

Új tranzisztorok

DR. VALKÓ IVÁN PÉTER
BME Elektronikus Eszközök Tanszék



ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk új, nagysebességű tranzisztorok egy fajtáját ismerteti. Az alapanyag galliumarzenid, amelyben az elektronok mozgékonyasága jóval nagyobb, mint szilíciumban. Ezt már korábban is kihasználták mikrohullámú GaAs térvezérlésű tranzisztorokban. Nem adalékolt anyagban még nagyobb a mozgékonyaság, de kevés a mozgásképes elektron. Vékony réteggel megfelelően kialakított heteroátmenet azonban elektronban feldúsult csatornát hoz létre a nem adalékolt GaAs felületén. Az elektronok potenciálvölgyben vannak, csak az átmenettel párhuzamos síkban mozoghatnak. Ezen az elven a MOS tranzisztorokhoz hasonló működésű diszkrét eszközöket és integrált áramköröket alakítanak ki, amelyek különösen 77 K hőmérsékletre lehűtve igen gyors működésre képesek. Heteroátmenettel egyéb érdekes kísérleti eszközök is készülnek.

Nagy sebességigény

Volt egy időszak — a 70-es évek elején — amikor úgy tűnt, hogy a tranzisztor rohamos fejlődése átmegegy a beérésbe. Valahogy úgy, mint a vevőcső pályája az 1930-as évtizedben: a jellegzetes típusok kialakulnak, az alaptermotechnológiák szintén. Következik a finom részletek aprómunkája. A nagy változások pedig áthúzódnak az elektronika szomszédos területeire.

Az újabb évtized, a 80-as, azután rációfolt erre a hitre. Megint felgyorsult az iram; egyre-másra jöttek a közlemények új tranzisztorfajtákról.

Hogy a félvezető fizikában még lappangtak ki nem használt lehetőségek, az természetes. Hogy a technológia folytonos tökéletesedésével ezek elérhetőbbek lettek, az is érthető. De persze ez nem lett volna elegendő, ha nem lép fel a gazdaság részéről is egy új ösztökélő igény. Ez az igény a korábbiaknál gyorsabb eszközöket sürgetett, részben mint kapcsolókat, részben mint mikrohullámú erősítőket.

A komputerok sebessége, amit a ciklusidővel, az egy egyszerű részműveletre jutó átlagos idővel szokás kifejezni, eleinte nagyon gyorsan fejlődött. Eljutott odáig, hogy egyes csúcstípusok — például a Cray 1 — már másodpercenként egymás után 100 millió műveletet voltak képesek végezni. És ha akadtak is feladatok, pl. a meteorológiában, amelyekhez ez sem volt elegendő — kínálkozott más megoldás. Ez volt az új felépítési rendszer: több párhuzamosan dolgozó, de egymással kommunikáló logikai egység, amely egyszerre foglalkozik egy nagyobb probléma egyes részfeladataival.

Amióta azonban a „szuperkomputer” az emberi észjáráshoz alkalmazkodó, a bonyolult folyamatokat „valódi időben” áttekinthető számítógép lett az új célkitűzés, már a Cray ciklusideje sem elég rövid. A fejlesztők legalább egy nagyságrenddel tovább szeretnének jutni.

Beérkezett: 1985. IV. 3. (A)

DR. VALKÓ IVÁN PÉTER

1935-ben Stuttgartban szerzett fizikusmérnöki oklevelet. 1952-ben a műszaki tudományok kandidátusa, 1963-ban a műszaki tudományok doktora, 1979-ben a Drezdai Műszaki Egyetem tiszteletbeli mérnök-doktora lett. 1936-1949 között az Egyesült Izzó Kutatólaboratóriumában, 1949-1952 között a Távközlési Kutató Intézetben dolgozott. Részt vett az Állami Műszaki Főiskola megalapításában és vezette annak Híradástechnikai Tagozatát. 1952-től 1982-ig a BME oktatója volt, előbb

a Vezetéknélküli Híradástechnikai Tanszék docense, majd 1957-1977 között az Elektronikus Eszközök (régebben Elektroncsövek és félvezetők) Tanszék vezetője. 1963-ban lett egyetemi tanár. 1953-1972 között a Híradástechnikai Ipari Kutató Intézet elektronikus laboratóriumát is vezette. Előbb akusztikával, majd elektroncsövekkel, később félvezető eszközökkel és integrált áramkörökkel foglalkozott, számos publikációja és öt szakkönyve jelent meg. Jelenleg az MTA Vákuumtechnikai és Elektronikus Eszközök Bizottságának elnöke.

Mit is jelent ez? A gép működését a ciklusidővel jellemzik, az elemi eszköz, a tranzisztor (vagy tranzisztorpár) működését pedig a be- és kikapcsolási tranziens idővel, illetve az ezek átlagának nagyjából megfelelő „terjedési késéssel”. A két fogalom között nincs teljes korreláció: egyik különböző egyedi eseménysorozatból képzett statisztikus átlag, a másik fizikai összefüggésekből és anyagi-geometriai jellemzőkből következik. A gyakorlat mégis ad valami fogódzót: úgy tűnik, a terjedési késés minimális elérhető értéke közel két nagyságrenddel kisebb, mint a megfelelő kapcsolóelemeket alkalmazó és megfelelő felépítésű gép ciklusideje. Eszerint a számítástechnika új igénye olyan tranzisztor, amely a kapcsolás műveletét 10 ps (10^{-11} másodperc) nagyságrendben teljesíti.

Változás következett be a mikrohullámú technikában is. A mikrohullámú összeköttetések „klasszikus” korszaka elsősorban a 2-6 GHz frekvenciatartományt használta fel, mellette árnyékéletét élte a 10-15 GHz-es tartomány. Az ennél nagyobb frekvenciák más területen (pl. magfizika) kerültek alkalmazásra. Amint azonban az utóbbi években a távközlési műholdak fejlődésével aktuálissá vált a műholdas műsorszórás, fellángolt az érdeklődés a 30 GHz-nél is nagyobb, milliméteres sáv iránt, talán 80 GHz-ig.

A két terület igénye tehát hasonló.

Konstrukcióban azonban jelentős az eltérés a kétféle alkalmazástól függően. Ennek az egyik oka az, hogy a töltéstárolási jelenségek egészen más fontos-

ságuk a digitális logika nagyjelű áramköreiben, mint a mikrohullámú gyakorlat kisjelű analóg köreiben. A másik ok az, hogy a digitális logikai eszközök fejlődésének lényegében az integrálás lendülete szabott irányt. Ezen a fronton a szilícium szinte napjainkig egyeduralgó maradt. Váltakozó hadiszerecsével folyt a bipoláris és térvezérlésű MOS tranzisztorok harca.

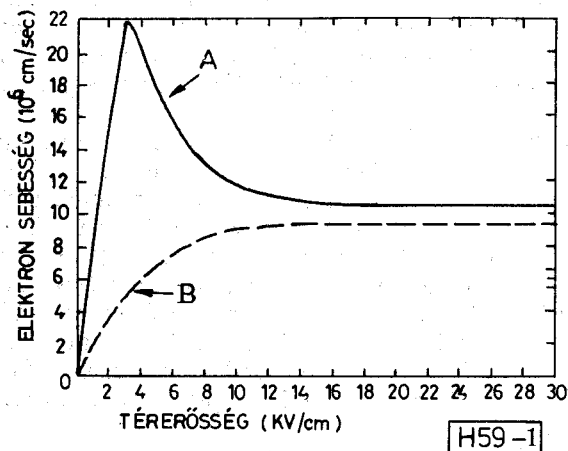
Bipoláris tranzisztorokkal gyorsabb kapcsoló áramkörök alakíthatók ki; különösen ECL megoldásban, amely elkerüli a telítési üzemmódot (amikor a tranzisztorban mindkét átmenet nyitott). ECL körök tartalmazzák a CRAY 1 is. A MOS köröknek viszont kisebb a fogyasztásuk, ami ugyancsak fontos szempont. Itt a pálmát a CMOS tranzisztorpár viszi.

A két szempont — sebesség és fogyasztás — egyidejű értékelésére szokták használni a terjedési késés és veszteségi teljesítmény szorzatát, a kapcsolási energiát. Értéke ma pj (10^{-12} joule) és fj (10^{-15} joule) nagyságrendek között található.

Elektronok a gallium-arszenidben

A mikrohullámú technika korábban nem elégedett meg a szilícium tranzisztor nyújtotta lehetőségekkel. Korán tért át ugyan — bár nem teljes mértékben — a csőről a szilárdtest eszközökre, de sokáig főleg különböző kétpólusokat használt. Egyik nevezetes eszköze lett a Gunn-oszcillátor. Talán ez irányította a mikrohullámú világ figyelmét általában a gallium-arszenid (GaAs) felé.

Röviden emlékeztetünk a Gunn-oszcillátor alapját képező jelenség lényegére. Egyszerű körülmények között GaAs-ben a szabad elektronok effektív tömege kicsi és mozgékonyasága nagy, ha azonban kellően nagy energiát vehetnek fel, egy részük nagyobb effektív tömegű, kisebb mozgékonyaságú állapotba lép át. Az átlépésnek csak bizonyos kritikus térerősség ($E_{krit} \approx 3,2$ kV/cm) fölött van számottevő valószínűsége. Ez az állapotváltozás instabilitást okozhat az elektronok térbeli eloszlásában. Ez pedig áramkörileg a minta negatív ellenállásaként jelenhet meg.



1. ábra. Elektronsebesség nagy tisztaságú gallium-arszenidben a térerősség függvényében, szobahőmérsékleten. Összehasonlításul a szaggatott görbe mutatja a nagy tisztaságú szilícium viszonyait

Mindezt a jól ismert elektronsebesség — térerősség görbéről lehet leolvasni (1. ábra). Ezt azonban úgy kell tekintenünk, hogy a különböző elektronoknak a szóródások által kialakított átlagos sebességére vonatkozik. A görbe első szakaszának nagy mozgékonyasága ($\mu \approx 8500$ Vs/cm²) csak igen tiszta anyagra vonatkozik, amelyben az adalék koncentrációja 10^{15} atom/cm³-nél kisebb. Már 10^{16} /cm³ adalékolás lecsökkenti a mozgékonyaságot, a tisztább anyagban viszont a hőmérséklet erős csökkentése a mozgékonyaság jelentős növekedését idézi elő.

Figyelembe kell azonban vennünk, hogy a görbe a fizikai folyamatok eredményeként adódó egyensúlyi állapotokat adja vissza és ezek kialakulásához bizonyos relaxációs idő (néhány tized ps) szükséges. Ha az eszköz méretei miatt még ez az idő sem áll rendelkezésre, túllövészerű sebességértékek lépnek fel, amelyek itt nagyobbak, mint a szilícium esetében.

A teljesség érdekében beszéljünk arról az esetről is, amikor a térerősség egészen rövid szakaszon, igen rövid futási idő alatt hatásos. — Ilyenkor az elektronok részben elkerülik a szóródást, sebességük ballisztikus lesz, nagyobb értékű, mintha a mozgékonyaságból adódna. Az anyag sáv szerkezete természetesen mindenképpen határt szab a sebességnek. A kvantummechanika szerint

$$v = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial W(k)}{\partial k}, \quad (1)$$

ahol $W(k)$ az elektronenergia és a k hullámszám kapcsolatát megadó diszperziós összefüggés, $k = p\hbar$, p az impulzus és $2\pi\hbar = h$ (Planck-állandó) [1].

A GaAs sáv szerkezetéből v maximális értéke körülbelül 1×10^8 cm/s-ra adódik, de ez a gyakorlati körülmények között el nem érhető érték. Itt jegyezzük meg, hogy a termikus sebesség szobahőmérsékleten (sőt még 77 K hőmérsékleten is) jóval nagyobb, mint a szilíciumban kiadódó 10^7 cm/s érték.

Kérdés, hogy mi az összefüggés az elektronsebesség és az eszközök sebessége között.

A térvezérlésű tranzisztorokban az egységnyi áramerősítésnek megfelelő f_1 frekvenciahatár akkor áll be [2], ha a nyelő áramában fellépő i_D kimenőjel és a vezérlő elektróda által felvett, lényegében kapacitív i_G jel abszolút értéke egyenlő:

$$|i_D| = |g_m U_{as}| = |j\omega_1 C_G U_{GS}| = |i_G| \quad (2)$$

itt g_m meredekség, C_G lényegében a vezérlő elektróda és az árampálya (csatorna) közötti kapacitás.

(2)-ből $\omega_1 = 2\pi f_1$ miatt

$$f_1 \approx \frac{g_m}{2\pi C_G} \approx \frac{1}{2\pi} \frac{\partial I_D / \partial U_{as}}{\partial Q / \partial U_{GS}} \approx \frac{1}{2\pi} \frac{\partial I_D}{\partial Q} \quad (3)$$

Ha feltételezzük, hogy a töltéshordozók v_e átlagos sebességgel haladnak keresztül az L hosszúságú csatornán, tehát $Q = \frac{I_D L}{v_e}$, akkor a MOS tranzisztorok elméletéből jól ismert

$$f_1 = f_t \approx \frac{1}{2\pi} \frac{v_e}{L} \quad (4)$$

közelítő összefüggésre jutunk, mely azonban kissé optimista becslést ad, mert a mellékhatásokat — például a vezérlő elektróda és nyelő közti kapacitást, a forrás, illetve nyelő kontaktus ellenállását és az árampályának a vezérlő elektróda által nem takart folytatását — nem veszi figyelembe.

Digitális, lényegében nagyjelű alkalmazások esetében is szokás (4) összefüggés szerint a futási időből kiindulni:

$$t_d = \frac{L}{v_e} = \frac{L}{\mu E} = \frac{g_m}{C} \quad (5)$$

és ezt tekintik a terjedési késés minimális értékének. Ez az okoskodás azonban helytelen, mert az analóg esetben a meredekség munkaponti értékével számolunk és természetesen C is munkaponti kisjelű paraméter. A nagyjelű kapcsolási késésben a meredekség helyébe a teljes áramváltozás és feszültségváltozás G_m hányadosa lép, C kapacitás helyébe a csatornában levő és a feszültség változtatásával eltüntethető töltés és a feszültségváltozás \bar{C} viszonya; de ez még kiképzül a parazita kapacitásokkal:

$$t_d \approx \frac{G_m}{C} \quad (6)$$

Az így meghatározott t_d érték egy 2...5 tényezővel nagyobb (5)-nél. De ez sem elég, mert az integrált chipen figyelembe kell venni az összeköttetés okozta késést is, ami a terjedési késés többszöröse is lehet, az integrálás mértékétől és a technológia méretfinomságától függően [3].

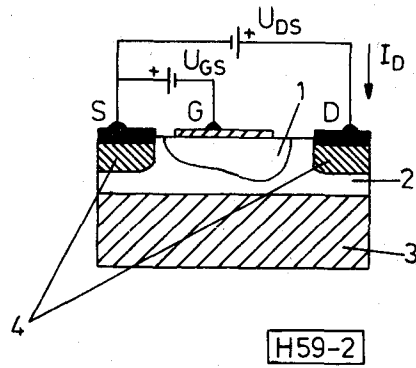
A gallium-arszenid MESFET

Az előző megfontolások eredetileg azért terelték a figyelmet a GaAs-re, mert abban a mozgékonyabb ötször akkora, mint a szilíciumban. Tudjuk, ennek csak kis térerősségnél van jelentősége. Ma lényegesebbnek tartjuk, hogy a sebességtúllövés miatt egy kisméretű GaAs eszközben nagy térerősség mellett egy adott töltésmennyiség sokkal gyorsabban szállítható, mint szilícium eszközben. (Ez természetesen elektronvezetésre vonatkozik; a lyukak sebessége GaAs-ben csekély.) Világos tehát a GaAs tranzisztor előnye.

A GaAs technológiája azonban sokkal nehezebb. Két összetevőből kell előállítani, bonyolult a tisztítása, nincs SiO_2 -hoz hasonló pompásan passzíváló oxidja stb. Sokáig úgy látszott tehát, hogy a várható előnyök nem érik meg a fáradságot.

A 60-as évek végén azonban a szilícium-technológia eredményeire támaszkodva már tovább tudtak lépni. Megszületett a jól használható GaAs tranzisztor — mégpedig mikrohullámú kiadásban. Nem bipoláris, nem is MOS jellegű, hanem az ún. MESFET (2. ábra), vagyis Schottky-átmenetes (fém-félvezető) térvezérlésű tranzisztor.

Itt az átmenet diffúziós feszültsége a fémet negatívabbá, a félvezetőt pozitívabbá teszi (mintegy 0,6...1 voltal). A szükséges erőteret a fém oldalán többlet-elektronok felületi töltése, az n típusú félvezetőben kiürített réteg donor-ionjainak töltése biz-



2. ábra. MESFET szerkezete. 1 — tértöltésréteg, 2 — n GaAs, 3 — félvezető GaAs hordozó, 4 — erősen adalékolt n^+ zónák, S — forrás, D — nyelő, G — vezérlő elektróda

tosítja. Kívülről adott feszültséggel pedig változtatni lehet a kiürített réteg, illetve a félvezetőben megmaradt nem kiürített, tehát jól vezető rész vastagságát.

A felépítés némileg a MOS tranzisztorra emlékeztet. A hordozó itt úgynevezett félvezető GaAs kristálylapka. A „félvezető” olyan anyag, amely tartalmaz ugyan bizonyos arányban szennyezéseket, de ezek hatástalanná vannak téve megfelelő kompenzáló adalék segítségével. Ez a gyakorlatban többnyire néhány ppm Cr, amely a GaAs fajlagos ellenállását igen nagygyá teszi. A hordozóra epitaxiával visznek fel vékony (pl. 0,3 μm vastagságú) n típusú ($N_D \approx 10^{17}/\text{cm}^3$) réteget. A forrás és nyelő igen erősen adalékolt zónái, amelyeket például ionimplantációval állítanak elő, néhány μm távolságban lehetnek egymástól, de maga a Schottky-átmenetes vezérlőelektróda rövidebb, pl. 1 μm , újabb típusoknál ennél is kisebb hosszúságú. (A felületen erre merőleges irányban — szélességben — az elektródák kiterjedése jóval nagyobb lehet, pl. 100 μm .)

A korábban elterjedt típus a D-MESFET, amelyben a vezérlő elektródára adott negatív feszültséggel lehet a kiürítést növelni, bizonyos küszöbfeszültséggel az elektronpályát úgyszólván egészen elzárni. Az újabban, főképpen digitális áramkörökben alkalmazott E-MESFET-ben külső vezérlő feszültség nélkül nem folyik áram, mert az epitaxiális réteget az átmenet diffúziós feszültsége teljesen kiüríti. Csak néhány tízed V pozitív vezérlő feszültség hatására (itt ez a küszöbfeszültség) indulhat meg az áram.

A régebbi típusú, hosszabb csatornájú MESFET-ekre az egyszerű elméletet lehetett alkalmazni. Eszerint a működés lényegileg megfelelt a MOS tranzisztorénak. Megfelelő pozitív U_{DS} nyelőfeszültséggel a csatornában a nyelő felé haladva az áram okozta feszültségésés és a kiürítés vastagsága nő, a vezetőképesség csökken. A gyakorlatban úgy választják meg a feszültségeket, hogy egy, a nyelőhöz közeli pontban beáll az elzáródás. A nagyon rövid maradék útszakasz veszi fel az U_{DS} feszültség jelentékeny részét. Így ott nagy térerősség lép fel, amely igen nagy sebességgel röpi a töltéshordozókat a nyelőhöz.

A későbbi, rövidcsatornás GaAs eszközökre azt az elméletet nem alkalmazhatjuk [2]. Nagyon sok eset-

ben mondhatjuk azonban, hogy a pálya itt is két szakaszból áll, csak hogy az elválasztó pont nem a teljes elzáródás beállta, hanem az a hely, ahol a forrástói kiindulva növekvő télerősség eléri a kritikus értéket. Ehhez elég lehet már néhány tized voltnyi feszültség. A nyelőfeszültség legnagyobb része pedig a pálya maradékkis szakaszára esik, amlyében a korábban említetthez hasonló instabilitás, úgynevezett *domain* alakul ki. Ebben az elektronok zöme már nagy tömegű és kis mozgékonyaságú, tehát az igen rövid szakaszra aránylag nagy feszültség és igen nagy télerősség jut.

Számos közelítést alkalmazva, erre az esetre is kimutatható a (4) összefüggés érvényessége.

A hetvenes évek vége nem hozott újabb látványos áttörést; némileg finomodott a tranzisztorok geometriája (kisebb csatornahossz) és eredmények voltak — bár durvább geometriával — az integrált digitális GaAs áramkörök kifejlesztésében. Fordulatot a 80-as évtized hozott; felfedezték, hogyan lehet GaAs-ben a töltéshordozók sebességét növelni. Tudnunk kell ugyanis, hogy a MESFET epitaxiális rétegében valóban használt, kellően adalékolt gallium-arszenidre az 1. ábra csak általános alakjában érvényes, mert a tényleges mozgékonyaság $4000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ alatti.

Mire jó a heteroátmenet?

Persze el lehet érni az ideális $9000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ mozgékonyaságot is, ha az anyagot annyira megtisztítjuk, hogy az adalékatomok aránya csekély, pl. $10^{13}/\text{cm}^3$ körüli legyen. Ebben az esetben már nem is az ionok okozta szóródás, hanem az atomrács hőrezgése korlátozzák a mozgékonyaságot. Csak hogy ekkor az elektronok koncentrációja is $10^{13}/\text{cm}^3$ lenne; ilyen gyenge vezetőképességű anyagból nem érdemes esz-közt készíteni; roppant kicsi lenne az áram és a meredekség. A nagyobb adalékolás viszont, amint látuk, lerontja a mozgékonyaságot.

Kínálkozik azonban egy megoldás arra, hogy a szinte adalékolatlan réteget elektronban gazdaggá tegyék. Mégpedig egy szomszédos, erősen adalékolt, kémiaiilag más összetételű félvezető rétegből [4]. Erre akkor van mód, ha a két anyag egykristályos szerkezetben érintkezik; ez a heteroátmenet. Ezt a megoldást először *L. Esaki* javasolta, ő azonban eredetileg a „szuperrács” elnevezésű dobostortaszerű sokréteges szerkezetre gondolt.

A két anyag kilépési munkája általában nem egyforma. Mivel termikus egyensúlyban a Fermi-szintek azonosak, ebből diffúziós feszültségkülönbség adódik, amelyet jól ismert módon tértöltésrétegek tartanak fenn. Csak hogy rendszerint a tiltott sáv szélességek sem egyformák, a sávhatároknál tehát ugrás is fellép. Ez olyan potenciálgátat követel meg, amelyet legalább egyik oldalán felületi töltésnek kellene fenntartani. Fémen ez könnyen valósulna meg, félvezetőben viszont valamennyire megközelíti egy, töltéshordozóiban erősen feldúsult, esetleg inverziós réteg.

A heteroátmenetes térvezérlésű tranzisztor ezt a jelenséget használja ki. A két félvezető anyag GaAs és alumíniumgallium-arszenid ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$). Az utóbbi anyag tulajdonságai természetesen függenek az alu-

mínium x részarányától. Az alábbiakban közlünk néhány fontosabb adatot [5]:

a tiltott sáv szélessége	$W_g = (1,424 + 1,25\chi) \text{ eV}$
relatív diel. állandó	$\epsilon_r = 13,1 - 3\chi$
elektronaffinitás	$\chi = (4,07 - 1,06\chi)$
effektív elektrontömeg	$m_{eff} = (0,067 + 0,083\chi)m_0$
effektív lyuktömeg	$m_{eff} = (0,48 + 0,21\chi)m_0$

m_0 a szabad elektron tömege.

Az effektív állapotsűrűségek az effektív tömegek $3/2$ hatványával arányosan változnak. Az adatok szobahőmérsékleten érvényesek. $\chi=0$ vonatkozik természetesen a GaAs-re.

Az elektronaffinitás a vákuumszint és a vezetési sáv alsó határa közötti energia- vagy potenciállépcsőt jelenti. Két anyag érintkezésénél — termikus egyensúlyban — a vákuumszint folytonos, tehát az elektronaffinitás különbsége az U_c sávhatárban jelenik meg mint ΔU_c különbség. Például a táblázat szerint, ha $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ és GaAs alkot heteroátmenetet, ott $\Delta U_c \approx 0,32 \text{ V}$.

Ezt a potenciálkülönbséget az AlGaAs oldalán pozitív, a GaAs oldalán negatív töltésnek kell fenntartania. Ha az AlGaAs réteg n típusú, benne kiürített réteg keletkezik. Ha a GaAs réteg szabad töltéshordozóban szegény, felülete elektronokban feldúsul. Ez képezheti egy térvezérlésű tranzisztor vezető csatornáját.

Megfelelő körülmények között a GaAs felületén kis mennyiségben a Fermi-szint a vezetési sávba kerül: a félvezető elfajul. Így tehát, bár a GaAs nincs adalékoltva, a heteroátmenetnél mégis annyi elektron van benne, ami szinte fémhez hasonló vezetést biztosít, csekély vastagságban. Az elektronok egy energiavölgybe vannak zárva. Az AlGaAs felől is, de a nem adalékolt GaAs réteg belseje felől is a tiltott sáv tartja vissza őket; mozgásuk csak az átmenettel párhuzamos irányokban szabad. (Kétdimenziós elektrongáz). A néhány nm vastagságnak megfelelő kiterjedésű elektrongáz alkotja a tranzisztor vezető csatornáját. Ezt a két végén a szokásos erősen adalékolt forrás és nyelő zóna határolja, a vezetési viszonyokat pedig az AlGaAs réteg fölül helyezett fém vezérlő elektróda befolyásolja.

Az új tranzisztorfajtát az irodalomban nagy elektronmozgékonyaságú tranzisztoroknak, modulációs adalékoltású tranzisztoroknak vagy kétdimenziós elektrongáz tranzisztoroknak nevezik. (HEMT, MODFET, TEGFET = high electron mobility transistor, modulation-doped field-effect transistor, two-dimensional electron gas field-effect transistor.)

A tranzisztor megvalósítását az epitaxiás eljárás tökéletesítése tette lehetővé. A közönséges epitaxia a III–V vegyületeket folyékony fázisból vagy gáz-atmoszférában kémiai reakciókkal állítja elő a hordozókristály felületén. A molekuláris nyaláb epitaxiában (MBE) az összetevő anyagok molekulái nagy vákuumban érkeznek megfelelő arányban a viszonylag alacsony hőmérsékletű kristályfelületre. A nyaláb az adalékokat is kellő arányban tartalmazza. A nyalábok útját komputerrel vezérelt gyors működésű mechanikai zárral nyitják-csukják. Ezzel a módszerrel tudják a rétegszerkezetet tetszés szerinti csekély

vastagsággal hirtelen változtatni. A fémorganikus kémiai gőzből való leválasztás (MOCVD) csaknem hasonló eredményekre képes.

A tranzisztor elvi felépítését a 3. ábrán mutatjuk be. A rétegezés bonyolultabb, mint ahogy előbb leírtuk. A félszigetelő hordozóra először a korábban említett nem adalékolt GaAs réteget viszik fel 1–2 μm vastagságban, amely a maradék (mintegy $10^{13}/\text{cm}^3$) szennyezés miatt rendszerint enyhén p jellegű. Föléje azonban először egy nagyon vékony, 10–20 atomnyi, nem adalékolt szétválasztó AlGaAs réteg kerül és csak azután következik a 20–60 nm vastag, $5 \times 10^{17} - 2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ szilícium koncentrációval adalékolt n^+ AlGaAs, amelyben majd kialakul a kiürítés. Ha a szétválasztó réteg hiányozna, a donoronok olyan közel kerülnének a nem adalékolt réteg felületén kialakuló elektrongázhoz, hogy terük megzavarná az elektronmozgást. Az AlGaAs tetejére még egy vékony GaAs réteget szoktak felvinni, ez biztosítja a forrás és nyelő zóna jó csatlakozását a fémelektrodákhoz. A csatorna fölött azonban ez a réteg hiányzik, mert a fém vezérlő elektródát enyhe marás után süllyeszteviszik fel.

Vizsgáljuk először önmagában a heteroátmenet viszonyait termikus egyensúlyban, tehát tekintsük végtelenül távolinak a vezérellektróda Schottky-átmenetét (4. ábra).

Mivel az AlGaAs réteg erősen adalékolt, abban a Fermi-szinthez közel van a vezetési sáv U_c alsó határa.

A heteroátmenet miatt U_c értékében fellépő ΔU_c ugrás megfelel a két anyag elektronaffinitása közötti különbségnek (lásd a táblázatot). Ehhez az adalékolt anyagban a sávhatár meggörbül, mert az átmenetnél kiürített réteg keletkezik. A görbülés mértéke a 2. ábra szerint U_h . Ha az anyag dielektromos állandója ϵ , adalékolása N_D , az összefüggés U_h és a kiürítés w mélysége között

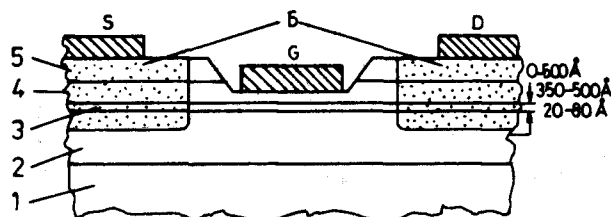
$$U_h = \frac{qN_D w^2}{2\epsilon}, \quad (7)$$

ill.

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon U_h}{qN_D}}. \quad (7a)$$

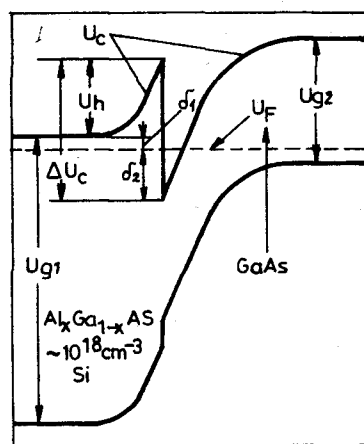
A 4. ábrán láthatjuk U_h kapcsolatát ΔU_c -vel:

$$U_h = \Delta U_c - \delta_1 - \delta_2 \quad \text{itt} \quad \delta_1 = U_F - U_c$$



H59-3

3. ábra. Nagy elektronmozgékonyosságú terveztelésű tranzisztor szerkezete, 1 — hordozó, 2 — nem adalékolt GaAs réteg, 3 — nem adalékolt AlGaAs réteg, 4 — n^+ adalékolt AlGaAs, 5 — vékony n GaAs, 6 — erősen adalékolt n^+ zónák



H59-4

4. ábra. Heteroátmenet termikus egyensúlyban. Jelezve az elektrongázzal betöltött alsáv. Jelölések magyarázata a szövegben

az AlGaAs réteg belsejében, ahol már nincs kiürítés. A nagy adalékolás miatt δ_1 kis érték.

δ_2 az az érték, amellyel a GaAs felületén az U_F szint alá kerül a vezetési sáv alsó határa. Így jön ott létre az n_s felületi elektrontöltés, amely nagyjából egyensúlyt tart a donoronok másik oldali tértöltésével:

$$qn_s \approx qN_D w. \quad (8)$$

A valóságban itt az elektronoknak is van bizonyos mélységi eloszlásuk néhány nm átlagértékkel [6]. n_s szokásos mértékegysége cm^{-2} .

n_s biztosításához a Fermi-szintnek csak kevéssé kell behatolni a vezetési sávba, tehát δ_2 is csekély. A valóságban persze az összefüggések jóval bonyolultabbak. Ennek főleg kvantumfizikai okai vannak; a vázolt viszonyok között a potenciálgát keskeny háromszögű alakja miatt a vezetési sávban elfoglalható elektronállapotok nem alkotnak folytonos sáv-részletet, hanem különálló alsávokat. Az impulzusmomentumok felületre merőleges összetevője ugyanis kvantált. Ennek figyelembevétele mellett még a megszokott Boltzman-statisztika helyett is a bonyolultabb Fermi-Dirac-statisztikát kell alkalmazni [7], ha az alsávokat meg akarjuk határozni.

Korrektíót hoz a számításba az a — már említett — néhány nm vastag, nem adalékolt AlGaAs réteg is, amelyet a kiürítés donoronjai által előidézett hatás csökkentése végett közbeiktatnak. Másik szerepe ugyanaz, mint egy a töltés közé iktatott dielektrikumé; csökkenti a szükséges töltések nagyságát, amelyek egy adott potenciálkülönbséget fenntartanak. Ha a vastagság ϵ , akkor ennek figyelembevételével

$$U_h \approx \frac{qN_D}{2\epsilon} w_1^2 + \frac{qN_D w_1}{\epsilon} e, \quad (9)$$

$$w_1 \approx \sqrt{\frac{2\epsilon U_h}{qN_D} + e^2} - e \quad (10)$$

$$qn_s \approx qN_D w_1 \quad (11)$$

ahol w_1 a kiürített réteg csökkent vastagsága.

A (8) és (11) összefüggéseket azért fogadhatjuk el, mert a nem adalékolt GaAs réteg tértöltése a két dimenziós elektrongázon kívül nagyon csekély, n_s értéke $N_D = 10^{18}$ atom/cm³ adalékolású AlGaAs és $e = 3$ nm esetében 10^{12} /cm² elektron közelében van.

Heteroátmenetes tranzisztor

Ilyenek a heteroátmenet viszonyai termikus egyensúlyban. Mi történik a tranzisztorstruktúrában, amelyben az n^+ jellegű AlGaAs réteg vékony ($d \approx 20 \dots 60$ nm), és másik oldalán ott van a vezérlő elektród (5. ábra)?

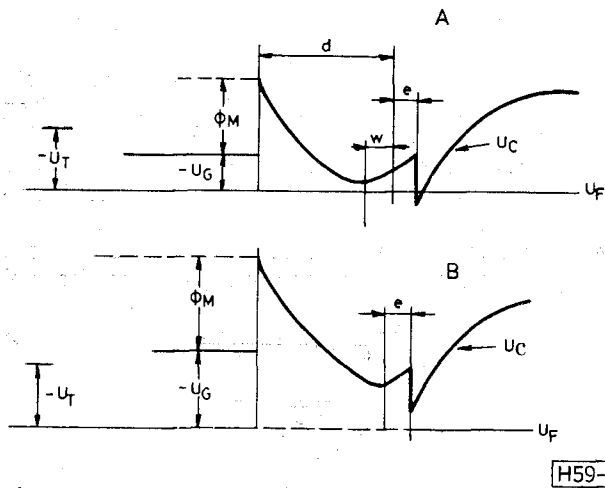
A Schottky-átmenet itt is kiürítést okoz, amelyet a vezérlő elektródára adott pozitív feszültség csökkent, negatív feszültség növel. Ha ez a kiürítés a réteg belsőjében úgy ér véget, hogy a heteroátmenethez tartozó kiürítést nem befolyásolja — a viszonyok olyanok, mint a termikus egyensúly esetében.

Ha azonban a kiürítés ennél a határértéknél, amely természetesen az AlGaAs réteg adalékolásától és vastagságától is függ, nagyobb mértékű (nagyobb pozitív töltésre van szükség), akkor már áttérjed a heteroátmenetre is, és — mivel az AlGaAs oldalon már úgy sincsenek elektronok — a GaAs oldal elektrónrétegének felületi sűrűségét csökkenti.

A sávörbülés többi részét a mélyebben fekvő tértöltés réteg veszi fel. Még negatívabbá téve a vezérlő elektróda feszültségét, végül oda jutunk, hogy az adalékolt AlGaAs réteg teljes d vastagságában a kiürítés érvényesül, annyira, hogy a vezetési sáv U_c határa még a heteroátmenetnél is ΔU_c magasságban van a Fermi-szint fölött (5b ábra). Ez már kizárja azt, hogy a GaAs felületén kétdimenziós elektrongáz alakuljon ki. Ez a vezérlő feszültség, amely megfelel a MOS tranzisztorok küszöbfeszültségének, a következőkben írható fel:

$$U_G = U_T = \Phi_M - \Delta U_c - \frac{qN_D d^2}{2\epsilon}, \quad (12)$$

ahol Φ_M a vezérlő elektróda Schottky-átmenetének



5. ábra. Energiaviszonyok a vezérelt tranzisztorban. A — elektrongáz létrejön, B — U_G túlságosan negatív

diffúziós feszültsége. Elektrongáz akkor van, ha U_G pozitívabb (kevésbé negatív), mint U_T . A tranzisztor-működés másik határa a termikus egyensúly beállta, amely megszünteti a vezérlés lehetőségét, $U_G = U_H$ értéknél érhető el és a (7), (10) és (12) egyenlet alapján számítható ki:

$$\frac{qN_D}{2\epsilon} (d - w_1)^2 = \Phi_M - U_H. \quad (13)$$

A tranzisztor gyakorlati működtetésében általában a nyelőre adott feszültség elég nagy ahhoz, hogy a csatornamenti feszültségesés miatt egy, a nyelőhöz közeli pontban

$$U_{GS} - U_{csat} = U_T \quad (14)$$

beálljon, tehát az elektrongáz által alkotott jó vezetési csatorna véget érjen. A MOS tranzisztornál megismert módon a fennmaradó rövid útszakaszon extrém nagy térerősség röpíti át az elektront a nyelőhöz, telítési sebességgel.

A pálya valamely (elzáródás előtti) x pontjában a töltéssűrűség értéke egységnyi szélességre vonatkoztatva:

$$q n_s(x) = Q(x) = \frac{\epsilon}{d_1} [U_{GS} - U_T - U_{csat}(x)]. \quad (15)$$

Itt d_1 a vezérlő elektróda és az elektrongáz közötti teljes távolság: $d_1 \approx d + e$.

Az áram (a parazita elemek hatásának elhanyagolásával)

$$I = Q(x) v(x) \quad (16)$$

és kis térerősségeknél $v(x) = \mu E(X)$ alapján a klasszikus MOS tranzisztorhoz hasonlóan

$$I = \frac{\epsilon \mu}{2d_1 L} (U_{GS} - U_T)^2. \quad (17)$$

Nagy térerősségeknél már a pálya korai szakaszán beáll a sebesség v_{sat} maximális értéke és az áram függése U_{GS} vezérlő feszültségtől fokozatosan lineárisabbá válik.

Gyakorlati viszonyok

Az új tranzisztor valóban sok előnyt mutat fel a GaAs MESFET-tel szemben.

Elérhető igen nagy meredekség, mert a vezérlő elektróda és csatorna közti távolság nagyon kicsi, 30–60 nm körül van. Még ennél kisebb is lehet az E-MESFET-hez hasonló megoldásban, mikor tehát vezérlőfeszültség nélkül nincs elektrongáz és pozitív az U_T küszöbfeszültség. Ha még emellett igen nagy az AlGaAs réteg adalékolása, a vastagság egy számítás szerint akár 15 nm-re is csökkenthető.

Lényeges, hogy a karakterisztika kezdő szakasza kevésbé görbült, ami azt jelenti, hogy a nagyjelű terjedési késés kifejezésében szereplő G_m értéke jobban megközelíti a kisjelű g_m értéket, mint a MESFET-nél.

Különösen az integrálás szempontjából nagy előny

az is, hogy az áram/igénybevett terület hányadosa magasabb, mint más tranzisztoroknál.

Végző, de nem utolsó előny a nagyobb mozgékony-ság alapján várható nagyobb sebesség. Igaz, hogy itt az első lelkesedést bizonyos kiábrándulás követte. Való tény, hogy $8-10\,000\text{ cm}^2/\text{Vs}$ tényleg elérhető volt szobahőmérsékleten. Itt már a mozgékony-ságot a rács hőrezgése, a fononok által okozott szóródás korlátozza. Ezért is előnyös (de elvileg más szempontból is kedvező) a hűtés, mégpedig 77 K-re, ami könnyen megoldható folyékony nitrogénnel. Az így lehűtött elektrongázban a mozgékony-ság (kis tér-erősséggel mérve) több mint tízszeresére emelkedik, ami még nagyobb várakozást keltett.

Itt azonban rendkívül nagy térerősségek lépnek fel a gyakorlatban már azért is, mert éppen a (4) egyenletre való tekintettel célszerű a műszakilag megvalósítható legrövidebb csatornahosszat választani. (Megjegyezzük, hogy a kis méretekkel járó kis feszültségek miatt itt nem kerül sor arra, hogy az elektronok átkerüljenek a fővölgyből a mellékvölgyekbe, tehát a csatornában felléphet nagyobb tér-erő a „kritikus” értéknél, anélkül, hogy instabilitás-ra kerülne sor.)

Így például a ma már az elektronsugaras technológia eszközeivel elérhető $L=0,25\ \mu\text{m}$ és $U_{DS}=0,5\text{ V}$ esetében a térerősség átlaga 20 kV/cm . A csatorna mentén természetesen a nyelő felé növekvő az érték.

A leegyszerűsített számításból adódó $2\times 10^8\text{ cm/s}$ vagy éppen $2\times 10^9\text{ cm/s}$ sebességre persze nem számíthatunk, hiszen az — amint láttuk (1) — fizikailag lehetetlen is lenne. Elméleti számítások szerint azonban (8) körülbelül $4\times 10^7\text{ cm/s}$ a várható tényleges telítési sebesség. Úgy tűnik viszont a kísérletek alapján, hogy az elektronsebesség ennél alacsonyabb telítési értéket mutat, ez szobahőmérsékleten mintegy $1,5\times 10^7\text{ cm/s}$ és 77 K hőmérsékleten $2\times 10^7\text{ cm/s}$. Egy durva becslés a (4) egyenlet szerint ennek alapján is 100 GHz fölötti határfrekvenciát mutatna ki. A valóságban azonban a parazita mellékhatások némileg lerontják a nagyfrekvenciás viselkedést. (Ilyen pl. a forrás és nyelő kontaktusellenállása és a nyelő-vezérlőelektróda közötti C_{DG} visszacsatoló kapacitás.)

Azt is meg kell jegyeznünk, hogy ez a nagy elektron mozgékony-ságú tranzisztor még rendelkezik bizonyos gyerekbetegségekkel. Ez különösen áll az alacsony hőmérsékletű üzemmódra, melytől pedig olyan sokat várnak. Egyes kísérletekben tapasztalnak itt a karakterisztikában instabilitást, hiszterézist, esetleg a karakterisztika „összeomlását”. Az utóbbi szemléletes kifejezés azt jelenti, hogy az áram alacsony értéken marad és nem vezérelhető. Az okok felderítésére és a kiküszöbölésére élénk kutatás folyik. Annyi már bizonyos, hogy — bármilyen jó eljárás is a molekuláris nyaláb epitaxia: a két félvezető határ-felülete így is bővelkedik még hibahelyekben, csapdákban, és ezek zavarják az alacsony hőmérsékletű működést (9).

Van egy szempont, amelyből nézve az új tranzisztor mindenképpen alul marad a GaAs MESFET-tel szemben. Ez pedig a sugárzásokkal szemben való ellenállás. Az AlGaAs ugyanis kellemetlenül sugár-érzékeny anyag. Ez erősebb árnyékolást tesz szükségessé.

Az első megvalósított tranzisztorok Japánban születtek meg, 27 elemből álló integrált gyűrűs oszcillátor formájában (9), mégpedig 17 ps kapcsolási idővel. Ezt az értéket később 10 ps alá sikerült le-szorítani, különböző kutatóintézetek közlései szerint. A gyűrűs oszcillátor azonban csupán az eszköz le-hetőségeinek bemutatására alkalmas, más haszna nincs. Később készítettek már háromfokozatú integrált erősítőt 20 GHz frekvenciára és integrált frekvencia-osztó logikai köröket is, amelyekben a terjedési késés 20 ps alatt volt. 1984 még gyorsabb kapcsoló áram-köröket és meglepően kis zajú mikrohullámú tran-zisztorokat hozott [10].

További fejlemények

A heteroátmenet bevonulása a tranzisztorteknikába érdekes további fejlődési irányokat indított el. Az egyik sokat ígérő új lépés a Bell laboratóriumtól származik [11]. Lényege az, hogy GaAs alapon a CMOS-hoz hasonló, integrálható komplementer tranzisztor-párat alakítanak ki. Ennek azelőtt azért nem volt gyakorlati realitása, mert a lyukvezetéses MESFET-ben a lyukak sebessége az alacsony mozgékony-ság miatt nagyon kicsi volt. Történtek azonban sikeres kísérletek olyan heteroátmenetes FET előállítására, amelyben a nem adalékolt GaAs réteg egy vele hatá-ros p-AlGaAs rétegből kap lyukakat és ezek alkotnak az átmenet közelében elfajult rétegben kétdimenziós „lyukgázt”. Ezzel sikerült 77 K hőmérsékleten $5000\text{ cm}^2/\text{Vs}$ mozgékony-ságot elérni.

Az integrálás azonban nem volt magától értetődő-en megoldható. Azt a zsebttechnikát, amely a szilícium CMOS készítésében szokásos, a GaAs-nál nem lehet alkalmazni.

Végül is megszületett a megoldás. A tranzisztor párja itt egy olyan elektronvezetéses GaAs MESFET, amelynek aktív rétege nem közvetlenül a félszigetelő hordozó, hanem egy közbeiktatott p-AlGaAs rétegen foglal helyet. Ez a réteg nincs káros hatással a MESFET működésére, sőt a kialakuló nagy potenci-álját a szokásosnál biztosabban zárja el az elektronok útját a hordozó felé. Az AlGaAs réteg pedig ugyan-az, amely a másik tranzisztorban jut tényleges sze-rephez. Ebből persze az is következik, hogy alatta nem közvetlenül a félszigetelő hordozó van. Közvet-lenül a hordozóra először (körülbelül $1\ \mu\text{m}$ vastag-ságban) nem adalékolt GaAs kerül, majd erre a szo-kásos pár nm vastag, nem adalékolt AlGaAs után az előbb említett p-típusú AlGaAs réteg, amelynek adalékolása a megvalósított kísérletben $2\times 10^{18}\text{ atom/cm}^3$ Be volt. Ezzel képezik ki a lyukvezetéses tranzisztort. Az alsó GaAs rétegbe is mélyen benyúló mart árok választja el a két eszközt egymástól.

Az elektronvezetéses MESFET aktív rétege körül-belül $0,5\ \mu\text{m}$ vastag n GaAs. Ebben a csatorna klasz-szikus módon alakul ki, a fölötte levő vezérlő elektró-da feszültségének hatására. A lyukvezetéses eszköz tetejéről ezt a GaAs réteget eltávolítják, és a vezérlő elektróda természetesen közvetlenül az AlGaAs ré-teggel alkot Schottky-átmenetet (6. ábra).

Szobahőmérsékleten nagyon kicsi a lyukvezetéses eszköz meredeksége, de 77 K hőmérsékleten már meg-közelíti az elektronvezetéses elemét. Az előállított

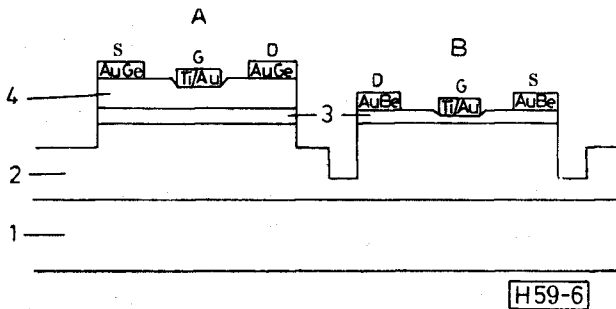
tranzisztorpárok, amelyekben a csatornahossz 2 μm volt, már 1 V tápfeszültség alatt is jól működtek.

Ez a friss eredmény azért figyelemreméltó, mert az új komplementerpár a szokásos szilícium CMOS-nál gyorsabb, fogyasztása pedig kisebb. A két menynység szorzatában talán még nagyságrendi javulás is elérhető lenne.

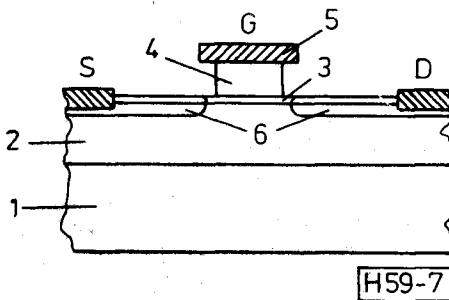
Egy másik új, érdekes eredmény: az IBM laboratóriumában a heteroátmenet felhasználásával teljesen egykristályos szerkezetben állítottak elő a MOS tranzisztorhoz hasonló elvű eszközt. Nagy előnye, hogy a tolerancia szempontjából kevésbé kényes, mint a nagy elektronmozgékonyosságú tranzisztor, vagy akár a GaAs MESFET. Alapja az a felismerés, hogy a kellő tisztaságú AlGaAs nagy tiltott sáv szélessége és kis elektronmozgékonyossága miatt igen jó szigetelő. Lehet tehát olyan tranzisztort kialakítani, amelyben a félvezető nem-adalékolt GaAs; a dielektrikum nem-adalékolt AlGaAs, a vezérlő elektróda pedig igen erősen adalékolt n^+ GaAs réteg, amelynek ohmos kontaktusa van (7. ábra).

A hordozó félszigetelő GaAs. A molekuláris nyaláb epitaxia módot ad az egyes rétegek felvitelére úgy, hogy azok egykristályos szerkezetet alkotnak a hordozóval. A szilícium MOS szerkezete ezzel szemben bonyolult: kristály, amorf, polikristály rétegeződés: ez elvi hátrány a bipoláris tranzisztorhoz képest. Ezt a hátrányt az új szerkezet kiküszöböli.

Sokkal fontosabb az a gyakorlati előny, hogy a küszöbfeszültség beállítása nem kényes.



6. ábra. Komplementer térvezérlésű tranzisztorpár heteroátmenetes p -eszközzel. 1 — hordozó, 2 — nem adalékolt GaAs, 3 — p^+ AlGaAs, 4 — n-GaAs A — elektronvezetéses, B — lyukvezetéses eszköz



7. ábra. Heteroátmenetes térvezérlésű tranzisztor GaAs vezérlő elektródával. 1 — hordozó, 2 — nem adalékolt GaAs, 3 — nem adalékolt AlGaAs, 4 — erősen túladalékolt n^+ GaAs, 5 — ohmos kontaktus a vezérlő elektródához, 6 — implantált zónák

Amint láttuk, a nagy elektronmozgékonyosságú tranzisztorban a küszöbfeszültség (12) szerint:

$$U_T = \Phi_M - \Delta U_C - \frac{qN_D d^2}{2e} \quad (18)$$

Itt Φ_M a vezérlő elektróda és az n AlGaAs közötti potenciálgát, ΔU_C az elektronaffinitásbeli ugrás, N_D az AlGaAs réteg adalékolása, d a vastagsága. A kívánt küszöbfeszültség beállítása N_D és d értékének megfelelő megválasztásával lehetséges, ezért mindkét paramétert kis toleranciával kell megvalósítani.

Az új eszközben azonban Φ_M és ΔU_C majdnem azonos, mivel mindkét oldalon ugyanaz az anyag van, ugyanis a heteroátmenetnél itt is kialakul az elektron-gáz, amely az elektronokat itt a forrás és nyelő zónákból nyeri. Itt tehát a vezetési sáv határa minimális mértékben van a Fermi-szint felett, míg a vezérlő elektróda oldalán az erős adalékolás miatt sávhatár és Fermi-szint közel egybeesik.

A (12) egyenlet jobb oldalának harmadik tagja nem veszélyes többé, mert annyira kicsi, hogy N_D szórásának sincs jelentős befolyása. A küszöbfeszültség közel 0 [12].

Előny az is, hogy az AlGaAs rétegben nem folyhat a hasznos árammal párhuzamos parazita áram, és — mivel a réteg nem adalékolt — a két átmeneten kevesebb lesz a csapda. Az elkészítés pedig lényegében homogén művelet; egyetlen, programozott, molekuláris nyaláb epitaxiás eljárás.

A kísérleti eszközök egyelőre elsősorban alacsony hőmérsékleten (77 K) mutattak kitűnő működést. Összehasonlítás kedvéért kitérünk a heteroátmenetes bipoláris tranzisztorra is, bár az itt tárgyalt új irányzatokkal szemben az a gondolat, hogy a heteroátmenetes bipoláris tranzisztorban hasznosítsák, nagyon régi. Már felmerült Shockley 1948-as szabadalmi bejelentésében. Krömer 1957-ben javasolt olyan tranzisztort, amelyben az emitter tiltott sáv szélessége nagyobb, mint a bázisé. Ebben (példának npn szerkezetet véve) potenciálgát tartja vissza a bázisban a lyukakat attól, hogy az emitterbe lépjenek, tehát az emitterhatásfok értéke 100% lesz.

Ezért a bázist erősen, az emitternél is sokkal erősebben lehet adalékolni. Ha pedig ez így van, a bázis lehet nagyon vékony (pl. 10 nm) anélkül, hogy veszedelmesen megnőne a bázisellenállás. A vékony bázisban viszont kicsi lesz a rekombináció valószínűsége, és így a transzporttényező is megközelítheti a 100%-ot. Ez viszont azt jelenti, hogy β áramerősítési tényező könnyen 1000 fölé emelkedhet. Ha az átmenetnél a kétféle anyag összetétele nem hirtelen, hanem fokozatosan megy át egymásba (ami a molekuláris nyaláb epitaxiával megvalósítható), további előny lép fel: az elektronok nagy energiával lépnek be a bázisba. Ilyen esetben kisebb a szóródás és az elektronok szinte ballisztikusan mozognak, sebességük a bázisban is tovább nő, még 4×10^7 cm/s értéket is elhagyhat.

A (4) összefüggést ugyan nem alkalmazhatjuk minden további nélkül a parazita mellékhatások miatt, a határfrekvencia azonban elvi számítások szerint így is megközelítheti, vagy elhagyhatja a 100 GHz értéket.

Nagyjelű kapcsoló működésben viszont kisebb a heteroátmenetes bipolaris tranzisztor fölénye, mert az (5) egyenlet a töltéstárolási késleltető hatásokat nem veszi figyelembe. Igaz, hogy ezeket az ECL áramkör kiküszöböli, de a megnövekedett fogyasztás miatt ez nem mindig használható.

Technológiai szempontból a bipolaris típus még sokkal nehezebb feladatot jelent, mint a heteroátmenetes térvezérlésű tranzisztor.

I R O D A L O M

- [1] *J. B. Socha, L. F. Eastman*: Comment on single carrier space charge controlled conduction vs-ballistic transport in GaAs devices at 77K. *Elect. Dev. Lett.* EDL 3, p. 27, 1982.
- [2] *Gottwald, P.*: Mikrohullámú félvezető eszközök, p. 173. Műszaki Kiadó, Budapest, 1985.
- [3] *P. M. Solomon*: A comparison of semiconductor devices for high speed logic. *Proc. IEEE* 70, pp. 489–609, 1982.
- [4] *L. Esaki and R. Tsu*: Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors. *IBM J. Res. Develop.* 14, pp. 61–68, 1970.

- [5] *Tomizawa et al.*: Monte-Carlo simulation of AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors. *IEEE Trans. El. Dev.* ED31, pp. 382–385, 1984.
- [6] *T. C. Hsieh et al.*: Carrier density distribution in modulation doped GaAs–AlGaAs quantum well heterostructures. *Solid State El.* 26, pp. 1173–1180, 1983.
- [7] *D. Delagebeaudeuf, N. T. Linh*: Metal (n) AlGaAs–GaAs two dimensional Electron Gas FET. *IEEE Trans. El. Dev.* ED29, pp. 955–960, 1982.
- [8] *B. R. Nag, M. Debroy*: Electron Transport in submicron GaAs channels at 300 K. *Appl. Phys. A. Solids and Surfaces*, 31, pp. 65–70, 1983.
- [9] *T. Mimura et al.*: A new field-effect transistor with selectivity doped GaAs/n AlGaAs heterojunction. *Jap. J. Appl. Phys.* 19, pp. L 225–L 227, 1980.
- [10] *R. Chao et al.*: Quarter micron gate length microwave HEMT's. *El. Lett.* 19, pp. 894–896, 1983.
- [11] *R. A. Kiehl, A. C. Gossard*: Complementary p-MESFET and n HB MESFET (AlGa) As Transistor. *El. Dev. Lett.* EDL-5, pp. 521–523, 1984.
- [12] *P. M. Solomon et al.*: A GaAs gate heterojunction FET. *El. Dev. Lett.* EDL-5, pp. 379–382, 1984.