

Poliszilícium emitteres tranzisztorok

NGUYEN SY NAM

BME Elektronikus Eszközök Tanszék

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk új fajta bipoláris tranzisztort ismertet. Ebben a fajta tranzisztorban az adalékolt poliszilícium-réteg emitter-ill. emitterkontaktusként szerepel. A poliszilícium tulajdonságainak ill. a poli-monokristály határátmeneti rétegnek köszönhető, hogy ennek a fajta tranzisztornak sok előnyös tulajdonsága van a hagyományos bipoláris tranzisztorokkal szemben. Ilyen pl. rendkívül nagy az áramerősítési tényezőjük / a β -juk elérheti a 30000-et/. Így alkalmazásával a bipoláris VLSI áramkörök gyártásában a méretcsökkentéssel együttjáró számos problémát ki lehet küszöbölni.

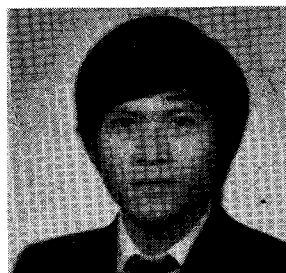
Bevezetés

A 60-as években megjelent az első monolit integrált áramkör /IC/. Az integrált áramkörök előállítására kezdetben a bipoláris technológiát alkalmazták. A standard bipoláris technológiával /eltemetett kollektor, szigetelés pn-átmenetekkel/ realizálható TTL áramköröknek azonban igen nagy volt a területszükséglete. Az első áramkörök megjelenése óta a felhasználók fokozódó igénye visszahatott a technológiák fejlődésére, az eszközök intenzív kutatására. Az integrált áramkörök gyártásában a főtörekvés az, hogy minél kisebb fogyasztású, minél nagyobb elemsűrűségű és minél gyorsabb működésű integrált áramköröket tudjanak létrehozni, minél olcsóbban.

A bipoláris integrált áramkörök megjelenése után fokozatosan előtérbe kerülnek a MOS integrált áramkörök. A MOS technológia nagy előnye a bipoláris szemben, hogy kisebb a helyigénye, ugyanis itt tranzisztorok között nem szükséges a szigetelés, amely leegyszerűsíti a technológiát is. Az önillesztő poliszilícium gate-es technológia előnyösen kihasználható az integrált áramkörök elemsűrűségének növelésére. További előnye a MOS IC-éknek, hogy sokkal kisebb a fogyasztásuk /különösen a CMOS IC-éknek/, mint a bipoláris integrált áramköröké. Viszont a MOS IC-ék működési sebessége sokkal kisebb, mint a bipoláris IC-ék sebessége, különösen a nem telítési üzemi bipoláris IC-éké.

A MOS technológia fejlesztésére ezért nagy erőket fordítanak és jelentős eredményeket érnek el. A MOS IC-ék működési sebessége jelentősen megjavult, fogyasztásuk és elemsűrűségük viszont sokkal kedvezőbb, mint a bipoláris IC-éké.

Később megszületett a bipoláris I^2L áramkör, amely alkalmas a nagy integráltsági fok elérésére /nincsenek felületigényes ellenállások és szigetelések a tranzisztorok között/. A gyártás bonyolultsága miatt mégsem



NGUYEN SY NAM

A Budapesti Műszaki Egyetem Villamosmérnöki Kar Elektronikai Technológia szakán 1986-ban szerzett mérnöki diplomát. 1987-től aspiráns a Budapesti Műszaki Egyetem Elektronikus Eszközök Tanszékén. Kutatási témája: újszerű emitterstruktúrával (jém-tunnelexid emitter, poliszilícium-emitter) rendelkező, bipoláris tranzisztorok készítése, vizsgálata és modellezése.

tudott versenyezni az I^2L a már kiforrott MOS technológiával. Máig általában azt mondhatjuk, hogy azokon a területeken, ahol szükség van a nagy működési sebességre /pl. super számítógépek központi egységében/ bipoláris ECL áramköröket használnak, amelyeknek használata rendkívül kényes:

- a nagy disszipáció teljesítmény miatt különleges hűtést igényelnek
- a kis zavarvédeltsége miatt bonyolultabb a berendezés konstrukciója

Kiseb sebességű, de nagy integráltsági /VLSI, LSI/ áramkörök már inkább különböző MOS technológiával készülnek, végül MSI, SSI szinten mind bipoláris /TTL/ mind MOS /CMOS/ integrált áramkörök kaphatók a kereskedelemben. A fokozódó igény a sebesség iránt arra kényszeríti a kutatókat és a fejlesztőket, hogy nagy figyelmet fordítsanak a bipoláris technika fejlesztésére. A kutatók igen sok nehézségbe ütköznek a bipoláris tranzisztor méretcsökkentésében és a sebesség növelésében. Tudjuk, hogy a bipoláris tranzisztor működési sebességét jelentősen befolyásolja a bázis vastagsága. Hogy minél gyorsabb eszköz készüljön, minél vékonyabbra kell elkészíteni a bázist, ugyanis ekkor kisebb lesz a töltéshordozó áthaladási ideje. A legkisebb bázisvastagság, amellyel elvileg még lehet tranzisztort készíteni, 25 nm [1].

Minden olyan próbálkozás, amely hagyományos eljárással /2-szeres diffúzió, 2-szeres ionimplantáció, ill. a kettő kombinációja/ próbál vékony bázisú tranzisztort készíteni, számos problémával jár. Például 2-szeres diffúziós eljárásnál: előbb létrehozzák a bázisprofil /bórdiffúzióval/ később az emitter-réteget az arzén, ill. foszfor bediffundálásával. A két réteg vastagságának különbsége adja a tranzisztor bázisát. Ezzel az eljárással nehéz jó minőségű vékony bázisú tranzisztort készíteni a következő okok miatt:

- a bór gyorsan diffundál az Si-ban, így az emitter készítésénél a bázisprofil mélyebbre megy, ezért

Beérkezett: 1989. 1. 19. (†)

nem kapunk vékony bázist, ha mélyre hajtjuk be az emitter-diffúziót.

a másik káros effektus ennél az eljárásnál az EDE effektus /Emitter-Dip-Effect./ amelynek lényege a következő: az emitter alatti bázisterület az emitter-diffúzió által okozott rács hibák / diszlokációk/ miatt mélyebbre diffundál, mint a széleken. Így a tranzisztor működése közben az áram jelentős része az emitter szélén folyik, ezért kisebb lesz a tranzisztor áramterhelhetősége.

Az első probléma kiküszöbölésére sok megoldás kínálkozik. Az első megoldás az, hogy az első bórdiffúzió alkalmával vékony bázisprofilat készítenek, így az emitter-diffúziót is sekélyebbre kell készíteni. Az így kapott vékony emitterű tranzisztornak sok hibája van: fémezésnél, különösen az alumíniumozásnál; a fém könnyen bediffundál az Si-ba és rövidre zárhatja az emittert. Vékony emitterű tranzisztornak kisebb az áramerősítési tényezője / a kisebb emitter Gummel szám miatt [2] / így, hogy elfogadható β értéket kapjunk, erősen kell adalékolni az emittert. Az erősen adalékolat félvezetőben a tiltott sáv szélessége jelentősen leszűkül [3]. A tiltott sáv szűkülése az emitterben a jelentős, a bázisban, a lényegesen kisebb adalékkoncentráció miatt, nem nagy. Ezért nagy a tranzisztor áramerősítési tényező hőfüggése [4], amely korlátozza az integrált áramkörök alacsony hőmérsékleten való alkalmazását. A második megoldás lényege a következő: kihasználva a bór gyors diffundálását olyan tranzisztort készítenek, amelynél előbb készítik el az emittert, ezután bór diffúzióval létrehozzák a bázisprofilat. Mivel a bór gyorsabban diffundál, így előbb-utóbb kialakul a bázisréteg.

Összefoglalva: Hagyományos technológiával nehéz vékonybázisú tranzisztort készíteni /bázisvastagság a két adalékprofil különbsége, ami nehezen kézbe tartható/. Az elkészített tranzisztornak általában kicsi az áramerősítési tényezője, részben a vékony emitter kis Gummel száma miatt, részben az átszűrési feszültség növelésére növelni kell a bázis adalékolást, ami viszont elrontja a β -t. Az elemsűrűség növelésében nehézséget jelent, hogy a bipoláris technológiában nehezen alkalmazható az önillesztő technológia. A felsorolt problémákat ki lehet küszöbölni egy újszerű struktúrájú bipoláris eszköz, a poliszilícium emitteres tranzisztor alkalmazásával. Ezen új eszközt, bár működése teljesen még nem tisztázott, kiváló tulajdonságai miatt már a gyakorlatban is alkalmazzák. Így például a Faichild újabb 256-kbites statikus memória áramkörében [5]. Az eszköz működése a poliszilícium különleges tulajdonságain alapszik.

A poliszilícium réteg előállításának és tulajdonságai

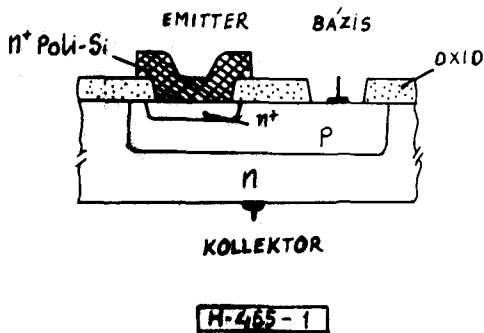
A poliszilícium olyan félvezető anyag, amely egykristály Si szemcsékből áll. Az egykristály Si szemcsék átlagos mérete széles határok között változhat /nm-től

100 μm -ig/. emiatt a poliszilícium tulajdonsága más-más lehet eltérő szemcseméretű anyagoknál. A poliszilícium tulajdonságát nemcsak a szemcseméret határozza meg, hanem számos technológiai paraméter is befolyásolja, pl. a leválasztás módja, körülményei, a hőkezelési eljárás stb. A tiszta poliszilícium elektromos tulajdonságai viszonylag kedvezőtlenek, így a gyakorlatban nem sok alkalmazási területe van. Az adalékolat poliszilícium sok érdekes elektromos tulajdonságot mutat. Az adalékolat poliszilíciumban a töltéshordozók élettartama τ rendkívül rövid, és sok tényezőtől függ [6]: pl. szemcsemérettől, adalékkoncentrációtól, a határfelületi állapotok sűrűségétől. A kis szemcsés poliszilíciumban a τ kisebb lehet 100 ps-nál. [7] A poliszilícium fajlagos ellenállása kis adalék koncentrációnál alig változik, szinte intrinsic marad az anyag, a középértékeknel gyorsan lecsökken és megközelíti a monokristály fajlagos ellenállás-értékét a nagy adalékkoncentrációnál. A töltéshordozó Hall mozgékonyasága poliszilíciumban sokkal kisebb, mint monokristályban. Az adalékkoncentráció növelésével a mozgékonyaság minimum értékre csökken közepes adalékolásnál, és ezután gyorsan növekszik az adalék növelésével. A poliszilícium előállítására a legelterjedtebb növesztési mód a kémiai gőz-fázisú lecsapattós módszer CVD [chemical vapor deposition/ ill. LPCVD /low pressure chemical vapor deposition/, de kísérleteznek olyan leválasztási módszerrel is, amelynél a leválasztást nagy vákuumban, alacsony hőmérsékletű szubsztrátra, Si párolgatással valósítják meg [8]. A kémiai gőzfázisú leválasztásnál a tiszta poliszilíciumot szilán gázzal, amíg adalékolat poliszilíciumot az un. in-situ módszerrel, vagyis az adalékanyagot vivő gáz bekeverésével választják le. A poliszilícium réteg növekedési sebessége jelentősen lecsökken az adalékgáz jelenlétében [9]. A szubsztrát hőmérséklete erősen befolyásolja a leválasztott réteg tulajdonságát [9]: ha a szubsztrát hőmérséklete alacsonyabb 600 °C-nál, amorf réteget kapunk, ha magasabb 1050 °C-nál, epitaxiális réteg keletkezik. A két fenti hőmérséklet érték közé eső szubsztrát hőmérséklet esetén a hőmérséklettől függő szemcseméretű poliszilícium réteget kapunk. Gyakorlatban elterjedt az az eljárás, hogy a leválasztott tiszta poliszilícium réteget diffúzióval vagy ionimplantációval adalékolják.

A poliszilícium emitteres tranzisztor működési elve és technológiája

A poliszilíciumban az adalékok diffúziós állandója 3-4 nagyságrenddel nagyobb lehet, [10] mint szilícium egykristályban, ugyanis a poliszilíciumban sok szemcse van, amelyeknek zavaros határfelülete mentén könnyen mozoghatnak az adalékatomok. Az adalékolat poliszilícium réteget jól kézben tartható diffúziós forrásként lehet használni. Először Takagi [11] folytatott olyan kísérletet, amelyben az in-situ módszerrel levá-

lasztott polyszilícium réteget használta mint emitter diffúziós forrást. A megvalósított tranzisztor paraméterei erősen függenek az adalékkoncentrációtól, a hátréteg tulajdonságaitól. Murrman [12] tiszta polyszilícium réteget választott le a nyitott emitter-területre, ezután, ezen keresztül foszfort átdiffundáltatva észre vette, hogy az ilyen módon elkészített tranzisztor áramerősítési tényezője β / rendkívül nagy. Ezen újszerű struktúrájú tranzisztor részletesebb tanulmányozását később Graul [12] folytatta. Az általa készített tranzisztor struktúrája az 1. ábrán látható. A tranzisztor rétegeinek adalékolásához ionimplatációt alkalmazott, kihasználva az ionimplatáció előnyös tulajdonságait: gyors, könnyen kezelhető, jól kézben lehet tartani az adalékprofil tulajdonságait. Az eszköz előkészítésé-



1. ábra. A polyszilícium emitteres tranzisztor struktúrája

nek technológiai menete röviden a következő: a kiinduló alapanyag n-típusú Si szelet. A bázisprofil bór ionimplatációval kb. 100 nm oxidon keresztül készül el. Az ionenergia 50 keV-től 100 keV-ig, míg a dózis $5 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}$ -től $2 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-2}$ -ig változik. Ezután egy hőkezelési folyamat következik 900 °C-on 30 percig. A bázis kialakítása után kinyitják az emitter-ablakot és CVD eljárással leválasztják a tiszta polyszilícium réteget. A polyszilícium réteget arzén-ionimplatációval adalékolják. Az ionenergia 100 keV, amely elég alacsony, hogy a belőtt ionok ne érhék el a bázisréteget, a dózis 10^{15} -től $5 \cdot 10^{15}$ -ig változik. A polyszilícium adalékolása után a 900 °C-tól 1000 °C-ig tartományba eső hőmérsékleten hőkezelési ciklussal behajtják az emitter-diffúziót a polyszilícium rétegből, amelynek következtében nagyon vékony emitter alakul ki. Végül a megfelelő fémezési, marási műveletekkel készül az ún. polyszilícium emitteres tranzisztor. Összehasonlítás céljából hasonló technológiai paraméterekkel /kettős ionimplatáció/ elkészültek a hagyományos npn bipoláris tranzisztorok is. Az összehasonlításból kiderült, hogy a polyszilícium emitteres tranzisztor sokkal jobb paraméterekkel rendelkezik.

- Magasabb az áramerősítési tényező, kb. 7-szer nagyobb /egyébként az emitter Gummel szám tízszerese a hagyományos tranzisztoroknak/.
- Kisebb a bázisellenállás.

- Nagyobb az áramterhelhetőség.
- Nagyobb az emitter-bázis letörési feszültség.
- Kisebb az áramerősítési tényező hőfüggése.

Az elkészített eszközök határfrekvenciája $f_c = 3,5 \text{ GHz}$.

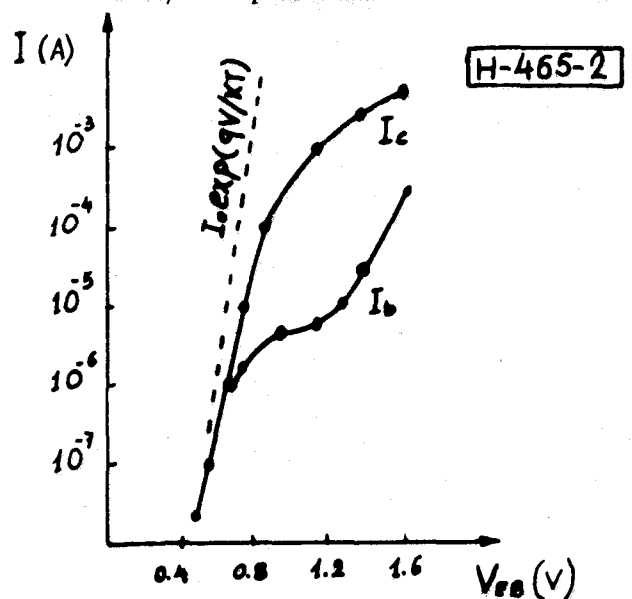
Hogy mi okozza a β növekedését, ez mindmáig teljesen még nem tisztázott. Viszont tudjuk, hogy erősen adalékolat félvezetőben a tiltott sáv szélessége csökken, a szűkülés mértéke függ az adalékkoncentrációtól, így a hagyományos tranzisztoroknál, ahol az emitter-adalékolás sokkal magasabb a bázisénál, az emitter sávszűkülés mértéke ΔE_g -val nagyobb, mint a bázisé. És ez okozza a tranzisztor β -hőfüggését, amely a következő kifejezéssel írható le [4/

$$\beta = \beta^* \exp \left[- \frac{\Delta E_g}{KT} \right]$$

ahol β^* elméleti értéke, ha $\Delta E_g = 0$

Így a polyszilícium emitteres tranzisztor kisebb β -hőfüggéséből következik, hogy kisebb a ΔE_g a polyszilícium tranzisztorban, és ez hozzájárul a β növekedéséhez. Ebből az is következik, hogy a polyszilícium emitteres tranzisztor aktív emitter tartományában kisebb az adalékkoncentráció. A tranzisztorok β -hőfüggéséből azt állapították meg, hogy a polyszilícium tranzisztorban ΔE_g kb. 30 meV-tal kisebb, mint a hagyományos tranzisztorban. Ez a ΔE_g különbség szobahőmérsékleten $\exp(30/26) \approx 3$ -szoros β növekedést eredményez a polyszilícium emitteres tranzisztorban. Az első jól működő polyszilícium emitteres tranzisztor elkészítése után intenzív kutatás folyt ezen újszerű eszköz tanulmányozására, továbbfejlesztésére és a működési modell megalkotására. Sajnos az eszköz paraméterei erősen függenek az alkalmazott technológiától, különösen a polyszilícium réteg leválasztási körülményeitől és a szelet leválasztás előtti felület-kezelésétől.

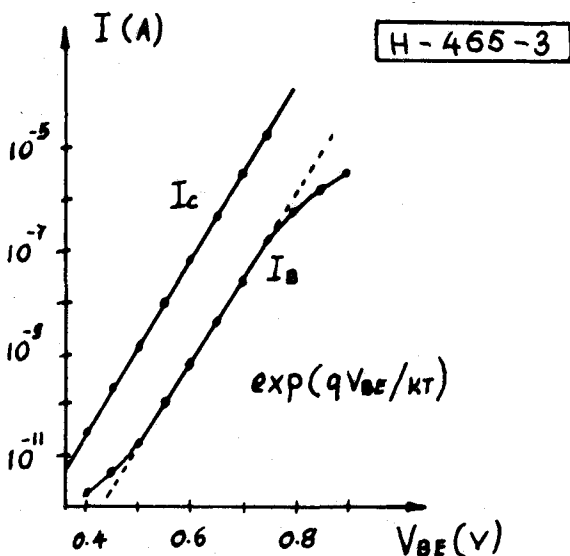
Graaff [13] szándékosan növesztett vékony /tunnel/ oxidot az emitter területre a polyszilícium leválasztása előtt. Foszfor diffúzióval kialakította az emittert /oxidon keresztül/ és a polyszilícium kontaktust. Az esz-



2. ábra. Az oxidréteggel rendelkező poli-Si emitteres tranzisztor áramai V_{BE} függvényében

köz paraméterei erősen függenek a tunneloxid növesztési technológiától. Plazmával növesztett oxid esetén az eszköz nagy emitterhatásfokot mutat, de a működés instabil. A nedves kémiai eljárással készült eszközök stabil működésűek, de kisebb az emitter-hatásfokuk. A Graaff tranzistorai nagy emitterhatásfokot mutatnak, az emitter Gummel számuk elérheti a $7 \times 10^{14} \text{ sem}^{-4}$ -t, a β -hőfüggésük kisebb, mint a hagyományos tranzistoroké, sőt voltak olyan tranzistorok, amelyek negatív a β -hőfüggése. A tunneloxid jelenléte miatt a tranzistor I-U karakterisztikája eltér az ideális exponenciális görbétől /2. ábra/. Graaff az eszköz működésében jelentős szerepet tulajdonít a tunneloxidnak.

Ning [14] olyan eszközt készített, amelyben bór ill. arzén implantációjával hozta létre a bázist ill. az emittert. In-situ módszerrel választotta le az arzénadalékolású poliszilícium kontaktus réteget. A poliszilícium leválasztása után 900°C -on történő hőkezelés következett, amely aktiválja az emitterben lévő implantált arzén atomokat. Az ilyen módon elkészített eszköz tulajdonképpen más, mint az előző eszköz. Itt a poliszilícium réteg csak kontaktus feladatot lát el, diffúzióforrásként nem szerepel és nincs szándékosan növesztett határoxid réteg. Ning eszközei 3-szoros β -növekedést mutatnak. A bázis áram /ezen keresztül a β / függ a poliszilícium réteg vastagságától, ha ez 50 nm-nél kisebb. Minél vastagabb a poliszilícium réteg, annál nagyobb a β ill. annál kisebb a bázisáram. A β hőfüggése, ellentétben a fentiekkel, nagyobb értékű, mint az Al-kontaktusú hagyományos tranzistoroké. Az I- U_{BE} karakterisztika ideális exponenciális görbe /3. ábra/.



3. ábra. Az oxidréteg nélküli poli-Si emitteres tranzistor áramai V_{BE} függvényében

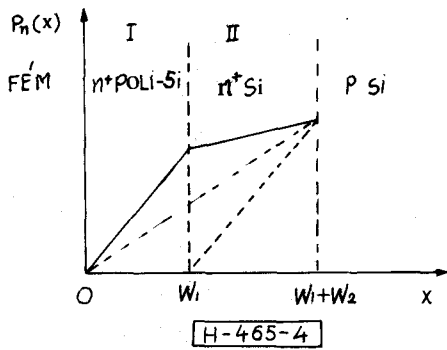
Ning nem találta fontosnak a határréteg szerepét. Soerowirdjo [15] különböző felületkezelési eljárásokkal kezelte a felületet a poliszilícium leválasztása előtt. Az emittert az adalékolt poliszilícium rétegből, a határrétegen keresztül átdiffundáltatva hozta létre. Azt tapasztalta, hogy különböző felületkezelés hatására kü-

lönböző vastagságú határréteg alakult ki. A legvékonyabb határfelületet akkor kapta, ha HF savval marta a felületet. Az Auger electron spectroscopy eredményei mutatják, hogy ilyenkor a határréteg 2Å -nál kisebb. Ha HF sav-marás után alkalmazott RCA tisztítást, akkor a határréteg vastagsága $13\text{--}15\text{Å}$ között alakult.

A különböző határréteg miatt különböző értékre adódott az eszközök β -ja. A HF sav-marással készült eszköz 3-szoros β -növekedést mutatott, ami megegyezik a Ning-eredménnyel. Az RCA tisztított eszközök β -ja, a hagyományos eszközének 7-től 32-szereséig terjedt. Mind a két fajta eszköznek pozitív volt a hőfüggése, de az RCA tisztított eszközök β -ja kevésbé volt érzékeny a hőmérséklet változására, mint HF-marás eszközöké.

Halen [16] bór-ionplantációval hozta létre a sekély bázist. A poliszilícium leválasztása előtt szándékosan növesztett oxidot az emitter területére. A poliszilícium réteg leválasztása és ionimplantációs adalékolása után rövid ideig /kb. 15-percig 900°C -on/ hőkezelés alá vetette szeletét, amelynek eredményeképpen nagyon sekély / 200Å / emitter alakult ki. Az így készített tranzistor β -ja 2000 volt, 20-szor nagyobb, mint a hasonlóképpen készített, határ oxidréteg nélküli poliszilícium emitteres tranzistoré.

Az eddigiek alapján úgy tűnik, hogy kétfajta poliszilícium emitteres tranzistor létezik. Az egyikben a szigetelő-félvezető határ átmenet fontos szerepet játszik, ebben a fajta tranzistorban jelentős mértékben javul az áramerősítési tényező. A másik típusban minimális vastagságú határréteg van a poliszilícium és monokristály emitter között. Ez a csekély átmenet nem befolyásolja - vagy legalább észre nem vehető mértékben - az eszköz működését. Az ilyen tranzistor a poliszilícium réteg vastagságától függően kb. 3-szoros β -növekedést mutat a hagyományos tranzistorhoz képest. Arra, hogy mi okozza a növekedést, alapjában véve két elméleti modell született. Abban az esetben, ha a határátmenet nem jelentős [14] ezt nem vesszük figyelembe az eszköz működésének leírásához. Az indok a következő: a poliszilícium-kontaktus ugyan növeli a tranzistor β -ját, de a β -növekedése a poliszilícium réteg vastagságától jelentősen függ /ha a poliszilícium kontaktus vékonyabb 500Å -nél/, úgy hogy a növekedést nem elsősorban a felületi határátmenet okozza. az I_c / U_{be} , I_b / U_{be} görbék ezeknél az eszközöknél ideális exponenciális görbék, ezért a határátmenet, ha egyáltalán létezik, elhanyagolható /3. ábra/. A β -növekedés így feltehetően a töltéshordozóknak a monokristályból a polikristály rétegbe való transzportálási tulajdonságain alapszik. A 4. ábrán látható lyukak eloszlása p_n/x / az emitterben. A p_n/x eloszlást könnyen meghatározhatjuk, ha feltételezzük, hogy $D_p dp_n/dx$ folytonos az $x=w_1$ helyen. A β növekedést szemléletesen úgy lehet magyarázni, hogy a poliszilíciumban a diffúziós állandó kisebb mint az egykristályban. Ezért az előbbi feltétel érvényesülése esetén az $x=w_1$ helyen

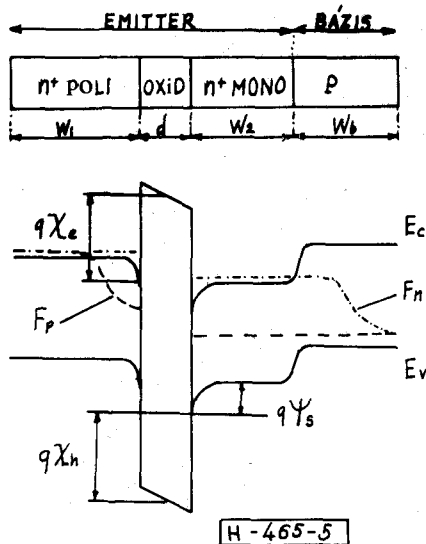


4. ábra. A lyukeloszlás az oxidréteg nélküli poli-Si emitteres tranzistor emitterében

a lyukak koncentrációja magasabb lesz, mint abban az esetben ha a poliszilícium helyén monokristály lenne. Ez a koncentráció növekedés csökkenti a lyukáramot /diffúziós áramot/ ezért növekszik a β . Ha feltételezzük, hogy $L_{p2} \gg w_2$, amely sekély emitter esetén igaz és legyen K a β javulási faktor a poliszilícium réteg nélküli esethez képest, a p_n/x ismeretében felírhatjuk /14/.

$$K = \frac{G_c/Poli/}{G_c/Al/} = \frac{b/Poli/}{b/Al/} = 1 + \frac{D_{p2}L_{p1}}{D_{p1}w_2} \tanh \frac{w_1}{L_{p1}} = 1 + \frac{D_{p2}L_{p1}}{D_{p1}w_2} \quad \text{Ha } w_1 > L_{p2}$$

D_{p1} a diffúziós állandó poliszilíciumban, amely kisebb mint a monokristály-rétegben, így K faktor egynél jelentősen nagyobb. Abban az esetben, ha szándékosan növesztünk oxidot a mono- és poliszilícium között ennek a határátmenetnek fontos szerepe van a β növelésében. Az emitter sáv-struktúrája az 5. ábrán látható.



5. ábra. Az oxidréteggel rendelkező poli-Si emitteres tranzistor sávstruktúrája

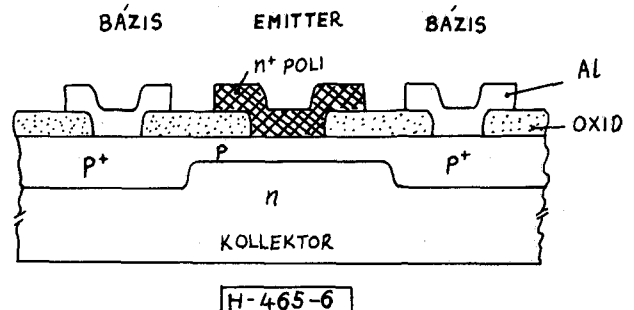
A határátmenet szerepe a következő: mind a lyukaknak, mind az elektronoknak gátat jelent a tunnel-oxid réteg. De a lyukak számára a potenciál-gát magasabb, mint az elektronoknak. A lyukáram, a magas potenciál-gát miatt, tunnel áram. A bázisáramot ez a potenciál-gát korlátozza /vékony emitterben rekombináció elhanyagolható/. Minél vastagabb az oxidréteg, annál kisebb a bázisáram adott emitter-áram mellett, tehát nő a β , de a vastagabb oxidon eső feszültség is nagyobb lesz. A β max. értékre a következő kifejezést adhatjuk [13].

$$\beta_{max} = \text{const} \frac{\sqrt{T}}{\zeta_{ob}} \exp\left(-\frac{q}{KT} (\Delta V_{g2} - \Delta V_{gb} - \psi_s)\right)$$

ahol ΔV_{g2} , ΔV_{gb} a sávszűkülés az emitterben ill. a bázisban, ζ_{ob} a bázisréteg négyzetes ellenállása, ψ_s sáv elhajlás a határátmenetnél.

A képletből az látszik, hogy nemcsak a különböző sávszűkülés, hanem a sávelhajlás mértéke is befolyásolja a tranzistor β -ját és annak hőfüggését. Ha a sávelhajlás / ψ_s / mértéke nagyobb, mint a sávszűküléskülönbség / $\Delta V_{g2} - \Delta V_{gb}$ /, a tranzistor β -hőfüggési együtthatója negatív lesz.

A fenti két elméletet később továbbfejlesztették, egyesítették, [17]-[20] figyelembe veszik a poliszilícium szemcsehatárátmenet szerepét, rekombináció jelenségeket. Bár sikerült modelleket alkotni, mégis azt mondhatjuk, hogy a poliszilícium emitteres tranzistor működése nem teljesen tisztázott. Különböző módon készített eszközöknek teljesen más-más a tulajdonságuk. A modellekben nagyon sok olyan feltevést állítanak fel, amelyeket nagyon nehéz gyakorlatilag igazolni és ezek erősen függenek a technológiától. Ilyen pl. a határátmenet tulajdonságai. Mindezek mellett a poliszilícium vezetési mechanizmusa sem teljesen világos /3 vezetési modell létezik/. Az előbbieken olyan poliszilícium emitteres tranzistorokról esett szó, amelyekben az emitter egyik része a monokristály Si-ban van, másik része pedig maga a poliszilícium-kontaktus. A poliszilícium és az átmeneti határ réteg /ha van/, jelentős szerepet játszik a tranzistor β -jának növekedésében. Az említett tranzistor struktúrák bizonyos értelemben hagyományos struktúrák /ha a poliszilícium réteget csak kontaktusnak tekintjük/. Az "igazi" poliszilícium emitteres tranzisztort Rowlandson 1985-ben készítette [21]. Az új tranzistor struktúrában hiányzik



6. ábra. Az "igazi" poli-Si emitteres tranzistor struktúrája

az emitter monokristályban levő része, az emitter maga a poliszilícium réteg /6. ábra/. Az eszköz elkészítése röviden a következő: alacsony energiájú 50-keV [21] kis dózisz $/10^{12}-10^{13} \text{ cm}^{-2}/$ bór ionimplantációval /50-nm oxidon keresztül/ létrehozták a sekély bázist. A bázis külső részét, amely jó bázis kontaktust biztosít, a bázis ionimplantáció előtt bór-diffúzióval valósították meg. Az ionimplantáció után 30-perces 950 °C-os hőkezelés következett, amelynek hatására aktiválódnak a bór atomok a bázisban. A bázis adalékolása után kinyitották az emitterablakot a poliszilícium leválasztására. Közvetlenül a poliszilícium leválasztása előtt egy rövid HF-marást hajtottak végre, amely biztosította a tiszta felületet a poliszilícium emitter számára. A foszforral adalékolt poliszilícium réteg leválasztása in-situ módszerrel történt az LPCVD reaktorokban. A nyomás 0,4 torr és a hőmérséklet 627 °C volt. Rowlandson nem vizsgálta meg az adalékok eloszlását, de az alacsony hőmérsékleten történő poliszilícium leválasztása miatt feltehetően a foszfor atomok nem tudtak bediffundálni a bázisrétegbe. A poliszilícium leválasztását követő műveletek alacsony hőmérsékletűek voltak, így pl. a poliszilícium marása plazma-marással, kollektor és bázis Al kontaktus hőkezelése 450 °C-on. Az így elkészült tranzisztornak meglepő módon, rendkívül nagy az áramerősítési tényezője. Rowlandson tranzisztorainak a β -ja elérte a 20 000 értéket. Később Keyes [22] hasonló módon, de sekélyebb bázissal /Rowlandson bázisa 0,5 μm , Keyes bázisa 0,3 μm / elkészített tranzisztorainak a β -ja már 30 000-et is meghaladta. A sekély bázisréteg miatt a tranzisztor átszűrési és Early feszültsége elég alacsony. Így pl. Rowlandson legnagyobb β -jú tranzisztorának Early feszültsége 3,5 V és átszűrési feszültsége 15 V, amíg Keyes tranzisztoránál az Early feszültség 18 V és az átszűrési feszültség 15 V volt. Az új eszköz működését az előbbi elméletekkel nem lehet megmagyarázni. Kétséges az is, hogy létezik határátmeneti réteg /a poliszilícium emitter és a bázis között/ és, hogy annak fontos szerepe van az eszköz működésében. Bár kétségtelen, hogy a poliszilícium leválasztása előtt egy vékony natív-oxid réteg ránőtt az emitter-felületre, ennek a tulajdonságát pontosan nem lehet meghatározni. Ning [14] eszközeiben ez a vékony határátmenet nem befolyásolta az eszköz működését. De az is lehet, hogy a poliszilícium-réteg leválasztás utáni hőkezelése miatt Ning eszközeiben a határátmenet más, mint itt Keyes és Rowlandson eszközeiben, ahol a poliszilícium leválasztását nem követik magas hőmérsékletű műveletek. Ha az átmeneti határátmenetnek fontos szerepe van az eszköz működésében, akkor a tranzisztor működése hasonlít a MIS emitterű tranzisztor működésére. Ha az átmeneti réteg szerepe nem jelentős, a tranzisztor ideális emitter hatásfoka a poliszilícium különleges tulajdonságainak köszönhető. Mindenesetre a poliszilícium tulajdonsága fontos tényező az eszköz működésében, ugyanis, ha a poliszilícium-emitter fémezése /Al/ után hőkezelés alá /450

°C/ vették a szeletet, akkor jelentős β -csökkenés volt tapasztalható, amely az Al poliszilíciumba való bediffundálásának tulajdonítható.

A poliszilícium emitteres tranzisztor alkalmazása

A leírtak alapján minden különösebb nehézség nélkül /hagyományos technológiát használva/ elkészíthetjük a vékony bázisú poliszilícium emitteres bipoláris tranzisztort. Ezeknek sokkal nagyobb a β -ja mint a hagyományos tranzisztoroké, így a méret csökkenéssel együttjáró β -csökkenés problémája megoldódott. A vékony bázisú tranzisztornak nagy a határfrekvenciája, amely lehetőséget teremt a gyorsabb integrált áramkörök létrehozására. Az extrém nagy β -értékekre az integrált áramkörökben tulajdonképpen nincs szükség, de a nagy β felesleg lehetővé teszi, hogy megnöveljük a bázis adalékolást megengedhető β csökkenés mellett. Így a bázis ellenállása csökken, ezért a tranzisztor kapcsolási tulajdonságai jobbak, az áramkiszorítási jelenség csak nagyobb áramnál jelentkezik, amely azt jelenti, hogy nő a tranzisztor áramterhelhetősége. Ez szintén méretcsökkenési lehetőséget ad. A bázisadalék növelés azon további előnnyel jár, hogy magasabb lesz az átszűrési feszültség.

A poliszilícium emitteres tranzisztoroknak a fent megemlített előnyeik kívül a másik óriási előnye az, hogy alkalmazásával be lehet vezetni az önillesztő technológiát a bipoláris VLSI-IC gyártásában. A poliszilícium különböző tulajdonságát kihasználva /ilyen pl. nagy a poliszilícium adalékkoncentrációtól való oxidációs sebesség függése [23], nagy a szelektív marási sebességkülönbség a tiszta és az adalékolt poliszilícium között [24]. Különböző önillesztő technológiát sikerült kifejleszteni. Az önillesztő technológiák alkalmazásával jelentősen lecsökkenthető a tranzisztor mérete. A kisebb parazita-kapacitások miatt az áramkör gyorsabban működik. T.Sakai [24] SST technológiát /Super self-aligned technology/ használva 1-kbit ECL RAM-ot készített, amelynek hozzáférési ideje kisebb volt, mint 3 ns. H. Yamachi [25] szintén az SST technológiát használta a gyors szorzó áramkör megvalósítására. 8x8 bites szorzó áramkörének 10-ns, míg 32x32 bites szorzónak /az alap 8 bites chipek összekapcsolásával/ 55-ns a szorzási művelet ideje. Az önillesztő technológiát alkalmazva az I²L áramkörökben nagy integráltsági fokot lehet elérni. Ezzel a technológiával készült kisfogyasztású I²L áramkör kapu késleltetési ideje kisebb mint 1 ns [26]. A bipoláris és MOS eszközök előnyös tulajdonságait /CMOS kisfogyasztású, bipoláris-gyors/ összekombinálva BiCMOS áramkört hoztak létre, amelyben a bipoláris szerepet poliszilícium emitteres tranzisztor tölti be. Az ilyen áramkör megtalálható a Faichild 256-kbites sztatikus memóriában [5]. A memória-áramkör elérési ideje 10 ns.

További fejlesztési irányok

A polyszilícium emitteres tranzisztorok különleges tulajdonságaik révén sok érdekes alkalmazást nyerhetnek a mikroelektronikában. ezen új fajta tranzisztor széleskörű alkalmazása azonban még sok kísérleti vizsgálatot és elméleti munkát igényel, főleg a poli-Si emitter kialakításának, tervezésének, áramköri működésének szempontjából. A "hagyományos" poli-Si emitteres tranzisztor paraméterei ugyanis erősen függenek az alkalmazott technológiától és az eszköz működése sem teljesen tisztázott. Az "igazi" poli-Si emitteres tranzisztor, amelyet először 1985-ben készítettek, igéretes tulajdonságokkal rendelkezik. Az alacsony hőmérsékletű poli-Si emitterleválasztás és a későbbi hideg technológiai lépések következtében a bázisprofil nem változik. Így a bázisprofil, mint az integrált áramköri tranzisztor egyik legfontosabb paramétere, jól kézben tartható. A tranzisztor rendkívül jó emitterhatásfoka szintén előnyt jelenthet a különleges alkalmazási célokra. Mindezek mellett a tranzisztor könnyen elkészíthető a hagyományos eljárásokkal. Ennek a fajta tranzisztornak sok jellemzője /pl. a dinamikus viselkedése/ nem ismeretes, működési elve nem tisztázott és keveset tudunk a gyártási reprodukálhatóságáról, ugyanis eddig meglehetősen kevés kísérletet, vizsgálatot folytattak ez új eszköz tanulmányozására. A poli-Si emitteres tranzisztoroknak nagy jövője lehet, ha a fenti problémákat sikerül megoldani. Ebben a munkában szeretnék résztvenni az eszköz működésének kitisztázásában, a jellemzőinek további tanulmányozásában.

IRODALOM

- [1] P.M. Solomon and D.D. Tang; "Bipolar circuit scaling", in 1979.ISSCC Dig. Tech. Papers, pp. 86-87.
- [2] H.C. de Graaff, J.W. Slotboom, and A. Schmitz; "The emitter efficiency of bipolar transistors" Solid-State Electronics, 1977, vol. 20, pp. 515-521.
- [3] R. J. Van Overstraeten, H.J. DeMan, and R.P. Mertens; "Transport equations in heavy doped silicon", IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-20, PP. 290-298, Mar. 1973.
- [4] D. Buhanan; "Investigation of current-gain temperature dependence in silicon transistors", IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-16, pp. 117-124, Jan. 1969.
- [5] C. L. Cohen; "Here comes a 256-K SRAM and its from Fairchild", Electronics, pp. 34-35, June 1, 1987.
- [6] H. C. Card and E. S. Yang; "Electronic processes at grain boundaries in polycrystalline semiconductors under optical illumination", IEE Trans. Electron Devices, vol. ED-24, pp. 397-403, Apr. 1977.
- [7] J. Y. W. Seto; "The electrical properties of polycrystalline silicon films", J. Appl. Phys. Vol 46, pp. 5247-5254, Dec. 1975.
- [8] Y. Shiraki and E. Maruyama; "Poly-Si thin film transistors and their application to liquid crystal display", JARECT, amorphous Semiconductor Technologies and Devices, vol. 6, pp. 266-273, 1983.
- [9] Z. Lieblich and A. Bar-Kev; "A polysilicion-silicon n-p junction", Electron Devices, vol. ED-24, pp. 1025-1031, Aug. 1977.
- [10] M. Arienzo, Y. Komen, and A. E. Michel; "Diffusion of arsenic in bilayer polycrystalline silicon films", J. Appl. Phys., vol. 55, pp. 365-369, Jan. 1984.
- [11] M. Takagi, K. Nakayama, Ch. Tevada, and H. Kamioko; "Improvement of shallow base transistor technology by using a doped polysilicon diffusion source", J. Jap. Soc. Appl. Phys., vol. 42, p. 101, 1972.
- [12] J. Graul, A. Glasl, and H. Murrmann; "High-performance transistor with arsenic-implanted polysil emitters", IEEE J. Solid-State Circuit, vol. SC-11, P.491, Aug. 1976.
- [13] H. C. De Graaff, and J. G. De Groot; "The SIS tunnel emitter a theory for emitters with thin interface layers", IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-26, P. 1771, Nov. 1979.
- [14] T. H. Ning and R. D. Isaac; "Effect of emitter contact on current gain of silicon bipolar devices", IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-27, p. 2051, Nov. 1980.
- [15] B. Soerowirdjo and P. Ashburn; "Effect of surface treatments on the electrical characteristics of bipolar transistor with polysilicion emitters", Solid-State Electronics, Vol. 26, pp. 495-498, 1983.
- [16] P. V. Halen and D. L. Pulfrey; "High-gain bipolar transistor with polysilicion tunnel junction emitter contacts", IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-32, p. 1308, Jul. 1985.
- [17] A. A. Eltoukhy and D. J. Roulston; "Minority-carrier injection into polysilicion emitters", IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-29, pp. 961-964, Jun. 1982.
- [18] A. A. Eltoukhy and D. J. Roulston; "The role of the interfacial layer in polysilicion bipolar emitter transistors", IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-29, pp. 1862-1869, Dec. 1982.
- [19] P. H. Yeung and W. C. Ko; "Current gain in polysilicion emitter transistors", IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-30 pp. 593-597. Jun. 1983.
- [20] Z. Yu, B. Ricco, and R. W. Dutton; "A comprehensive analytical and numerical model of polysilicion emitter contacts in bipolar transistors", IEEE Trans. Electron Devices, vol Ed-31 pp. 773-784, June 1984.
- [21] M. B. Rowlandson and N. G. Tarr; "A true polysilicion emitter transistor", IEEE Trans. Electron Device Letters, vol. EDL-6, p. 255, June 1985.
- [22] E. P. Keyes and N. G. Tarr; "Superbeta polysilicion emitter transistors", IEEE Trans. Electron Device Letters, vol. EDL-8, pp. 312-314, July 1987.
- [23] A. Cuthbertson and P. Ashburn; "Self-aligned transistor with polysilicion emitters for bipolar VLSI", IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-32, pp. 242-247, Feb.1985.
- [24] T. Sakai, Y. Yamamoto, Y. Kobayashi, K. Kawarada, Y. Jinabe, T. Hayashi, and H. Miyanaga; "A 3ns 1-kbit RAM using super self-aligned process technology", IEEE J. Solid-State Circuits, vol. SC-16, pp. 424-429, Oct. 1981.
- [25] H. Yamauchi, T. Nikaido, T. Nakashima, Y. Kobayashi, and T. Sakai; "10-ns 8x8 multiplier LSI using super self-aligned process technology", IEEE J. Solid-State Circuits, vol. SC-18 Apr. 1983.
- [26] T. Nakamura, K. Nakazato, T. Miyazaki, M. Ogrimia, T. Okabe, and M. Nagata; "290 p. sec. I2L circuits with five-fold self-alignment", in IEDM Tech. Dig. pp. 684-687, 1982.