

HÍRADÁSTECHNIKA

Mikroelektronika 2000-ig

DR. SZÉP IVÁN
MTA Műszaki Fizikai
Kutató Intézete

Bár divat a prognóziskészítés, a mikroelektronika fejlődéséről jóslásokba bocsátkozni nem túl hálás feladat. Az elektronikai berendezések egyre bonyolultabb funkcióval járó méretnövekedés kiküszöbölésére alig harminc éve indult meg az a miniatürizálási folyamat, amelynek egyik eredménye a mai mikroelektronika. A kor igénye által sarkalt technológiai fejlődés üteme olyan gyors volt, hogy egy adott időpontban a szakértők többsége szerint még annak megjósolására sem lehetett vállalkozni, mi várható akár csak öt év múlva. A hatvanas évek elején az amerikai Teal, Moore és néhányan mások annak a meggyőződésüknek adtak hangot, hogy a legközelebbi 10–15 évben a szilárd testekben kialakított integrált áramkörök révén a mikroelektronika döntően új szakaszába lép és alapvetően meg fogja változtatni az elektronikai ipar termékeinek arculatát. Az ugyancsak amerikai Noyce volt az, aki a planáris szerkezetű integrált szilíciumeszközök technológiájának feltalálásával a döntő lépést ebbe az irányba megtette.

Mások, óvatosabban, még mindig esélyt láttak az egyedi szubminiatűr alkatrészeket összeszerelő, ún. *mikromodul-technológia* továbbfejlődésében és a különböző más, szitanyomást vagy vákuumban történő elpárologtatást alkalmazó vastag-, illetve vékonyréteges mikroáramköri technológiák fejlődésében.

E homlokegyenest eltérő megítélés fő oka az volt, hogy a planáris szilíciumeszközök technológiája olyan, az elektronikai alkatrészgyártásban szokatlan eljárásokat alkalmazott, mint pl. a nyomdaiiparból átvett fotolitográfiát, a szilárd anyagba gőz állapotból diffúzió útján történő adalékbevitelt, vezetékhalózat előállítását fémeknek vákuumban történő ráparologtatásával. A planáris technológiához szükséges fotosablonok néhány mikrométeres illesztési pontossága mint kévtelmény gyártási körülmények között annyira irreálisnak látszott, hogy ezt a technológiát legfeljebb laboratóriumi célokra tartották alkalmasnak.

Ma már látjuk, hogy Moore-nak és Noyce-nak volt igaza. De azt is látni kell, hogy a mikroelektronika nemcsak integrált félvezető áramkörökből áll, hanem más mikrominiatűr komponensekkel is operál. Ez a fejlemény a prognóziskészítés egy gyakori bukatójára mutat rá, amikor a megjósolt dolgok bekövetkeznek ugyan, de más formában és más tartalommal. A ma használatos hibrid mikroáramkörök például messze nem azonosak a hajdani ellentábor által favorizált mikroáramkörökkel, kialakulásuk éppen a planáris technológiával előállított diszkrét és integrált aktív szilíciumelemek felhasználásának köszönhető.

A mikroelektronika jelenlegi térhódításának mozgatója kétségtelenül a szilícium alapú integrált áramkörök rohamos fejlődése. Az egy kristálydarabon integrált elemi komponensek száma a legutóbbi tizenöt évben évenként megkétszereződött. E Gordon Moore által megfogalmazott tapasztalati törvényből következnek a hasznos kristályméret növekedésére, a teljesítmény-sebesség szorzat, a fajlagos önköltség csökkentésére vonatkozó más megfigyelt időfüggések.

A legutóbbi két évben azonban érezhetően lelassult a fejlődés üteme. Ennek oka nem a technológiai nehézségekben keresendő, hiszen a fizika törvényei által állított méretkorlátokat a technológia még nem érte el. A jelenlegi gazdasági helyzetben viszont új felismerés, hogy a mikroelektronika fejlődésének határai nem is annyira technológiai, mint inkább gazdasági jellegűek. A több százezer elemi komponenset tartalmazó áramkörök tervezése és ellenőrző mérései olyan költségterhet jelentenek, amely csak igen nagy gyártási darabszámok értékesítése esetén térülhet meg. Az ilyen nagy bonyolultságú áramkörök iránti igény azonban többnyire elmarad e darabszámoktól. Általános a vélemény, hogy a továbblépéshez jelenleg a tervezési elvek megújítására, a megrendelő igényeihez rugalmasan alkalmazkodó tervezési technológiára, az egyetlen szilíciumlemezen többféle funkciót magában foglaló variábilis konstrukciók rendszerének kialakítására és nem utolsósorban a végminősítő mérések költségétényezőjének csökkentése érdekében, az áramkörbe beépített mérő-ellenőrző hálózatra

Rövidítve elhangzott a „Microelectronics '82” konferencián (Siófok, 1982. május 5–7.).

van szükség. A mikroelektronikai komponensek, elsősorban az integrált áramkörök gyártásának világszerte növekvő összefonódása az elektronikai berendezések és készülékek gyártásával arra mutat, hogy ennek a továbblépésnek finánciális terheit az alkatrészipar, különösen a jelenlegi gazdasági helyzetben, saját maga már nem képes vállalni.

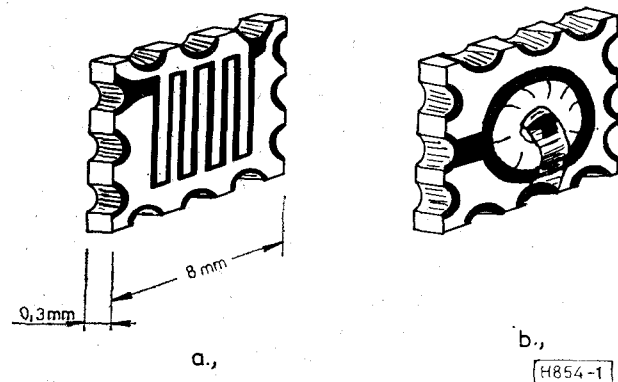
Ilyen körülmények között a mikroelektronika fejlődésében talán még kockázatosabb a változás jeleit kutatni. Tagadhatatlan, hogy vannak ilyen jelek; várhatók, de nem túl hamar és nem túl gyors változások. Az új már mutatkozik, de attól nem kell tartani, hogy a szilícium kora hirtelen véget ér. Ami megszűnőben van, az a szilícium monopolhelyzete. Új anyagok, új struktúrák, új fizikai effektusok bővítik a mikroelektronika eszközválasztékát, amelyekkel új, eddig nem ismert technikai megoldások érhetők el.

A továbbiakban az anyagtechnológia néhány olyan olyan új fejleményéről lesz szó, amely ilyen változásokhoz vezethet.

A kezdet

Ha vizsgálni kívánjuk a fejlődés irányait, nem árt visszatekinteni a kezdetre. Az ötvenes években a vezető ipari államokban főleg a haditechnika, a rakéta- és űrtechnika által támasztott igények nyomán az elektronikai készülékek, szerelvények méreteinek csökkentését szorgalmazták (1). Ugyanilyen igénnyel jelentkezett a számítógépipar is. Ezek kielégítésére elkezdődött az alkatrészek miniatürizálása, a szerelvéstechnikában bevezették a nyomtatott huzalozású hordozólapokat és az akkortájt megjelent tranzisztorral az elektroncsőhöz képest jelentős méretcsökkentés vált lehetővé.

A következő lépés az alkatrészek „lecsupaszított”, tehát szokásos tokjuktól, védőbevonatuktól mentes alakban egyetlen szerelvényre történő összeépítése volt. Ebben az ún. mikromodulrendszerben az e célra kialakított aktív és passzív alkatrészeket egységes, 8×8 mm méretű kerámialapokra szerelték (1. ábra) és ezekből forrasztott huzalos kötésekkel



1. ábra. Mikromodul-lapok (1959)
a) vastagréteg ellenállással
b) ötvözött tranzisztorral

alakították ki a szükséges „modulokat” (2). Ez a módszer a korábbi méretekhez képest 1:10 arányú csökkentést eredményezett. Ezzel egyidejűleg fejlődtek a vastag és vékony réteges mikroáramköri technológiák is, ahol a kerámia, illetve üveg hordozólemezekre rétegek alakjában különböző fémekből, fémötvezetkekből, szigetelőkből kialakított szubminiatur ellenállások, kondenzátorok mellé miniatűr diódák, tranzisztorok felerősítésével dolgozták ki a különféle integrált hibrid áramköröket. Végül 1961-ben jelentek meg a monolitikus integrált félvezető áramkörök (3). Ettől kezdve beszélhetünk valóban mikroelektronikáról. Alkalmazásának általános előnyei közül a forrasztott összeköttetések számának jelentős csökkenése miatt azonnal felismerték a *megnövekedett megbízhatóságot*, a *gyártási költségekben jelentkező megtakarítást*, a berendezések *megtervezésére fordított idő lerövidülését*, a *méretekben, súlyban és tápteljesítményben mutatkozó csökkenést*. Nem volt teljesen előre látható, hogy a mikroelektronika egy új ipari forradalom elindítója, amely a számítás-, irányítás- és hírközléstechnika lehetőségeinek kiterjesztésével új korszakot nyit gazdasági és társadalmi életünkben egyaránt.

A hatvanas évek

A fentiekből talán úgy tűnik, hogy a mikroelektronika új fejlődési irányának kialakulása a tranzisztor feltalálásával áll közvetlen kapcsolatban. Valójában több mint nyolc évnél kellett eltelnie, amíg a tranzisztor bebizonyította önmaga létjogosultságát, és további hat évnél, amíg kialakult az a technológia, amelyik a tranzisztoron túllépve az integrált áramkörök és ezzel a tulajdonképpeni mikroelektronika korszakát is megnyitotta. Ebben a másfél évtizedben azonban több történet technológiák pusztázásánál. A bipoláris elven működő p-n átmenetes diszkrét és integrált eszközök mellett megjelentek a fémoxid-szilícium (MOS) rétegszerkezetek tulajdonságain alapuló diszkrét és integrált eszközök. Kialakult a szilárdtestek fizikájára épülő anyagtudomány, melyre alapozva indult rohamos fejlődésnek az egyre szélesebb anyagválasztékkal és egyre változatosabb módszerekkel operáló mikroelektronikai technológia, fejlődtek ki a nanométeres mérettartományokba behatoló szerkezet- és anyagvizsgálati módszerek.

Az anyagok területén a hatvanas években végbe ment fejlődésre álljon itt néhány példa. Ismeretes, hogy a félvezető anyagok szükséges fizikai tulajdonságait specifikus adalékanyagok segítségével szabályozzák. A félvezető diódák, tranzisztorok nélkülözhetetlen szerkezeti eleme a p-n átmenet, amely a formailag pozitív *lyukak* útján vezető p-típusú és a negatív *elektronok* útján vezető n-típusú szakasz között jön létre. A p- és az n-tartomány kialakításához szükséges adalékok minősége, mennyisége az előállító eszköz célparamétereitől függ. Ahhoz azonban, hogy ez a művelet kézben tartható legyen, el kell távolítani az alapanyag eredeti szennyezéseit. Az idegen szennyező atomok eltávolításának módszerei éppen a félvezető anyagok technológiájában alakultak ki olyan hatékonysággal, hogy egy ilyen eljárással tisztított

szilíciumban tízmilliárd szilíciumatomra esik egy aktív idegen atom. Hasonlóképpen fokozódott az igény a technológiában használt sokféle egyéb vegyi anyag tisztasága iránt is; az „elektronikai tisztaság” mint minőségi jelző három-négy nagyságrenddel tisztább anyagot jelent mint a kémiában használatos „analitikai” tisztaság.

A fotolitográfiai műveletektől megkívánt felbontóképesség (4–5 mikrométeres csíkszélesség) csak új, nagy fényérzékenyséű és ugyanakkor bizonyos vegyszereknek ellenálló lakkok (fotoreziszttek), nemkülönben 1000 vonal/mm felbontású fotolemezek kidolgozásával volt lehetséges. A műanyagok megjelenése a tokozás technológiájában speciális, a műanyagiparban eddig teljesen szokatlan tisztasági követelmények teljesítését, semleges vegyhatású alapanyagok használatát tette szükségessé. Rendkívüli mértékben megnöttek az igények a gyártásban használt víz, ipari gázok, a környezeti levegő tisztaságával szemben, ami igen költséges szolgáltatási hálózat és ellátás létrehozásával járt együtt.

A hetvenes évek

A hetvenes évek elején, miközben egyre nőtt az egy kristályelemre integrált elemek száma és funkcionális komplexitása, kezdtek megjelenni olyan új eszközök, amelyek más alapanyagra és más fizikai effektusokra épültek. Ilyenek voltak elsősorban a szilíciumhoz igen közeli elektronszerkezettel rendelkező, az elemek periódusos rendszerének harmadik oszlopába sorolt alumínium, gallium, indium és az ötödik oszlopban szereplő foszfor, arzén és antimon 1-1 atomjából képződő $A^{III}B^V$ vegyületfélvezetők (mégkülönböztetésül az *elemi félvezető* germániumtól, szilíciumtól). A kilenc vegyület közül a legjelentősebbek a galliumarzenid, a galliumfoszfid és az indiumfoszfid. E csoport egyes tagjainak legjellegzetesebb sajátja, hogy a bennük kialakított p-n átmenetben az elektromos áram p-oldali lyuk- és n-oldali elektron-komponense közvetlenül rekombinálódik és energiakülönbségük megfelelő hullámhosszúságú fény alakjában kisugárzódik. Ezen a jelenségen alapulnak az ismert piros, zöld és sárga színű „világító” diódák (LED) és kijelzők, az infravörös tartományban sugárzó lézerdiodák. Ugyanezek az anyagrendszerek p-n szerkezet formájában alkalmasak adott hullámhosszú fénysugárzás szelektív detektálására is. Ezekben a vegyületfélvezetőkben tehát a p-n átmenet a fény és az elektromos energia reverzibilis átalakítását képes elvégezni. Ezzel a felfedezéssel megnyílt a lehetőség, hogy a mikroelektronikában az elektromos áram mellett a nagyobb terjedési sebességű és sokkal több információ hordozására képes fénysugárzást is igénybe vegyünk. Új mikroelektronikai ágazat keletkezett, az *optoelektronika*.

A kutatások további lehetőségeket tártak fel az elektromágneses energia különböző megjelenési formáinak egymásba történő átalakítására és az információ továbbításában és feldolgozásában történő felhasználására. Egyes vegyületfélvezetőkben mint pl. a galliumarzenidben, indiumfoszfidban a rájuk kapcsolt egyenfeszültség egy meghatározott küszöb-

értékénél igen magas, 10^9 Hz körüli frekvenciájú rezgések lépnek fel (4). Ez az ún. Gunn-effektus általában jön létre, hogy az említett félvezetőkben a vezetési elektronok részére több energiasáv áll rendelkezésre. Megfelelő nagyságú elektromos tér hatására az alapsávból a melléksávba léphetnek át az elektronok. Itt azonban mozgékonyaságuk kisebb, az áramerősség emiatt csökken, az áramfeszültség karakterisztikán negatív ellenállású szakasz jelenik meg. A megfelelően kialakított áramkörben ennek következtében rezgések keletkeznek, amelyek frekvenciája a félvezető lemez vastagságától és anyagi tulajdonságaitól függ. A Gunn-diódák megjelenésével a mikroelektronika a mikrohullámú frekvenciatartományokra is kiterjesztette hatását.

A hetvenes években a mikroelektronika fejlődése a szilíciumalapú eszközök területén látványosan folytatódott. A bipoláris és a MOS-áramkörök párthívei között dúló koncepcionális csaták az áramkör integrálás különböző szintjein (**SSI**, **MSI**, **LSI**) keresztül elvezettek a **VLSI**-korszakba, a százalékos elemsűrűségű integrált áramkörök kidolgozásához. A hatvanas években a tranzisztortechnológiában használt 2–2,5 cm átmérőjű szeletek helyett a **VLSI**-áramkörök már 10–12 cm átmérőjű szilíciumszeleteken készülnek. Az ezekhez előállított 1 méter körüli hosszúságú egykristályok súlya 25–30 kg! A korábbi technológiai eljárások mellett új technológiai megoldások jelentkeztek, mint pl. az ion-implantációval történő adalékbevitel, a nedves kémiai megmunkálást felváltó, nagyobb pontosságú „száraz” ion-marásos technológiák, a helyenként 1 mikrométer méretű alakzatokat tartalmazó fotosablonok előállítását fény helyett elektron-sugárral végző elektronlitográfia.

Az évtized termékújdonságai között említendők a fenntartó feszültséget nem igénylő elektromosan átprogramozható tartós memóriák (**EAROM**, **EEROM**), a töltéstovábbításon alapuló soros tárolók, képfelvevők (**CCD**), a hengeres mágneses domének tulajdonságait felhasználó „buborék”-memóriák, az akusztikus és elektromos energia kölcsönös átalakítását létrehozó felületi akusztikus hullámú eszközök és a hetero-átmeneteken alapuló félvezető lézerek (5–10).

A nyolcvanas évek

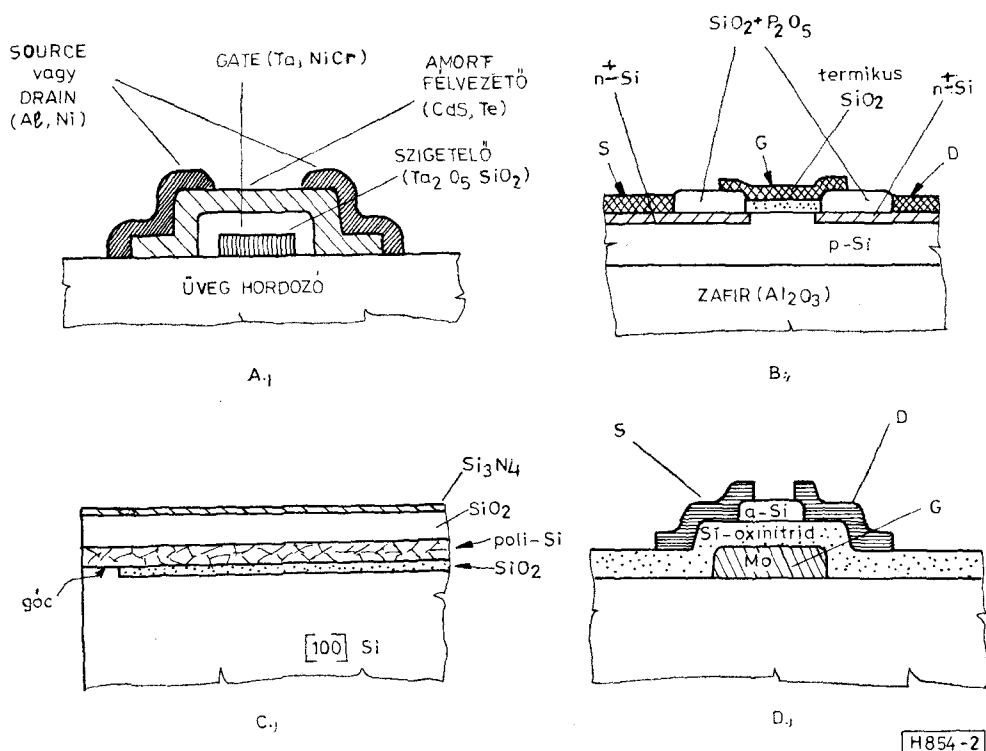
1980-ban a világ elektronikai célokat szolgáló félvezetőtermék-forgalma elérte a 20 milliárd dollárt. Ennek hetven százaléka mikroelektronikai alkatrész volt. Napjainkban is folytatódik az integráció fokának növekedése: egy 5×6 mm-es szilíciumdarabon 100 000 integrált elem nem számít rekordnak, az információátvitelt szolgáló memória-áramkörök rendezetten ismétlődő elemei hasonló méretű szilíciumkristályon a 100 000 bitet meghaladó tárolókapacitás felé tartanak és 0,2 μ m-es csíkméret mellett az 1 millió bit sem látszik elérhetetlennek. A mikroprocesszor sikerét folytatva már itt vannak az egyetlen kristálydarabon integrált mikroszámítógépek! A gondok azonban sűrűsödnek. A korábban vázolt gazdasági korlátok mellett a technológia korlátai is kezdenek jelentkezni. Kellemetlen kérdések hang-

zanak el: meddig érdemes vagy lehet egy szilíciumszelet átmérőjét növelni? Kiszámították, hogy 5×6 mm-es kristályméretnél a szeleten a kihozatalt lerontó hibák száma nem lehet több mint $5/\text{cm}^2$, ha a kihozatalt a még elfogadható 10% fölött akarjuk tartani. Ez felfelé korlátozza az áramkörök kristályméretét, lefelé pedig a legkisebb alakzatméretet. De hát ki a felelős a kristályhibákért? Az anyagtudomány derítette ki, hogy gyakorlatilag mindenki, aki a szilíciumkristállyal kapcsolatba kerül. A kristály gyártójáról kiderült, hogy még oly gondos munkája esetén is tökéletesnek hitt egykristályába főleg oldott oxigén alakjában nagy mennyiségű lappangó hibaforrást épít be, amely a technológiai folyamatok hőhatásai által „hívódik” elő és okoz selejtet a kész termékben. Ha viszont az oxigénszint egy meghatározott érték alá csökken, a nagy méretű szilíciumszeletek a hőkezelések során deformálódnak és feldolgozásra alkalmatlanná válnak. A szelettechnológia nagy számú lépése sem ártatlan további selejt-okok előidézésében; gondoljunk csak a fotó-leképezés vagy a kémiai marás szórása által előidézett hibákra.

Az integrált áramkörök funkcionális sűrűségének növekedésével újabb korlátként jelentkezik a meghajtó teljesítmény, amely léghűtés esetén legfeljebb $1 \text{ W}/\text{cm}^2$ lehet. Ha eltekintünk a kényszerhűtéstől mint kényelmetlen megoldástól, ez meghatározza az elektronikus készülék minimális méretét is, amit pl. a nagy teljesítményű számítógépek konstrukciós méretezésénél figyelembe kell venni. Ugyancsak korlátozzák az alkalmazható teljesítményt a vékony párologtatott vezetékek, amelyekben a megengedett-

nél nagyobb áramok hatására anyagvándorlás lép fel és ez egy idő múlva szakadáshoz vezethet.

A napjainkra kialakult planáris szilíciumeszközök konstrukciója eléggé felemás képet mutat, ha meggondoljuk, hogy a szilíciumszelet felületén elrendezett átlagosan 10 mikrométer átmérőjű tranzisztor- vagy dióda-elemek mélységben sem igényelnek többet 10 mikrométernél, azaz a szilíciumszelet teljes vastagságának 5%-ánál is kevesebbet. A szilíciumszelet tehát lényegében mechanikai hordozó szerepét tölti be, aktív funkciót csupán egy vékony felületi réteg visel, amelynek anyagi tulajdonságai ráadásul lényegesen eltérnek a tömbi tulajdonságoktól. Figyelembe véve azt a tényt, hogy egy szokásos, 350–400 mikrométer vastag szilíciumszelet előállításakor hasonló vastagságú kristályanyag megy kárba a vágási, csiszolási, polírozási műveletek során, újra és újra jelentkezett az a törekvés, hogy a szilíciumot valamilyen semleges hordozón eleve vékony réteg formájában állítsák elő. A hatvanas években párologtatott félvezetőkkel (*CdS*, *tellúr*) vékony-réteges tranzisztor (*TFT = thin-film-transistor*) előállítására végzett kísérletek a planáris szilíciumeszközök mellett nem számíthattak sikerre (11). (2. ábra, A) A MOS eszközök fontosságának felismerésével azonban újra felbukkant a vékony félvezető réteg gondolata, mégpedig szilíciumból, a hőtágulási eltérés kiiktatása miatt egykristályos zafírhordozón, mint hordozón (*SOS*) (12). (2. ábra, B) A szilícium leválasztása illékony vegyületének termikus vagy redukáló bontásával történt. Az ilyen rétegből előállított MOS áramkörök sok szempontból előnyösebbek voltak



2. ábra. A vékonyréteges tranzisztor újjászületései
A) Weimer *TFT*-ja (1962); B) A *SOS*-tranzisztor (1965); C) *SOI*-szerkezet (silicon-on-insulator) oldalirányú rekristallizációhoz (1981); D) *FET* amorf szilíciumból (1982)

monolit megfelelőinél, a zafirhordozó magas ára azonban mindmáig csak speciális alkalmazásokra korlátozta szerepüket.

A gőzfázisból leválasztott szilíciumrétegek félvezető-fizikai tulajdonságai elmaradtak a tömbi anyag tulajdonságaitól, elsősorban rendezetlen (amorf) kristályszerkezetük miatt. Emiatt nem bizonyultak alkalmasnak pl. bipoláris eszközök céljaira. Ennek javítására különböző átkristályosítási eljárásokkal próbálkoztak. A napjainkban is folyó vizsgálatok kiderítették, hogy hőimpulzusokkal pásztázva rendkívül kedvezően befolyásolható a réteg kristályszerkezete. Erre a célra leggyakrabban fókuszált lézert fényt alkalmaznak, de fókuszált nagy teljesítményű fényforrásokkal is értek el jó eredményeket. Váratlan fordulatot vett a szubsztrát-probléma is. Kiderült, hogy oxidált szilíciumlemezt használva hordozól ennek felületére gond nélkül rávihető egy vékony szilíciumréteg, melynek átkristályosítása a fent említett módon elvégezhető. Ha a réteg kis helyen érintkezik az egykristályos szilícium felületével, a hőkezelés hatására a szilíciumréteg rendezett egykristállyá alakul át (2. ábra, C). Hozzávéve az ionimplantáció és az ionsugaras megmunkálási technológiák kínálta lehetőségeket nem látszik túlzásnak az az állítás, hogy a technológiai fejlődés új szakaszába érteztünk, amikor kiiktatható a költséges egykristály-hordozó, nélkülözhetővé válik a fotolitográfia, a nedves kémiai műveletek. Helyettük polikristályos szilíciumlemeze plazma-oxidációval oxidréteget visznek, ezen szilíciumréteget alakítanak ki, vezérelt ionsugárral helyileg építik be a megfelelő adalékokat, elektronsugárral elvégzik a helyi rekristallizációt, fémgőzsugárral ráválasztják a vezető hálózatot, majd az egész felületet védő szigetelőréteggel bevonják. Mindez egyetlen, számítógéppel vezérelt berendezésben elvégezhető — *lesz*.

Polikristályos szilíciumlemezek gazdaságos előállítására egyébként a napelem-kutatások során dolgoztak ki eljárásokat. Az amorf szilíciumrétegen térvezérelt tranzisztor hálózatok is egyszerű technológiával készíthetők (2. ábra, D).

Jellemző, hogy a vékonyréteges szilícium-struktúrák egy régi, annak idején kiforrotlan gondolat ismételt visszatérését jelentik. A félvezető-technológia számos más példát is ismer a korukat megelőző elképzelések bukására, feltámadására és visszatérésére egy olyan korban, amikor a feltételek már megérték számukra. Tipikus eset a galliumarzenid váltakozó karrierje 1952-től napjainkig, amelyről egy korábbi közleményben volt részletesen szó (13) vagy a térvezérelt MOS-tranzisztor gondolatának felbukkanása 1932-ben (14).

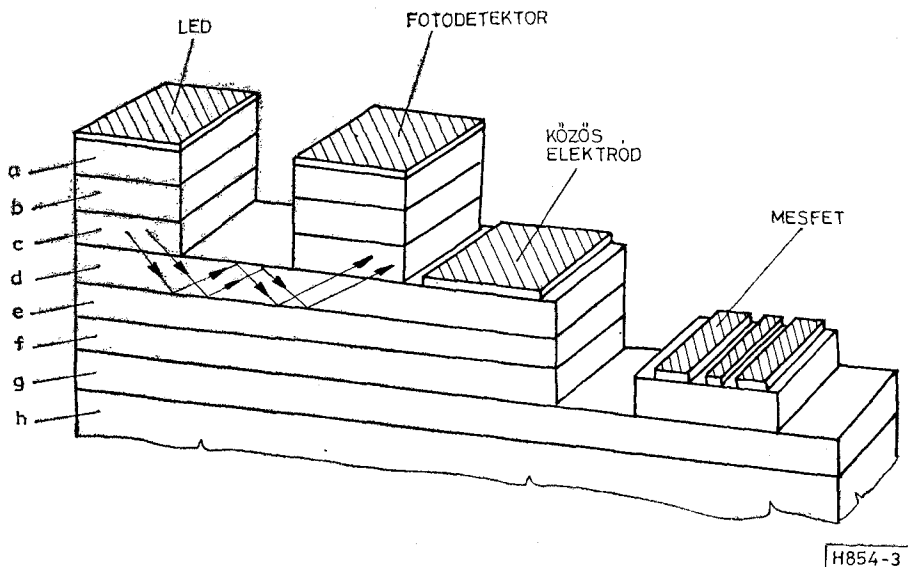
Pillantás a jövőbe

A jövő szilícium-technológiájára vonatkozó fenti elképzelés nagyjából valószínűség, hiszen technikai eszközei már léteznek. Hogy gazdaságilag mikor érkezik el az ideje, erről nem sok értelme volna találgatásokba bocsátkozni. Feltehetően a klencvenes évek táján a számítógéppel vezérelt automata elektronikai gyárak korszakában.

De nézzünk most más irányokba, olyanokba, amelyek más koncepciók hordozói. Láttuk az optoelektronika kezdeteit. Napjainkban már messze nem arról van szó, hogy bizonyos félvezető anyagokból nem hősugárzáson, hanem az elektro-lumineszcencia jelenségén alapuló miniatűr színes fényforrásokat lehet készíteni. Közben a kutatók felfedezték, hogyan lehet a kibocsátott fény hullámhosszát az összetétel függvényében változtatni a látható és az infravörös tartományban, milyen struktúrával lehet stimulált koherens sugárzást létrehozni, hogyan lehet a fényt az anyag belsejében irányítani, amplitúdóját modulálni. Mindezzel adva voltak a feltételek az optikai szálak segítségével történő fénytávközlési rendszerek megszületéséhez. Ezekben a rendszerekben, amelyek 2000-ig a hírközlés és adatátvitel feladatainak túlnyomó részét átveszik a jelenlegi elégtelen teljesítő-képességű távközlési rendszerektől, az optoelektronikai adó és vevő elemek elképzelhetetlenek az előbb említett félvezető anyagok nélkül. Szemünk előtt alakul az integrált optoelektronikai elemek új generációja (15), ahol ugyanazon félvezető szerkezet egyik részében a lézertűdőben gerjesztett sugárzást a MESFET-re adott jellel modulálva hullámvezető rétegben fotodetektorra irányítják, vagy a detektált jelet erősítik fel és a lézertűdőbe gerjesztve a sugárzást optikai kábelbe csatolják ki. Az ilyen elrendezés vevő és ismétlő erősítő célokra egyaránt alkalmas (3. ábra).

Az ilyen eszközök sok rétegből álló struktúrák létrehozását igénylik, amire a jelenleg használt, fémoldatból történő epitaxiális kristályosítási módszere kevésbé látszik gazdaságosnak. Az ultranagy vákuumban a komponensek kollimált gőzsugárból szintetizált (MBE-, „molekula-sugaras epitaxia”) vegyületfélvezető rétegek akár 10 nm-ként változó összetétellel is előállíthatók. A szükséges komponensekből pl. galliumból, arzénből és alumíniumból vátakozva galliumarzenidből és gallium-alumínium-arzenidből álló 100–120 réteges „szuperrács” készíthető, amely argon-ion lézerral megvilágítva koherens vörös sugárzást bocsát ki. Ezzel a megoldással tehát félvezető anyagból a látható tartományban sugárzó lézer állítható elő. Az MBE technológiánál egyszerűbbnek látszik a fém-organikus származékok hóbontásával történő rétegleválasztás. Ezek a gőz alakjában jelenlevő vegyületek már néhány száz fokon elbomlanak és elegyarányuktól függő összetételben komponenseik a szilárd hordozóra kiválnak. A rétegek ilyen hőmérsékleten gyakorlatilag nincsenek kitéve diffúziós keveredésnek, a köztük levő összetételi határok élesek. Ugyanez a technológia alkalmasnak látszik vékony vegyületfélvezető rétegeknek nagy felületű semleges hordozókra történő leválasztására is, hasonlóan a szilíciumnál ismertett eljáráshoz. A vegyület-félvezető egykristályok jelenlegi magas ára mellett ez a módszer elősegítheti alkalmazásuk terjedését pl. a galliumarzenid esetében a szilíciumnál kétszer nagyobb hatásfokú nap-elemcellák előállítására.

Az optoelektronika az a terület, ahol ezek az új félvezető anyagok egyszerűen nélkülözhetetlenek. Van azonban más területek is, ahol előnyös tulajdonságaik érvényesülnek. Ismét a galliumarzenid az, amelynek e tulajdonságait ismerjük és hasznosítani



3. ábra. Integrált optoelektronikai áramkör elvi vázlata

Rétegek összetétele: a) p-GaAs, b) p-Ga_{0,7}Al_{0,3}As c) n-GaAs, d) n-Ga_{0,75}Al_{0,25}As, e) n-Ga_{0,5}Al_{0,5}As f) n-GaAs, g) félszigetelő GaAs, h) GaAs hordozó

tudjuk. A már említett Gunn-diódákon kívül a Schottky-záróréteggel vezérelt unipoláris tranzisztoroknak (**MESFET**) van a jövő szempontjából jelentősége. A galliumarzenidben az elektronok mozgékonyasága hatszorosa a szilíciuménak, ami közel ilyen javulást jelent minden olyan elektromos paraméterben, amely az elektronmozgékonyasággal áll kapcsolatban. A galliumarzenid **MESFET**-ek működési frekvenciája jelenlegi technikával megoldható geometriai méretekkel 10–35 GHz körül állítható be, néhány mW-től néhány wattig terjedő teljesítményszint mellett. Ezek az újfajta tranzisztorok a mikrohullámú erősítők és oszcillátorok új generációját alapozzák meg. A szilíciumeszközök technológiájában alkalmazott eljárások megfelelő módosításával galliumarzenid **MESFET**-ekkel mind digitális, mind analóg integrált áramkörök készíthetők. Ezekre az űrtávközlésben és a fénytávközlésben is nagy szükség lesz. Bár elemsűrűségük még nem érte el a szilícium-áramkörökét, ennek elvi akadályai nincsenek. A nagyobb elektronmozgékonyaság kínálta előny itt a jelátviteli sebesség megnövekedésében, a megengedhető magasabb üzemi hőmérséklet pedig a nagyobb terhelhetőségben nyilvánul meg. Ennek következtében elvben galliumarzenid alapú integrált áramkörökből sokkal gyorsabb és sokkal kompaktabb, azonos térfogat mellett háromszor-négyszer nagyobb teljesítőképességű gépeket lehet majd készíteni a szilícium-alapú integrált áramkörökből készült számítógépekhez képest.

A működési sebesség további növelésére nyújt lehetőséget egy, a galliumarzenid-alapú hetero-rétegek tulajdonságainak vizsgálata során a közelmúltban tett felfedezés (16). A galliumarzenidre növesztett megfelelő összetételű gallium-alumínium-arzenid réteg hatására a galliumarzenid határán potenciálvölgy alakul ki, amelyben elektronakkumuláció lép fel (4. ábra). FET struktúrában a gate-vezérelés hatására az elektronok a vékony akkumulációs

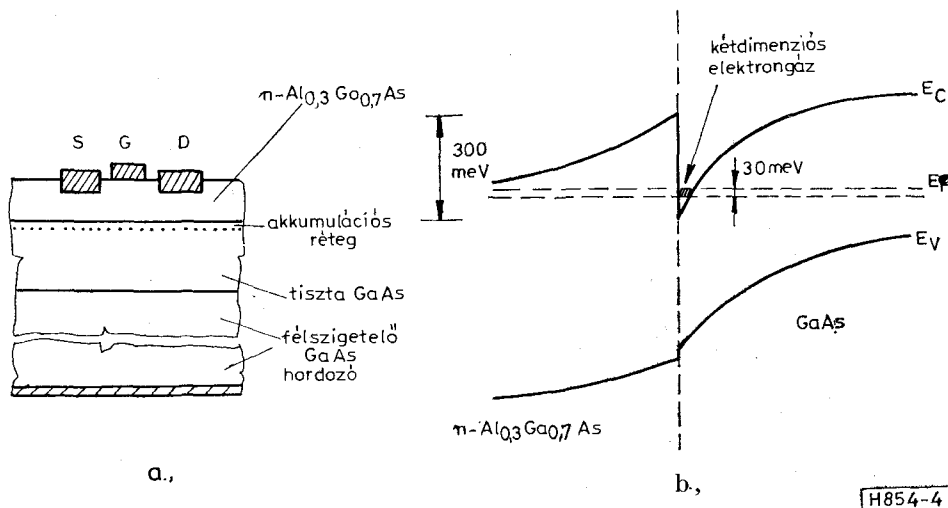
rétegben „két-dimenziós gáz” módjára viselkednek, sebességük 30–40%-kal nagyobb a normálisnál, a folyékony nitrogén hőmérsékletén pedig a tömbi érték 3-szorosát is eléri. Japán kutatók az ilyen struktúrákból készített 27-fokozatú gyűrűs oszcillátorban 20 ps-nél kisebb késleltetési időt mértek, ami közel esik a jelenleg ismert leggyorsabb működésű, de csak 4 K-en üzemképes szupravezető Josephson-átmenetes áramkörök késleltetési idejéhez.

Következtetések

1. A gazdasági tényezőket figyelembe véve az integrált áramkör technológiájában 2000-ig valószínűleg általános lesz az 1 μm-es elemméretek használata. Ehhez azonban olyan áramkörrendszerek kialakítása szükséges, amelyek tagjai egy-egy szilíciumszeleten preformált állapotban vannak jelen és kis ráfordítással egymásba átalakíthatók. További feltétel a standard elemek segítségével történő számítógépes áramkörtervezés és áramkörgyártás elterjedése.

2. Gazdaságilag nem látszik indokoltnak 100 mm-nél nagyobb átmérőjű szilíciumszeletek feldolgozása. A nagyobb termelékenység előnyei a megszoruló minőségi problémák miatt csak látszólagosak.

3. Talán vékony szilíciumrétegeknek semleges hordozóra — lehet oxiddal bevont szilíciumlemez, esetleg kerámia is — történő leválasztása fogja szolgáltatni azt az univerzális kiinduló struktúrát, melyen ion-implantálással és lézeres vagy elektronsugaras hőkezeléssel, majd szigetelővel fedett területek és fémbevonatból álló összekötő hálózatok segítségével néhány funkcionális alapelemből olyan általános mátrix állítható elő, amelyből számítógéppel vezérelt gyártásban a szükséges variációkkal megfelelő **VLSI** áramkörök készíthetők. E technológia egyes elemei



4. ábra. Heteroátmenetes GaAs-FET kétdimenziós elektrongázzal (TEGFET)
a) sematikus metszet b) az átmenet energiasáv-szerkezete

már itt vannak, másokra (pl. kerámiahordozó anyaga és felületi kikészítésének módja) még várni kell.

4. A vékonyréteges struktúrák igazi területét az $A^{III}B^V$ alapú eszközök fogják jelenteni (heteroátmenetes lézerek, detektorok, integrált optikai áramkörök). A fémorganikus vegyületek hőbontásán alapuló technológia az első helyezett, a molekula-sugaras rétegnövesztési eljárás speciális célokra marad. Itt a hordozó mibenléte egyelőre ismeretlen; lehet, hogy erre is az oxiddal bevont szilíciumot fogják használni.

5. Az ultranagyfrekvenciás mikroelektronika elterjedéséhez az egykristályos $A^{III}B^V$ félvezetők minőségének javítására és árának csökkentésére van szükség. Különböző összetételű félvezető-vegyületekből felépített szuperrács-struktúrák, integrált optoelektronikai egységek, kvantált tértöltés-rétegek és átmenetek, tárolt és vándoroltatott töltések, mágneses és elektromos domének tulajdonságaira épülő új mikroelektronikai korszaknak nézünk elébe, ahol nem Kirchoff-féle hálózatokban kell gondolkodnunk, hanem a fizikai tulajdonságok ismerete alapján tudatosan létrehozott, az anyagba beépített elektronikai funkciókban.

6. Az elektronikai készülékek konstruktőrei számára természetes lesz, hogy konstrukciós terveiket először gépi szimulációval ellenőrizték, majd a rendelkezésükre álló programcsomagok segítségével megtervezik és le is gyártják a készülékekhez szükséges integrált funkcionális egységeket. A fiókos szekrényben tárolt katalógus-alkatrészek és az ezekből készített deszkamodellek kora lejárt (17)!

I R O D A L O M

[1] T. A. Prugh, J. R. Nall, N. J. Doctor: The DOFL. Microelectronics Program, Proc. IRE 47, 882 (1959).

- [2] S. F. Danko, W. L. Doxey, J. P. McNaul: The Micro-Module: A Logical Approach to Micro-miniaturization, Proc. IRE 47, 894 (1959).
- [3] R. N. Noyce, US. Pat. 2 981 877 (1961). E. Keonjian (ed.), Microelectronics, McGraw-Hill Book Co. New York (1963).
- [4] J. B. Gunn, The Discovery of Microwave Oscillation in Gallium Arsenide. IEEE Trans. Electron Devices ED-23, 705 (1976).
- [5] Szép I. — Forgács G.: Töltéstárolás és töltéstovábbítás szigetelő-félvezető rétegszerkezetekben. Akadémiai Kiadó Budapest, 1980. (A szilárdtestkutatás újabb eredményei 10. k.)
- [6] D. Frohman — Bentchkowsky: FAMOS — A new semiconductor charge storage device. Solid State Electronics 17, 317 (1974).
- [7] W. S. Boyle, G. E. Smith, Bell Syst. Techn. J. 49, 487 (1970); C. H. Sequin, M. F. Tompsett, „Charge transfer devices”, Academic Press, New York (1975).
- [8] A. H. Bobeck, P. Bonyhard, J. E. Geusic, Magnetic bubbles — an emerging new memory technology Proc. IEEE, 63, No 8, 1176 (1975).
- [9] H. Sabine, P. H. Cole, Acoustic Surface Wave Devices: A survey. Proc. IREE Australia, December, 1971, p. 445.
- [10] H. C. Casey, M. B. Panish, „Heterostructure Lasers”, Academic Press, New York (1978).
- [11] P. K. Weimer, The TFT — A New Thin Film Transistor. Proc. IRE 50 1462 (1962).
- [12] R. S. Ronen, F. B. Micheletti, Recent SOS Technology; Advances and Applications. Solid State Technol. 18. (8), 39 (1975).
- [13] Szép I., A galliumarzenid alapú mikroelektronika perspektívái. Híradástechnika XXXI., 5. szám, 161 (1980).
- [14] R. S. C. Cobbold, Theory and Application of Field-Effect Transistors, Wiley-Interscience, New York (1970), p. 2.
- [15] A. C. Carter et al, Monolithic Integration of Optoelectronic, Electronic and Passive Components in GaAlAs/GaAs multilayers, Electronic Letters, 18, No. 2, p. 72.
- [16] T. Mimura et al, A new field-effect transistor with selectively doped GaAs/n-Al_xGa_{1-x}As heterojunctions, Japan J. A. P. 19, L225 (1980).
- [17] C. A. Mead, G. Lewicki, Electronics, Vol. 55, No. 16, p. 107 (1982. aug. 11).