

HÍRADÁSTECHNIKA

A galliumarzenid alapú mikroelektronika perspektívái*

DR. SZÉP IVÁN
MTA Műszaki Fizikai
Kutató Intézet

A mikroelektronika — mint szakmai kifejezés — alig húszéves múltra tekinthet vissza, de ezalatt máris mélyreható fogalmi és tartalmi változásokon ment keresztül. E változások visszavezethetők az alkatrészeket felhasználó ipar igényei és az alkatrészek előállítási technológiájának mindenkorai lehetőségei között fennálló szoros kölcsönhatásra, amely a technikai haladást ösztönözve mind a technológiában, mind az elektronikai áramkörök, berendezések, készülékek konstrukciójában, architektúrájában rövid idő alatt hihetetlen átalakulást idézett elő. E változásokat előre látni nem volt könnyű, a mikroelektronika különböző technológiai megoldásai többnyire nem „vagy-vagy” alapon, hanem gyakran két megoldás szintézisével vezettek korszerűbb, nagyobb bonyolultsági fokú alkatrészekhez. Így pl. az eredetileg szigetelő hordozóra diszkrét alkatrészeket összeépítő vastag- és vékonyréteg-technika azáltal tudott lépést tartani az igényekkel, hogy egyes tranzisztorok és diódák helyett félvezető integrált áramkörök kristályelemeit ülteti rá a szigetelő hordozóra. A szokásos RC- és aktív elemek mellett új funkciók is megjelentek mikroelektronikai alkatrészek formájában, pl. mágneses vagy optikai elven működő elemek. A fémes vezetékek, kábelek mellett megjelent az üvegszál és a fény mint információátviteli, ill. -hordozó közeg. E műszaki fejlődést kétségkívül stimulálták a természettudományos, elsősorban a szilárdtest-kutatások új eredményei, amelyek az elektronika eszköztárának bővítését tették lehetővé. A fejlődés mozgatórugói között gyakran találunk olyasmit, amit a „meglevővel való elégedetlenségnek” lehet nevezni. Ez vonatkozhat mind a berendezések, készülékek teljesítőképességére, mind az alkatrészek technológiai okokra visszavezethető tökéletlenségére. Időnként elértünk egy teljesítőképesség határára, egy adott technológia korlátaihoz. A műszaki kutatásban, fejlesztésben dolgozó szakemberek számára ilyenkor következik be a „nagy áttörés” lehetősége, amikor új megoldásokkal, új elképzelésekkel tovább kell lendíteniük a ha-

ladás megakadt kerekét. Ennek illusztrálására az 1. táblázatban a mikroelektronika fejlődését alapvetően meghatározó germánium és szilícium eszközök kialakulásának legfontosabb állomásait, az azokat létrehozó technológiai változásokat foglaltam össze.

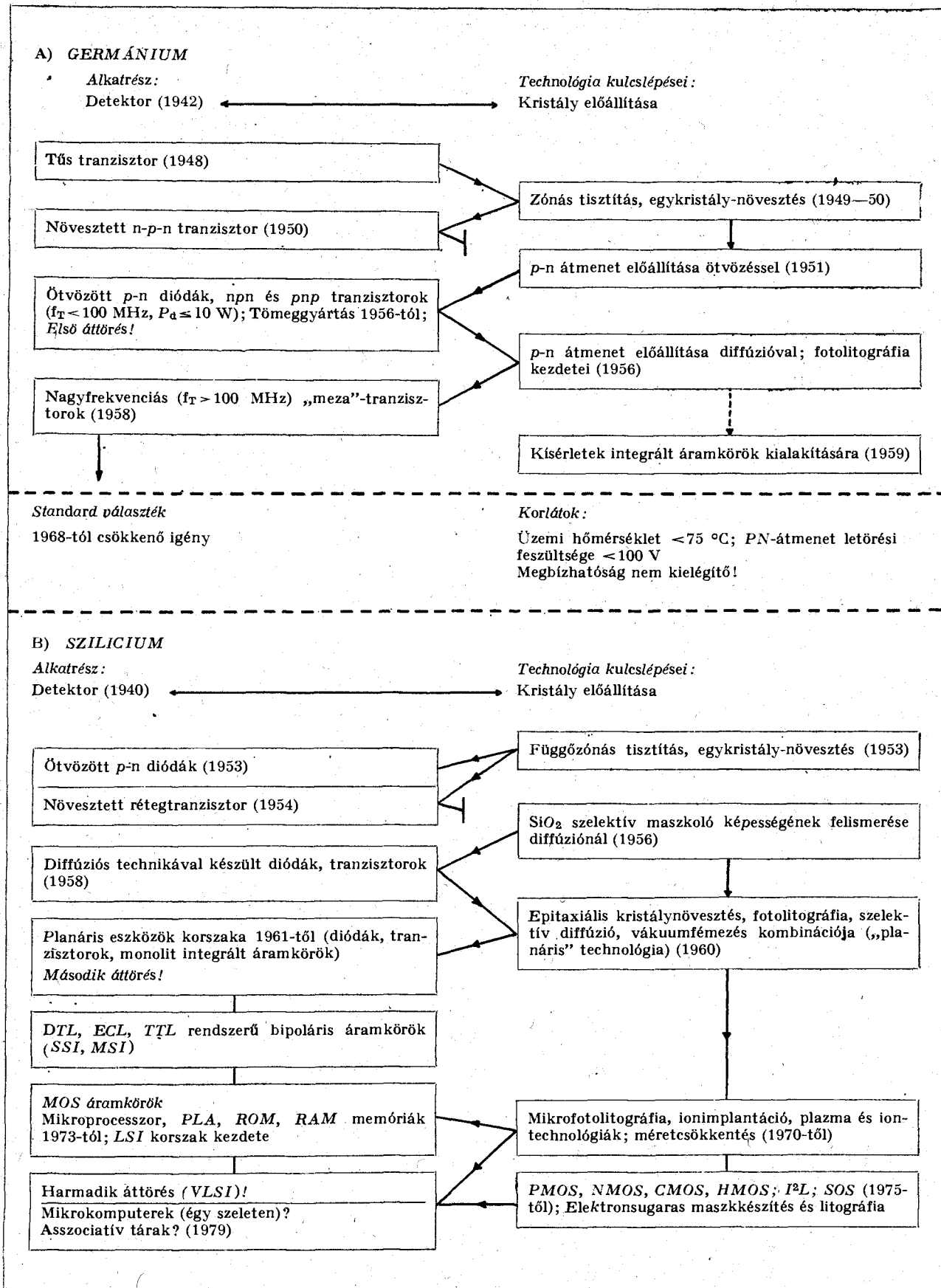
Az összeállításból látható, hogy a technológia egy-egy lényeges előrelépése milyen meghatározóan befolyásolta a félvezető eszközök minőségi és konstrukciós fejlődését, de úgy is felfogható, hogy a felhasználói igények növekedése (pl. magasabb működési frekvenciájú eszközök iránt) sarkallta az alkatrészfelvezetőket a minőségi igényt teljesítő, ugyanakkor termelékenyebb technológiák kialakítására. A készülékgyártók oldaláról érkező impulzusok új alkatrészekonstrukciók megfogalmazásához vezettek, és provokálták új technológiai megoldások keresését. A félvezető eszközök nagyobb termikus és elektromos terhelhetőségének igénye fordította a figyelmet a germániumról a szilíciumra, a korszakváltást azonban különleges technológiai eljárások; elsősorban az ún. „planáris” technológia döntő mértékben felgyorsították. A szilícium nemcsak helyettesíteni tudta a germániumot, hanem minőségileg új eszközök valóra váltását tette lehetővé. A monolitikus integrált áramkörök megjelenése a mikroelektronika fejlődésének kiemelkedő jelentőségű eseménye lett, amely nemcsak egész ipari struktúránkat, gazdasági és vezetési módszereinket formálja át, hanem egész életmódunkat is mélyrehatóan befolyásolni fogja.

A jelenlegi mikroelektronikában a szilícium alapú eszközök olyan döntő fölényre tettek szert, az alkalmazott tömegtechnológiai eljárásokban még annyi tartalom van, hogy szinte lehetetlennek tűnik egy, a germánium és szilícium között végbementhez hasonló alapanyag-korszakváltás. Minden bizonnyal a legközelebbi 10 évben ilyen nem várható.

A szilícium alapú integrált áramkörök fölénye a technológia- és a konstrukcióelmélet olyan tényezőin alapul, mint a fotolitográfiai módszerek állandó finomítása — jelenleg optikai módszerekkel $1\ \mu\text{m}$ körüli vonalfelbontások érhetők el —, a gyártási eljárások folyamatos tökéletesítése, a szerkezeti hibáktól szinte teljesen mentes, nagy átmérőjű szil-

* Rövidítve elhangzott az 1979. évi Alkatrész Konferencián (Szombathely, 1979. szept. 24—26.)
Beérkezett: 1979. X. 15.

A germánium és a szilícium alapú elektronikai alkatrészek fejlődésének lépései



cium alapanyag gyártási módszerének kifejlesztése és — nem kis mértékben — a logikai, ill. analóg funkciók végzésére használt aktív elemcsoportok nagy változatossága (n-p-n bipoláris, p-n-p bipoláris, PMOS, NMOS, I²L, CMOS, MNOS stb.).

A fejlődés ilyen hajszolt üteme mellett az elmúlt 20 évben kevés figyelmet fordítottak a szilícium-alapú elemekben hasznosított fizikai elvek teljesítő-képességének és korlátainak vizsgálatára. Ha szemügyre vesszük a ma ismert félvezető anyagok legfontosabb fizikai tulajdonságait (2. táblázat), ame-

lyek a belőlük készíthető mikroelektronikai eszközök paramétereit meghatározzák, észre kell vennünk, hogy a szilícium nem mindegyik fizikai adata kiemelkedő, más félvezető anyagok több adatukkal jelentősen felülmúlják. Más szóval, a szilícium nem „univerzális” félvezető anyag, ami persze nem azt jelenti, hogy jelenleg nem a legfontosabb. Az egyik-másik vonatkozásban előnyösebb adatokkal rendelkező félvezetőkből viszont kedvezőbb tulajdonságú eszközök készíthetők arra a célra, ahol ezeknek a paramétereknek van kulcsszerepe.

2. táblázat

Félvezető anyagok tulajdonságai

Tulajdonságok	Si	Ge	GaAs	GaP	InP	InAs
Tiltott energiasáv szélessége, eV (300 °C)	1,1	0,67	1,43	2,24	1,32	0,36
Rel. dielektromos állandó	11,8	16	12	10	12,1	12,5
Töltéshordozók mozgékonyága (cm ² /V·s)						
elektronok	1500	3900	8500	300	4800	33 000
lyukak	600	1900	400	150	150	450
Opt. törésmutató	3,44	4,00	3,4	3,37	3,37	3,42
Hővezetőképesség (W/cm·fok)	1,41	0,61	0,45	0,77	0,68	0,27
Elektronok határsebessége (cm·sec)	1·10 ⁷	5·10 ⁶	1,7·10 ⁷	?	2·5·10 ⁷	?
Kritikus télerősség (V/cm·x10 ⁴)	20	10	4	?	12	?

A félvezető fizika az utóbbi években számos olyan új effektust, struktúrát fedezett fel, amelyek alkalmasak meghatározott elektronikai funkciók ellátására. Bizonyosnak látszik, hogy az elektronika további fejlődésében információközvetítés céljaira jelentős szerepet fog játszani a különböző hullámhosszúságú fénysugárzás. A szilícium nem használható olyan eszközök készítésére, amelyek szélesebb tartományban kellő intenzitású fényt emittálnak, a belőle készíthető fényérzékelő detektorok érzékenysége és működési spektruma is korlátozott. Az 1–100 GHz frekvenciatartomány a modern hírközlés számára fontos, erre a célra a szilíciumból készíthető eszközök lassúak, viszont kedvezőek a nagy elektronmozgékonyossággal rendelkező anyagok, mint a galliumarzenid, az indiumfoszfid. A 2. táblázatban megtalálhatók a ma ismert és megvizsgált legfontosabb félvezető anyagok mikroelektronikai szempontból lényeges adatai. Az A^mB^v csoportba tartozó több félvezető tulajdonságai mind az igen nagy működési sebességű eszközök, mind a fény kibocsátására, érzékelésre, modulálására képes ún. optoelektronikai elemek szempontjából előnyösek.

Az adatok közül hasonlítsuk össze a töltéshordozók mozgékonyágát. A bipoláris áramvezetési mechanizmussal működő tranzisztorok működési sebességére jellemző határfrekvencia kifejezéséből levezethető egy csak anyagi paramétereket tartalmazó M_T jósági tényező:

$$M_T \sim \frac{\mu_n \mu_p}{\sqrt{\varepsilon}}$$

ahol μ_n , μ_p a vonatkozó mozgékonyágok, ε a dielektromos állandó. Látható, hogy a nagy elektron-

mozgékonyág ellenére nincs lényeges különbség M_T értékében pl. a Ge és a GaAs között, utóbbinak lényegesen kisebb lyukmozgékonyága miatt.

Nagyobb különbség mutatkozik a térrel vezérelt unipoláris tranzisztoroknál. A töltéshordozó mozgékonyág szerepel pl. a meredekség és a határfrekvencia kifejezésekben:

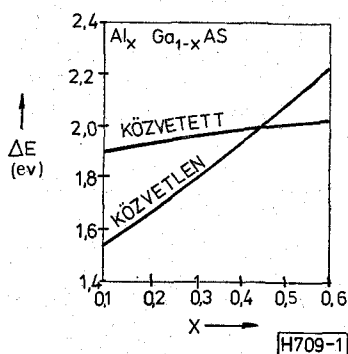
$$g_m = \frac{2\mu\varepsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} V_{DS}; \quad f_{lim} = \frac{\mu E_{kr}}{2\pi L}$$

μ = mozgékonyág, t_{ox} = oxid vastagsága, ε_{ox} = oxid dielektromos állandója, W = csatorna szélessége, L = csatorna hossza, V_{DS} = drain-source-feszültség, E_{kr} = kritikus télerősség.

Nyilvánvaló, hogy ilyen struktúrájú tranzisztorokból álló integrált áramkörök működési sebessége sokkal nagyobb lehet, ha nagyobb mozgékonyágú félvezetőkből készülnek (MIS-, Schottky-rendszerek).

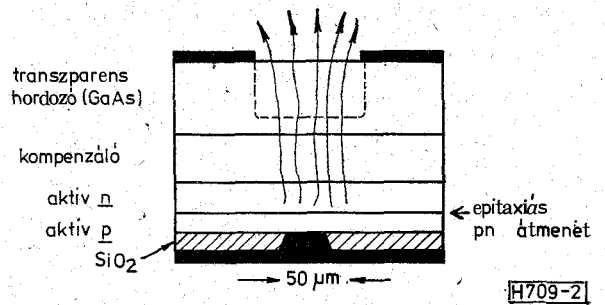
Az A^mB^v anyagok egy csoportjának leglényesebb tulajdonsága, hogy bennük a p-n átmenettel beinjektált kisebbségi töltéshordozók a távoli infravöröstől a zöldig terjedő fénysugárzás kibocsátásával rekombinálnak. Ez a fényemisszió az alapja a közismert „világító diódáknak” (LED), megfelelő belső reflexióval bíró több réteges struktúrákban pedig a lézerdiodáknak. A fényemisszió színe több tényezőtől függ, de domináns a vezetési és a vegyértéksávot elválasztó „tiltott” sáv szélessége. Mint a 2. táblázatból látható, az A^mB^v anyagokban a töltéshordozók rekombinációja nagyobb energiafel szabadulással járhat, mint az elemi félvezetőknél. Hogy ennek az energiának hányad része jelenik meg közvetlen sugárzás formájában, függ a rekombináció mechanizmusától. A legkedvezőbb a helyzet

azoknál a félvezetőknél, ahol a vezetési sáv és a vegyértéksáv között közvetlen rekombináció lehetséges. Ilyen a felsoroltak közül a $GaAs$, $InAs$ és az InP . A $GaAs$ -nál az 1.43 eV energiakülönbség $0.8\text{--}0.9\ \mu\text{m}$ közötti sugárzásnak felel meg. Az elektronok közvetlen rekombinációja azonban nem mindig lehetséges. A rácsot alkotó atomok egymást átfedő elektronhéjai olyan energiasáv-szerkezetet is eredményezhetnek, ahol a tiltott sáv energiaértékének megfelelő rekombinációs sugárzás csak kis hatásokkal keletkezik, a nagyobbik rész fononok, azaz rácsrezgések alakjában emésztődik fel, tehát legfeljebb melegítést termel. Ilyen ún. közvetett elektronátmenetek észlelhetők a galliumfoszfidnál, de ez az oka annak is, hogy a szilícium és a germánium nem alkalmasak jó hatásfokú fényemittáló eszközök előállítására. Igen fontos tulajdonsága az $A^{III}B^V$ félvezetőknél, hogy rekombinációs mechanizmusuk megfelelő adalékok segítségével, ezen túlmenően



1. ábra. Elektronátmenetek az $Al_xGa_{1-x}As$ -rendszerben az összetétel függvényében

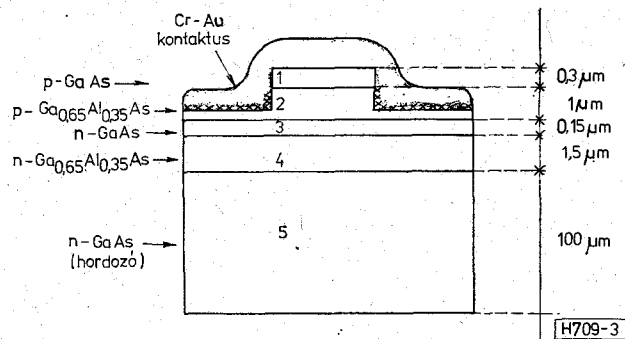
tiltott sáv szélességük és az elektronátmenet jellege egymással való elegyítéssel változtatható. Ez teszi lehetővé különböző spektrális színű sugárzások létrehozását ugyanabból az alapanyagból, és ilyen módon tudjuk a közvetett elektronátmenet mechanizmusát közvetlen átmenetre módosítani. A közvetett átmenetet mutató galliumfoszfid nitrogén beépülése következtében zöld, cink- és oxigénkomplexum beépülése után vörös rekombinációs sugárzást tud kibocsátani. Rendkívül érdekes a galliumarzenidből és az alumíniumarzenidből álló rendszer. Előbbiben közvetlen, utóbbiban közvetett az elektronátmenet. Mint az 1. ábrán látható, az $Al_xGa_{1-x}As$ kettős rendszer $0.3 \leq x \leq 0.5$ összetételig növekvő tiltott sáv szélességet mutat, megtartva a közvetlen rekombináció mechanizmusát. Ennek folytán a $GaAs$ -nek eredetileg az infravörös tartományba eső sugárzása a látható vörös tartományba tolódik el. További értékes tulajdonsága e rendszernek, hogy két alkotójának majdnem azonos a rácsállandója és hőtágulási tényezője. Ezzel a „sávillesztési” eljárással tehát egészen finoman lehet szabályozni a kibocsátott fény színét. Igen fontos tulajdonság, hogy a különböző összetételű $GaAs-As$ -rendszereknek eltérő az optikai törésmutatója, és ez teszi lehetővé koherens sugárzás keltését a totális reflexió elvét megvalósító réteges szerkezetű lézerdiodákban. A 2. ábrán egy több réteges intenzív sugárzó világító dió-



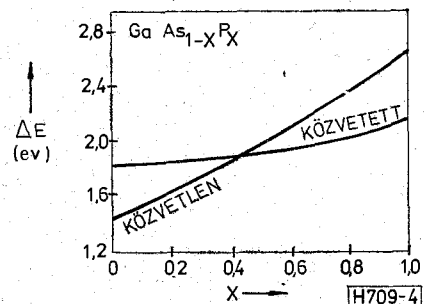
2. ábra. Intenzív sugárzó ($\lambda > 1\ \mu\text{m}$) többregezes világító dióda (LED) metszete. Az aktív p, n és a kompenzáció rétegek alapanyaga $InGaAs$

da szerkezeti metszetét tüntettük fel, a 3. ábrán pedig egy kettős heteroátmenetű $GaAs$ -lézer keresztmetszete látható. A két $GaAlAs$ -réteg által közrefogott $GaAs$ -réteg optikai rezonátorként működik, és ezáltal válik képessé koherens sugárzás kibocsátására. Az $Al_xGa_{1-x}As$ -rendszerekhez hasonlóan viselkedik a $GaAs_{1-x}P_x$ -rendszer (4. ábra), amely a széles körben alkalmazott vörös világító diódáknak az alapanyaga. A 3. táblázatban különböző $A^{III}B^V$ anyagok heterostrukturái és az általuk kibocsátott sugárzás hullámhossza közti kapcsolat látható.

A galliumarzenidnek ezek a figyelemre méltó tulajdonságai csak az utóbbi 5–10 év kutatási alapján váltak ismeretessé. Ennek ellenére a galliumarzenid maga nem nevezhető új félvezető anyagnak. Ellentétben a germániumnál és a szilíciumnál látott, egymást kölcsönösen előrevívő konstrukciós és technológiai fejlődéssel, a galliumarzenid technológiája, eszközkonstrukciói többször zsákutcába torlottak, főleg az alapanyag tisztításának, megfelelő



3. ábra. Kettős heteroátmenetű (2–3 és 3–4 között) $GaAs-GaAlAs$ lézerdioda metszete



4. ábra. Elektronátmenetek a $GaAs_{1-x}P_x$ -rendszerben az összetétel függvényében

Fényforrás	$\lambda_{\mu\text{m}}$	0,8–0,9	1,0–1,1	~1,3
Világító dióda (LED)		GaAs/GaAlAs	GaInAsP/InP GaInAs	InGaAsP/InP
Lézerdióda		GaAs/GaAlAs GaAs/InGaP	InGaAs/InGaP InGaAsP/InP GaAsSb/GaAlAsSb	GaInAsP/InP

egy kristályok előállításának problémái miatt. Csak a hatvanas évek közepén következett be az a döntő fordulat, amely a fejlődést továbblendítette.

A 4. táblázatban feltüntetett kronologikus felsorolás némi illusztrációjával szolgál a mondottaknak.

A fejlődésben a fordulatot két esemény váltotta ki. Az egyik a három- és több komponensű GaAs alapú elegykristályok és az ezekből készült struktúrák felfedezése volt, amelyek látható fényemisszióra készíthetők, azonkívül a fény detektálásá-

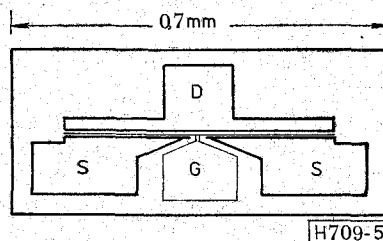
ra, kis veszteségű átvezetésére, modulálására is alkalmassá tehetők. Ezzel először vált lehetővé a fénynek információátviteli célokra történő komplex felhasználása, az adó—moduláló—vevő funkciók egyetlen hordozóanyagban integrált formában történő megvalósítása útján. Ez a mikroelektronika jelentős kiterjesztését jelentette a nagyobb működési sebesség, adatsűrűség és kompaktabb részegységek irányába. A másik jelentős esemény a Schottky-rétegei vezérelt unipoláris tranzisztor (MESFET) kidolgozása, amely a mikrohullámú hírközlés alkatrészválasztékát igen fontos új elemmel bővítette. Mindezek a fejlemények fokozták a tisztítási, kristály- és rétegnövesztési eljárások tökéletesítésére irányuló erőfeszítéseket, és ennek következtében a technológia magasabb színvonalon, reprodukálhatóan tudta teljesíteni az új eszközök által támasztott követelményeket.

Az 5. ábrán látható egy GaAs MESFET felülnézeti rajza. A gate-csatorna hossza 1,5 μm , szélessége 500 μm . A hordozó itt is félszigetelő, az S (source) és D (drain) kontaktusok kialakítása, valamint a csatorna nyitófeszültségének beállítása ionimplantációval történt. A több wattos teljesítményű MESFET-ek a teljesítménytranzisztoroknál szokásos módon 20–30, az ábrázolthoz hasonló elem

4. táblázat

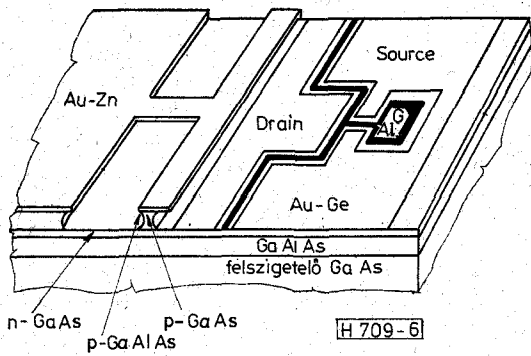
A galliumarzenid fejlődéstörténete

1929 (!)	Születési év (Goldschmidt, V. M.)
1952	Félvezető tulajdonságok felismerése (H. Welker)
1955	A „jövő félvezető anyaga” (!?)
1956	Polikristályok előállítása közvetlen szintézissel
1959	Egykristályok előállítása Czochralski-módszerrel
1960	Megbízható tisztítási és kristálykészítési módszerek nem állnak rendelkezésre! Első kísérleti eszközök: tús dióda, tunnel dióda. Bizonytalan eredmények!
1962	Még mindig a „jövő anyaga”!
1963	Erős elektromos térben fellépő negatív differenciális mobilitás (Gunn-effektus) felfedezése. Gunn-diódák.
1965	Új kristálynövesztési eljárások (LEC, epitaxiális rétegek) kidolgozása
1967	Világító diódák GaAsP alapon
1968	Kettős átmenetű GaAlAs—GaAs-rendszerek, lézerdiódák, napelemek kidolgozása
1970–74	Epitaxiális növesztés módszereinek továbbfejlesztése (olvadék és gőzfázisú növesztés)
1975	MESFET tranzisztor kidolgozása GHz-es frekvenciákra, néhány watt teljesítményre
1976	Integrált áramkörök félszigetelő GaAs hordozóalapon; optikai hullámvezetők és lézerek integrálása
1977	Ion-implantáció alkalmazása adalékolásra GaAs integrált áramkörök előállításánál
1978	Lézer és MESFET integrált kivitelben
1979	A GaAs a holnap anyaga, nem a jövője! Alkalmazási területek: igen nagy sebességű (szubnanoszekundumos) digitális áramkörök (VHSIG) és optikai integrált áramkörök (OIC) az optikai kommunikációs rendszerekben



5. ábra. GaAs MESFET felülnézeti rajza ($f_T = 14$ GHz, $P_{\text{max}} = 100$ mW)

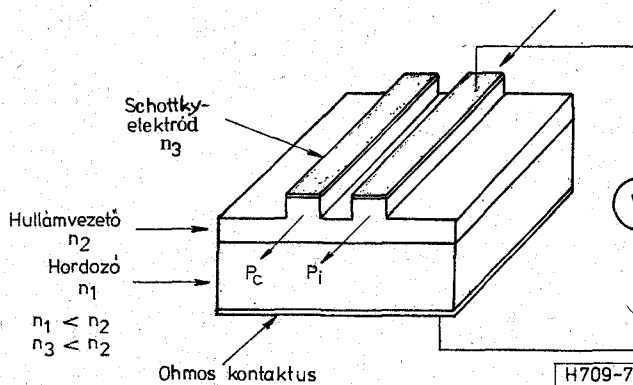
párhuzamos kötésével készülnek, természetesen integrált kivitelben. Ez egyben a galliumarzenid alapú integrált áramkörök lehetőségére is rámutat, amiről még lesz szó. A galliumarzenid sajátosságai azonban összetettebb funkciók, fény- és elektromos hatások egyidejű feldolgozását is lehetővé teszik. A közelmúltban bemutatott integrált lézerdióda-MESFET-elem előhírnöke annak a nagyarányú fejlődésnek, amely az optikai elven működő integrált áramkörök korszakához fog elvezetni (6. ábra). A nagyobb elektronmozgékonyosságú galliumarzenid olyan eszközök teljesítményképességét is fokozza, amelyek más alapanyagban csak gyengébb paraméte-



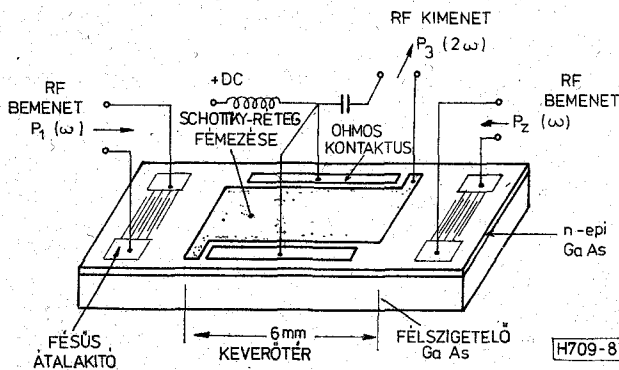
6. ábra. MESFET-eti integrált T-lézerdióda

rekkel rendelkeztek. Így pl. a szilíciumból készült CCD-tolóregiszter maximális órajel-frekvenciája kisebb 50 MHz-nél; galliumarzeniden azonos méretek mellett gigahertz nagyságrendű frekvenciák érhetőek el.

A felsoroltakon kívül vannak a galliumarzenidnek olyan, eddig kevésbé tanulmányozott tulajdonságai, amelyek újabb mikroelektronikai eszközök előállítására használhatók. Mivel optikai viselkedése elektromos tér, mechanikai feszültség, ultrahang segítségével változtatható, kiválóan alkalmas elektrooptikai, akusztikai célokra, modulációs, keverő és egyéb hasonló feladatok megoldására (7. ábra). Piezo-elektromos tulajdonságai alkalmassá teszik akusztikus felületi hullámok keltésére és ezen az elven működő eszközök, pl. kohvolverek készítésére (8. ábra).



7. ábra. Galliumarzenid alapú elektrooptikai iránycsatoló (vázlat)



8. ábra. Akusztikus felületi hullámú konvolver Schottky-réteges kicsatolással

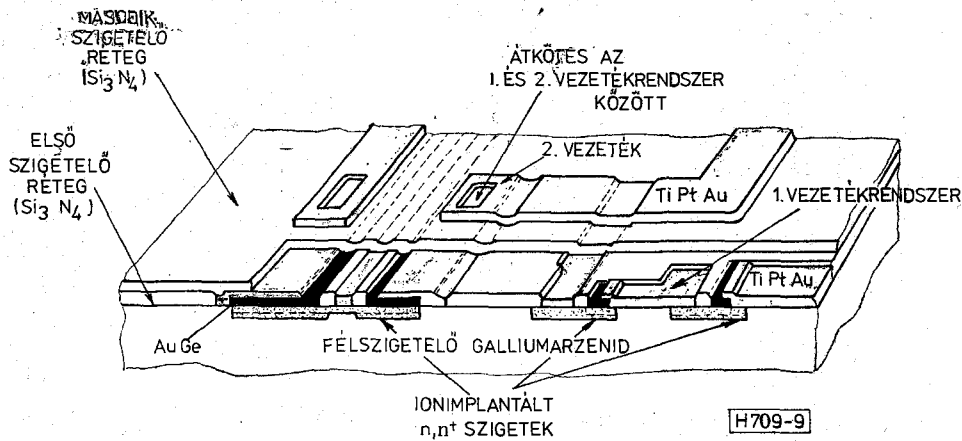
A felsoroltaktól eltérő jellegű, de a nagyérzékenyű fotoelektron-sokszorozók technikájában szempontjából fontos tulajdonsága a galliumarzenidnek, hogy bizonyos anyagok (pl. céziumoxid) hatására ún. *negatív elektronaffinitást* mutat. Ez azt jelenti, hogy a GaAs belsejében a vezetési sáv aljának megfelelő energiával bíró elektronok a vákuumtérben levő elektron 0-energia szintjéhez képest nagyobb energiával rendelkeznek, így már igen kis fotoenergia hatására a vákuumtérbe emittálódnak. Az így érzékenyített GaAs-katóddal az infravörös tartományban is működő fotoelektron-sokszorozók készíthetők.

Nagy jövőt jósolnak a galliumarzenid alapú napelem-celláknak is. Nagy abszorpciós tényezője miatt a GaAs már 2–3 μm vastag rétegben is jó hatásokkal nyeli el a sugárzást; egykristályos pn-átmenetes GaAs-cellán mérték eddig a legmagasabb hatásfokot (26%). 100 °C-nál ez az érték még mindig 20%; 1000:1 arányú sugárzáskoncentrátorokat alkalmazva 1 cm^2 cellafelületről 15 W teljesítményt sikerült nyerni. Hasonló előnyös tulajdonságokkal rendelkeznek a GaAs/GaAlAs heteroátmenetes cellák. A lényegesen jobb hatásfok és a nagyobb megengedhető teljesítménysűrűség miatt ezek a rendszerek még az olcsónak tartott polikristályos szilícium-napelemek mellett is versenyképesek lehetnek.

A mikrohullámú hírközlés területén a korábbinál korszerűbb választékot kínálnak a galliumarzenidből készült aktív elemek. A már említett Schottky-réteges mikrohullámú teljesítménytranzisztoron kívül kidolgoztak 100 GHz-nél nagyobb frekvenciákon működő Schottky-réteges keverődiódákat, néhány W teljesítményű Gunn- és IMPATT-diódákat a 10–20 GHz-es tartományra. Utóbbiakat előnyösebb zajtulajdonságaik különböztetik meg a szilícium IMPATT-diódáktól. A kidolgozott konstrukciók alkalmasak hibrid áramkörökbe történő beépítésre, ami elősegíti a mikroelektronika elterjedését a mikrohullámú hírközlésben.

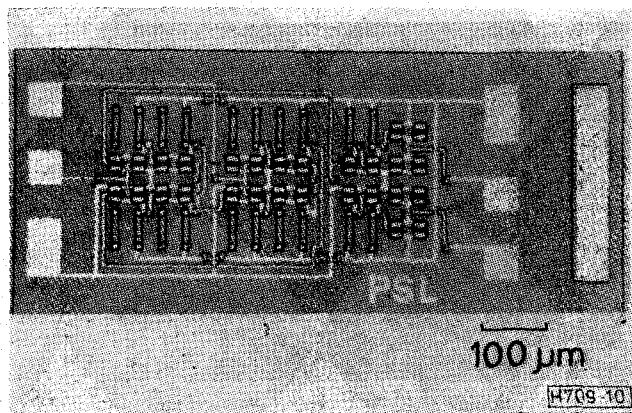
A galliumarzenid kristályok és epitaxiális rétegszerkezetek előállításában elért újabb eredmények lehetővé tették integrált áramkörök előállítását. Ezekben a már említett Schottky-réteges tranzisztorokat (MESFET) alkalmazzák, növekményes vagy gyakrabban kiürítéses üzemmódban. A galliumarzenid áramkörök hordozója igen nagy ellenállású ($\rho > 10^7$ Ohm-cm), ún. felsingetelő egykristályos anyag. A digitális technika számára Schottky-diódákból és MESFET-ekből felépített logikai áramköröket dolgoztak ki, a régi DTL-rendszer korszerű, nagysebességű változatát. A Schottky-diódák kis helyigénye ($< 10 \mu\text{m}^2$) következtében máris LSI-rendű integrált áramkörök tervezésére nyílik lehetőség. A legkorszerűbb eljárásnál a diódák aktív rétegét, katódkontaktusát és a MESFET-ek csatornarétegét ionimplantációval állítják elő; ezáltal elhagyható a korábban használt epitaxiális n-réteg. A 9. ábrán ezzel a technológiával előállított integrált áramkör egy részletének rajza látható (1 MESFET- és 2 Schottky-dióda).

A felsingetelő galliumarzenidben szelén- és kénionok közvetlen implantálásával állítják elő az aktív elemekhez szükséges n és n⁺ rétegeket. Az ohmos

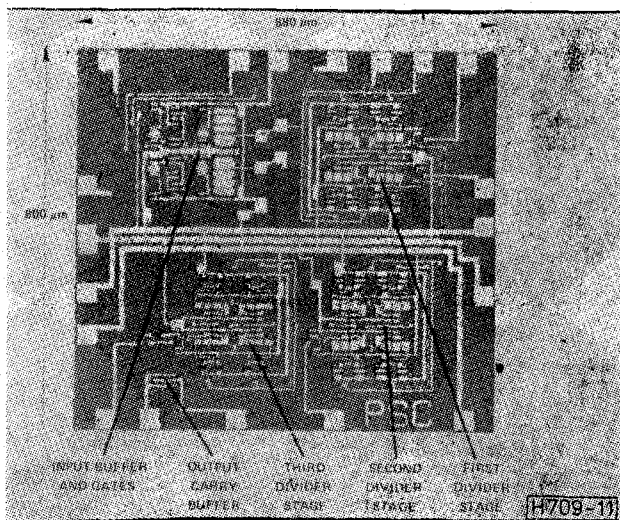


9. ábra. Planáris szerkezetű galliumarzenid integrált áramkör (részlet)

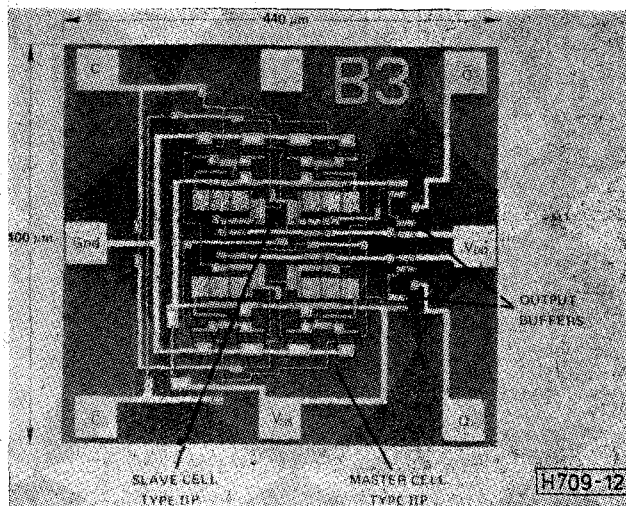
kontaktusok anyaga arany-germánium-eutektikum. Az elemeket összekötő fémezés három rétegből áll (titán, platina, arany), ez egyben a Schottky-rétegek fémfegyverzetét is alkotja. A kétszintű fémezést szilíciumnitrid szigetelés választja el egymástól, amely a galliumarzenid védelmét is szolgálja az egyes technológiai műveletek közben. A planáris szerkezetű struktúra rokonsága a több réteges szilícium integrált áramkörök szerkezetével nyilvánvaló, és egyben bizonyíték, hogy a szilícium technológia korszerű módszerei a galliumarzenidre is minden további nélkül alkalmazhatók. Ilyen módszerekkel pl. olyan gyűrűs oszcillátorokat állítottak elő, amelyek késleltetési ideje 100 ps-nál kisebb, teljesítmény-késleltetési idő szorzata pedig 200–250 fJ volt. Nagyfrekvenciás alkalmazásokra kidolgoztak frekvenciaosztó és -számláló áramköröket is, 0,5 ns-nál jobb időfelbontással (10–12. ábra). Ezek az eredmények arra mutatnak, hogy a nagysebességű processzorok, számítógépek számára a GaAs LSI-technológia olyan előnyöket tud biztosítani, amilyent a szilícium alapú áramkörök objektív okok miatt nem tudnak teljesíteni. A fejlődés ezen a területen a legutóbbi időben remekül felgyorsult; úgy tűnik, hogy az anyagtechnológiai problémák nagy része már megoldást nyert. A szilíciumtechnológia egész korszerű fegyverlárának bevetésével a közeli jövőben galliumarzenid alapon nemesak VLSI- (= very large scale integratim), hanem



10. ábra. Növekményes MESFET-ek Integrálásával készített frekvenciaosztó (DC-től 630 MHz-ig) (Fujitsu)

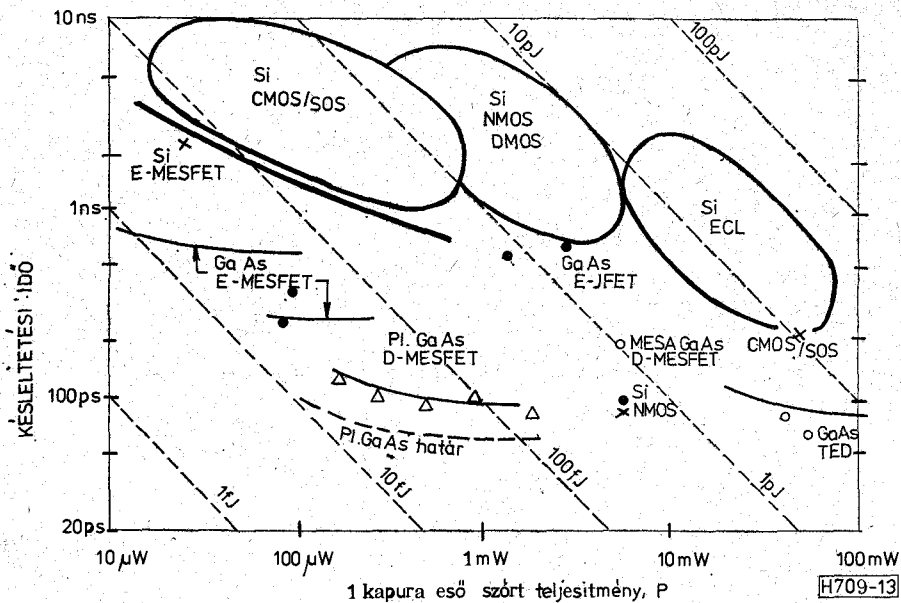


11. ábra. 1:8 számláló áramkör (HP); időfelbontás 0,5 ns



12. ábra. Frekvenciaosztó 4 GHz-ig (HP); (klűrfléses MES-FET)

VHSIC- (= very high speed integrated circuit) áramkörök megjelenésével is számolhatunk. A jelenlegi VLSI-technológiák teljesítményképességének összevetését a 13. ábrán láthatjuk. A galliumarzenid alapú integrált áramkörök azonos fajlagos (1 kapura



13. ábra. Si és GaAs VLSI digitális technológiák összehasonlítása (1979) (R. C. Eden alapján, IEEE Trans. Electron. Dev. 1979. április)

számított) disszipált teljesítményre vonatkoztatva a nagyobb elektronsebesség és a kisebb parazita kapacitások (felszigetelő hordozó hatása!) miatt sokkal gyorsabbak. Az igen kis méretű elemeket tartalmazó szilícium alapú áramkörök közül csupán a $0.25 \mu\text{m}$ csatornahosszú, elektronlitográfiával készített NMOS-áramkör közelíti meg a GaAs-áramkörök adatait. Ehhez még azt is figyelembe kell vennünk, hogy a jelenlegi GaAs-áramkörök rendszerkonstrukciója még nem tekinthető kiforrottnak. Japán kutatók Schottky-réteggel vezérelt Gunn-dióda mátrixokból építettek fel gigabit kapacitású tolóregisztereket; pillanatnyilag ezeknél érték el a legkisebb késleltetési időt ($< 50 \text{ ps}$). Igaz, ezek az áramkörök nagyobb teljesítményt igényelnek, így csak meghatározott feladatokra alkalmazhatók. Az azonban bizonyosnak látszik, hogy a galliumarzenid alapú integrált áramköröket ott, ahol ez előnyös, növekvő mértékben fogja alkalmazni a mikroelektronika. Ezzel párhuzamosan csökkenni fognak a jelenleg még magas árak, és az új integrált áramkörök ilyen szempontból versenyképesek lesznek a szilícium áramkörökkel. Kísérletek folynak más $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ típusú félvezetőkkel is, pl. az extrém nagy elektronmozgékonyossággal bíró InSb -dal, és nincs kizárva, hogy ez az anyag is szerephez jut a pikoszekundumos, gigabites integrált áramkörök alakuló családjában.

Az optikai integrált áramkörök autonóm területe még fejlődésének legelején tart, és ez nem választható el az optikai kommunikációs rendszerek fejlődésétől. Azok az alkatrészek, amelyekről a galliumarzenid alapú fényemittáló struktúrák kapcsán volt szó, minden bizonnyal szerepet kapnak ezekben a rendszerekben.

Hazánkban a galliumarzenid kristályok előállításával, epitaxiális rétegstruktúrák növesztésével 1970 óta az MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézete fog-

lalkozik. A kutatások eredményeként több, a jelenlegi mikroelektronikában használatos eszköz prototípusa is kifejlesztésre került ($8-10 \text{ GHz}$ -es tartományban működő Gunn-diódák 30 és 200 mW teljesítményre, kis zajú Schottky-réteges keverődiódák, fényemittáló elemek közül pedig vörös, sárga és zöld fényű világítódiódák, infravörös diódák). Folyamatban van többréteges lézerstruktúrák kidolgozása is. Ezek az eredmények, a felhalmozott technológiai, mérés-technikai és vizsgálati tapasztalatok megfelelő alapot szolgáltatnak a további munkákhoz. Az Országos Középtávú Kutatási Fejlesztési Terv (OKKFT) mikroelektronikai alkatrészprogramjához kidolgozott javaslatok olyan kutatási-fejlesztési és kísérleti bázis kialakítását célozzák, amely képes lépést tartani a galliumarzenid alapú eszközök gyors fejlődésével, és időben tudja a különféle elektronikai berendezések fejlesztőit ellátni a számukra szükséges alkatrészekkel. A program elsősorban a hírközlő rendszerek igényeit veszi figyelembe, de az integrált elemek a számítástechnikai fejlesztőket is érdekelhetik. A galliumarzenid alapú mikroelektronika külön hazai vonatkozása az a tény, hogy alumíniumiparunk jelentős mennyiségű tiszta galliumot állít elő. Az integrált áramkörökhöz szükséges egykristályos galliumarzenid így hazai alapanyagból készíthető, és nincs szükség drága importra. Ennek lehetőségét a következő öt éves tervben szintén meg kívánjuk teremteni. Jelenleg igen nagy a nemzetközi kereslet jó minőségű felszigetelő galliumarzenid egykristály iránt. A hazai gyártás megindulása így nemcsak az itthoni munkák alapanyag-ellátását biztosítja, hanem nagyértékű exportterméket is eredményez. A galliumarzenid alapú mikroelektronikai termékek hazai fejlesztése és alkalmazása pedig minden bizonnyal elő fogja segíteni a magyar elektronikai ipar egy számottevő részének felzárkózását a nemzetközi színvonalhoz.