik a prekompetitív iparági innováció megszervezéséről.
- A prekompetitív iparági innováció megszervezése mindenekelőtt a kiaknázandó technológiai paradigma (paradigmák) megtalálását és alapvető sajátosságainak tisztázását követeli meg. Ennek, ezeknek a „kiaknázása” adja meg az iparág alapvető műszaki jellemzőjét.
- A mikroelektronikai félvezetőipar esetében a dinamikának egy rendkívüli, az „önmagában tekintett technológiát”, a műszaki „oldalt” és a gazdaságtani és menedzsment „oldalt” lényegileg összekötő sajátossága van. Ez az ebben az iparágban lehetséges sajátos miniatürizálás kettős, műszaki és gazdasági hatása. Alapvető sajátosságait Moore két, 1965-ös felismerése írja le. Ez a különleges miniatürizálási potenciál különleges „hajtóerőt” jelent(ett) az iparág fejlesztésére. Moore felismeréseinek szakaszonként megismételt extrapolációja és az új szakaszok jellemzőinek megfelelő rugalmas átalakítása és ennek érvényesítése a megfelelő erőfeszítéssel megadja azt az alapvető „törvényt”, ami kijelöli és biztosítja az iparág műszakilag és gazdaságilag optimális dinamikáját. Ez az alapvető „törvény” egy műszaki funkció folytonos fejlesztésének lehetőségét írja le és előíró jelleget kap az iparág fejlesztési stratégiájában.

- Az iparág termelékenységének jellege írja elő az innováció legmegfelelőbb ütemezését. Iparági technológiai úttérkép elkészítése és ismételt megújítása a lehető legátfogóbb innovációs tudásbázis kialakítását és megújítását biztosítja, és alapvetően elősegíti a technológiai paradigma/technológiai vektor „kiaknázását”, de a paradigma határán való, „ideje korán” végzett kutatást és innovációt is.
- A mikroelektronikai félvezetőipar megtanulta a globális iparági úttérkép elkészítésének a módját és a periodikusan megújított úttérképet fő szakpolitikai segédeszközzé tette. Az úttérkép készítés feladata lényegesen megváltozik, a szcenárióalkotás elkerülhetlenné válik, ha az iparág széleskörű termékdiverzifikációba kezd. Az úttérkép készítés sürgető szükséglet marad, noha egyes esetekben az úttérkép készítés feltételeinek nem mindegyike áll rendelkezésre. Ezekben az esetekben az iparpolitikának lépéseket kell tenni a hiányzó feltételek megteremtődésének elősegítésére, vagy más tervezési utakat kell megkeresnie.
- A mikroelektronikai félvezetőiparban elért innovációs szervezés mintát jelent más iparágak számára is. Analogikus alkalmazása döntő jelentőségű más iparágak esetében is. Ennek az alkalmazásnak egyrészt elkerülhetetlenül kell magában foglalni az elvonatkoztatást, a minden iparágra formálisan érvényes általános „elméleti” kidolgozására törekvést. Másrészt mindig el kell végezni azt az elemzést, amelyik megkísérli kimutatni azokat az alapvető „negatív analógiákat” az összehasonlított konkrét iparágak között, amelyek korlátot szabnak a mikroelektronika alapján elméleti általánosság szintjére emelt tanultak érvényesítésének a másik iparágban.

Felhasznált irodalom

- Albright, R. (2003): *Roadmapping Convergence*. Albright Strategy Group.
- Barnett, M. L. – Starbuck, W. H. – Pant, P. N. (2002): Which dreams come true? Endogeneity, industrial structure and forecasting accuracy. *Industrial and Corporate Change*, 12, 4, pp. 653-672.
- 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, MA.
- Dosi, G. (1982): Technological paradigms and technological trajectories, A suggested interpretation of the determinants and directions of technological change. *Research Policy*, 11, 3, pp. 147-162.
- Flamm, K. (1996): *Mismanaged Trade: Strategic Policy and the Semiconductor Industry*. The Brookings Institution, Washington.
- Giddens, A. (1984): *The Constitution of Society*. Polity Press, Cambridge.

- Henderson, R. (1994): *Of Life of The Unexpectedly Cycles Real and Imaginary: Long Old Age of Optical Lithography*. M.I.T.WP 3661-94.
- Hronszky I. (2012): Expectations and visions in industrial practice. On the case of modern biopharmaceutics. *Science, Technology and Innovation Studies*, June.
- Hronszky I. (2014): Technological Paradigm Conceptions in the 80s. In Bour, P. E. et al. (eds): *Logic, Methodology and Philosophy of Science: Proceedings of the Thirtieth International Congress*. Kézirat, várható megjelenése 2014-ben.
- Hutcheson, D. G. (2005): The Economic Implications of Moore's Law. In Huff H. R. – Gilmer, D. G. (eds): *High Dielectric Constant Materials*. Springer Series in Advanced Microelectronics, V, 16, NY.
- Hutcheson, D. G. (2006): Forty Years of Moore's Law: Ever smaller transistors and ever larger wafers. *ECS Trans*, 2, 2, pp. 3-9.
- Hutcheson, D. G. (2009): *Innovation Economics: Why Moore's Law is about more than semiconductors*. WeSRCH.com 7/20.
- Intel (2000): <http://www.intel.com/research/silicon/mooreslaw.htm>
- Intel (2002): *Expanding Moore's Law: The exponential opportunity*. Publication TL_001. Intel Corporation: Santa Clara, CA.
- ITRS (1999): Edition: <http://www.itrs.net/Links/2009ITRS/Home1999.htm>
- ITRS (2009) Edition: <http://www.itrs.net/Links/2009ITRS/Home2009.htm>
- ITRS (2011) Edition: <http://www.itrs.net/Links/2009ITRS/Home2011.htm>
- Isaac, R. (1997): Viewpoint: Beyond Silicon...And Back Again. *IEEE Spectrum*, 34. 1. p. 58.
- Knowles, H. C. (1964): Research and Development in Integrated Circuits. *IEEE Spectrum*, 6, 1, pp. 76-79
- Korcynski, E. (1997): Moore's Law Extended: The Return of Cleverness (interview with Gordon Moore). *Solid State Technology*, 40, 7, p. 364.
- Kuhn, T. S. (1962): *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago University Press, Chicago.
- Lécuyer, C. – Brock, D. (2010): *Makers of the Mikrochip*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Mack, C. (2003): The end of the semiconductor industry as we know it. *Proceedings of Optical MicroLithography*, 16, 5044, pp. 16-31.
- Mack, C. (2011): Fifty years of Moore's Law. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 24, 2, pp. 202-207.
- MacKenzie, D. (1996): *Knowing Machines*. MIT Press, Cambridge/Mass.
- Malerba, F. (ed.) (2004): *Sectoral Systems of Innovation: Concepts, Issues and Analyses of Six Major Sectors in Europe*. Cambridge University Press, Cambridge, MA.
- Moore, G. E. (1965): Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38, 8.
- Moore, G. E. (1975): *Progress In Digital Integrated Electronics*. IEDM Technical Digest.
- Moore, G. E. (1995): Lithography and the Future of Moore's Law. *Proceedings of SPIE*, 5, p. 2437.
- Moore, G. E. (1996a): *Moore's_Law_An_Intel_Perspective.pdf*
- Moore, G. E. (1996b): 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): *Scientific American*, September.

- Müller-Seitz, G. – Sydow, J. (2012): Maneuvering between networks to lead – A longitudinal case study in the semiconductor Industry. *Long Range Planning*, 45, 2-3, pp. 105-135.
- Phaal R. et al. (2004): Technology roadmapping – A planning framework for evolution and revolution. *Technological Forecasting & Social Change*, 71, pp. 5-26.
- Phaal, R. (2011): *Public-Domain Roadmaps*.
http://www.ifm.eng.cam.ac.uk/ctm/trm/documents/public_domain_roadmaps.pdf
- Radnor, M. – Probert, D. (2004): Viewing the Future. *Research Technology Management*, 47, Mar/Apr.
- Rip, A. – Talma, S. (1998): Antagonistic patterns and new technologies. In Disco, C. – van den Meulen, B. (eds): *Getting new technologies together*. De Gruyter, Berlin, pp. 299-321.
- Rip, A. (2011): *Futures of Science and Technology in Society*. University of Twente, Twente.
- Sakakibara, K. (1983): *From imitation to innovation, the Very Large Scale Integration (VLSI) semiconductor project*. MIT Library.
- 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.
- Schulz, S. (1999): New ITRS Roadmap Portends Massive Design Changes Ahead. *ISD Magazine*, December.
- Tuomi, I. (2002): The Lives and Death of Moore's Law. *First Monday*, 7, 11, November.
- Tuomi, I. (2003): Kurzweil, Moore, and Accelerating Change. *Working paper*, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies.
- van Houten, H. (2004): Addressing Soaring Complexity. *Materials Today*, Nov, p. 72.
- van Lente, H. (1993): *Promising Technology: The Dynamics of Expectations in Technological Developments*. Twente University, Enschede.
- van Lente, H. – Rip, A. (1998): Expectations in technological developments: an example of prospective structures to be filled in by agency. In Disco, C. – van der Meulen, B. (eds): *Getting New Technologies Together. Studies in Making Sociotechnical Order*. De Gruyter, Berlin, pp. 209-229.
- Willyard, C.– McClees, C. (1987): Motorola's Technology Roadmap Process. *Research Management*, Sep-Oct, pp. 13-19.