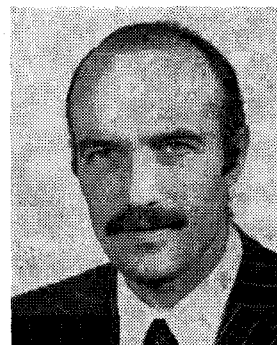


Monolit integrált áramkörök adalékolási és oxidálási technológiai lépéseinek kétdimenziós szimulációja. Összefoglaló.

DR. VESZELY GYULA — DR. ZOMRORY LÁSZLÓ

Budapesti Műszaki Egyetem
Elméleti Villamosságtan Tanszék



ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk ismerteti azokat az effektusokat, amelyek az adalékeloszlás kétdimenziós ismeretét igénylik. Összefoglalja azokat a technológiai lépéseket, amelyeknél indokolt a kétdimenziós szimuláció és ismerteti a szimuláció modelljét és algoritmusait.

„A hasonló csak hasonló által ismerhető meg.”
(Emerson)

Bevezetés

A félvezetőeszközök technológiájának szimulációja kettős célt szolgál. Egyrészt a szimuláció eredményeit a mérésekkel összevetve következtetések vonhatók le az alapvető effektusokra, és azok kölcsönhatására, másrészt a modellek felhasználásával, kísérletek nélkül következtetések vonhatók le adott folyamatsor eredményeként kialakuló struktúra tulajdonságaira, elősegítve ezzel a tervezést. A két oldal természetesen kiegészíti egymást: kellően prediktív erejű modellek csak olyan módon fejleszthetők, hogy a kvalitatív helyes eredményeket szolgáltatató modellek paramétereit éppen a mérésekkel történő összevetésekből határozzuk meg.

Természetesen bármely fizikai (tehát térben és időben lejátszódó) folyamat szimulációjánál az elsőként megválaszolandó kérdések közé tartozik: a valódi vagy transzformált tartományban történik-e a szimuláció és a valódi tartományban a három térbeli és az időváltozó mennyiségek közül hány független változót akarunk (tudunk?) figyelembe venni a szimuláció során. A kérdésekre adott választ részben a feladat, részben a szimulációhoz rendelkezésünkre álló eszközök (algoritmus, program, számítógép stb.) szabják meg. Így például nemlineáris feladatok esetén a transzformált tartomány használata az esetek döntő többségében nem ígér semmiféle könnyítést, ezért a szimulációt a valódi tartományban végezzük.

Nem ilyen egyértelmű a válasz a dimenziószám tekintetében. Stacionárius esetet vizsgálva az idő természetesen nem szerepel, de technológiai modellezés esetén ez az eset kiesik. A térbeli dimenziók számának a növelése fokozódó számítási nehézségekkel jár és számos alapjelenség megértéséhez nem is szükséges. Ezért természetes, hogy az IC technológiai modellezés egy térbeli dimenzióban kezdődött és jelentős eredményeket ér el mind a mai napig [1]. Hazánkban a BME Elektronikus Eszközök Tanszék-

DR. VESZELY GYULA

A BME Elméleti Villamosságtan Tanszékének docense. 1962-ben a BME híradástechnika szakán villamosmérnöki, 1967-ben mikrohullámú szakmérnöki oklevelet szerzett. 1977-ben elnyerte a műszaki tudományok

kandidátusa címet. Az URSI Magyar Nemzeti Bizottságának tagja. Számos közlemény és konferenciaelőadás szerzője. Fő kutatási területei: félvezető technológiák és eszközök számítógépes modellezése, üvegszálak elektromágneses elmélete.

kén Tarnay professzor és munkatársai létrehozták a nemzetközileg is egyik legjobb szimulációs programrendszert: a STEP-et [2].

Mikor szükséges a kétdimenziós szimuláció?

„Ki mit jól keres,
Rájön — de elszalasztja, mire gondja nincs”
(Szophoklész)

Az egydimenziós technológiai szimuláció nyilvánvaló sikerei ellenére is fokozottan előtérbe kerül a kétdimenziós modellezés szükségessége [1]. Ennek indoka a planáris technológia esetén nyilvánvaló, és alapvetően az eszköz fizikai működésének modellezése igényli.

A bipoláris tranzisztor alapjelensége, hogy a kollektoráram és a rekombináció bázisáram egymásra merőlegesen folynak (1. ábra). Ez alapvetően kétdimenziós jelenség. A MOS térvezérléses tranzisztorban pedig a vezérlő térerősség és az áram iránya merőlegesek egymásra, a pontos leírás ismét kétdimenziós modellezést igényel. Hosszabb csatornánál a rendkívül kis vastagságú csatorna a telítés előtti tartományban lehetővé tesz kvázi-egydimenziós modellezést (ez az ún. „gradual channel approximation”) a csatorna rövidülésével azonban a feltevések egyre kevésbé igazak. Erről győző meg egy rövid csatornás MOS eszköz potenciáreloszlásnak kétdimenziós képe (2. ábra).

Meg kell említenünk, hogy a technológia egyes lépései közül az ún. lokális oxidáció, valamint az adalékolás során a felülettel párhuzamosan elmozduló adalék eloszlása szintén csak kétdimenziós szimulációval írható le helyesen.

A legalább kétdimenziós eszközszimuláció igénye már az 1960-as években létrehozta az első stacionárius algoritmusokat és ezek az 1970-es évek első felében széles körben használatossá váltak. A 70-es évek

Beérkezett: 1984. IV. 5.

végén, 80-as évek elején jelentek meg a háromdimenziós stationárius szimulációs programok.

Ezek egyrészt az eszközök fokozatosan csökkenő méretéből adódó új effektusok, másrészt az eleve háromdimenziós struktúra (lásd például [3]) vizsgálatának igényével születtek. Létrehozásukat a hatalmas méretekben növekvő számítógépes lehetőségek mellett a hatékony numerikus eljárások kifejlesztése tette lehetővé.

Megjelentek egyúttal a két térbeli dimenzióval számoló dinamikus szimulációs programok is.

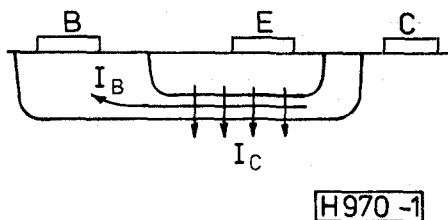
Mindezek a korszerű eszközszimulációs eljárások csak akkor használhatók széles körben és jó eredményekkel, ha a vizsgált térrész geometriája (oxidréteg, elektród stb.) és az adalékeloszlás legalább két térbeli dimenzióban ismert. Ezt szolgálja tehát a két-dimenziós technológiai szimuláció.

Milyen jelenségeket tudunk (ill. nem tudunk) modellezni?

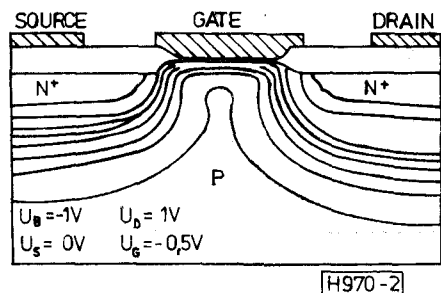
„A tudomány nem próbál magyarázni, alig is próbál interpretálni, a tudomány főként modelleket állít fel”
(Neumann János)

A technológiai folyamatok szimulációja elvben természetesen valamennyi technológiai lépésre elvégezhető. Neureuther [4] nyomán az alábbiakban csoportosítjuk a modellezendő eljárásokat.

<i>Litográfia</i>	<i>Termikus folyamatok</i>
– optikai	– oxidálás (nitridálás)
– elektronsugaras	– adalékolás (predepozíció)
– röntgen	– ionimplantáció
– ionsugaras	– hőkezelés
<i>Maratás</i>	<i>Rétegnövesztés</i>
– nedves	– gőzölés



1. ábra. Planáris bipoláris tranzisztor metszete



2. ábra. Rövid csatornás MOST potenciáeloszlása

- száraz (plazma, ion – porlasztás stb.)
- kémiai növesztés gőzfázisból (CVD)
- epitaxiális növesztés

Az egyes lépések modellezhetősége nem egyforma, de kétdimenziós modellezésük nem is egyformán szükséges.

A *litográfia* és a *maratás* szerepet játszik a két-, ill. háromdimenziós struktúra kialakulásában. Ez a szerep azonban nem mérhető a termikus folyamatokéhoz. Ezért még egydimenziós kinetikus modellezésük is csak a közelmúltban indult meg. Bár a lépéseknek léteznek kezdeti kétdimenziós modelljei, ezeknek megalapozottsága még igen sok kívánnivalót hagy maga után.

A *rétegnövesztés* modelljei fizikailag ma még kevésbé megalapozottak, lényegében fenomenologikusak. A kétdimenziós effektusokban kevés szerepet játszanak.

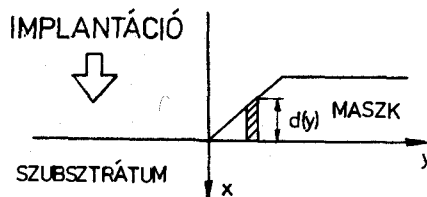
A továbbiakban ezért részletesen a termikus folyamatok címszó alatt összefoglalt technológiai lépések modelljeivel, ill. szimulációjával foglalkozunk részletesen. Megjegyzendő, hogy az ionimplantáció jobb gyűjtőfogalom híján került ebbe a csoportba. Mivel azonban a legtöbb termikus folyamat tartalmaz egy vagy több implantációs adalékolást és a kialakult adalékprofil a többi folyamat kiindulási adata, szerepe azonos a többi ide sorolt folyamatéval.

A most következőkben csak a kétdimenziós modellezés és szimuláció eredményeit ismertetjük. Az ennél bővebb egydimenziós modellek tekintetében ismét az [1] és [2] irodalomra utalunk.

Ionimplantáció

Az implantáció kinetikus modellezése igen bonyolult. Ezért a szimulációnál a kinetikus modellekből nyert analitikus vagy félempirikus eloszlásfüggvényeket, illetve ezek szuperpozícióját használják az implantációval nyert adalékeloszlás leírására. Az ún. csatornaképződéstől eltekintve – ez egyes irányokban, „csatornák” mentén igen mély behatolást eredményez – az eloszlásfüggvény Gauss profil, illetve ilyen eloszlásfüggvények szuperpozíciója (3. ábra)

$$C(x, y) = \frac{C_0}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[-\frac{(y-\eta)^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(x+d_{eff}(\eta)-R_p)^2}{2a_p^2} \right] d\eta, \quad (1)$$



3. ábra. Ionimplantáció a maszk éle mellett

ahol C_{\square} a felületegységre jutó ionok száma, σ_p és σ_{\perp} az eloszlás vertikális (x irányú) és laterális (y irányú) szórása, R_p az eloszlás várható értéke maszk nélkül és d_{eff} a maszk effektív vastagsága, amely arányos d -vel.

Az (1) formulát néhány egyszerűsítő feltevés mellett analitikusan is ki lehet értékelni. A számunkra legfontosabb eredmény, hogy a laterális eloszlás komplementer hibafüggvénnyel írható le, pl.

$$d_{eff} = \begin{cases} 0 & y < 0 \\ \infty & y > 0 \text{ esetén} \end{cases}$$

$$C(x, y) = \frac{C_{\square}}{2\sqrt{2\pi}\sigma_p} \exp\left[-\frac{(x-R_p)^2}{2\sigma_p^2}\right] \operatorname{erfc}\frac{y}{\sqrt{2}\sigma_{\perp}} \quad (2)$$

B és A s adalék esetén az eloszlás aszimmetriáját néha jobban tükröző mélységi eloszlásfüggvényt választanak. Ez lehet két „fél-Gauss eloszlásból” kombinálva, vagy az ún. Pearson-IV. típusú eloszlásfüggvény. Mindkét függvény használatos az egydimenziós modellezésben is. Számunkra a hozzájuk tartozó laterális eloszlás érdekes. Ezt általában erfc függvénynek választják, de van olyan modell, amelyben ezt is Gauss eloszlás írja le.

Oxid- (nitrid-) réteg növesztése

A felületi passzív réteg olyan módon növekszik a Si felületen, hogy az oxidáló (nitridáló) anyag átdiffundál a már kialakult passzív rétegen és az érintkező felület mentén kémiai reakcióba lép a Si-mal.

A felületi passzív réteg növesztésének modelljét azzal a feltétellel határozzák meg, hogy a növekedés eléggé lassú ahhoz, hogy 1., az oxidáló anyag eloszlása az oxidban minden pillanatban stacionárius legyen (adiabatikus közelítés) 2., a nyomás relaxációs ideje kisebb az oxidáció idejénél (viszkózus csúszó folyás). Utóbbinak a kétdimenziós modellezésnél van szerepe, hiszen a Si és SiO_2 eltérő móltérfogata az érintkező felületen feszültséget hoz létre, amely szétterjed az oxidban.

Az 1. feltétel figyelembevételére egydimenziós esetben a rétegvastagságra a következő összefüggéshez vezet

$$X = L \cdot \ln \frac{2L^2 + Bt + \sqrt{(Bt)^2 + L^2A^2 + 4L^2Bt}}{2L^2 + AL} \quad (3)$$

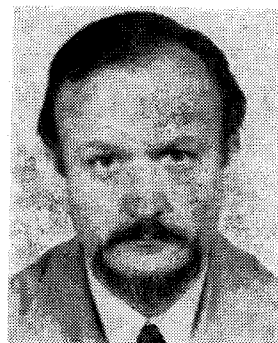
ahol L a diffúziós hossz, A és B a növekedést jellemző paraméterek. Valamennyinek a hőmérsékletfüggése legegyszerűbben

$$G = G_0 \exp(-E_G/kT) \quad (4)$$

alakú összefüggéssel írható le. Ennél bonyolultabb összefüggéseket is használnak.

A (3) összefüggés által leírt növekedés sematikusan a 4. ábrán látható. Az ábrából kitűnik, hogy amennyiben $L \gg X$, (a diffúziós hossz jelentősen felülmúlja a rétegvastagságot) a görbe logaritmikusan „telítődő” szakasza a görbe számunkra érdekes szakaszáról eltűnik. Ez igen jó közelítés oxidnövekedés esetén. Ekkor (3) határesetben az

$$X = -\frac{A}{2} + \sqrt{\frac{A^2}{4} + Bt} \quad (5)$$



DR. ZOMBORY
LÁSZLÓ

a BME Elméleti Villamoságtan Tanszékének docense. 1965-ben végzett a BME Villamosmérnöki Kar híradástechnika szakán. 1969-ben Sub auspiciis kitüntetéssel doktorált. 1974-ben védte meg kandidátusi értekezését. Hosszabb ideig dolgozott a SZUTA A. F. Ioffe Műszaki Fizikai Intézetében, a Polytech-

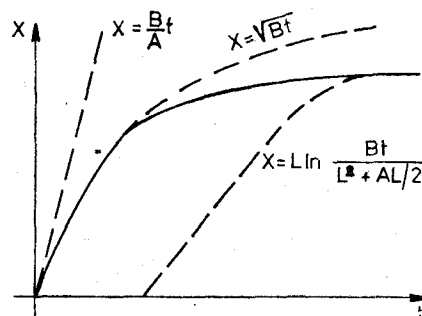
nic Institute of New-York-ban és a Stanford University-n. A HTE BME Villamoskari Csoportjának titkára, az URSI Magyar Nemzeti Bizottságának tagja.

Fő kutatási területei: terek hálózati modelljei, félvezető eszközök technológiájának és működésének térelméleti modellezése. Egy szakkönyv, számos szakkikk és konferenciaelőadás szerzője, III. társszerzője.

„lineáris-parabolikus” növekedési törvénybe megy át. A növekedés kezdetén (3) és (5) egyaránt pontatlan, ezért gyakran t helyett $t + \tau$ effektív idővel számolnak.

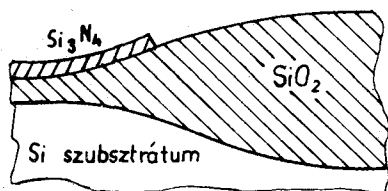
A kétdimenziós oxidnövekedés adiabatikus modellje most van kialakulóban. Az oxidáló anyag az oxidban a $D_{eff}\Delta C = 0$ Laplace egyenletnek tesz eleget, míg az oxid lokális sebessége a $\mu\Delta V = \text{grad } P$ egyszerűsített Navier–Stokes egyenletnek, ahol μ a viszkozitás és P a nyomás. A sebesség az összenyomhatatlanságból következő $\text{div } \mathbf{V} = 0$ egyenletnek is eleget kell tennie, ebből a feltételből a $\Delta P = 0$ egyenlet is következik. Megfelelő peremfeltételekkel a fenti egyenletrendszer meghatározza az adott oxidréteg növekedési sebességét. Ezt ismerve az oxid alakja módosítható és a számítás ismét elvégezhető.

A kétdimenziós oxidnövekedés modellezése elengedhetetlen a nitridréteg alatt növekvő ún. lokális oxidáció esetén (5. ábra). A nitridréteg alatt a növekedés üteme két okból kisebb: egyrészt az oxidáló közegnek a réteg alá kell diffundálnia, másrészt a



H970-4

4. ábra. Növesztett réteg vastagságának időfüggése



H970-5

5. ábra. Oxidréteg lokális oxidáció esetén („madárcsőr” geometria)

rugalmas nitridréteg a növekedés során fokozódó mértékben nyomja az oxidot.

Amint látjuk az oxid (nitrid) növekedését leíró modell nem kinetikus. Még kevésbé az a növesztett réteg adalékeloszlásának leírása szempontjából. Az adalékról feltételezik, hogy diffúzióval vándorol az oxid (nitrid) réteg belsejében. Ez azonban már átvezet a következő ponthoz.

Diffúzió

A technológiai lépések végrehajtása során a diffúzió a leggyakrabban megjelenő folyamat. Használják magas hőmérsékleten predepozícióra, alacsonyabb hőmérsékleten behajtásra, hőkezelésre. Diffúziós adalék-újraeloszlással jár valamennyi magashőmérsékletű művelet, elsősorban a termikus rétegnövesztés (oxidálás, nitridálás).

A diffúzió alapegyenlete a folytonossági egyenlet:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \text{div } \mathbf{J} = 0, \quad (6)$$

ahol C a koncentráció, \mathbf{J} pedig az anyagáram (fluxus) sűrűség.

Utóbbinak a fenomenológikus kifejezésre *egyetlen* semleges diffundáló anyag és *csak* termikus hatások esetén

$$\mathbf{J} = -D \text{ grad } C. \quad (7)$$

Ez az összefüggés nem tartalmazza a *keresztteffektusokat*, azaz az elektromos, kristályrács, ill. több diffundáló közeg kölcsönhatásokat. Ezeket az összefüggéseket (különösen, ha nem lineáris karakterűek) fél-empirikus modellösszefüggésekkel közelítik. Ezek azonban kevésbé prediktív erejűek azon a tartományon kívül, amelynek vizsgálati eredményéből származtatták őket.

A diffúzió kétdimenziós modelljeiben ezeket a hatásokat ugyanúgy modellezik, mint egydimenziós esetben. Ezért csak igen röviden tekintjük át őket, hiszen jelentős irodalom foglalkozik a témával (l. pl. [5]). Az egyetlen jelentős többlet, hogy többdimenziós esetben a diffúzió anizotróp lehet, azaz eltérő kristálytani irányokba más és más a D diffúziós együttható értéke. Legáltalánosabb esetben a D tenzor lehet. Az egyes komponensek tulajdonságai azonban hasonló módon függnek a keresztteffektusoktól, mint egydimenziós esetben.

A legfontosabb modellezett hatások

- diffúziónövekedés saját elektromos tér hatására,
- diffúziónövekedés vakanciák hatására,

- diffúziónövekedés a felületi oxidnövelés hatására,
- diffúziócsökkenés a koncentrációnövekedés okozta adalékcsoomósodás (clusterképződés) hatására,
- diffúzió változása több adalék együttes diffúziója esetén.

Különleges effektusokat modelleznek foszfor diffúziója esetén [6]. Általában nem modellezik a sugárzások okozta diffúziónövekedést és a nyomásváltozás okozta diffúzióváltozást. E jelenségek megértése további kísérleti munkát is igényel.

Vegyük ezek után sorra a modellezett effektusokat

a) A diffundáló adalék ionizálódik. Lokális töltés-egyensúlyt feltételezve az elektromos potenciál, ill. gradiense kiszámítható. Az elektromos tér okozta drift áramsűrűség megnöveli az adalék összszámát. Más szemlélettel: a lassan diffundáló adalékion és a gyorsan diffundáló szabad töltéshordozója között kialakuló elektromos tér gyorsítja az adalékion diffúzióját. Egytípusú adaléokra és az alábbi effektív diffúziós állandóval vehető figyelembe:

$$D = D_i \left(1 + \frac{C/2n_i}{\sqrt{(C/2n_i)^2 + 1}} \right). \quad (8)$$

b) A vakanciákon keresztül történő diffúzió megnöveli a diffúzió sebességét az interszticiós mechanizmusokra viszonyítva. Felderítésében Fair és munkatársai eredményei alapvetőek [7]. A modell kialakításánál tett feltételezések a következők:

1. a töltéssel rendelkező vakanciák sűrűsége jóval kisebb az adaléksűrűségnél; 2. a töltött vakanciák betöltési arányát az adalékokkal kialakult lokális egyensúly szabja meg; 3. a vakancia-adalék kölcsönhatás mindig két részecske kölcsönhatása, nem bonyolultabb. Ezekkel a feltételezésekkel a diffúziós állandóra az alábbi kifejezést kapjuk

$$D = D^0 + D^+ \frac{p}{n_i} + D^- \frac{n}{n_i} + D = \left(\frac{n}{n_i} \right)^2, \quad (9)$$

ahol a tagok rendre a semleges, a pozitív, valamint az egyszeres és kétszeres negatív töltésű vakanciákon keresztül történő diffúzió hozzájárulását adják. A formula egy adalék és egy töltött mechanizmus figyelembevételével az igen elterjedt

$$D = D_i \frac{1 + \beta f}{1 + \beta} \left[f = \frac{n}{n_i}, \frac{p}{p_i}, \left(\frac{n}{n_i} \right)^2 \right] \quad (10)$$

alakra egyszerűsödik. Ezt a formulát, vagy ennek enyhén módosított alakját használja lényegében valamennyi eljárás, bár a használt β értékek igen eltérőek. Megemlítendő, hogy (8) és (10) kombinációja elegendően nagy adalékkoncentráció esetén $\alpha = C/2n_i$ közel lineáris függvénye. Pl. $\alpha > 2$ esetén $D = D_i [3,96\alpha + 0,0198]$ As adaléokra; $D = D_i [3,80\alpha + 0,100]$ B adaléokra.

c) Kísérleti tény, hogy termikus oxidáció során az oxid alatti térrészben megnő a diffúzió állandó értéke. Figyelembe vételére — kielégítő elmélet nem lévén — félempirikus összefüggéseket javasolnak, amelyek figyelembe veszik az oxidnövekedés sebességét és az oxidrétegtől mért távolságot.

d) Nagy koncentrációk esetén az adalékból csomók (clusterek) képződnek és kiválnak a rácsból. Ezek a kivált adalékatomok elektromosan inaktívvá válnak, nem vesznek részt elektromos kölcsönhatásban. Ennek következtében a diffúzió folyamata lelassul.

A csomóképződés kinetikusan is modellezhető. A csomók kialakulásának és felbomlásának karakterisztikus ideje azonban olyan rövid a diffúzió idejéhez viszonyítva, hogy a dinamikus leírással felesleges bonyolítani a szimulációt.

Feltételezzük tehát, hogy a csomókban levő adalék atomok száma és a rácsban elhelyezkedő adalékatomok száma között egyensúly van minden időpillanatban. Az egyensúly feltételét a

$$\left(\frac{C_s}{C^*}\right)^m = \frac{C_s}{C^*} \quad (11)$$

alakba írhatjuk, ha a csomóban m atom található. Itt C_s a rácsban és C_c a csomóban levő atomok koncentrációja, C^* pedig egy karakterisztikus érték, amelynél a két koncentráció megegyezik. A teljes adaléksűrűség (11) alapján a

$$\frac{C}{C^*} = \frac{C_s}{C^*} + m \left(\frac{C_s}{C^*}\right)^m \quad (12)$$

alakba írható, amelyet gyakran

$$C = C_s + m k C_s^m \quad (13)$$

alakban használnak. A konkrét számértékeket mérésekkel határozzák meg. As esetén $m=2..4$, B esetén $m=12$. Egy (az előzőeknél könnyebben kezelhető) empirikus formula a rácsban levő, tehát aktív és az összes adalék arányára

$$C_s = C / [1 + (C/C_m)^{\alpha}]^{1/\alpha} \quad (14)$$

A csomósodás figyelembevételével a diffúziós áramot az alábbi módokon közelítik:

i) Csak az aktív adalékatomok mozognak és csak a diffúziós fluxust vesszük figyelembe

$$\mathbf{J} = -D \text{ grad } C_s, \quad (15a)$$

ahonnan

$$\mathbf{J} = -\left(D \frac{\partial C_s}{\partial C}\right) \text{ grad } C = -\frac{D}{1 + m^2 k C_s^{m-1}} \text{ grad } C. \quad (15b)$$

Láthatóan az effektív diffúzió állandó a koncentráció növekedésével rohamosan csökken.

ii) A termikus diffúzióban valamennyi adalékatom részt vesz, az az elektromos tér hatására kialakuló-driftáramot azonban csak az elektromosan aktív atomok szolgáltatják.

$$\mathbf{J} = -D \text{ grad } C_+ - \frac{q}{kT} DC_s \text{ grad } \varphi. \quad (16)$$

ahol a felső előjel az akceptor, az alsó a donatorokra érvényes.

iii) Csak az aktív adalékatomok mozognak, de ezek diffúziós és drift járulékát is figyelembe kell venni. (Ez kompromisszum az előző két modell között.)

$$\mathbf{J} = -D \text{ grad } C_{s+} - \frac{q}{kT} DC_s \text{ grad } \varphi, \quad (17)$$

A (16) és (17) összefüggésekben szereplő φ potenciál termikus egyensúly és lokális semlegesség feltételezésével az adalékkoncentrációból közvetlenül meghatározható. Ennek következtében végül is valamennyi formula koncentrációfüggő diffúziós állandóra vezet.

e) Több adalék együttes diffúziójának modellezése a következő feltevéseken alapul: 1. Valamennyi adalék árama diffúziós és drift komponensekből áll; 2. lokális semlegesség áll fenn; 3. termikus egyensúly áll fenn, és a töltéshordozók eloszlása Boltzmann eloszlással közelíthető; 4. az adalékok teljesen ionizáltak.

Ekkor az együttes diffúzió árama

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_D &= -D_D [h_D \text{ grad } C_D - (h_D - 1) \text{ grad } C_A], \\ \mathbf{J}_A &= -D_A [h_A \text{ grad } C_A - (h_A - 1) \text{ grad } C_D], \end{aligned} \quad (18)$$

ahol D_D , D_A , h_D és h_A a koncentrációk (C_D és C_A) függvényei. Az egyes modellek lényegében csak ezen függvények konkrét alakjában különböznek.

A diffúzió modellezésének bemutatását befejezve megemlíthetjük még, hogy a keresztteffektusok formális modellezésére gyakran használják a (7) összefüggés módosított alakját.

$$\mathbf{J} = -\text{grad } (D \cdot C). \quad (19)$$

Ennek a kifejezésnek a fizikai tartalma igen kétséges, ugyanakkor alkalmasan választott $D(C)$, $D(C_A, C_D)$, $D(C, \varphi)$ függvényekkel lényegében az eddig bemutatott kifejezésekhez jutunk.

Peremfeltételek

Az eddigiekben a közeg belsejében lejátszódó jelenségeket vizsgáltuk. A teljes kinetikai leíráshoz nem elegendők az adaléknak a térfogat belsejében történő mozgását leíró összefüggések, hanem szükség van a peremeken lejátszódó jelenségek ismeretére is. Ezek modellezése bizonyos fokig nehezebb, mint a térfogati jelenségeké. Ezért a modellek viszonylag egyszerűek, heurisztikusak. A modellek konkrét numerikus együtthatói közül a bizonytalanság igen nagy, így valószínűleg a peremfeltételek okozzák a modellek és a mért eredmények között a legnagyobb eltérést.

Alapvetően fontos az oxid-szilícium (illetve a nitrid-szilícium) határfelület közelében az adalékok viselkedése. Nyugvó határfelület és termikus egyensúly esetén nem a koncentrációk folytonosak, hanem a kémiai potenciál. Ennek megfelelően a koncentrációk értékének aránya lesz meghatározott. Ez az ún. szegregációs együttható, amelyre

$$m = C_{si}/C_{ox} = m_0 \exp(-\Delta E/kT). \quad (20)$$

Nyugvó határfelület esetén is kell a felületre merőleges árammal számolnunk, ha bármilyen okból a felület két oldalán kialakult koncentráció hányadosa nem egyezik meg a szegregációs együtthatóval. Erről az áramról feltételezzük, hogy a koncentrációk lineáris függvénye az alábbi alakban:

$$\mathbf{J}_s = -h(C_{ox} - C_{si}/m)n, \quad (21)$$

a szilíciumból kifelé mutató normális vektorral.

A közelmúltban figyelték fel arra, hogy közvetle-

nül a felület közelében a koncentráció igen nagymértékben megnövekszik a termikus folyamatok során. Ez utóbbi, a (21)-hez hasonló áramokkal vehető figyelembe, de ezt kétdimenziós modellezésben egyelőre nem használják.

Bonyolódik a helyzet, ha a közeghatár, ahol a szegregációval számolnunk kell, mozog. Ez a helyzet termikus rétegnövesztésnél. Ilyenkor az egyensúlyi értékek különbsége által okozott fluxustól eltekintve is fellép egy áram. Oxidra

$$\mathbf{J}_b = -V_{\text{oxn}}(C_{\text{ox}} - \alpha C_{\text{si}})\mathbf{n}, \quad (22)$$

ismét a szilíciumból kifelé mutató normálissal. Itt V_{oxn} az oxidréteg növekedési sebességének a határfelületre merőleges komponense, $\alpha = 0,44$ pedig az oxid és a kialakulásához szükséges szilíciummennyiség térfogataránya. Nyilvánvaló, hogy $C_{\text{ox}} = \alpha C_{\text{si}}$ esetén zérus a járulékos fluxus, hiszen az oxid adalékmenyisége azonos az eloxidált szilíciuméval.

Általános esetben a két áramot együtt kellene figyelembe vennünk a közeghatáron. Ha azonban a (21) és (22) kifejezésekben szereplő h és V_{oxn} sebességdimenziójú mennyiségek közül az egyik jóval nagyobb a másikénál, ez az illető áramban szereplő mennyiségek gyakorlati egyensúlyát jelenti.

A $h \gg V_{\text{oxn}}$ feltételezéssel a szegregáció gyakorlatilag egyensúlyi, azaz (21) alapján $C_{\text{ox}} = C_{\text{si}}/m$ és ezt (22)-be helyettesítve

$$-V_{\text{oxn}} \left(\frac{1}{m} - \alpha \right) C_{\text{si}} \cdot \mathbf{n} = -D \text{grad } C_{\text{si}} \cdot \mathbf{n},$$

ahol felhasználtuk, hogy a felületen átfolyó áramot diffúziós áram táplálja. A fenti kifejezésből a szokásos jelöléssel

$$D \frac{\partial C}{\partial n} = V_{\text{oxn}} \left(\frac{1}{m} - \alpha \right) C \quad (23)$$

vegyes, lineáris, homogén peremfeltételt kapjuk. Valamennyi ma ismert kétdimenziós folyamatszimuláció, amelyik oxidnövekedést is figyelembe vesz, a (23) peremfeltétellel számol oxid-szilícium közegfelületen.

A (23) összefüggés az oxidban nem tételez fel diffúziót. Ez a közelítés azért engedhető meg, mert az oxidban a diffúziós együttható nagyságrendekkel kisebb, mint a szilíciumban. Ennek eredményeképpen valamennyi olyan folyamatban, amelynek során az oxid nem növekszik, (23) alapján $\partial C / \partial n = 0$, azaz az oxidfelület tökéletesen „visszaverő” az adalékatomokat. Ez a peremfeltétel is általánosan elfogadott a szimulációs programokban.

Hogyan szimuláljuk a folyamatokat?

„A kocsi egyes részei még nem kocsik.”
(Lao-ce)

Az egyes technológia lépések modelljei önmagukban még nem elegendők a folyamatok szimulációjához, csak annak alapját biztosítják. A szimuláció során az egyes modelleket az adott feltételek között mennyiségileg is ki kell értékelnünk, majd a végered-

mény egy következő lépés szimulációjának kiindulása lehet. A teljes műveletsort a szimulációs algoritmus írja le.

A szimulációs algoritmusok két nagy csoportja: az analitikus és a numerikus eljárások. Mint valamennyi hasonló feladatnál, az analitikus eljárások használhatósága igen szűk, csak erősen korlátozott feltételek mellett használhatók, és a megoldás alakja akkor is igen bonyolult. Mint minden felosztásnál, itt is van egy átmeneti sáv, a félanalitikus (hibrid) eljárások.

1. Zárt analitikus formulát szolgáltató eljárások

A teljesség kedvéért ismertetjük azokat az analitikus algoritmusokat, amelyeket kétdimenziós technológiai lépésekre alkalmaznak. A $D = \text{áll.}$ feltételezéssel a

$$\partial C / \partial t = D \Delta C \quad (24)$$

egy adalék diffúzióját modellező egyenletnek a megoldását predepozícióra és behajtásra is megadta a maszkablak figyelembevételével Kennedy és O'Brien. A második eset két dimenzióban viszonylag egyszerű formulára vezet (végtelen vékony kezdeti eloszlást feltételezve a maszkablak szilícium felületén):

$$C = \frac{C_{\infty}}{2} \exp(-x^2/4Dt) \operatorname{erfc}(-y/2\sqrt{Dt}), \quad (25)$$

ahol C_{∞} a koncentráció távol a maszkéltől, x a mélységi, y pedig a laterális távolság a maszk élétől.

A predepozíció szimulációja azonban olyan bonyolult végeredményre vezetett, hogy Cherednichenko, Grünberg és Sarkar megkísérelték más módszerrel megoldani a problémát. Munkájuk eredményeképpen a 6. ábrán bemutatott koordináta-rendszerben a koncentrációra az alábbi kifejezést kapták:

$$C(r, \varphi, t) = C_0 \left[1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} B_n(z) \cos\left(n + \frac{1}{2}\right) \varphi \right], \quad (26)$$

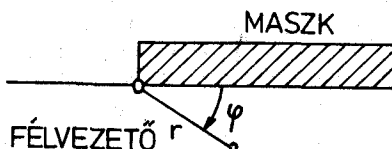
ahol

$$z = \frac{r^2}{8Dt} \quad \text{és}$$

$$B_n(z) = \sqrt{\frac{\pi z}{2}} \exp(-z) \left[I_{\frac{n}{2}-\frac{1}{4}}(z) + I_{\frac{n}{2}+\frac{3}{4}}(z) \right].$$

Itt I_ν a ν -edrendű elsőfajú módosított Bessel-függvény.

A (26) összefüggés eléggé meggyőző, hogy még ez a sok közelítéssel (konstans diffúziós együttható, egyszerűsített geometria) kapott eredmény is milyen nehézségeket támaszt az analitikus kiértékelés során.



H970-6

6. ábra. Koordináta-rendszer a (26) formula levezetéséhez

Fokozottan áll ez a MADIPAM programra [8]. A program egyetlen, implantációval bevitt adalék szét diffundálását szimulálja kettő-, ill. három dimenzióban. A maszkablak hatását az (1) formulában szereplő d_{eff} alkalmas megválasztásával veszi figyelembe azzal a kikötéssel, hogy a maszk csak lépcsőzetesen vastagodhat. Ezzel az implantációs eloszlás analitikus lépések után exponenciális és erfc függvényekkel kifejezhető. Ezt az eloszlást a (24) egyenlet exponenciális függvényeket tartalmazó Green függvényével összeszorozva kell kiintegrálni. Ez szintén analitikusan elvégezhető, és Hermite-polinomok végtelen sorára vezet. A program ezt a sort értékeli ki.

Lee-Dutton és Antoniadis [9] algoritmus a azon a felismerésen alapul, hogy az oxidáció közben történt adalék eloszlás-változás az eredeti eloszlás korrekciójával adható meg. A laterális eloszlást az eredeti és a korrekciós eloszlásra azonosnak feltételezi. A teljes adalékkoncentráció tehát:

$$C(x, y, t) = \{C_1(x, t) + C_2(x, t)\} \cdot C_y(y, t) = C_x(x, t) \cdot C_y(y, t), \quad (27)$$

ahol C_x a mélységi eloszlás, ebből C_1 az oxidnövesztés nélküli eloszlás, C_2 ennek korrekciója, végül C_y a laterális eloszlást reprezentálja. Az idézett publikáció megadja ezen függvények analitikus kifejezését meredek maszkablak esetére.

Változó maszkvastagság figyelembevétele azonban már átvezet a félig analitikus algoritmusok területére.

2. Félig analitikus (hibrid) eljárások

Chin et al. [10] előzőekben ismertetett analitikus modellekre támaszkodó numerikus eljárást dolgoztak ki, amelyik minden egyes pontban a ponthoz legközelebb eső oxidfelület növekedési sebességének ismeretében korrigálja az adalékeloszlást. A program asztali kalkulátorral is kiértékelhető. (Jelen összefoglalás szerzői kipróbálták az eljárást, és tapasztalataik szerint az csak igen korlátozott feltételek között ad elfogadható végeredményeket.)

A RECIPE program [11] a laterális diffúziót az előzőekhez hasonlóan a (25) formulával veszi figyelembe, de időlépésenként újraszámított, az adott helyen levő koncentrációtól függő diffúzióval. A kis időlépésekre az aktuális növekményt tehát analitikus formulából számolják, de változó együtthatókkal.

A kezdeti eloszlást a (27) formulának megfelelően bontják fel, ahol a mélységi $C_x(x, t)$ -t egydimenziós numerikus szimulációval kapják kiindulási adalékként. Az algoritmus úgy működik, mintha a diffúzió egymás mellé helyezett vékony maszkablakokon keresztül történne, és az így kapott eloszlásokat szuperponálja. A számítás eredménye a diffúziós együttható koncentrációfüggése következtében eltér a valódi eloszlástól, de a hiba lineáris koncentrációfüggés esetén nem túl nagy. A program 50×50 rácspontot tud kezelni, a rács mindkét irányban inhomogén is lehet. Laterálisan 5 különböző rácsozást megengedett, a mélységi rácsozást az alkalmazott egydimenziós szimuláció állítja be.

3. Numerikus szimulációs eljárások

A nemlineáris diffúziós egyenletek a már ismertetett módon a (6)–(7) egyenletből származnak. A

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}[D(C) \text{ grad } C] \quad (28)$$

alakú egyenletek diszkretizálásának alapvető lépése, hogy a jobb oldalon álló kifejezést a folytonos C függvény helyett véges számú pontban felvett (közéltő) értékével reprezentáljuk. Erre elenyésző kivétellel a végesdifferencia módszer szolgál. Eredményül nemlineáris közönséges differenciál-egyenletrendszer kapunk.

$$\frac{d}{dt} \mathbf{C} = \mathbf{A}(\mathbf{C}) \cdot \mathbf{C}, \quad (29)$$

ahol $\mathbf{C} = C_1, C_2, \dots, C_n$ a reprezentatív koncentrációértékeket tartalmazó vektor. Az \mathbf{A} mátrix sávstruktúrájú ritka mátrix (29) megoldása különböző módszerekkel történik.

a) közönséges differenciál-egyenletrendszer egyszerű vagy prediktor-korrektor megoldásrutinjainak felhasználásával.

b) a (29) egy Δt hosszúságú diszkrét időlépésre történő megoldásából adódó

$$\mathbf{C}^{n+1} = \exp(\mathbf{A} \cdot \Delta t) \mathbf{C}^n \quad (30)$$

egyenletben a mátrixfüggvény alkalmas közelítéssel. A leggyakrabban használták a

b.1. előrelépő (explicit) séma

$$\exp(\mathbf{A} \cdot \Delta t) \cong \mathbf{I} + \mathbf{A}(\mathbf{C}^n) \cdot \Delta t$$

b.2. hátralépő (implicit) séma

$$\exp(\mathbf{A} \cdot \Delta t) \cong [\mathbf{I} - \mathbf{A}(\mathbf{C}^{n+1}) \Delta t]^{-1}$$

b.3. Crank–Nicholson séma

$$\exp(\mathbf{A} \cdot \Delta t) \cong \left[\mathbf{I} - \frac{1}{2} \mathbf{A}(\mathbf{C}^{n+1}) \Delta t \right]^{-1} \cdot \left[\mathbf{I} + \frac{1}{2} \mathbf{A}(\mathbf{C}^n) \Delta t \right]$$

Az irodalomból ismert numerikus szimulációs eljárásokat az alábbiakban részletezzük, majd táblázatosan összefoglaljuk.

Az ICECREM [12] lényegében egydimenziós program a SUPREM-hez hasonló felépítéssel. Kétdimenziós szolgáltatásai: egy adalék implantációját és hőkezelés során fellépő diffúzióját modellezi. Az implantált profil mélységi eloszlása Pearson IV. típusú, laterális szóródását Gauss eloszlás írja le. Az oxid és a szabad felületek tökéletesen visszaverők.

Vandorpe [13] „klasszikus” programja egy donor és egy akceptor adalék szimultán diffúzióját szimulálja két dimenzióban. Csak diffúziót modellez: predepozíciót (a felületen előírt koncentrációval) és behajtást (tökéletesen visszaverő felületeknél). Az egyenleteket végesdifferencia módszerrel, implicit sémaival diszkretizálja.

Tielert [14] programja a következő folyamatokat szimulálja:

- ionimplantáció, lineárisan növekvő vastagságú maszkszélen keresztül;
- diffúzió semleges közegben, koncentrációfüggő diffúziós együtthatóval;
- csomósodás;
- adalékok (max. 3.) kölcsönhatása.

	Oxidálás	Lokális oxidálás	Adalékok száma	Diffúzió térerő függése	Diffúzió oxidáció függése	Clustering	Max. rácsméret	Diszkretizálás	Időlépés	Megoldó rutin	Implementáció, futási adatok
ICECREM	-	-	1	+	-	+					
Vandorpe	-	-	2	+	-	-		Véges differencia	Hátralépő (implicit)	Iteratív	IBM 360/50/67 időlépésenként 30—40 iteráció
Tielert	-	-	3	-	-	-	64 × 46	Véges differencia	Crank—Nicholson	Iteratív (SOR)	Siemens 7755 10—60 sec
Warner, Wilson	-	-	1	+	-	-	21 × 41	Galerkin	Implicit		Gray 1 7,25 min
BICEPS (LORD)	+	+	2	+	-	+	60 × 40	Véges differencia	Hátralépő (implicit)	Iteratív (blokk-iteráció) Gauss—Seidel	
Seidl	+	+	1	+	-	-	65 × 49 33 × 25	Véges differencia, kettős rácson	Crank—Nicholson	Gauss—Seidel	Cyber 175 60 sec 15 sec
ROMANS II.	+	+	1				31 × 51	Véges differencia	Prediktor-korrektor (GIERBI)	Iteratív (SOR)	Cyber 176 10—30 sec
TOPICS	+	+	1	+	+	+	60 × 50	Véges differencia	Hátralépő (implicit)	Iteratív (SIP, Stone)	
FEDSS	+	+	1	+	-	-		Véges elemek	Implicit v. explicit	SPARSPAK	

A diszkretizálás véges differenciámódszerrel, Crank—Nicholson sémával történik 64 × 64 rácspontra tartalmazó egyenlő közül (reguláris) rácson. A megoldás iteratív.

Warner és Wilson [15] programja több tekintetben eltér a szokásostól. A szimulált effektusok: egy adalék behajtása, illetve implantáció utáni hőkezelés. A közeghatárok állandóak, a peremen a koncentráció előírt, vagy a fal tökéletesen visszaverő.

A megoldó rutin a relatív hiba minimalizálására az alábbi transzformációt vezeti be

$$C = n_i \exp(u(x, y, t)). \quad (31)$$

Ezzel (28) alakja

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \operatorname{div} [\hat{D}(u) \operatorname{grad} u] + \hat{D}(u) (\operatorname{grad} u)^2, \quad (32)$$

ahol

$$\hat{D}(u) = D(u, \exp(u)).$$

A hőkezelés szimulációjánál egy további (ún. Boltzmann) transzformációval, amelynek összefüggései:

$$\xi = \frac{x}{\sqrt{4D_0 t}}; \quad \eta = \frac{y}{\sqrt{4D_0 t}}; \quad \tau = t,$$

a (32) egyenlet az alábbi alakra transzformálódik:

$$\tau \frac{\partial u}{\partial \tau} = \operatorname{div} \left[\frac{\hat{D}(u)}{4D_0} \operatorname{grad} u \right] + \frac{\hat{D}(u)}{4D_0} (\operatorname{grad} u)^2 + \frac{1}{2} r \operatorname{grad} u \quad (33)$$

A (33) egyenlet viszonylag bonyolult alakjáért kárpótól, hogy a transzformált koordinátákban a transziens okozta koncentrációváltozás sokkal kisebb, mint az eredeti koordinátákban.

A diszkretizálás Galerkin módszerrel történik, ún. B-spline-okat választva bázisfüggvényeknek.

A LORD és továbbfejlesztett változata: a BICEPS [16] az első olyan program, amely a lokális oxidációval kapott „madárcsőr” alakú oxid növekedéskor kialakuló újraeloszlást is modellezi. Több adalékot is figyelembe vesz, együttes behajtásuknál elektromos kölcsönhatással számol. Modellezi a csomósodást, a vakanciák hatását. Az ionimplantációt Gauss mélységi és erfc laterális eloszlással modellezi.

Az oxid növekedését olyan transzformált koordináta-rendszerrel veszi figyelembe, amelynek rácsonaljai párhuzamosak az oxid felületével. Ebben a transzformált, időben változó koordináta-rendszerben a diffúziós egyenletben vegyes másodrendű parciális deriváltak is megjelennek. Ennek végesdifferencia módszerrel történő diszkretizálása kilencpontos differenciasémához vezet. Ezért az egyenletrendszer megoldása nehezebbé válik és igen érzékeny a peremfeltételekre.

Az egyenleteket Penumalli [16] blokkiterációs módszerrel oldja meg, minden iterációs lépésben a linearizált egyenletrendszer Gauss-Seidel módszerrel történő megoldásával. A bemutatott példája 60×40 méretű rácson teljes technológiai műveletsort szimulál. Az implementációról és futási időről nincsen adat.

Ugyanezeket az egyenleteket Seidl [17] kettős rácson oldja meg, ahol a durvább rácson végzett öt pontos sémával történt számítás során korrekcióként használja a kilencpontos sémával kapható közéltételeket. Az öt pontos séma megoldására számos módszer ismert, [17] a Gauss-Seidel iterációt használja. 65×49 méretű rácson Cyber 175 számítógépen 60 másodpercig tartott a diffúziós számítása nemlineáris esetben. Állandó diffúziós együtthatóval, vagy 33×25 pontos sávon a számítási idő $1/4$ -ére esett.

Murphy, Hall és Maldonado [18] programja (ROMANS II,) az előző két program elemeit ötvözi, modellezi a lokális oxidációt. A megoldást (29) alakú közönséges differenciálegyenletre vezet vissza és azt prediktor-korrektor módszerrel oldja meg. A program továbbfejlesztését tervezik több adalék, ill. elsőként háromdimenziós diffúziószimuláció céljára. Tervezik a SUPREM-hez hasonló felhasználó orientált bemeneti nyelv kialakítását is.

A ma legjobban kidolgozottnak tűnő program a TOPICS, Taniguchi, Kashawagi és Iwai [19] nevéhez fűződik. A szimulált effektusok

- kémiai depozíció gőzfázisból
 - marás
 - ionimplantáció
 - diffúzió oxidációval vagy anélkül.
- } csak egy
} dimenzióban

Az oxidációval történő diffúzió esetén figyelembe tudják venni a „madárcsőr” geometriát, továbbá mellékeffektusokat; a diffúzió függését térerősségtől, az oxidációtól és a csomósodástól. Az irodalomban közölt programok közül egyedül ez a program használ erősen implicit iteratív megoldórutint.

Végül meg kívánjuk említeni az egyetlen programot, amely diffúziós adalékolást véges-elemek módszerével szimulál. Ez a program az IBM által fejlesztett FEDSS [20], amely egy adalék implantáció utáni behajtását szimulálja, oxidációval vagy anélkül. Képes depozíciós lépéseket is modellezni. Futási adatok nem ismeretesek.

A programok összehasonlítását az alábbi táblázat mutatja.

[1] Dutton, R. W.: Modeling of silicon integrated-circuit design and manufacturing process. IEEE Trans. ED-30 968–986 (1983).

[2] Tarnay K.—Masszi F.—Drozdy Gy.: Többrétegű struktúrák technológiai modellezése. Híradástechnika 34. 504–508. (1983).

[3] Pásztor Gy.: Új irányzat a korszerű félvezető technológiában: a nagy teljesítményű tárvézérelt tranzisztor. Híradástechnika 34. 54–59. (1983).

[4] Neureuther, A. R.: Simulating LSI wafer topography. IEDM Dig. Tech. Papers (1980 dec. 8–10, Washington) pp. 214–218.

[5] Kedves F.—Beke D.: Diffúzió szilárdtestekben. in: Fizika 1978 (ed.: Abonyi I.) Gondolat, Bp., 1979. pp. 193–224.

[6] Tarnay K. et al.: Szilícium technológiai eljárás számítógépes szimulációja. Finommechanika-Mikrotechnika 18, 257–260. (1979).

[7] Fair, R. B.: Impurity concentration doping effects on impurity diffusion in silicon. SEMI-CON/EUROPA 1983 Semiconductor Processing and Equipment Symposium Tech. Proc. (1983 márc. 8–10, Zürich) pp. 230–237.

[8] Krusius, J. P. et al.: Two- and three-dimensional analytic solution for post-anneal implant profiles through arbitrary mask edges. IEEE Trans. ED-29, 435–444 (1982).

[9] Lee, H. G.—Dutton, R. W.: Two-dimensional low concentration boron profiles: modeling and measurement. IEEE Trans. ED-28, 1136–1147 (1981).

[10] Chin, D. J. et al.: Process design using two-dimensional process and device simulators. IEEE Trans. ED-29, 336–340 (1982).

[11] Smith, G. E.—Steckl, A. J.: RECIPE — a two-dimensional VLSI process modeling program. IEEE Trans. ED-29, 216–221 (1982).

[12] Ryssel, H. et al.: Simulation of doping processes. IEEE Trans. ED-27, 1484–1492 (1980).

[13] Vandorpe, D.: Simulation numerique de la fabrication et du comportement des dispositifs semi-conducteurs. in: Computing Methods in Appl. Sci. Eng. Pt. I. (Lecture Notes in Comp. Sci. No. 10.) Springer, Berlin 1974 pp. 467–497.

[14] Tielert, R.: Two-dimensional numerical simulation of impurity redistribution in VLSI processes. IEEE Trans. ED-27, 1479–1483 (1980).

[15] Warner, D. D.—Wilson, C. L.: Two-dimensional concentration dependent diffusion. B.S.T.J. 59, 1–41 (1980).

[16] Penumalli, B. P.: A comprehensive two-dimensional VLSI process simulation program, BI-CEPS. IEEE Trans. El. Dev. ED-30 986–992 (1983).

[17] Seidl, A.: A multigrid method for solution of the diffusion equation in VLSI process modeling. IEEE Trans. vol. ED-30 999–1004 (1983).

[18] Murphy, W. D.—Hall, W. F.—Maldonado, C. D.: Efficient numerical solution of two-dimensional nonlinear diffusion equations with non-uniformly moving boundaries: a versatile tool for VLSI process modeling. NASECODE II. Dublin 1981 pp. 249–253.

[19] Taniguchi, K.—Kashiwagi, M.—Iwai, H.: Two-dimensional computer simulation models for MOSLSI fabrication processes. IEEE Trans. El. Dev. ED-28, 574–580 (1981).

[20] Salsburg, K. A.—Hansen, H. H.: FEDSS — Finite-element diffusion simulation system. IEEE Trans. ED-30, 1004–1011 (1983).