

A mikroelektronikai technológiák és anyagok fejlődésének mai irányzatai

H. G. SCHNEIDER

VEB Galvanotechnik Lipcse (NDK)

B. JUNGHANS

Zentrum für Forschung und Technologie Mikroelektronik Carl Zeiss Kombinat Jena (NDK)



ÖSSZEFOGLALÁS

A szilíciumalapú és A III^{IV}-félvezető vegyületekből készült mikroelektronikai alkatrészek fejlődési irányait foglalja össze a közlemény, különös tekintettel az integráltsági fok növekedéséből és a kapcsolási idő csökkentéséből adódó kérdésekre. A bonyolult technológia-fejlődés számos anyagtudományi kérdést is felvet. A jelen és közeljövő félvezető alapanyaga a szilícium, valamint az A^{III}-BV-félvezető anyagok közül a GaAs és az InP, továbbá az Al-tartalmú három- és négykomponensű szilárd oldatok tulajdonságai is tárgyalásra kerülnek.

1. Technológiai szempontok

1.1. Szilícium mikroelektronika

A mikroelektronika indulásakor — az 50 és 60-as években — két fontos célt kellett kielégíteni:

- miniaturizálás és az elektronikus rendszerek jobbá tétele, valamint
- a tömeg és térfogat egységére vonatkoztatva nagyobb funkcióűrűség mellett, gazdaságosabb gyártás.

A jelenleg gyártásban lévő termékekben a nemzetközi átlag színvonalon, integrált áramköröként illetve chipenként, melynek tömege 1 g, 10⁶ komponense van, és ez végtermékként körülbelül 1 cm³ térfogatú.

A fejlődés mai állapotában azt mondhatjuk, hogy a termékekben az elektronikus rész tömege és térfogata elhanyagolható a többi elem, tápegységek működtető és vezérlő elemek stb. mellett. Példaként említhetjük a zsebszámológépeket, személyi számítógépeket, szívritmus szabályozókat (pacemaker).

A mikroelektronikai technológiák folyamatosan és rohamosan fejlődnek a mindig nagyobb integrációs fok és az egyre csökkenő belső késleltetési idő felé, aminek két fő oka van:

- mint mindig: a gazdaságosság és
- a mikroelektronika váratlan elterjedése a számítástechnika és hírközléstechnika klasszikus alkalmazási területein kívüli területeken is.

Az előző két tényező természetesen szoros kapcsolatban van egymással.

Feltételezhetjük, hogy a több mint 10⁵ alkalmazás alig 1%-át képviseli az elképzelhető alkalmazásoknak. A mikroelektronika további fejlődése

H. G. SCHNEIDER

1968—70 között, az NDK elektronikai iparának központi irányításában dolgozott.

1970—1984-ig a Karl-Marx-Stadt-i Műszaki Főiskolán egyetemi tanár. Jelenleg a VEB Galvanotechnik Lipcse vezető kutatója és tanácsadója, mikroelektronikával, érzékelőkkel és számítógépes tervezéssel foglalkozik.

a Freiburgi Bányászati Akadémián végezte tanulmányait. 1953—1959 között az NDK bányászatiában dolgozott. 1959—65-ig a Nagytisztaságú Anyagok Kutató Intézetében dolgozott. 1965—1968-ig docensként dolgozott az Ilmenau-i Műszaki Főiskolán ahol elektronikai anyagok kutatása volt a fő témája.

és alkalmazása a gazdaságosság további javulásától függ, ez konkrétan azt jelenti, hogy:

— kevesebb pénzért jobb terméket lehet kapni és, hogy

— növekszik a racionalizálás majd minden termelő sőt a nem termelő tevékenységekben is.

Ezek a mikroelektronika mai és jövőbeli fejlődésének hajtóerői.

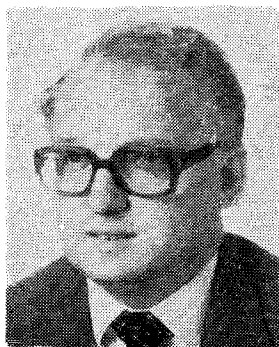
A mikroelektronikai technológia különlegessége, hogy az adott szilícium felület megmunkálásának költsége — durva közelítésben — nem függ a felületegységen megvalósított eszközök számától. Ez a tény a gyártási technológia jellegéből következik, és csak egy adott alaptermékben és technológiai fejlettségi szinten belül érvényes. Ezért nem meglepő, hogy például az 1k dRAM, 4K dRAM, 16K dRAM, 64K dRAM és legutóbb a 256K dRAM egymás után azonos áron kerültek forgalomba, ami tükrözi azt a tényt, hogy a funkció sűrűség végül is ingyen a 256-szorosára növekedett.

Mindez azt jelenti, hogy az integrált áramkör komplexitásának növelése az IC felhasználóknál csökkenti a költségeket mert kevesebb áramköri kártyára van szükség, kisebb tápegység is elég, csökken az energiafogyasztás és kisebbek a telepítési és egyéb költségek.

Mindezen faktorok arányosan csökkennek az IC integráltsági fokának növekedésével.

Végeredményben az elektronikának minden más megoldással szemben növekvő intenzív és széleskörű használata a rendszerek megbízhatóságának folyamatos javulását eredményezi. Mivel az integrált áramkörök 10⁻⁶...10⁻⁸/óra meghibásodási valószínűsége majdnem független az integráltsági foktól, a rendszer megbízhatósága több nagyság-

Beérkezett: 1987. X. 7. (H)



DB. B. JUNGHANS

egyetemi tanulmányait Moszkvában végezte 1968-ban. 1972-ig aspiráns volt a Karl-Marx-Stadt-i Műszaki Főiskolán ahol félvezető technológiából doktorált, ugyanott lett tudományos munkatárs,

1976-ig MOS-áramkörökkel foglalkozott. 1984-ig a drezdai Mikroelektronikai Kutató Központban (ZMD) áramkörök tervezését és technológiáját vezette.

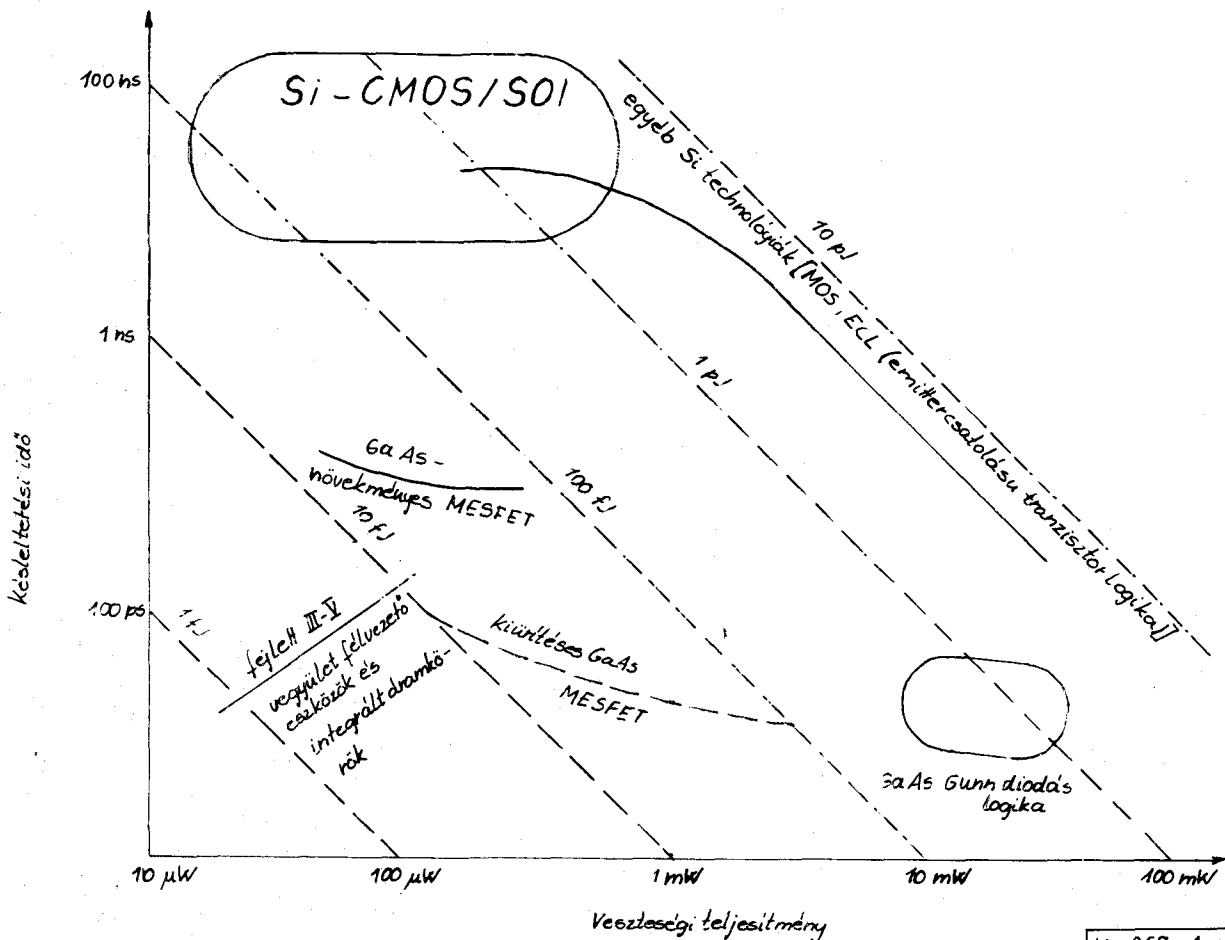
1984 óta a Drezdai Műszaki Egyetemen egyetemi tanár.

renddel javítható egyedül azáltal, hogy nagyobb integráltságú IC-ket alkalmazunk.

További igen fontos probléma a jelfeldolgozási idő csökkentése. Az egyre sokszorozódó alkalmazások és a flexibilis megoldások következtében egyre jobban terjednek a mikroprocesszor áramkörök és a mikroszámítógépek.

A software vezérelt jelfeldolgozás lassúbb mint a huzalozott. A jelenleg használt 1 μ sec végrehajtási periódusidő problémát jelent a folyamatok egyidejű szabályozásában. Feltétlenül csökkenteni kell a belső késleltetési időt és a jel-futási idejét. Ezt a problémát két módon közelíthetjük meg:

- tovább kell növelni az integráltsági fokot, ezzel csökken a jelvezetékek geometriai hossza, ez tulajdonképpen a szilícium IC-elemeinek további méretcsökkentését jelenti. A cél kompakt elektronikus rendszerek kialakítása egy chipen. A Si-IC-ben a jelterjedés időállandója 0,1 μ sec/mm. Ilyen igényeknek csak olyan technológia képes megfelelni, amelyben a késleltetési idő veszteségi teljesítmény alacsony, mint például a CMOS áramkörökben (1. ábra).
- új félvezető anyagok alkalmazásával mint például a III-V félvezetők GaAs, InP és az ezeken a bináris vegyületeken alapuló három és négy komponensű szilárd oldatok. (Ezekről az anyagokról a jelen cikk 2. pontja szól.) Összehasonlítva a Si és III-V-vegyület integrált áramköröket meg kell jegyezni azt, hogy a szilíciumban a telítési elektronsebesség tömb szilíciumban 10⁷ cm/sec, ez az érték alig kisebb mint a GaAs-ban tapasztalt érték. Ennek következményeként nagyon kicsi a különbség a GaAs IC (FET) és a Si IC sebessége között, de ebben az esetben a Si messze a telítési feszültsé-



1. ábra. Késleltetési idő/vesztési teljesítmény összefüggése

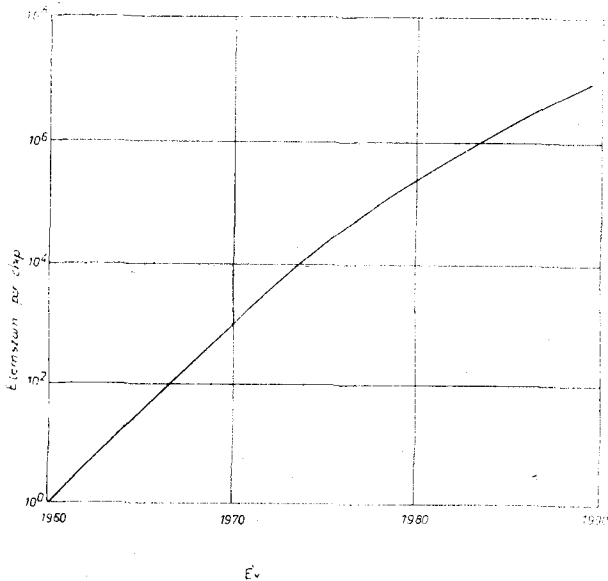
H-369-1

ge felett dolgozik. Nem kívánatos az ilyen erős előfeszítés, különösen nem a VLSI—IC-ben. A GaAs áramkörökben erre nincs is szükség, de van egy sor probléma amit meg kell oldani.

Hogyan növelhetjük az integráltsági fokot?

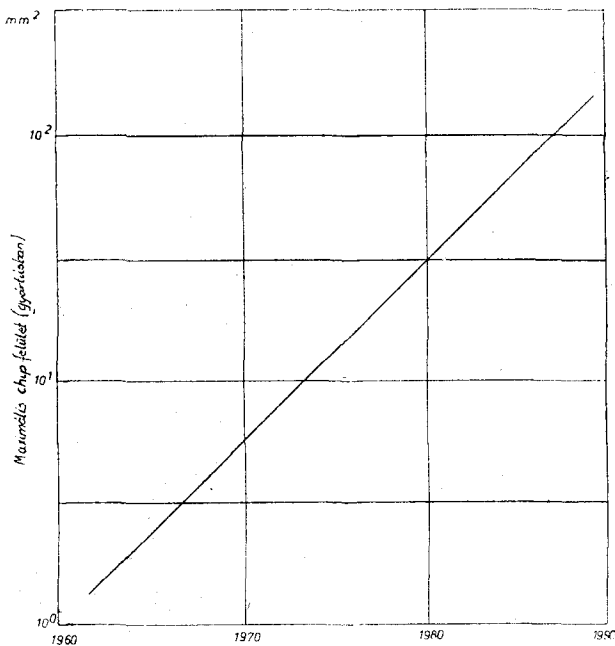
A fejlesztés irányzatai a 2. ábrán láthatóak. Az integráltság növelésének két útja van:

- a chip felület növelése és
- az elemsűrűség növelése.



H.369-2

2. ábra. A Si integrált áramkörök elemsűrűségének növekedése (1)



H.369-3

3. ábra. A Si integrált áramkörök felületnövekedése (1)

A chip felület növelésének gazdaságossági korlátai vannak. Ez nem a nagyobb Si felhasználással függ össze (3. ábra). Az anyagköltség lineárisan nő a felülettel de ezt kompenzálja az áramkör nagyobb teljesítménye.

Nagyobb problémát jelent a szerelés, de a mai modern kikötési és chipcarrier technológiák meg fogják oldani ezt a gondot.

A fő probléma, hogy az adott technológiai sorra az adott hibasűrűség miatt a jó elemek kihozatala a chipméret növekedésével a Poisson eloszlás értelmében exponenciálisan csökken.

Jelenleg a gazdaságilag elfogadható kihozattal gyártható chip felülete maximum 100 mm² lehet. A hibák számának csökkentése oldhatja fel ezt a korlátot. A stohasztikus hibák legfőbb okai a maszkokon lévő hibák, a közegekben, leginkább a vízben lévő szilárd részecskék, és a környezetből származó por. Ezen csak komplex intézkedések segíthetnek. Nem elég ha például hibátlan az új maszk, annak hibátlanak kell maradnia az egész technológiai folyamat során is. Jó áramkörök kihozatala nagyon összetett probléma és a legfontosabb mérőszáma az elért gyártási kultúra színvonalának és a technológiai minőségnek. Végül a gyártás hatékonysága dönti el a gazdaságosságát. Megjósolhatjuk, hogy az alábbi feltételek együttes megléte esetén a gyártósorokban rövidesen túl lehet lépni a 100 mm² chip nagyságot:

- hibamentes maszkok,
- vetítéses litográfia,
- pormentes szeletkezelő rendszerek,
- reverz ozmózis szűrők használata a víz tisztításában,
- új típusú tiszta szoba rendszerek pl. alagút elven.

Ezeket a feltételeket az elemi méretek egyidejű csökkentése mellett kell biztosítani.

Ha a legkisebb méretünk — mint ahogyan az az utóbbi években általános volt — 5 μm, a 0,5 μm méretű hibák nem zavarják az áramkör működését.

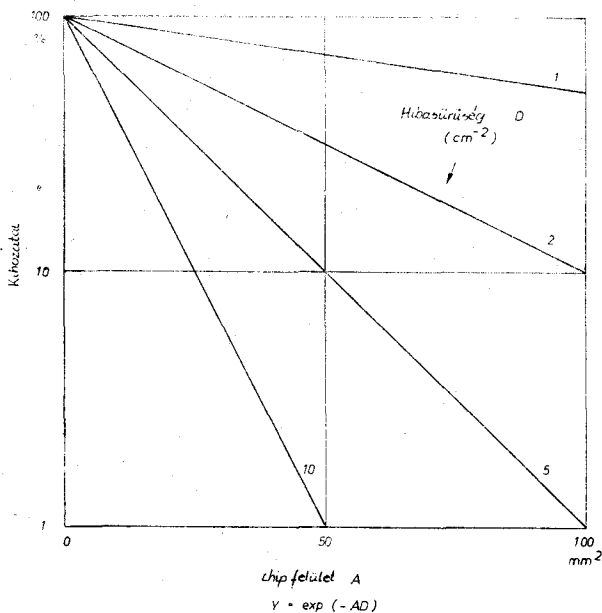
A mai 1,5 μm elem méretek mellett már a 0,15 μm méretű hibák sem engedhetők meg.

Az elemsűrűség növelésének négy útja van:

- a legkisebb méretek csökkentése,
- helykihasználás szempontjából optimalizált tervezésű alkatelemek,
- a túrések csökkentése,
- a szigetelések és összeköttetések által elfoglalt területek csökkentése.

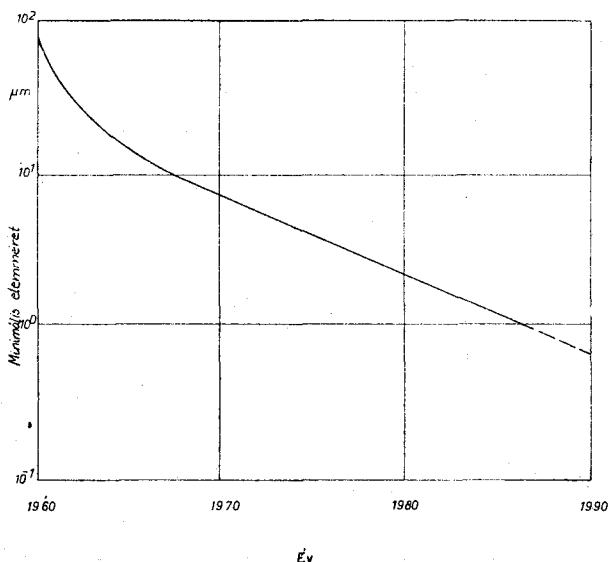
Lényegében az alkatelemek típusától függetlenül a jelenlegi helyzethez képest csökkentve a minimális méreteket nagyságrendekkel lehet csökkenteni az alkatelemek felület-igényét.

Jelenleg Si—IC-ben a legkisebb tranzisztor helyigénye kb. 100 μm². A bipoláris és az unipoláris tranzisztorok méretének fizikai korlátja 1 μm². Az 5. ábrán látható, hogy a nemzetközi trend analízisek szerint ezt a célt ebben a században nem fogjuk elérni. Feltételezhető, hogy tömeggyártásban 10 éven belül megvalósítható legkisebb méret 0,5 μm, ha három évenként tömeggyártásban a legkisebb méret csökkenése 0,3 μm [7].



4. ábra. A Si integrált áramkörök kihozatala a chip felület és a hibásűrűség függvényében (1)

H 369-4



5. ábra. A Si integrált áramkörök minimális elemméreteinek csökkenése (2)

H 369-5

Az előbb említett $1 \mu\text{m}^2$ felületű tranzisztor megvalósításához $0,1\text{--}0,2 \mu\text{m}$ legkisebb méret szükséges (az utóbbi laboratóriumi körülmények között már ma megvalósítható), a korlátot fizikailag az adalékkoncentráció inhomogenitása, az elektron migráció (különösen az IC fémezésében) és a hődisszipáció jelenti. Korlátok vannak a minimális adalékkoncentrációra is, a p illetve n tartományoknak legalább egy adalékatomot kell

tartalmazniok, ez azt jelenti, hogy 10^{18}cm^{-3} adalékkoncentrációnál legalább 10^{-18}cm^3 térfogat szükséges, ez pedig megfelel egy $0,01 \mu\text{m}$ élhosszúságú kockának [7]. Természetesen ez technológiailag nem megoldható. Hasonlóképpen korlátot jelent a vezető anyag, az alkatелеmek sűrűsége, a substrát anyag hővezető képessége és a parazita kapacitások. Az elemsűrűség növelése általában csökkenti a parazita kapacitásokat, a tervet optimalizálni kell ebből a szempontból is!

Ilyen kis méretek eléréséhez egy sor alapvetően új technológiai megoldásra van szükség, melyek felülműlják a fotolitográfia fizikai korlátait. A laterális méretek csökkentése a $0,1 \mu\text{m}$ (100 nm) méretig a „scaling down” elv figyelembevételével megköveteli a vastagságok és behatolási mélységek arányos csökkentését, ez oxidvastagságban 10 nm értéket $p\text{--}n$ átmenetek behatolási mélységében pedig 100 nm értéket jelent. A „scaling-down” miatt egyéb paraméterek is megváltoznak (1. táblázat). A „scaling down” alapja az elektronikai

1. táblázat

A scaling down során változó paraméterek. Ha a lineáris méretek csökkennek, a feszültségek is csökkennek $1/a$ arányban, az adalékkoncentráció a -szorosára növekszik [7]

Hosszúság	L	L/a
Vastagság	T	T/a
Feszültségek	U	U/a
Adalékolás	N	aN
Térerősségek	F	F
Kapacitások	C	C/a
Kapcsolási idők	t	t/a
Áramok	I	I/a
Áramsűrűségek	j	aj

alkatelemeket leíró matematikai függvényektranszformációja, ezért csak ezek érvényességi határában belül használható. Például a MOS-tranzisztor csatornájában a felületi potenciál nem függ a méretektől, ezért a „scaling-down” során nem változik. Hasonló problémát jelent az elektronok számának csökkenése a csatornában, ez a szám olyan kicsi lehet, hogy az általános radioaktív háttér sugárzás már kapcsolhatja a tranzisztort, vagy, hogy $0,25 \mu\text{m}$ csatornahosszúságnál az adalékolás statisztikus változásai hatnak a nyitófeszültségre, ami azt jelenti, hogy a nyitófeszültség befolyásolhatatlanná válik. Mindezek miatt teljesen új technológiai műveleteket kell bevezetni, mint például ion implantáció, száraz kémiai marás, plazmás oxidáció, gyors hőkezelés és az epitaxiális rétegleválasztás új módszerei (ez utóbbit részletesebben tárgyaljuk a 2. fejezetben).

A szükséges elektronikai funkciót különböző alkatелеmekkel lehet megvalósítani. Az alkatелеmek

tervezését újra el kell végezni figyelembe véve a VLSI technológia szempontjait.

A logikai áramkörök felület igénye tized részére csökkent, amikor áttértünk a bipoláris TTL áramkörökről az unipoláris MOS áramkörökre. Ha statikus logikai rendszerekről és memória elemekről áttérünk dinamikus elemekre a felület-csökkenés ötszörös, ha dinamikus memóriákban a stack-rendszert használjuk, alkalmazunk programozható csak olvasó memóriákat (EPROM) és CMOS áramköröket további 2–10-szeres felület-csökkentést érhetünk el. Ha a jelenlegi technológiában ismert paraméter és geometriai méret ingadozásokat és inhomogenitásokat megszüntetjük a felület igény századrészére csökkenhet. Az ingadozások és inhomogenitások csökkentése az önillesztő technológiák [3] fokozott bevezetésével (pl. Sigates technológia) és mindenek előtt mikroszámítógéppel vezérelt műveletek alkalmazásával oldható meg.

Az integrációs fok növekedésével a szigetelések és összeköttetések által elfoglalt terület aránya növekszik. Jelenleg ezek teszik ki a chip területének 80%-át. Ez az arány csökkenthető, ha új kis ellenállású kontaktus rendszereket dolgozunk ki, többszintes fémezést alkalmazunk és ha megvalósítunk új szigetelési elveket, például fél szigetelő epitaxiális rétegek vagy szilícium-szigetelő hordozó rendszerek (ez utóbbi problémáról a 2. fejezetben lesz néhány megjegyzés). Ennek a résznek összefoglalásaként néhány megjegyzés a Si-mikroelektronika irányzatairól.

A mikroelektronika első negyedszázados története során a szilícium planáris technológiával a Si-IC integrációs foka évenként körülbelül megduplázódott. Ez megfelel a Moore törvénynek. Ez a tendencia fog érvényesülni a belátható jövőben is, már ami a csúcstermékeket például memória áramköröket illeti.

Az integráció fokának növekedése zömében a legkisebb méretek csökkenése miatt következik majd be. Napjainkig a 256 kbit dRAM áramkörben lévő 1,5 μm legkisebb méret hagyományos, de nagy pontosságú fotolitográfiával valósítható meg. A 2,5 μm -nél kisebb laterális struktúrákat a szeletre léptetéssel (DSW — Direct Step on Wafer) kell megvalósítani, azért is mert egyidejűleg növekszik a szeletméret is a jelenleg használatos 100 mm átmérőtől 150 mm átmérőre. A teljesen automata szelet mozgó és megmunkáló rendszerek kidolgozásával az átmérő 200 mm-re nőhet. Más vetítési eljárás szükséges a nyolcvanas évek második felében az 1 Mbit és a kilencvenes évek végére a 64 Mbit memóriák gyártásához. Ezek az eljárások elektron, röntgen vagy ionsugarakat használnak. Az új eljárások miatt megfelelő hullámhosszúságokra érzékeny rezisztalakkokat és reziszttechnikákat kell kidolgozni.

Többrétegű rendszerekkel lehet javítani a felbontóképeséget. Alkalmazni kell a száraz kémiai marást különösen fontos az anizotrop és szelektív tulajdonságú reaktív ion marás (RIE).

Az adalékolt rétegek behatolási mélységének csökkenése miatt el kell kerülni a nem kívánt

adalék-diffúziókat és meg kell őrizni a speciális kristályhiba eloszlást, ennek útja, hogy:

- alacsony hőmérsékleten, 900 °C alatt, végezzük a műveleteket,
- vagy magas hőmérsékleten rövid ideig hőkezelünk (gyors hőkezelés).

A termikus oxidálást nagy nyomáson (2–10 MPa) végezzük. A szilíciumot kémiai leválasztással kis nyomáson állítjuk elő a jobb egyenletesség érdekében, a hőmérséklet csökkentéséhez a termikus energia helyett mikrohullámokkal vagy fotonokkal gyorsítjuk a kémiai folyamatot.

Mindezek a tényezők szükségessé teszik a technológiai előírások pontos betartását és a szeletek pormentes kezelését. Ezek a gyártó sorok hierarchikus számítógép irányítással dolgoznak, az integrált gyártó szakaszok „on-line” méréseket tartalmaznak a gyártásközi minősítésre.

Mindezekkel a közeli jövőben lehetségessé válik 10^7 alkatrészt tartalmazó integrált áramkörök gyártása. Természetesen nem szabad figyelmen kívül hagyni a beruházási kérdéseket.

A mikroelektronika megfelelő és gazdaságos művelése megfelelő fejlettségű ipari legalább 100 milliós népességű nemzeti/vagy nemzetközi gazdasági területén lehetséges, szükséges hozzá a megfelelően nagy IC választék kialakítását biztosító fejlesztési bázis, és a sokoldalú felhasználói háttér.

Mivel a fejlesztés szoros kapcsolatban van az anyagproblémákkal néhány technológiai kérdés tárgyalását az anyaggal foglalkozó rész tartalmazza.

1.2. III—V vegyületfélvezetők a mikroelektronikában

A szfalerit rácsú III—V vegyületfélvezetők a közvetlen anyagkutató csodálatos eredményei: teljesen hasonló szerkezetűek mint az elemi félvezetők Si és Ge, de határozottan nagyobb az elektron mozgékonyosságuk mint az utóbbiaké (2. és 3. táblázat).

2. táblázat

A gyakorlatban fontos III—V félvezető vegyületek néhány fontosabb paramétere (300 K fokra vonatkozó)

Anyag	Töltéshordozó				Sáv-szélesség E_g [eV]	Rács állandó A_0 [pm]
	mozgékonyosság		effektív tömeg			
	μ_n [cm^2/Vs]	μ_p	m_n/m_0	m_p/m_0		
GaAs	8 800	450	0,067	0,54	1,43	565,31
InP	4 600	150	0,075	0,24	1,27	586,88
[In Sb]	100 000	1700	0,013	0,18	0,18	647,94]
Ga ₄₇ In ₅₃ As	12 000	300	0,04	0,4	0,8	575,45
Al ₃₂ Ga ₆₈ As	3 000				1,9	565,81
Si	1 350	480	1,1	0,59	1,12	543,1

A Si, GaAs és InP nagyfrekvenciás tulajdonságait befolyásoló néhány adat és minőségi jellemző [5], [10, 11, 12]

Paraméter	Egység	Si	GaAs	InP
Szaturációs drift sebesség v_{sat}	cm s^{-1}	$1 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^7$
Letörési térerősség F_d	V cm^{-1}	$2 \cdot 10^5$	$3,5 \cdot 10^5$	
Dielektromos állandó ϵ_{rel}		12	11,5	11,7
Hővezetőképesség $W \text{ cm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$		1,5	0,5	0,7
Jósági tényező Z_J	V^2s^{-2}	$3,2 \cdot 10^{23}$	$1,9 \cdot 10^{24}$	
Jósági tényező Z_K	$\text{W s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$6,7 \cdot 10^7$	$3,2 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^7$
Mozgékonyaság szorzat $\mu_n \cdot \mu_p \cdot \epsilon$		$2,5 \cdot 10^4$	$5,3 \cdot 10^3$	$9,1 \cdot 10^4$
Maximális működési hőmérséklet $^\circ\text{C}$		250	420	320

Johnson-féle jósági tényező:

$$Z_J = E_d^2 v_{sat} / 4\pi$$

Keyes-féle jósági tényező:

$$Z_K = \lambda (C v_{sat} / 4\pi e)^{1/2}$$

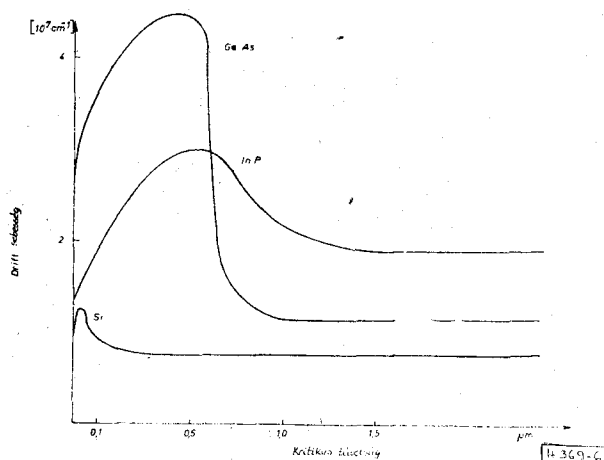
A legfontosabb a III—V félvezető anyagokban, hogy új minőségű heteroátmenetek készíthetők belőle, és megvalósítható a ballisztikus elektron transzport [4].

Ez utóbbi alkalmazás említésekor hallgatólagosan feltételeztük, hogy 0,5 μm -nél kisebb laterális méretek megvalósíthatók, és hogy rövid csatornában, szóródás mentes elektron transzport lehetséges.

Ez második effektus szilíciumban technológiailag megvalósíthatatlan mert a szóródásmentes elektron transzport távolsága kisebb mint 0,05 μm szemben a III—V vegyületekre érvényes előbb említett értékkel (6. ábra).

A III—V félvezetők gyártási technológiája elvileg hasonló a Si-IC gyártási technológiájához, de van néhány lényeges korlátozás [5]. A kisebbégi töltéshordozók „kellemetlen” tulajdonságai (lyuk mozgékonyaság, élettartam) miatt bipoláris áramkörök nem készíthetők.

A III—V félvezető és szigetelő rétegek határfelületének tulajdonságai miatt egy sor nehézség van MOS típusú tranzisztorok készítésében, vagy a planár technológia általános alkalmazásában. A technológiai kutatásnak van néhány újabb biztató eredménye [8]. Plazmás, anódikus oxidációval maximálisan 10 nm vastag oxidréteg növeszthető GaAs és InP felületére. Ezt követően vákuum gőzöléssel nagyon vékony Al réteget visznek fel, amit 100—150 nm vastagságúra oxidálnak anódos-plazmás oxidációval. Mindezen mű-



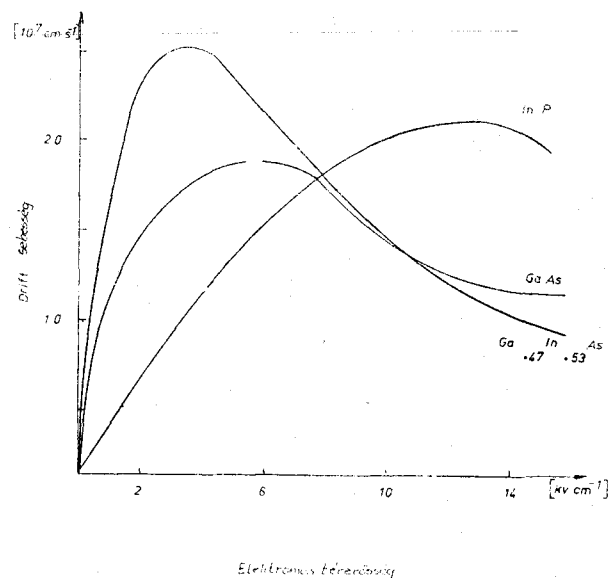
6. ábra. A kritikus távolság és az elektron drift sebesség összefüggése (4)

veleteket 150—180 $^\circ\text{C}$ hőmérsékleten végzik. Ezzel a módszerrel megfelelő VLSI áramkörök készíthetők. A GaAs alapanyag előnye, hogy a Cr adalékolással kompenzált nagy tisztaságú GaAs igen nagy ellenállású ($>10^8$ ohmcm); így VLSI áramkörök szigetelő hordozójaként is felhasználható.

InP alapanyaggal van néhány probléma az intrinsic ellenállás kicsi 10^4 ohmcm, és az ellenállás is inhomogén.

Az adalékolást szinte kizárólag ionimplantálással valósítják meg. A hőkezelést a megfelelő nagyságú As nyomás mellett zárt térben végzik. Lehetséges a hőkezelés SiO_2 és Si_3N_4 rétegekkel védett felületekkel is.

A mikroelektronikai áramkörök továbbfejlődésének az 1.1. részben leírt elvei itt is érvényesek.



7. ábra. A statikus sebesség és a térerősség összefüggése ($N_d = 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 300 K, Monte-Carlo módszerrel számítva) (9)

Félvezető	Kontaktus anyaga	Rendszer vastagsága [nm]	Hőmérséklet [°C]	Ötvözési idő [min]	Közeg	Félvezető adalékolás [cm ⁻³]	Fajlagos kontaktus ellenállás [Ωcm^{-2}]	Technológia
n-GaAs	Pd/Ge	50/50	500	120	Vákuum	1.2.10 ¹⁶ 10 ¹⁷ 1.5.10 ¹⁶	3.10 ⁻⁴ 1.7.10 ⁻⁴ 3.5.10 ⁻⁵	S
n-GaAs	Pd/Ge	125/47	500	20	N ₂ áram	1.1.10 ¹⁶	3.10 ⁻¹	8
			550	20	N ₂ áram	1.1.10 ¹⁶	2.5.10 ⁻³	
			600	20	N ₂ áram	1.1.10 ¹⁶	3.5.10 ⁻⁴	S
			500	20	N ₂ áram	2.0.10 ¹⁷	2.0.10 ⁻³	
n-GaAs	Ni/Ge	100/100	550	5	Vákuum és/vagy gázáram	1.1.10 ¹⁷	3.10 ⁻⁵	S
	Ta/Ge		650	5	1.1.10 ¹⁷	5.10 ⁻⁴		

Megjegyzés: Energiasűrűség értéke, hőkezelés és implantáció körülményei, adalékkoncentráció függőek

4/b. táblázat

Félvezető	Kontaktus anyaga	Rendszer vastagsága [nm]	Sugárzás	Energia sűrűség [J/cm ²]	Hőkezelés impulzus hossza	Félvezető adalékolás [cm ⁻³]	Fajlagos kontaktus ellenállás [Ωcm^{-2}]	Technológia	
n-GaAs	AuGe/Ni/Au	120—170	CW-Argon	0,64	43 cm/s	10 ¹⁷	4.8.10 ⁻⁶	p.a ⁺)	
	AuGe/In			0,56	43 cm/s		1.3.10 ⁻⁶		
	AuGe/Pt/Au			0,61	43 cm/s		1.5.10 ⁻⁵		
	Au-Ge/Ti/Au			1,35	20 cm/s		1.8.10 ⁻⁵		
n-GaAs	AuGe/Ag/Au	50—60	=0,51 μm	0,66	43 cm/s		2.0.10 ⁻⁴		
	AuGe	300	Q-kapcsolt rubin lézer	1,02	15 ns	3.10 ¹⁶	7—5.10 ⁻⁵	p.a ⁺)	
n-GaAs	AuGe/Ni/Au	120—170/	impulzus	0,28	100 ns	10 ¹⁷	2—9.10 ⁻⁵	p.a ⁺)	
	AuGe/Pt/Au			0,28					100 ns
	AuGe/Ag/Au	50—60	elektronsugár	E=10—12 keV	0,32		7.10 ¹⁷		4.10 ⁻⁷
	AuGe/Pt	120/30	E=20 keV	0,3—0,5	100 ns				

4/c. táblázat

Félvezető	Kontaktus anyaga	Hőkezelési módszer	Speciális körülmények	Implantáció dózis, energia, hőmérséklet	Implantált ion	Fajlagos kontaktus ellenállás [Ωcm^{-2}]	Technológia
n-GaAs	AuGeNi	N ₂ hályha	800 °C 20 min	7.10 ¹³ cm ⁻² 40 keV	Si	5.10 ⁻⁷	i.i ⁺)
n-GaAs	Ti Pt Au	elektronsugár	CVD SiO ₂	1.10 ¹⁴ cm ⁻² , 100 keV	Se	< 6.10 ⁻⁷	i.i ⁺ —
			védőréteg	20 °C			
n-GaAs	Al	elektronsugár	E=10—15 keV	10—15.10 ¹⁵ cm ⁻²	Se	< 6.10 ⁻⁶	i.i ⁺)
			t=150 ns p=0,71 I/m ²	120 keV, 20 °C			
n-GaAs	Al	elektronsugár	E=12 keV	5.10 ¹⁵ cm ⁻²	Se	< 6.10 ⁻⁶	i.i ⁺)
			t=80 ns p=0,65—0,93/cm ²	50 keV 350 °C			
p-InP	Au	Nd-YAG-	=1,06 μm ,	3.10 ¹⁵ cm ⁻²	Zn	0,5—2,2.10 ⁻⁴	i.i ⁺)
			t=200 ns				
		I=0,5 I/cm ²					
	Nd-YAG-	=0,53 μm ,					
	rubin lézer	t=300 ns				> 10 ⁻²	
		=0,694 μm ,					
		t=50 ns					

Megjegyzés: A leggyakrabban használt eljárás: ion implantációval a félvezető felületet erősen adalékolják, majd gyors hőkezelés következik.

A Czochralski (CZ) és a zónásan növesztett (FZ) Si kristály jellemző tulajdonságai [5]

Paraméter	CZ-kristály	FZ-kristály
Diszlokáció szám	zéro	zero
Max. átmérő	150 (200)	100 (150)
Szokásos átmérő	100 (150)	75 (100)
Ellenállás tartományok:		
n-típus	0,005—50 Ωcm	10—300 Ωcm
p-típus	0,005—50 Ωcm	10—3000 Ωcm
Adalékanyagok	B, P, As, Sb	B, P
Orientáció	[111], [110], [100]	[111], [110]
Élettartam	10—50 μs	50—1000 μs
Oxigén-tartalom	10^{17} — 10^{11}cm^{-3}	10^{16}cm^{-3}
Szén-tartalom	10^{16} — 10^{17}cm^{-3}	10^{16}cm^{-3}

Például az önillesztő source és drain kontaktusok alkalmazása segítségével tovább csökkenthető a kapcsolási idő [8]. A közeljövőben várható olyan VLSI áramkörök megvalósítása, melyek impulzusüzemű frekvenciája 100 GHz és a késleltetési idő/teljesítmény aránya kisebb mint 1 fJ.

A GaAs mellett egyre érdekesebbé válik az InP, mert nagyobb a drift sebessége, nagyobb térkapcsolható rá és ez egészében nagyobb tranzit frekvenciát jelent (7. ábra) [9].

A III—V félvezetők előállítására, IC célokra függetlenül attól, hogy kettős, hármas vagy négyes vegyületeket kívánunk előállítani, legalkalmasabban az organometallikus kémiai leválasztással történik (CVD). Ez az eljárás gazdaságosabb és legalább annyira pontos, mint molekula sugár epitaxia vagy más PVD-eljárások vagy a folyadékfázisú epitaxia (LPE). (Erről a problémáról még lesz szó a 2. fejezetben a 2.1. pontban.)

A III—V félvezető alapú VHSI (nagysebességű, Very High Speed Integrated Circuit) áramkörök mérés-technikai problémát vetnek fel, szükség van psec tartományban működő mérőberendezésre.

Az oxidréteg leválasztása mellett a III—V félvezetőkön az ohmos kontaktusok kialakítása is egy sor nehéz problémát jelent. Tekintsünk át ezek közül néhányat. Az ohmos kontaktus minősége különösen fontos, kiváltképp a megbízhatóság és a reprodukálhatóság [25].

Az ohmos kontaktusokat megfelelő fémréteggel, vagy fémötvözet réteggel valósítják meg diffúzióval, ionimplantációval vagy félvezető epitaxiával kialakított erősen adalékolt felülethez. Lehetséges az ohmos kontaktus kialakítása több komponensű fém-félvezető rendszereknek a fém leválasztással egyidejű hőkezelésével. A fém leválasztása termikus úton, fizikai gőzfázisból (PVD) vagy porlasztással történik. A fém megfelelő adalékanyagot tartalmaz a hőkezelés ellenállás fűtésű kályhában vagy laser/elektron sugaras hőkezeléssel történhet. A szükséges tunnel átmenet a fém és a félvezető között ötvözéssel vagy szintereléssel alakítható ki.

A fém és a félvezető határfelületén lezajló reakciók alapvető fontosságúnak, minden ismert rendszerben jelentkeznek ezért ismeretük fontos. Hatásukra az eszköz elromlik. Ezek a felületi reakciók egyrészt új vegyületeket vagy fázisátalakulást okoznak, a Pt/GaAs, Pt/Ti/GaAs, Pd/GaAs kontaktusrendszerekben PtGa PtAs₂ (vékony réteget alkot) TiAs, PtAs₂, PtGa stb. vegyületek alakulnak ki.

Más részről a kontaktus fém bediffundál az alapanyagban, ez a jellemző reakció pl. Au esetében, miközben bináris vegyületek is képződnek. A reakció eredménye egy sor aranyat, galliumot, indiumot, arzént és foszfort tartalmazó fázis. Minél összetettebb egy III-V vegyület, annál bonyolultabbak a felületi reakciók. Összefoglalva megállapítható [25], hogy a kontaktus anyagok összetevői mint az Au, Pt, Ag, In, Mo, Ta, Ti, Pd reagálnak a félvezető felülettel és többé kevésbé bonyolult bináris vegyületeket alkotnak a félvezető felületközeli tartományaiban.

Megállapítható továbbá, hogy az adalékanyagok Se, Zu, Si, Be, Pe stb. külön is képeznek vegyületeket.

Jelenleg a III—V. félvezetőhöz létesített ohmos kontaktusok tulajdonságairól csak kevésbé elegendő ismereteink vannak. Ahhoz, hogy ezt a kérdést megnyugtatóbban rendezni tudjuk, még sokkal több kutatásra van szükség. Az 5. táblázat néhány kontaktus készítmény technológia, a hozzá szükséges anyagok és az elért kontaktus ellenállás adatait foglalja össze.

1.3. Következtetések

A gazdaságossági szempontok azt sugallják, hogy egy azonos technológiával a maximális típusvariációt gyártjuk.

Ez az ötlet úgy valósítható meg, hogy kidolgozzunk egy bázisteknológiát, amelyik bizonyos lépéseiben a megengedett határokon belül módosítható. Ennek ellenére a mikroelektronikát az jellemzi, hogy gyors egymásutánban jelennek meg új bázisteknológiák, bár bevezetésük nagyon költséges.

A mikroelektronikai technológiák viharos fejlődésében két egymással ellentétes irányzat figyelhető meg:

1. A gyártóhelyek magas beruházási költsége, néhányszor 10^8 USD, azt sugallja, hogy az adott technológiát annyira használjuk ki, amennyire csak lehet.
2. Teljesen új gyártmányoknál igen gyakran olyan magas fokú az integrált áramkörök javulása, hogy minél rövidebb idő alatt be kell vezetni a gyártásba.

Az ellentmondás feloldását az ún. „felfelé kompatibilis” technológiákban találták meg. A „felfelé kompatibilis” technológia olyan bázisteknológia

nológia, vagy technológiai részművelet, amelyik biztosítja, hogy az alacsonyabb fejlesztési fokon kidolgozott integrált áramköröket a fejlettebb technológiai színvonalon ugyanúgy lehet gyártani [5].

2. Alapanyagok

2.1. Szilícium-kristályok és rétegek

A mikroelektronika további fejlődése mindenek előtt az alapanyagtól függ. A szilícium a legfontosabb alapanyaga a mikroelektronikának, habár az anyagi jellemzői kevésbé előnyösek mint a legtöbb III—V vegyület félvezető.

Nincsen más félvezető, amelynek ennyire jók a fizikai, kémiai és technológiai tulajdonságai, és rendelkezésünkre is áll.

Mindezekért egyetlen félvezető anyagra sem dolgoztak ki ilyen magas műszaki színvonalú és gazdaságos technológiai eljárásokat.

Elképzelhetetlenül nagy kutatási és technológiai erőfeszítések tették ezt a nagytisztaságú hibátlan anyagot, a szilíciumot mindenhatóvá és mindenek a mércéjévé. Új anyagok csak akkor jöhetnek számításba, ha úgy technológiai gazdaságossági, mind alkalmazástechnikai előnyök együtt a jó ellátással ezt feltétlenül megkövetelik.

Ez azt jelenti, hogy a szilíciumot még ki fogják használni a maximális mértékben, és mindaddig, ameddig a Si el tudja látni szerepét nem igen fogják helyettesíteni más anyaggal, és mindenki azon fog dolgozni, hogy a Si a lehető legtöbb feladatra alkalmas legyen.

Nem szabad azt gondolni, hogy a Si területén olyan sok kutatást végeztek, és már nincs mit tenni, és a szilíciumot már tökéletesen ismerjük. Minél jobban csökkennek a mikroelektronikában méretek, annál több alapanyag probléma keletkezik. Ezek azok a problémák, amivel jelen cikkünk foglalkozik.

Szilícium egykristály

Alapjai a Si-mikroelektronikának, mert ezeket használjuk IC szubsztrátumként [5].

A Si egykristályok tisztasága a polikristályos anyag gyártástechnológiájának tisztaságától függ. A polikristályos anyagból növesztjük az egykristályt, az a legfontosabb művelet a kristály kémiai és „fizikai” tisztaságának javításában, igen jó minőségű, erősen megnövekedett átmérőjű 60 kg súlyú kristály előállításában (4. táblázat).

A növesztés megbízhatósága és reprodukálhatósága az automatikus átmérő-szabályozástól függ, infravörös érzékelők vagy digitális kamerák biztosítják az állandó átmérőt és stabilizálják a növekedési sebességet, és szabályozzák a mag felnövekedését a végső átmérőre.

A teljesítmény elektronikához és a CCD eszközökhöz szükséges nagytisztaságú anyagokat zónás kristálynövesztéssel állítják elő (FZ-kristályok). A szabályozási problémák azonosak a CZ-technológiában jelentkezőkkel.

A szilícium kristályok igen homogén P-alapú adalékolását neutron transzmutációs adalékolással

oldják meg. Igen nagy erőfeszítéseket tesznek a tengely és sugárirányú ellenállás változások csökkentésére. Keresztirányú mágneses tér alkalmazásával csökkennek a növekedési hibák, az oxigén tartalom $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ értékre csökken, az ellenállás 380 Ohmcm, nem lépnek fel rétegepülési hibák (stacking fault), és a hőkezelt szeletekben nem lesznek „swirl”-hibák vagy egyéb oxigénnel kapcsolatos hibák [13]. Módosították a CZ-berendezések tégelyét is. Mechanikai tulajdonságai miatt az FZ kristályoknál előnyös az N adalékolás [14].

Az oxigén atmoszférában hőkezelt szeletekben nagy a mikrohibák sűrűsége, ezek getterező centrumokként működnek. Hasonló lokális getterező hatást érhetünk el, ha a szeletek hátoldalát nemesgáz ionokkal bombázzuk. Ilyen „hiba tervezéssel” (defect engineering) lehetővé válhat három dimenziós áramkör struktúrák kialakítása, ez tovább növeli az integrálási fokot, a laterális méretek egyidejű csökkenésével. A csökkenés eredményeként $1 \mu\text{m}$ alatti struktúrák alakíthatók ki [7].

A mikroelektronikában jelenleg használt és a jövőben kifejlesztendő szilícium alapanyag legfőbb problémái a getterezési kérdések (oxigén és belső getterezés), és a megmunkálás során keletkező kristályhibák. Az érzékeny vizsgálati módszerek egy sor nagyon érdekes tudományos problémát hoztak felszínre a tudományos műszerfejlesztés, kutatás és gyártás, az in situ vizsgálatok a számítógépes vizsgálatok és az interpretáció területén (további információk [15]-ben található). A szeletek tartalmazhatnak A és B swirl-hibákat, kristályrács hibákat különösen intersticiális atomokat, kémiai szennyeződések mint a C és az O. A kristályban mechanikai feszültségek keletkeznek (4. táblázat) [5]. A technológiában szereplő magas hőmérsékletű hőkezelések eredményeként a kristály törekszik a legkisebb szabad energiájú állapot elérésére. E folyamat során néhány tipikus hiba jön létre pl. SiC precipitáció (szegregáció) egyes diszlokációk és diszlokációs hurkok, rétegződései hibák, ezek különösen epitaxiánál és oxidációnál gyakoriak. A további hibák keletkezését elősegítik a térfogati (swirl) hibák, precipitációk és felületi (mechanikai karcok, marószerszámcsiszoló maradványok, orientálási hibák, ionimplantációs károsodás) hibák [5].

A diszlokáció keletkezésére a nagyobb tisztasága miatt az FZ-kristály érzékenyebb mint a CZ-kristály.

Ezen hibák nagy érzékenységgel diagnosztizálása két okból nagyon fontos:

1. sürgősen el kell végezni ezen hibák tudományos vizsgálatát, hogy megismerjük természetüket és eredetüket,
2. megismerve a hibákat meg kell tanulni, hogyan lehet őket csökkenteni vagy elkerülni, és hogyan lehet ezt a folyamatot vezérelni, mindezt az áramkör struktúra méretének kb. $1 \mu\text{m}$ csíkszélességre való csökkentése mellett, az egyéb „scaling” faktorok figyelembe vételével.

Az irodalom [5] szerint elektromos vizsgálatokkal, elektron mikroszkóppal, elektron és ion spektrosz-

kópiával a következő legfontosabb kérdéseket kell megvizsgálni: *CZ-Si kristályban* a homogénen eloszlott oxigént ($7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ körüli érték), getterező *hatását*, a lehetséges legkisebb széntartalmat és természetesen a Si teljes hibaszervezetét. Hasonló módon kell vizsgálni a szigetelő/félvezető, fém/félvezető, szigetelő/fém *határfelületeken* a felületi állapotok eloszlását, az átmeneti rétegeket, a fázis-összetételt, a sugárkárosodást, a szigetelő rétegekben a (SiO_2 , Si_3N_4 , Ta_2O_5 , Al_2O_3) a hibákat és a szigetelő töltését a töltéshordozó transzportot a letörési tulajdonságokat a sugárkárosodást; a *gate elektroda anyagában* (polikristályos Si) a struktúrát, az elektromos tulajdonságot; a *vezető pályák anyagában* (Al, szilicidok): a bediffúziót, fázis-összetételt, struktúrát és az elektron migrációt. Úgy véljük a kristályok elektromos tértől függő anizotróp tulajdonságai, melyeket nemrég fedeztek fel [16] is megvizsgálandók a mikroelektronikai áramkörökre gyakorolt hatásuk szempontjából.

Szilícium egykristályos rétegek

Alapvető jelentőségű technológiai lépés szilícium egykristály rétegek leválasztása szilícium vagy szigetelőhordozóra. Teljesen függetlenül attól, hogy egykristályos (epitaxiális) vagy polikristályos réteget választunk le, ennek legáltalánosabban használt módja a kémiai gőzfázisú leválasztás (CVD) [19].

A szilícium technológián belül az epitaxiális szilícium réteg az alapja a bipoláris áramköröknek, de újabban egyre elterjedtebben használják unipoláris eszközökben is. Az utóbbi esetben az epitaxiális rétegnek azt a tulajdonságát használják ki, hogy kémiailag és fizikailag igen tökéletes és a fajlagos ellenállása akár 1000 ohmcm is lehet [17], [18].

A szilícium hordozóra növesztett szilícium réteget *homoepitaxiálnak* nevezzük. A Si homoepitaxiára vonatkozó kutatások fő irányai a következők: a leválasztott réteg homogenitása, vékony Si rétegek leválasztása, megadott adalékeloszlású réteg kialakítása, az adalékeloszlás automatikus vezérlése, az adalék atomok beépülésének dinamikája, a réteg fizikai és kémiai tisztaságának javítása (szennyeződések a vívógázból, különböző típusú rétegződési hibák, ponthibák, diszlokációk) ez utóbbi kutatási terület igen hasonló az alapkristály kutatásához.

Meg kell jegyezni, hogy a kristályhibáknak a helyi generáció/rekombinációra és a töltéshordozó mozgásra gyakorolt hatása, a kristályhibákon kiváló fém-szennyeződéssel is kapcsolatos. A homoepitaxiális szilícium rétegekben a kristályhibák következménye, hogy csökken a kisebbségi töltéshordozó élettartam; a $p-n$ átmenetek visszaram karakterisztikája romlik (soft-karakterisztika) a diszlokációk, kinövések és rétegződési hibák miatt kollektor-emitter átütések keletkeznek a bipoláris eszközökben; a bipoláris tranzisztorok területén lévő rétegződési hibák és diszlokációk miatt növekszik a zaj. Jelentős tevékenységet fejtenek ki a CVD technológia termelékenységének

növelésére. Az automatizálhatóság és a gazdaságosság javítására növelik az egyszerre megmunkálható szeletek számát és a szeletek átmérőjét, így csökkenteni lehet a Si felületre vonatkoztatott segédanyag és energia felhasználást. A legigéretesebb eljárás a kisnyomású CVD (a rendszer infravörös fűtésű, SiH_4 , SiH_2Cl_2 , H_2 gázkeveréket használ, nyomása $10^2 \dots 10^4 \text{ Pa}$).

Nagyon sok kutatómunkát fordítottak a zafírra és spineire növesztett Si egykristály réteg technológiájának kifejlesztésére, ez a *Si-heteroepitaxia*.

Habár a zafír nem felel meg az epitaxia általános tapasztalat szerinti előfeltételeinek (a jó epitaxiához az kell, hogy az alap és a réteg hasonló rácsállandóval rendelkezzen, hasonló legyen a szimmetriája, orientációja a kötés iránya és ereje) mégis egy sor kutató jó eredményekről számolt be. Jogosnak látszik az a feltételezés, hogy a szilícium és a zafír közötti kötés tetraéderesen rendezett oxigén atomok közvetítésével valósul meg. A Si és az $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ közötti gyenge reakció eredményeként a felület megmaradik és szabad kötések keletkeznek, oxigén nyomok mindig vannak a zafír felületén. Ez a reakció olyan mértékben történik, hogy egyes (SiO_4) és (AlO_4) tetraéderek keletkeznek hibás, nem kívánt, köztesréteg kialakulása nélkül. Az O—O kötés ezekben a tetraéderekben és az Al_2O_3 cellákban közel azonos hosszúságú. Ezen tetraéderek speciális tulajdonsága, hogy mint teljes egységek végeznek rotációs mozgásokat, egyes atomok/ionok pedig elmozdulhatnak, tehát változtathatóak a szögek és a kötési hosszak. A kationok, Al és Si, egymást helyettesíthetik. A néhány tized nm vastag köztes rétegben lévő tetraéderek összekapcsolódnak a szilíciumban lévő tetraédetekkel (SiSi_4) a tetraéder központi magja útján, a bázis-cella oxigén atomjai útján pedig a zafír elemi celláival és így jutunk az epitaxiális növekedéshez [20]. A fenti módon alakul az atomok/ionok tartózkodási valószínűsége az egyes rácspontokban, és ez megadja azt a tetraéder orientációt ami néhány rácsátóvolságon belül biztosítja a két réteg összekapcsolódását. Az így létrejövő tökéletes heteroepitaxiális Si-zafír rendszerek (SOS) felhasználásával sok helyen gyártanak VLSI áramköröket speciális célokra. A zafír előállítás és feldolgozása drága (módosított Czochralsky módszer vagy szalaghúzás). A klasszikus epitaxiális eljárás (amikor a hordozó atomi kölcsönhatások útján határozza meg a réteg orientációját), egy sor olyan módszert kutatnak, amely a kristály orientációját nem az atomi kölcsönhatások útján határozza meg. A legfontosabb ilyen eljárások a grafoepitaxia és a LESS (laterális epitaxia mag körüli újraszilárdulással). Az első eljárásban az orientációt a szubsztrátban lévő kristallográfiai tisztaságú síkokkal határolt árkok hálózata határozza meg. Az árkokat mikrolitográfiai módszerekkel alakítják ki amorf szigetelő rétegekből, mint például Si szeleteken lévő SiO_2 rétegből vagy kvarc-üvegből. A grafoepitaxia során a félvezetőt amorf alakban választjuk le, és aztán irányítottan újra kristályosítjuk valamilyen gyors hőkezelési módszerrel (lézer, elektronsugár, grafit-szalagos kályha).

A rekrisztallizáció legígéretesebb módja a villanófényes újrakristályosítás (összefoglalása és speciális irodalma [5] és [21]-ben található).

A LESS-eljárás olvadákból történő visszánövesztés, hasonló a zónás kristályhúzáshoz. A SiO_2 réteggel borított szilícium szeleten polikristályos Si réteg van, amely egy pontjában érintkezik az alakristállyal.

Ez vagy a hasonló módszerek a kilencvenes évek technológiai kutatási programjába tartoznak.

Mindezek ellenére a szilícium nem univerzális anyag, fény emittáló és lézer diódák például nem készíthetők belőle. Ezért kell tárgyalni a III—V-félvezetőket is ahogy azt már tettük a technológiai problémák esetében (1.2. pont).

2.2. III—V vegyület félvezetők, kristályok és rétegek

A GaAs, InP, GaAlAs, GaInAs és a négyes szilárd oldatok mint például a GaInAsP a VLSI mikroelektronikai alkalmazásokra szolgáló anyagkutatások központjában vannak (2. táblázat, 6.7. ábra).

A szilíciumban az elektronok mozgékonyasága alig valamivel több mint $1000 \text{ cm}^2/\text{V sec}$, addig a GaAs-ben szobahőmérsékleten $8000\text{--}9000 \text{ cm}^2/\text{V sec}$, ha 77 °K illetve $4,3 \text{ °K}$ -ra hűtjük le, ez $50\text{--}300\,000$, illetve $10^6 \text{ cm}^2/\text{V sec}$ értékre növekszik. Hasonló mozgékonyaság növekedés következik be, ha vékony rétegeket alakítanak ki vagy a csatorna extrém rövid. A GaAs és InP és a többi III—V félvezetőkben a szaturációs elektrontranszport

negyedakkora elektromos térrel valósítható meg mint szilíciumban (lásd 1.1. pont utolsó sorai.). Mindez a kis effektív elektrontömeg következménye.

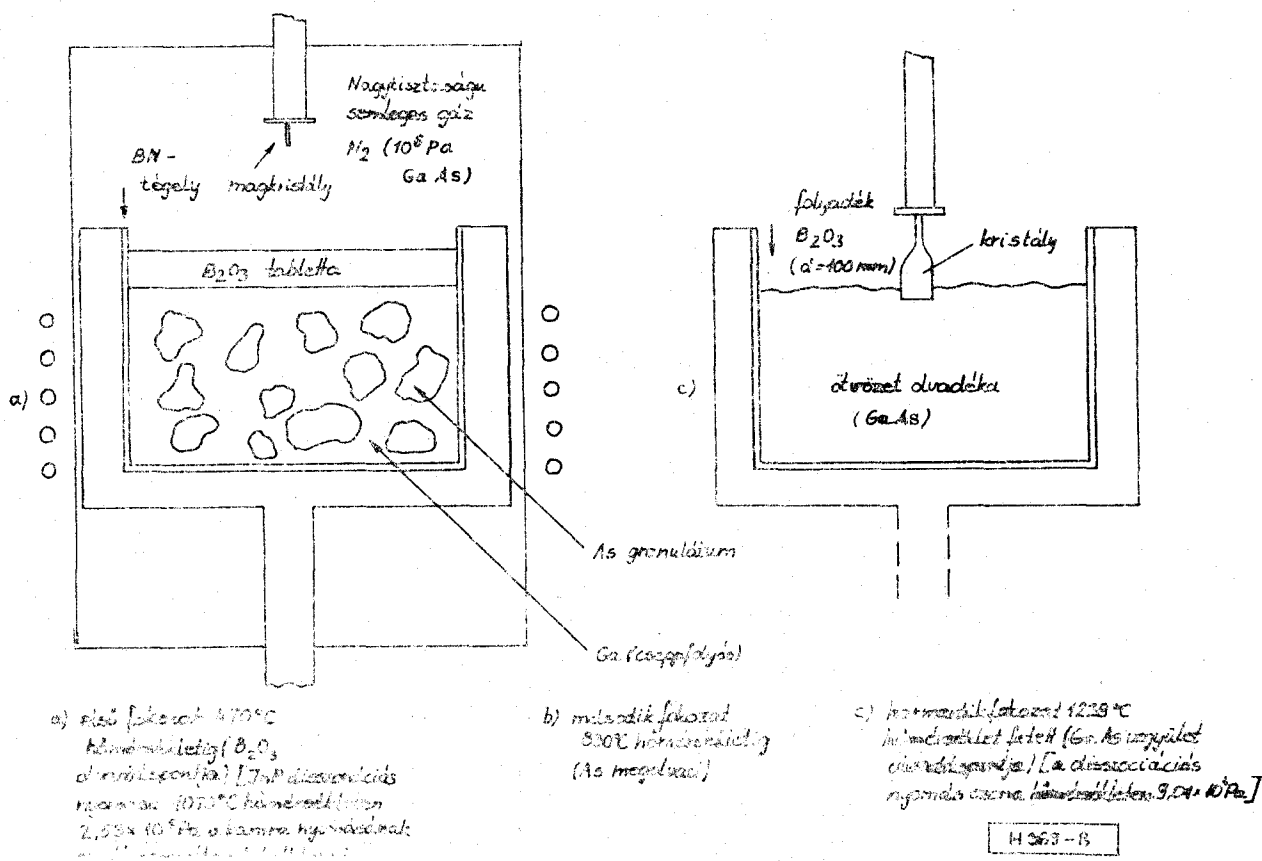
III—V vegyület félvezető kristályok

A III—V félvezető kristályok növesztésében a legnagyobb problémát a komponensek eltérő gőznyomása okozza.

Az úgynevezett LEC-módszer (8. ábra) módosított és modernizált változata [22] egyesíti a vegyület-szintézist a kristályhúzással [23].

A LEC-módszert GaAs és InP növesztésére használják. Az InP kristály növesztésekor polikristályos anyagból kell kiindulni. Az iparilag növesztett kristályok átmérője 75 mm , a kristályok tömege $3\text{--}5 \text{ kg}$. A probléma a viszonylag magas diszlokáció sűrűség, a diszlokáció kiváltó feszültség határértéke csak tizede a szilíciumra vonatkozó értéknek. Az értékek a kristályátmértől függenek.

Ezzel az eljárással félig-szigetelő GaAs és InP kristályokat növesztenek, a GaAs tipikus fajlagos ellenállása $10^7\text{--}10^8 \text{ Ohmcm}$, kompenzáló adalék nélkül. Az Fe adalékolt InP fajlagos ellenállása hasonló a GaAs-hoz. A LEC kristályhúzás javítása tökéletesebb kristály előállítását eredményezi, a diszlokáció sűrűség 100 cm^{-2} vagy kevesebb 75 mm átmérőjű kristályban.



8. ábra. A LEC (olvadákvédelemmel végzett Czochralski) technológia vázlata, GaAs növesztésére. a) kiindulási állapot, b) a GaAs olvadáspontjánál (1238 °C) magasabb hőmérsékletnek megfelelő állapot

Mint azt a jelen cikk technológiai részében már ismertettük, ezek a kristályok a III—V vegyület félvezető IC-k és eszközök alapanyagai.

III—V vegyület rétegek

A III—V vékony rétegek készítésének két szempontból van jelentősége, először, hogy lehetőség van olyan hármás vagy négyes vegyületek előállítására, melyek az előbb említett kristálynövesztési technológiával egykristály formában nem állíthatók elő, másrészt heteroátmenetek előállítására ez az egyetlen módszer.

A fenti két szempont egymással igen szoros kapcsolatban van. A mi szempontunkból egyedül az utóbbi érdekes. Az összes lehetséges eljárás közül a fémorganikus kémiai leválasztás (OM—CVD) és a molekulásugár epitaxia (MBE) a legjelentősebbek. Az utóbbi eljárást zömében a kutatásban használják, mert drága ugyan, de csodálatos in situ analízist tesz lehetővé (SIMS, AES, LEED, RHEED stb.), alacsony hőmérsékleten működik és igen pontos. Az OM—CVD hasonlóan a Si technológiában használt CVD-berendezésekhez a gyártásban használatos, pontos technológia és sok mindennel kompatibilis. A szubsztrát a reaktor magas hőmérsékletű helyén van, és a reaktor falai hűtöttek. A rétegnövekedés és a vegyület szintézis csak a magas hőmérsékletű helyeken történik.

Az OM—CVD-módszer további előnye, hogy a gázfázis összetétele és a kristály összetétele között egyértelmű összefüggés van.

Az adalékolás „egyszerű”, az adalékanyagok a réteg leválasztáshoz szükséges anyagokhoz hasonló vegyületek alakjában állnak rendelkezésre.

Az OM—CVD jó alap a tömeggyártott III—V vegyület-félvezető alapú integrált áramkörök és eszközök fejlesztéséhez.

A pontos „nanométer” III—V mikroelektronikához feltétlenül szükséges az MBE-eljárás. Ezzel közel ideális kristály növeszthető.

A III—V félvezetők azért alkalmasak rétegrendszerek készítésére mert a rácsállandójuk hasonló és változtatható az összetétellel, tiltott sávjuk széles, és a hőtágulási együtthatójuk egyforma. A GaAs egészen 350 °C üzemi hőmérsékletig használható, ez közel kétszerese a Si maximális üzemi hőmérsékletének.

A félvezető kutatás elragadó eredménye volt az *Esaki* által kidolgozott szuper-rács. Ebben néhány atomrétegni félvezető rétegek váltogatják egymást. Előállításukra az MBE eljárás adott lehetőséget. Ezzel új minőségű heteroátmenet született. Az ilyen típusú heteroátmenetekben hasonló vagy azonos rácsparaméterekkel rendelkező (ez technológiai szempontból fontos) de különböző tiltott sáv szélességű rétegek váltogatják egymást, ennek következtében nem folyamatos a dielektromos állandó a töltéshordozók potenciálgóttakon keresztül mozognak [4], [18], [24].

A VHSI és mikrohullámú eszközök szempontjából fontos, hogy a potenciál gátak a különböző töltéshordozókra különböző magasságúak. Ez a különböző tiltott sáv szélességekből és különböző affinitásokból következik. Ilyen módon injektált

töltéshordozó csomagok együtt tarthatók és növelhető a sűrűségük is.

A heteroátmenetek legérdekesebb tulajdonsága a határfelületeken a sávszélek alakja. Ha az átmenet igen vékony, néhány nm, akkor egy tüske keletkezik. Ezek a tüskék igen nagy elektron mozgékonytárgyat eredményeznek az elektron két dimenziós elektrongázhoz hasonlóan viselkedik a potenciál völgyben.

Technológiai trükkkel a donorokat a vezető csatorna mellett helyezik el. Az intrinsic GaAs csatornába a hordozókat nagy sáv szélességű (AlGaAs $E_g=1,6$ eV) anyagból juttatják be. Az alacsony télerősséghez tartozó elektron mozgékonytárgya ebben a heteroátmenetben, a Hall mérések szerint, 300 °K hőmérsékleten 10 000 cm^2/Vsec és 77 K hőmérsékleten 60 000 cm^2/Vsec , ha az AlGaAs réteg vastagságát és a csatorna hosszúságát néhány nm-re csökkentjük és az elektron réteggkoncentrációja $5,5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. Információnk szerint más hasonló heterogénátmenetekben 4,3 K hőmérsékleten 300 000 és közel $10^6 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ mozgékonytárgyat észleltek. Ehhez hármás és négyes vegyületeket használtak a vékony heteroátmeneteket adalékolt és intrinsic rétegekből építették fel.

Napjainkban és a jövőben nem okoz gondot az eszközök 77 K hőmérsékletre hűtése, ez cseppfolyós nitrogénnel megoldható.

A ballisztikus elektron transzport lehetőségeit kihasználva — erre a technológiai lehetőségek adottak — lehetővé válik kvantummechanikai áramkörök és eszközök készítése. Minden tudásunkat latba vetve III—V vegyület félvezetővel lehetséges 10^5 darab 1 ps késleltetési idejű kaput tartalmazó VHSI áramkör készítése.

Ez a fejlesztés a super sebességű számítógépekhez szükséges ahol a késleltetési idő az egyidejű számításokhoz csak a psec törtrésze lehet kapunként. Biztosak vagyunk abban, hogy a következő 5—7 évben ilyen eszközök gyártásban lesznek.

3. Kitekintés

A kitekintés nem nélkülözheti az alapvető megállapítások ismétlését:

- A következő évszázadig és tovább a jövőben is a szilícium lesz a vezető félvezető anyag. Ez azt jelenti, hogy további kutatásokat folytatnak az elem sűrűség növelésére, a nagyobb bonyolultságú funkciók kidolgozására, az eszközök megbízhatóságának növelésére, és az egyes technológiai műveletek reprodukálhatóságának javítására.
- Az optoelektronikai és mikrohullámú alkalmazások mellett a III—V félvezetőket fokozottan fogják alkalmazni VHSI áramkörökben. A növekedés sebessége függ a mikroelektronikai gyártás gazdasági növekedésétől és a növekvő alkalmazási területekről.
- A szerves anyagok a mikroelektronikában nem csak mint tokozó és hordozó anyagok szerepelnek, hanem új szerepkörben és minőségben mint vezető, félvezető és ellenállás rétegek is

alkalmazást nyernek. Meglehet hogy egy napon polimer rétegekből IC vagy teljesítmény elektronika gyártható.

— A laterális struktúrák a mikroelektronikában az évtized végére általánosan $1 \mu\text{m}$ alatt lesznek, a „scaling-down” minden következményével.

A technológia, bonyolultsága miatt, viszont egyre drágább lesz, a gyártmányok csak akkor lesznek piacképesek, ha végtermékekben jelennek meg mint egy chip-ből álló komplex funkciót ellátó önálló egységek, vagy egy nagy információs rendszer elemei.

Az alkalmazási területek: számítógépek, robotok, mindenféle gépek, teljesen automata gyártó sorok, repülőgépek, hajók, autók, forgalomirányítás közúton, sínen, vízen, levegőben és az űrben, otthoni használati berendezések, kutató-fejlesztő és mérőberendezések stb.

— Továbbiakban tekintünk messzebbre, ahol a VHSI III—V kriomikroelektronika van, az új típusú elektronikára [26].

— például az elektronikailag használt Gunn effektus, ahol egy elemet használnak egy funkció megvalósítására, szemben a hagyományos IC-vel, ahol erre több elem kell, ezekben az eszközökben, amennyire ma tudjuk problémát jelent a késleltetési idő/vesztési teljesítmény szorzat.

— A jól ismert kryoelektronikus Josephson effektus alagút diódából kiindulva alkalmazhatunk kvantum-mechanikai szupravetítő interferencia eszközöket. Logikai kapu-áramkörök, memóriák és számítógép egységek a mai mikroelektronika technológiai bázisán elkészíthetők, bár a Josephson áramkörök működéséhez cseppfolyós héliumra van szükség. Meg kell jegyezni, hogy ez elérhető $0,01 \text{ ns}$ késleltetési idők a fejlett III—V félvezetőkkel olcsóbban elérhetők. Bizonytalan, hogy bekerülnek-e a mikroelektronika eszköztárába, jelenleg nem látjuk, hogy lenne reális előnyük.

Valóban új ötlet az optikai és biológiai rendszer. Ilyen rendszerekkel messzire távolodtunk az elektronikától de más informatikai és jelfeldolgozási elveket alkalmazunk. Az ilyen optikai rendszerek jeltovábbításra fényt használnak. A nem lineáris optikai effektusok lehetőséget adnak arra, hogy egy optikai közeget pl. InSb-ot vagy egy szuper-rácsot, egy lézer sugárral a következő lézerpulzus számára áthatolhatatlanná tegyünk. Ilyen kapcsolókkal digitális jelfeldolgozás lehetséges.

A másik lehetőség egy lézer fényintenzitásának befolyásolása egy másik lézer segítségével ezzel optikai tranzisztort valósítható meg.

Biztosak vagyunk abban, hogy ezek az elvek nem kerülnek önállóan alkalmazásra, hanem csak beágyazva mikroelektronikai és optoelektronikai rendszerekbe, esetlegesen egychipes megoldásban.

Jelenlegi érdeklődésünkől messze áll a biológiai elvek felhasználása az információ feldolgozásban. Ennek ellenére érdekes lehet a kémiai és biológiai folyamatokkal élő szervezetekben történő információ feldolgozás titkainak megfejtése, így sokat tanulhatunk a szervezési elvekből.

IRODALOM

- [1] *Junghans, B., Schneider, H. G.*: Messen, Steuern, Regein (msr) 27 (3), 98 (1984).
- [2] *Electronics* 53 (1980) 9, a szám összes munkatársa és magán információk.
- [3] *Dreseher, K.*: Thesis (B), Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt, 1981.
- [4] *Beneking, H.*: Phys. Bl. 38 (6) 146 (1982).
- [5] *Eckhart, D., Hadamovsky, H. F., Jungans, B., Schneider, H. G.*: Mikroelektronik — Stand und Entwicklung (2 nd Edition) (Volume of the Microelectronic-Series edited by H.G. Schneider) Berlin 1984.
- [6] *Sugano, T.*: Personal information and Spectrum 16 (1), 22 (1985).
- [7] *Enderlein, R.*: Wissenschaft und Fortschritt 34 34 (12), 316 (1984).
- [8] *Nuzillat, G., et al.*: ISSCIRC 1981 Proc., p. 65.
- [9] *Wider, H. H.*: J. Vac. Sci. Technol. 18 (3), 827 (1981).
- [10] *Pettenpaul, E.*: Inst. Phys. Conf. Soc. No. 53, 21 (1981).
- [11] *Kurzinger, W.*: Nachrichten — Elektronik 11, 362 (1979).
- [12] *Tschulena, G.*: Nachrichten — Elektronik 2, 45 (1978).
- [13] *Suzuki, T.*: Semiconductor Silicon, The Electrochem. Soc., Princeton, NJ, 1981, p. 90.
- [14] *Taruri, T., Takeishi, T.*: like [13], p. 6.
- [15] *Brümmer, O., Heydenreich, J., Krebs, K. H., Schneider, H.-G.* (Eds.): Festkörperanalyse, Berlin, 1980.
- [16] *N. N.*: Spectrum 16 (4) V (1985).
- [17] *Herring, R. B.*: Solid State Technology 22. 11 (1979).
- [18] *Schneider, H. G., Ickert, L., Richter, F.*: et al.: Halbleiterepitaxie. Leipzig, 1984.
- [19] *Arnold, H.*: Chemische Dampfablagerung — CVD-Grundlagen für die Mikroelektronik (Volume of the Microelectronic-Series edited by H.-G. Schneider) Verlin, 1982.
- [20] *Schneider, H.-G., Karge, H., Weber, B.*: Physica status solidi (a) 77, 201 (1983).
- [21] *Ickert, L., Schneider, H.-G.*: Wachstum einkristalliner Schichten. Leipzig, 1983.
- [22] *Metz, E. P. A., Müller, R. C., Mazelsky, R.*: J. Phys. Chem. Solids 26, 782 (1965).
- [23] *Augoin, T. R., Wade, M. J., Ross, R. L., Sacage, R. O.*: Solid State Technology 1, 79 (1979).
- [24] *Unger, K., Schneider, H. G., et al.*: Verbindungshalbleiter, Leipzig, 1985.
- [25] *Piotrowska, A., Guivarch, A., Pelous, G.*: Solid State Electronics 26 179, (1981).
- [26] *Enderlein, R.*: Wissenschaft und Fortschritt 35 (2), 49 (1985).