

Az I²L kapu modellezése a TRANZ-TRAN nemlineáris áramköranalízis program segítségével

RANG, TOOMAS
BME Elektronikus Eszközök
Tanszéke

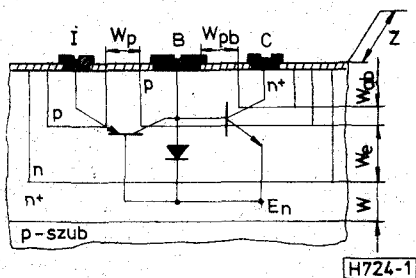
Az első publikációk [1, 2] és a későbbi áttekintő publikációk [3, 4] óta számos közlemény jelent meg az I²L modellezésének problémáival kapcsolatban [5...7].

Olyan modellt dolgoztunk ki, amely a [8]-ban közölt modellen alapul. A TRANZ-TRAN nemlineáris áramkör-analízis programmal [9] végzett vizsgálat első részében a DC jellemzőket, pontosabban az I²L kapu tranzszer karakterisztikájának különféle fizikai és technológiai paraméterektől, valamint hőmérséklettől való függését vizsgáltuk.

Az I²L kapu modellje

A [8]-ban leírt diódás helyettesítő kép elég bonyolult, és ezért kisszámítógéppel nem analízálható. Abból a célból, hogy az I²L kaput gyorsan és kisszámítógéppel is lehessen modellezni, kidolgoztuk az I²L kapu egyszerűsített, tranzisztoros helyettesítő áramköri modelljét (1. ábra).

Hasonló modellek az irodalomban is találhatók, azonban azokat általában egy konkrét célra, pl. ionimplantációval készített I²L kapu optimalizálására [10] vagy a technológiai eljárás modelljének vizsgálatára [11] dolgozták ki. E közleményben ismertett modell az I²L kapu tranzszer karakterisztikájának a különböző fizikai és technológiai paraméterektől való függése vizsgálatára dolgoztuk ki. A vizsgálandó struktúra megegyezik a [8]-ban közölt struktúrával, de a modell a következőkben tér el:



1. ábra. Az I²L kapu tranzisztoros helyettesítő képi modellje

1. Az npn vertikális részt egy npn tranzisztor képviseli, amelynek árama a diódás modell aktív bázisában folyó áram.

2. A pnp laterális részt egy pnp tranzisztor képviseli, amelynek árama a diódás modell laterális tranzisztor bázisáramának laterális komponense.

3. A diódás modell passzív bázisában folyó áramokat egy külön diódával vesszük figyelembe, amelynek árama a passzív bázisban folyó áramkomponensek összege.

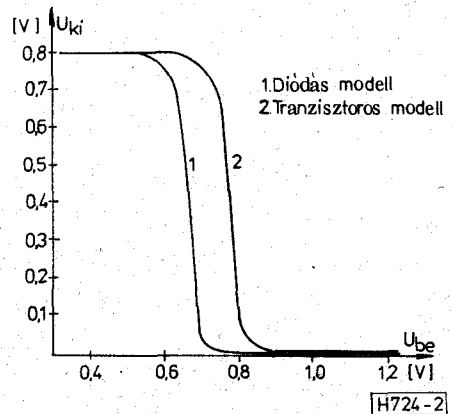
4. Nem vesszük figyelembe az injektor vertikális áramkomponensét.

5. Elhanyagoljuk az elosztott bázisellenállást.

A 2. ábrán a diódás modellel számított [8] és a tranzisztoros modellel számított tranzszer karakterisztikák összehasonlítása látható. Mint látjuk, az eltérés kb. 0,1 V. A számításhoz felhasznált adatok a következők: $w_{epi} = 5 \cdot 10^{-6}$ m, $w_p = 0,5 \cdot 10^{-6}$ m, $w_{db} = 0,5 \cdot 10^{-6}$ m, $w_{pb} = 10^{-6}$ m, $N_{AS} = 10^{25}$ m⁻³, $N_{epi} = 10^{22}$ m⁻³, $Z = 10^{-5}$ m, $v_{ox} = 7,5 \cdot 10^2$ m/s, $v_{nn+} = 0,2$ m/s, $D_p = 3 \cdot 10^{-4}$ m²/s, $D_n = 6,5 \cdot 10^{-4}$ m²/s, $\tau_n = \tau_p = 10^{-7}$ s, $T = 298,16$ °K. Az eltérés két fő okból származtatható.

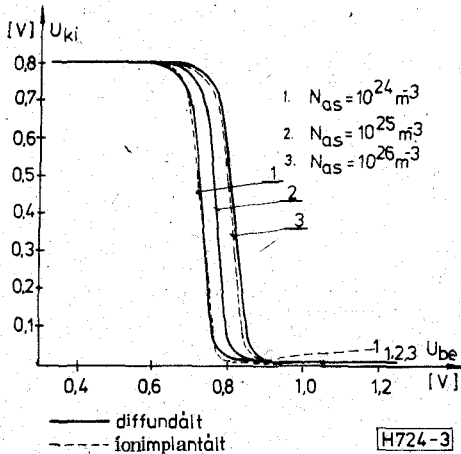
1. Az elosztott paraméterű diódás modell helyett három eszközből összetett modellt használunk.

2. Az $I = I_0 \exp(U/m_T - i)$ diódaegyenletben minden eszközre $m = 1,15$, ami eltér a [8]-ban leírt modelltől.



2. ábra. Az I²L kapu tranzisztoros és diódás helyettesítő képi modelljével kapott tranzszer karakterisztikák összehasonlítása

Az I²L kapu transzfer karakterisztikájának függése a bázis felületi koncentrációjától a 3. ábrán látható. Ebben a modellben ugyanolyan ionimplantált eszközt modelleztünk, mint amilyen [8]-ban szerepel. Ezért ezt a modellt közelebbről nem ismertetjük. Az ábrán a szaggatott vonal az ionimplantációval készített eszközre vonatkozik.

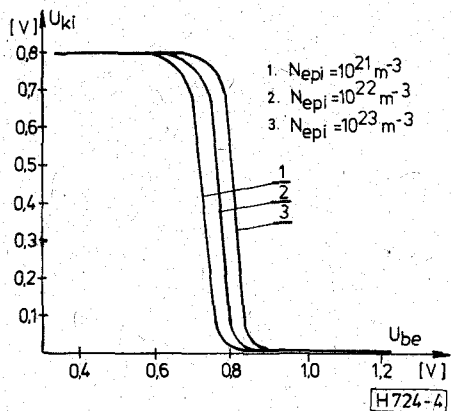


3. ábra. Az I²L kapu transzfer karakterisztikájának függése a bázis felületi koncentrációjától (N_{as})

Mint látjuk, a felületi koncentráció elég erősen befolyásolja az I²L kapu transzfer karakterisztikáját. Minél nagyobb a bázis felületi koncentrációja, annál nagyobb a bázisintegrál, és annál kisebb az I²L kapu aktív bázisában (npn vertikális tranzisztor) folyó áram. Minél kisebb az aktív bázisban folyó áram, annál nagyobb bemenő áramot és bemenő feszültséget kell biztosítanunk, hogy az I²L kapu npn tranzisztorát át tudjon kapcsolni.

Az ionimplantált bázisú I²L kapuban nagyobb N_{as} esetén tudjuk az átkapcsolást korábbra hozni, aminek az oka, hogy $\alpha_{npn}^n > \alpha_{npn}^i$. Ugyancsak a diffundált eszközben a nagy N_{as} esetén a bázisban levő fekező tér nagyobb, mint kisebb N_{as} esetén.

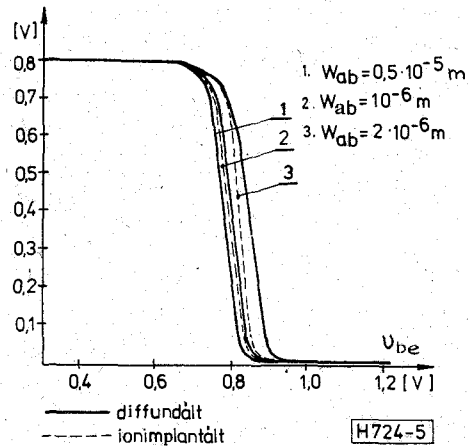
A 4. ábrán az I²L kapu transzfer karakterisztikájának az epitaxiális réteg koncentrációjától, N_{epi}



4. ábra. Az I²L kapu transzfer karakterisztikájának függése az epitaxiális réteg koncentrációjától (N_{epi})

től való függése látható. Ebben az esetben nincs különbség a diffúzióval és ionimplantációval készített eszközök transzfer karakterisztikái között. Ennek az oka, hogy a diffúzióval készített eszközben az epitaxiális réteg koncentrációjának változása nem okoz olyan nagy α_{npn}^n változást, hogy ezt a transzfer karakterisztikában észre lehessen venni. Az epitaxiális réteg koncentrációjának változása azonban erősen befolyásolja az I²L kapu transzfer karakterisztikáját. N_{epi} majdnem minden áramot befolyásol az eszközben. Ha N_{epi} nagy, akkor az injektor és az npn tranzisztor aktív bázisáramai viszonylag kicsik, és a kapu később kapcsol át, hiszen a telítésbe átugró szintet csak nagyobb bemeneti árammal tudjuk biztosítani. Fordított esetben (N_{epi} kicsi) az I²L kapu viszonylag korán kapcsol át.

Az 5. ábrán látható az I²L kapu transzfer karakterisztikájának függése az npn tranzisztor aktív bázisának vastagságától. A bázisvastagság elég erősen befolyásolja a kapu transzfer karakterisztikáját. Mint látjuk, itt újra eltérnek a diffúzióval készített és ionimplantációval készített eszköz transzfer karakterisztikái.



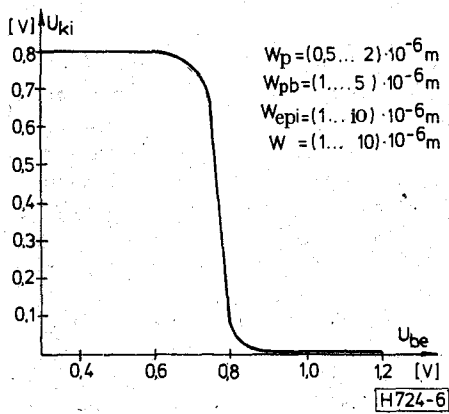
5. ábra. Az I²L kapu transzfer karakterisztikájának függése az npn vertikális tranzisztor aktív bázisvastagságától (w_{ab})

Az eltérésnek az oka, hogy a bázisvastagság növekedése nagyon erősen befolyásolja α_{npn}^n -t. Ez a hatás a transzportfaktoron keresztül történik, amely a vizsgált esetben majdnem a felére csökken, ha a bázis vastagsága négyszeresére növekszik.

A 6. ábrán a különböző geometriai méreteknek (w , w_{epi} , w_p , w_{pb}) az I²L kapu transzfer karakterisztikáira gyakorolt hatása látható.

Mint látjuk, ezek a geometriai paraméterek nem befolyásolják az I²L kapu transzfer karakterisztikáját. Ennek oka, hogy a geometriai méretek nem tudják a modellben levő tranzisztorok és a dióda áramait annyira befolyásolni, hogy a hatást a transzfer karakterisztikán észre lehessen venni. Emellett szerepet játszik az is, hogy a modellből kihagytuk az elosztott bázisellenállást, ami w_{pb} -től függő mértékben befolyásolná a transzfer karakterisztikát. A számítások a npn tranzisztor, irodalomból származó [12], konstans α_{pnp}^n és α_{pnp}^i értékeivel történtek.

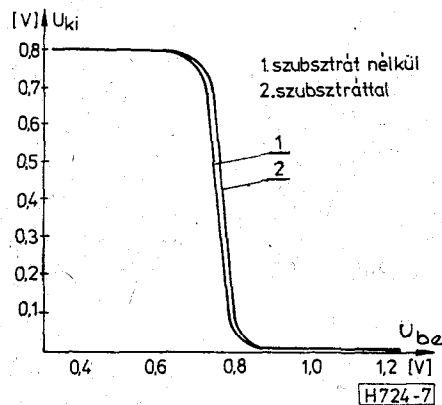
Külön vizsgáltuk, hogyan függ az I²L kapu transzfer karakterisztikája a npn tranzisztor α_{pnp}^n és α_{pnp}^i



6. ábra. Az I²L kapu transzfer karakterisztikájának függése a különböző geometriai méretektől

értékeitől a laterális tranzisztor konstans bázisszélessége esetén. Ez a függés nem erős, változás csak akkor vehető észre, amikor $\alpha_{npn}^n \cong 0,95$, ami a laterális tranzisztoroknál nem szokott előfordulni. Ezért nem követünk el nagy hibát, ha a laterális áramerősítési tényezőt konstansnak tekintjük.

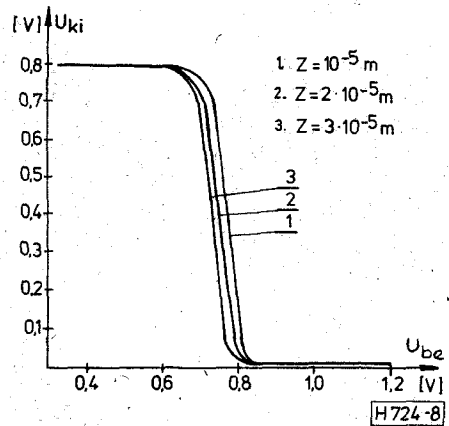
A 7. ábrán két olyan struktúrának a transzfer karakterisztikája látható, melyek egyikének sincs szubsztrátuma. Ez azt jelenti, hogy hiányzik a parazita vertikális pnp tranzisztor (a modell szempontjából pedig, hogy a dióda áramából egy tag hiányzik). Miután ebben az esetben a dióda árama kisebb, a kapu korábban tud átkapcsolni.



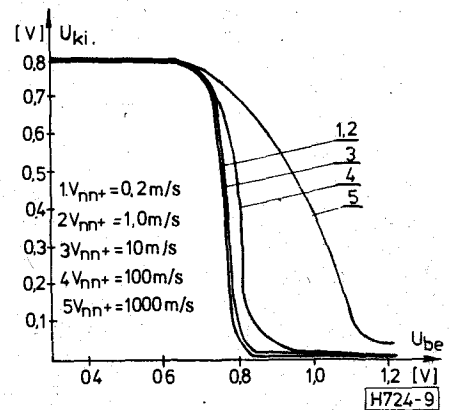
7. ábra. A p⁺ szubsztráttal és p⁺ szubsztrát nélkül elkészített I²L kapu transzfer karakterisztikáinak összehasonlítása

A 8. ábrán három különböző szélességű struktúrához tartozó transzfer karakterisztika látható. Ennek magyarázata, hogy a szélesebb korábban kapcsol át, az, hogy minél szélesebb a struktúra, annál nagyobbak az áramok az egész struktúrában, és annál kisebb bemeneti áram kell ahhoz, hogy az egész struktúra átkapcsoljon.

A 9. ábra az I²L kapu transzfer karakterisztikájának az nn⁺ átmeneti rekombinációs sebességtől való függését szemlélteti. Mint látjuk, ez a hatás akkor erős, ha a rekombinációs sebesség elég nagy. Ez mind az eszköz, mind a modell szempontból érthető. Ha v_{nn^+} nagy, akkor viszonylag nagy lesz a dióda árama is, tehát a dióda nyelőként működik, és az egész



8. ábra. Az I²L kapu transzfer karakterisztikájának függése a struktúra szélességétől (az áramok szintjétől)

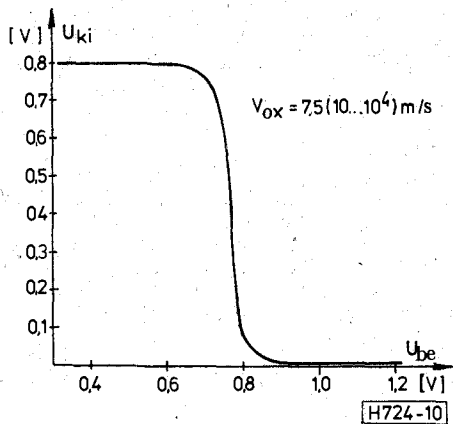


9. ábra. Az I²L kapu transzfer karakterisztikájának függése az nn⁺ átmeneti rekombinációs sebességétől (v_{nn^+})

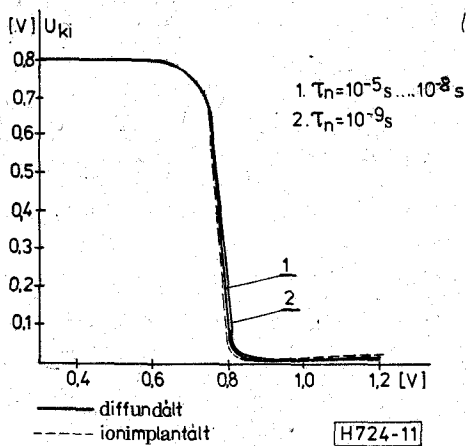
modell áramviszonyai megváltoznak. Sokkal több áramot kell injektoron keresztül beinjektálni, hogy a kaput átkapcsolhassuk, és nagy v_{nn^+} értékeknél ez a hatás igen jelentőssé válik. Fizikai szempontból ez azzal magyarázható, hogy nagy v_{nn^+} -nél az nn⁺ átmenet az emitterben folyó töltéshordozókat javarészt elnyeli, és ezzel befolyásolja végül az emitterhatásfokot, mert minél kevesebb lyuk éri el az emittert, annál rosszabb lesz az emitterhatásfok (γ_{npn}^n) és annál rosszabb α_{npn}^n . Ennek az eredménye az, hogy sokkal később kapcsol át, és a transzfer karakterisztika meredeksége sokkal kisebb.

A 10. ábrán az Si-SiO₂ határfelületi rekombinációs sebességének (v_{ox}) a transzfer karakterisztikára gyakorolt hatása látható. Mint látjuk, ez a hatás elhanyagolható mértékű. Ennek oka az, hogy ez az áramkomponens sokkal kisebb az npn tranzisztor bázisban folyó áramánál és a pnp bázisban folyó áramnál is, ezért praktikusán nem befolyásolja a transzfer karakterisztikát. Nagyon nagy v_{ox} ($v_{ox} \cong \cong 10^4$ m/s) értékeknél a befolyásolás elképzelhető, de ilyen rossz Si-SiO₂ határfelület technológiai szempontból nem engedhető meg.

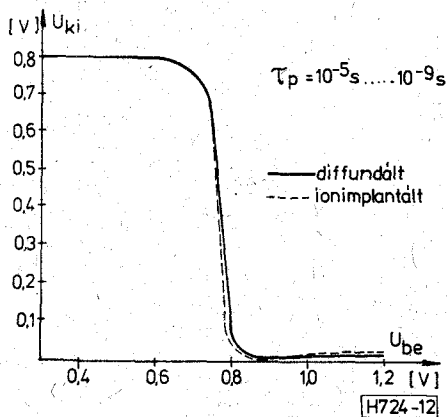
A következő két (11. és 12.) ábrán az I²L kapu transzfer karakterisztikájának az elektronok és lyukak élettartamától való függése látható. Mint látjuk, az I²L kapu transzfer karakterisztikája prakti-



10. ábra. Az I²L kapu transzfer karakterisztikájának függése az Si—SiO₂ határfelületi rekombinációs sebességtől (v_{ox})



11. ábra. Az I²L kapu transzfer karakterisztikájának függése a bázisban levő kisebbségi töltéshordozók élettartamától (τ_n)

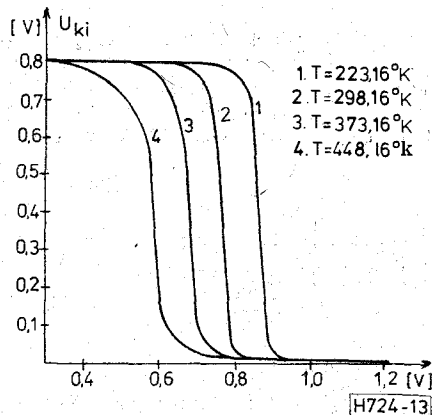


12. ábra. Az I²L kapu transzfer karakterisztikájának függése az emitterben levő kisebbségi töltéshordozók élettartamától (τ_p)

kusan nem függ a bázisbeli (τ_n) és az emitterbeli (τ_p) kisebbségi töltéshordozók élettartamától. Ennek az a magyarázata, hogy τ_n és τ_p nem tudják annyira befolyásolni az áramokat és az áramerősítési tényezőt, hogy ez a transzfer karakterisztikára erősen tudjon hatni.

A 13. ábrán az I²L kapu transzfer karakterisztikájának a környezeti hőmérséklettől való függése lát-

ható. Megfigyelhető, hogy minél nagyobb a hőmérséklet, annál korábban kapcsol át a kapu. Ez természetes, mert ha növekszik a hőmérséklet, akkor J_{pnp} és J_{npn} is növekszik, ezért korábban tud az egész kapu átkapcsolni. Mint látjuk, ez a modell elég széles hőmérséklet-tartományban érvényes, de pontosabb vizsgálatok [8] azt mutatták, hogy 175 °C-nál nagyobb hőmérsékletre már nem célszerű alkalmazni.



13. ábra. Az I²L kapu transzfer karakterisztikájának függése a környezeti hőmérséklettől (T)

Összefoglalás

A cikkben az I²L kapu tranzisztoros helyettesítő képen alapuló modelljét írtuk le. A modell alapján kiszámítottuk az I²L kapu transzfer karakterisztikájának függését fizikai és technológiai paramétereiktől. Mint a számítások mutatták, az I²L kapu normális működése szempontjából a legkritikusabb paraméterek a bázis felületi koncentrációja és az epitaxiális réteg koncentrációja. Ezenkívül nagyon erősen befolyásolja a diffúziós eljárással készült eszközök transzfer karakterisztikáját az npn vertikális tranzisztor bázisvastagsága, az nn⁺ átmeneti (eltemetett réteg) rekombinációs sebessége és a környezeti hőmérséklet. A modellel végzett számítások azt is mutatták, hogy a kapu transzfer karakterisztikáját nem befolyásolja észrevehető mértékben az epitaxiális réteg vastagsága, az eltemetett réteg vastagsága, a pnp tranzisztor bázis szélessége, az Si—SiO₂ határfelület rekombinációs sebessége, valamint az emitterben és a bázisban levő kisebbségi töltéshordozók élettartama.

Köszönetnyilvánítás

A szerző ezúton is köszönetet mond aspiráns-vezetőjének, dr. Tarnay Kálmán tanszékvezető egyetemi docensnek munkája irányításáért és a sok hasznos konzultációért.

IRODALOM

- [1] Hart, K.—Slob, A.: Integrated injection logic: A new approach LSI. IEEE J. Sol. St. Circ. SC-7, Oct. 1972. 346—351

- [2] Berger, H. H.—Wiedmann, S. K.: Merged transistor logic concept. IEEE J. Sol. St. Circ., SC-7, Oct. 1972. 340—346
- [3] Rang, T.: Az I²L technika. ESZR—MSZR 4.3 téma munkabizottsági előadás, 1978 május
- [4] Rang, T.: I²L új irányzat a bipoláris technikában I., II. Mérés és Automatika, XXVII. No. 5, No. 7, 1979. 191—195, 279—283
- [5] Berger, H. H.: The injection model — A structure oriented model for merged transistor logic (MTL). IEEE J. Sol. St. Circ., SC-9, Oct. 1974. 218—227
- [6] Vanhecke, C.: Sur la modelisation des structures a l'injection en régime statique. These du titre de Docteur a L'Université Paul Sabatier de Toulouse, France, 1975, d'Odre 1791, 147
- [7] Berger, H. H.—Helwig, K.: An investigation of the intrinsic delay (speed limit) in MTL/I²L. IEEE J. Sol. St. Circ., SC-14, Apr. 1979. 327—337
- [8] Rang, T.: Modelling of the I²L gate in steady state conditions with the nonlinear circuit analysis program TRANZ-TRAN. Periodica Polytechnica, (megjelenés alatt)
- [9] Tarnay K.—Székely V.: A TRANZ-TRAN nemlineáris áramköranalízis program. Híradástechnika XXIV., No. 9., 1973, 257—264
- [10] Evans, S. A.: An analytical model for design and optimization of ion implanted I²L devices. IEEE J. Sol. St. Circ., SC-12, Apr. 1977. 191—198
- [11] Schroen, W. H.: Modelling of I²L and process selection. Proc. of the NATO Advanced study Institute on Process and Device modelling for integrated circuit design, Louvain-la-Neuve, Belgium, July 19—29. 1977. 813—834
- [12] Kerns, D. V. Jr.: The effect of base contact position on the relative propagation delays of the multiple outputs of an I²L gate. IEEE, J. Sol. St. Circ., SC-11, Sept. 1976, 712—717