

OSNOVE RAČUNALNIŠKEGA MODELIRANJA PROCESNEGA KORAKA PLANARIZACIJE

Boštjan Gspan, Radko Osredkar
Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, Ljubljana, Slovenija

Ključne besede: polprevodniki, IC vezja integrirana, tehnologije mikroelektronske, osnove fizikalne, modeliranje računalniško, modeliranje numerično, modeliranje procesov, simulacije procesov, simulacije korakov procesnih, procesi planarizacije površine, planarizacija topografije, plasti planarizacijske, BPSG stekla boro-fosfo-silikatna, SOG steklo tekoče nanešeno centrifugalno, difuzija površinska, metode fizikalne, metode tekočinske, Navier-Stokes enačbe, oprema programska

Povzetek: V preglednem članku so predstavljene fizikalne osnove različnih modelov za simulacijo procesnega koraka planarizacije pri proizvodnih postopkih izdelave integriranih elektronskih vezij. Podrobneje sta opisana modela planarizacije s tanko plastjo močno dopiranega silicijevega dioksida in tanko plastjo tekočega stekla.

Physical Foundations of Computer Modeling of Planarization Processes

Keywords: semiconductors, IC, integrated circuits, microelectronic technologies, physical foundations, computer modelling, numerical modelling, process modelling, process simulations, process step simulations, planarization processes, topography planarization, planarization layers, BPSG, Boro-Phospho-Silicate Glasses, SOG, Spin-On Glass, surface diffusion, physical methods, liquid methods, Navier-Stokes equations, software

Abstract: In this review paper physical foundations of planarization process computer models are discussed. As planarization is becoming of crucial importance for processes with small lateral dimensions (i. e. $< 1.2 \mu\text{m}$), the need for a reliable computer model of this process is increasing. One approach to process modelling is to start from "the first principles"; at later stages of modelling this, approach usually requires extensive simplifications and omissions of the relatively small terms in the equations in order to keep the model within computing power of present day computers. The other approach is to fit parameters of a model as to match the result of simulation to experimental data.

One of the possible classifications of planarization techniques is to physical and to liquid methods. Based on our experimental investigations described elsewhere we focused on finding a model for planarization with borophosphosilicate glass (BPSG) layer among physical methods, and for planarization with spin-on glass (SOG) among liquid methods, therefore the two are treated in more detail. Different models of planarization are compared and evaluated with regard to possibility of their incorporation into existing process simulation software packages.

We conclude that the most promising model of physical planarization at present time is the model of "surface diffusion"; also, it is already a module in the process simulation program SAMPLE, and therefore easily accessible. In this model free surface energy is considered as the driving force that forms the topography of planarization layer. Planarization layers are regarded as layers of liquids with different viscosities. When viscosity of a liquid is appropriately low, liquid can flow in such a manner as to minimize the surface energy. This flow is called surface diffusion. Material properties, environment and other parameters are implicitly defined in variable diffusion coefficient.

Lubrication model of planarization can very accurately predict form of a topography planarized with liquid methods, but is less useful for predicting the results of planarization with physical methods. The essence of this model is solving the Navier-Stokes equations. In spite of the accuracy of predictions for cases within model limitations, the model is not yet incorporated in commercially available process simulation software.

As an example of a model which is based on fitting parameters to experimental data, a model is described that regards planarizing layer as a low pass filter. The starting topography of an IC with many steps and trenches is regarded as a high frequency signal and on the planarized surface only low frequencies are allowed. When the values of parameters in this model are based on large numbers of experimental data, the model can be very accurate and used for predicting the forms of planarized surfaces. Even though the model is computationally very simple it is not yet integrated in a process simulation program as a module.

In spite of different approaches and many attempts to validate simulation results with experimental data, simulations can not yet accurately predict the form of planarized surface, therefore new work and investigations of planarization processes are still necessary.

1. Uvod

Programi za simulacijo procesnih korakov lahko pri razvoju in modifikaciji procesa proizvodnje integriranih vezij prihranijo veliko časa in stroškov. Vzporedno z razvojem procesnih korakov zato običajno razvijajo tudi matematične modele za njihovo simulacijo. Dva pristopa sta k izgradnji simulacijskih modelov:

Prvi pristop izhaja iz obstoječih rezultatov meritev. Pri takem modelu se rezultati meritev in napovedi modela

navadno dobro ujemajo. Kadar pa se pojavi neskladje med rezultati meritev in napovedmi modela je potrebno popraviti parametre, ki nastopajo v modelu in navadno je nastajanje dobrega modela tega tipa iterativen postopek. Za dober model na osnovi rezultatov meritev potrebujemo statistično signifikantno število merilnih rezultatov, kar je lahko drago in zato opravičljivo le za izdelavo modelov, ki bodo koristili velikoserijski proizvodnji.

Drugi pristop izhaja iz podrobnega poznavanja fizikalnih osnov procesnega koraka. Pri izdelavi modela tega tipa

najprej poskusimo določiti vse veličine relevantne v nekem procesnem koraku in nato ugotoviti njihovo medsebojno delovanje. Za kontrolo tako nastalih modelov procesnih korakov nam služijo merilni rezultati. Pogosto je pri modelih, ki izhajajo iz fizikalnih osnov, problem v tem, da zaradi zapletenega dogajanja v njih nastopajo poenostavitve in je od poenostavitev odvisno kako dobro simulacije nekega procesnega koraka lahko opisuje realno dogajanje. Razlog za poenostavitve je seveda omejena zmogljivost računalnikov. Po drugi strani pa je res, da so današnji računalniki, kljub omejitvam, že povsem primerni za simulacije na osnovi fizikalnih modelov.

Obstoja več programov za simulacijo procesnih korakov proizvodnje integriranih elektronskih vezij (SAMPLE, SUPREM, SUPRA, DEPICT2, SPEEDIE) /1, 2/. Za nove modele je ugodno, če jih lahko vgradimo v obstoječe programe in zato modeli za nove procesne korake navadno nastanejo v obliki modulov. Seveda je pogoj za uspešno vgradnjo novega modula za simulacijo nekega procesnega koraka v obstoječi program, da je združljiv z njegovimi vhodnimi in izhodnimi.

Med izdelavo integriranega vezja na silicijevi rezini na njeno površino na različnih mestih nanašamo prevodne, izolacijske in druge plasti; zato dobiva površina rezine, ki je bila spočetka sicer ravna, vse bolj razgibano topologijo, ki otežuje izdelavo integriranega vezja. Postopek planarizacije pa zniža prehode med ravni-nami na površini tabletk (čipa). Največje višinske razlike na površini tabletk integriranega vezja nastanejo proti koncu njegove izdelave in za sledeče fotolitografske postopke ter postopke naprščevanje je ugodno, pri majhnih kritičnih dimenzijah integriranih vezij ($< 1,2 \mu\text{m}$) pa celo nujno, da je površina vezja uravnana.

2. Numerično modeliranje planarizacijskega postopka

Pri reševanju problematike planarizacije se je izoblikovalo več pristopov /3/. Različni pristopi se razlikujejo po nastanku in sestavi plasti za planarizacijo. Ena od možnih delitev je na fizične in fluidne metode. Pri fizičnih metodah planarizacije na površino silicijeve rezine najprej nanesemo dielektrično plast z ostrimi prehodi, ki jo nato z drugim fizičnimi procesi zgladimo (na primer nataljevanjem dopiranega silicijevega dioksida nanešenega iz plinske faze). Pri fluidnih metodah dielektrična plast nastane iz suspenzije ali raztopine reaktantov v ustreznem topilu, zato ima izhodiščna snov nizko viskoznost. Zaradi nizke viskoznosti lahko površinska napetost uravna površino dielektrične plasti. Površinski napetosti pomagamo še s centrifugalnim nanašanjem planarizacijskega materiala. Takšna planarizacija je, na primer, nanašanje tekočega stekla ali organskih planarizacijskih materialov.

Poznavanje fizikalnih dogajanj pri planarizaciji je že dovolj dobro, da ne predstavlja več bistvenih omejitev v primerjavi z zmogljivostmi računalnikov.

Kljub pomembnosti tankih plasti iz tekočega stekla za planarizacijo v proizvodnji integriranih vezij še vedno ni natančnega opisa prav vseh dogajanj pri nastajanju teh

plasti, ker se pri tem srečujemo s prevelikim številom pojavov, ki bi jih morali upoštevati. Primer do pred kratkim zanemarjenega vpliva je vpliv topologije prehodov v okolici obravnavanega prehoda na izravnavanje. Sprememba položaja in velikosti elementov vezja v okoliški topografiji prehoda ter spremembe kemijske zgradbe plasti pod tanko plastjo iz tekočega stekla, lahko spremenijo debelino nanešenega polimera pri planarizaciji s tanko plastjo iz tekočega stekla.

2.1 Model difuzije površine

Model difuzije površine je uporaben za napovedovanje oblike planarizirane površine vezja po tečenju močno dopiranega stekla (boro-fosfo-silikatno steklo, BPSG), nanešenega iz plinske ali tekoče faze. Osnovni mehanizem pri uravnavanju površine, ki je prekrita z dopiranim steklom, je delovanje površinske napetosti pri povišani temperaturi. Kot vsaka tekočina, tudi nataljeno steklo teži k temu, da bi imelo čim manjšo površinsko energijo. Pri tem modelu podrobna kinetika spreminjanja oblike površine ni pomembna, privzeta pa je difuzija materiala iz področij z višjo površinsko energijo v področja z nižjo energijo. Na ta način se površinska energija celotne površine zniža /4/. Na tem mestu ne bomo obdelovali natančnega mehanizma tega procesa, ampak le pokazali, da se da s sprejetimi predpostavkami narediti model, ki dobro opiše končno obliko površine vezja po planarizaciji.

Prednost tega modela pred drugimi je tudi v tem, da se njegovi vhodni in izhodni podatki zelo lahko prilagodijo obliki, ki jo uporablja priljubljeni program za simulacijo procesnih korakov SAMPLE. V programu SAMPLE so mnogi modeli za druge procesne korake, zato lahko enostavno simuliramo celoten kompleksen postopek planarizacije, ki vključuje tudi fotolitografske, depozicijske in korake jedkanja.

2.1.1 Osnovne predpostavke modela

Prosta energija površine je proporcionalna velikosti površine, kar opisuje naslednja enačba:

$$F = \gamma A \quad (1)$$

kjer je F prosta energija površine, γ površinska energija na enoto površine (površinsko napetost) in A površina. Lokalno ukrivljenost površine v izbrani točki (x, y) opišemo z dvema glavnima krivinskima radijema R_1 in R_2 , ki ležita v ravninah glavnih normalnih presekov (sta negativna pri konkavnih in pozitivna pri konveksnih površinah) /5/. Osi x in y ležita v oskulacijski ravnini v izbrani točki (x, y) in os z paralelno z binormalo. Površina infinitezimalno majhnega dela ukrivljene površine je torej $dx dy$. Če površini v točki (x, y) dodamo majhen del snovi se površina premakne v normalni smeri, to je v smeri z , krivinska radija v tej točki pa se spremenita. Kemijski potencial μ je definiran kot:

$$\mu = \frac{dF}{dN} = \Omega \gamma (1/R_1 + 1/R_2) \quad (2)$$

kjer je N število delcev in Ω molekularni volumen. V splošnem se krivinski radiji spreminjajo od točke do točke na površini tekočine, kar pomeni da so gradienti kemičnega potenciala na površini različni od nič in delujejo kot sile, ki povzročajo pretok materiala, kar opisuje enačba:

$$\bar{J} = \frac{(D\gamma\Omega^2)}{kT} \bar{V}_p (1/R_1(p) + 1/R_2(p)) \quad (3)$$

kjer je $\bar{J}$ volumski pretok materiala (na enoto dolžine), $\bar{V}_p$ površinska koncentracija molekul, D difuzijski koeficient površine, k Boltzmannova konstanta in T temperatura. Enačba (3) opisuje transport materiala po površini kot posledico sil, izvirajočih iz površinske energije. D in γ v enačbi nastopata le kot produkt in enačbo poenostavimo:

$$\bar{J} = \frac{D'}{kT} \bar{V}_p (1/R_1(p) + 1/R_2(p)) \quad (4)$$

kjer je $D' = D\gamma\Omega^2$ in predstavlja efektivni difuzijski koeficient površine. V limitnem primeru ravne površine, ko gresta krivinska radija proti $\pm\infty$, je pretok materiala po površini očitno enak nič. Robne pogoje lahko izberemo poljubno, parameter $(D'/kT)t$ pa je neodvisen, kjer je t celoten čas pretoka. Imenujejo ga "količino pretoka" in v njem so implicitno upoštevani vplivi temperature, sestave tanke plasti in drugi vplivi okolice.

Kot omenjeno, je model difuzije združljiv s programom SAMPLE. Posebej enostavno v sicer pogostem praktičnem primeru, ko je eden od obeh krivinskih radijev mnogo večji od drugega (cilindrična simetrija).

2.1.2 Modifikacija modela za planarizacijo s tanko plastjo tekočega stekla

Gornji model lahko do neke mere prilagodimo tudi za simulacijo planarizacijskega postopka s tanko plastjo iz tekočega stekla, če upoštevamo izhlapevanje topila med postopkom /11/. Opis izhlapevanja zahteva dva parametra. Tak model je omejen na simulacijo planarizacije gostih prehodov med ravninami vezja, kajti le pri taki topologiji lahko zanemarimo vplive rotacije silicijeve rezine. V simulacijskem modelu sta upoštevana dva procesa, ki imata nasprotno učinke na stopnjo planarizacije: ker je skrček v grobem proporcionalen volumnu tekočega stekla, je skrček plasti iz tekočega stekla večji v nižjih delih površine. Nasproten vpliv pa ima težnja, da zapolni nižje dele površine. Za natančen izračun vpliva izhlapevanja topila iz tekočega stekla bi morali rešiti dvodimenzionalno difuzijsko enačbo na neplanarni geometriji s premičnimi mejami. Problem je poenostavljen tako, da model predpostavlja s časom eksponentialno upadajočo hitrost krčenja volumna tekočega stekla. Poleg tega je zanemarjeno tudi lateralno krčenje plasti. Simulacija oblike površine planariziranega vezja s tanko plastjo iz tekočega stekla se začne s predpostavko, da je površina takoj po nanosu tekočega stekla ravna.

2.1.3 Modifikacije modela za opis ponovnega tečenja BPSG

Ponovno tečenje je postopek, pri katerem s povišano temperaturo zaoblamo ostro izjedkane prehode kontaktnih odprtin. Model za simulacijo tega postopka upošteva posebne robne pogoje, ki so za ta proces značilni. V kontaktnih odprtinah se stikata substrat ter rob plasti stekla in kot omakanja med njima je parameter, ki določa dinamiko procesa. Simulacija poteka v dveh korakih: najprej z nespremenljivo točko stika in s spremenljivim kotom ter nato z nespremenljivim kotom in pomično stično točko. Takša simulacija se dobro ujema z merjenimi rezultati /6/. Še posebej spodbudno je dobro ujemanje dejanskih rezultatov in simulacije razmer pri slabo poravnani kontaktni maski. V takih razmerah so stranice kontaktne odprtine izrazito nesimetrične.

2.1.4 Ocena uporabnosti modela

Model difuzije površine, kljub potrebnim poenostavitvam, dovolj natančno opisuje dogajanje na površini, ki jo želimo planarizirati. Uporaben je pri študiju geometrije planarizirane površine s tanko plastjo BPSG kot tudi s tanko plastjo iz tekočega stekla. Posebna prednost modela pred drugimi je to, da upošteva podatkovno strukturo komercialnega programa za simulacijo procesnih korakov SAMPLE in je zato takoj praktično uporaben.

2.2 Reološki model

Simulacijski modeli planarizacije, ki slone na teoriji mazanja, običajno opisujejo le dogajanje v radialnem prerezu površine (torej dve dimenziji) in opisujejo razmere za nehlapljive tekočine, vendar se jih da dopolniti, da upoštevajo tudi topološke lastnosti površine v tangencialni smeri. Zaradi velike viskoznosti do-pirane silicijevega dioksida, nanešenega iz plinske faze, model ni uporaben za simulacije tega načina planarizacije, pač pa je zelo uporaben za opis nanašanja mnogo manj viskoznega tekočega stekla. Posebno dobro opiše tanjšanje plasti tekočega stekla pri nanašanju /7/. Na obliko površine nanešenega tekočega stekla vplivajo površinska napetost, centrifugalna sila in debelina plasti tekočega stekla. Značilno je, da pri teh modelih na rezultate simulacij vplivajo tudi različne smeri prehodov med ravninami v radialni smeri (iz niže ležeče ravnine na višjo ali obratno). Novi, v nadaljevanju opisani model, do nekoliko upošteva tudi hlapnost planarizacijskega materiala, uporaba starejših tovrstnih modelov pa je nekoliko vprašljiva, ker niso podrobno raziskali njihovih omejitev in veljavnosti.

2.2.1 Osnovne predpostavke modela

Model simulira stopnjo planarizacije (SP), ki je definirana kot:

$$SP = \left(1 - \frac{\Delta d}{v}\right) \times 100\% \quad (5)$$

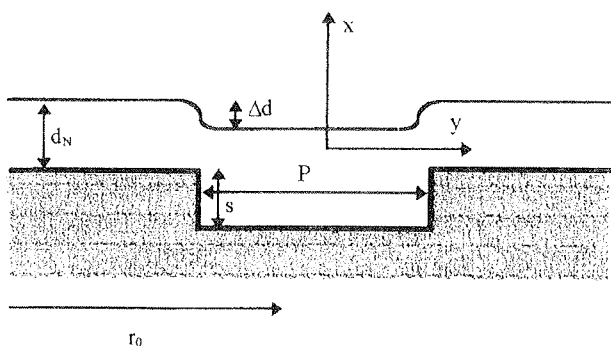
kjer je Δd največja deviacija od nominalne debeline plasti planarizacijskega materiala (n. pr. tekočega

stekla) in v višina prehoda med plastmi (glej sliko 1). Za kvantitativno oceno prevladujočega vpliva pri oblikovanju površine je v modelu definiran brezdimenzijski parameter ω^2 , razmerje med centrifugalno silo (F_c) in površinsko napetostjo (F_γ), ki delujeta na del planarizacijskega materiala:

$$\omega^2 = \frac{F_c}{F_\gamma} = \frac{\rho \omega^2 L^3 r_0}{\gamma d_N} \quad (6)$$

kjer je ρ gostota tekočine, ω kotna hitrost, L širina prehoda, r_0 razdalja prehoda od osi vrtenja rezine in σ površinska napetost raztopine planarizacijskega materiala.

Z reološkim modelom simuliramo tudi značilno brazdo, ki se pojavi v plasti planarizacijskega materiala nekoliko za prehodom iz višje na nižjo ravnino vezja ter grbo, ki sledi obratnemu prehodu. Oba pojava so opazili pri raziskavah, kjer so plast tekočega stekla opazovali med nanašanjem /8/. Ujemanje rezultatov simulacije in meritev je dobro pri prehodih, ki so bili široki glede na njihovo pogostost.



Slika 1: Značilni prehod med ravninami, ki ga je potrebno planarizirati.

P je širina presledka, s višina prehoda med ravninama vezja, d_N nazivna debelina plasti planarizacijskega materiala, Δd maksimalna deviacija debeline plasti od nazivne debeline in r_0 radialna oddaljenost prehoda med ravninama od središča rezine (osi vrtenja).

Opomba: Radi bi opozorili, da je koordinatni sistem v tem primeru orientiran, glede na površino, drugače kot v prejšnjem.

2.2.2 Fizikalna izhodišča za model

Tok planarizacijskega materiala po površini rezine v reološkem modelu planarizacije opisujeta kontinuitetna enačba in momentna enačba (Navier-Stokesova enačba):

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (7)$$

in

$$\eta \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \eta \mathbf{g} + \nabla^2 \mathbf{v} \quad (8)$$

kjer je $\mathbf{v}$ vektor hitrosti v tekočini, p je tlak v sistemu, $\mathbf{g}$ je vektor sile teže in η je viskoznost tekočine /9/.

Ker so opazovani prehodi med ravninami vezja običajno ozki v primerjavi z njihovo oddaljenostjo od osi vrtenja ($L \ll r_0$), lahko enačbi poenostavimo in ju rešujemo le v dveh dimenzijah. Poleg tega zaradi ozkega prehoda med ravninami vezja lahko zanemarimo spreminjanje centrifugalnega pospeška po širini prehoda - torej predpostavimo, da se centrifugalna sila po celi širini prehoda ne spreminja /10/. Dobimo sistem diferencialnih enačb:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right) + \rho \omega^2 r_0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) + \rho g \end{aligned} \quad (11)$$

Pred reševanjem enačbe transformiramo v brezdimenzijsko obliko. Hkrati z normiranjem ocenimo tudi vpliv posameznih členov enačb za tipične vrednosti, ki se pojavljajo pri simulaciji nanašanja tekočega stekla; nekateri členi v enačbah so namreč dovolj majhni, da jih v nadaljnjem obravnavanju lahko zanemarimo. Razdalje v smeri x so normirane z s , ki označuje višino prehoda med ravninami vezja. V starejših modelih so bile razdalje v normalni smeri na ravnino rezine normirane z nazivno debelino plasti tekočega stekla (d_N). Po razmisleku hitro vidimo, da vpliva na tok tekočega stekla višina prehoda med ravninami vezja in ne njegova nazivna debelina, zato je za normiranje bolj primerna višina prehoda med ravninami. Zaradi drugačnega normiranja je izraz za kvocient med centrifugalno in površinsko silo nekoliko drugačen kot v enačbi (6) - v novi obliki je to rotacijsko Bondovo:

$$B = \frac{\rho \omega^2 r_0 L^3}{\gamma s} \quad (12)$$

Reynoldsovo število (Re), ki izraža relativni vpliv vztrajnostnih sil glede na viskozne, je:

$$Re = \frac{\rho^2 \omega^2 r_0 d_N^2 s^2}{\eta^2 L} \quad (13)$$

Če v izraz vstavimo tipične vrednosti (podane v tabeli 1) za planarizacijo prehodov med ravninama integriranih vezij s tekočim steklom, ugotovimo, da so vrednosti Reynoldsovega števila mnogo manjše od 1, kar pomeni, da je tok tekočega stekla po površini rezine silicija laminaren.

Tabela 1: Tipične vrednosti parametrov za reološki model planarizacije mikroelektronskih vezij

Spremenljivka	oznaka	tipična vrednost
višina prehoda med ravninama vezja	s	1-5 μm
širina prehoda med ravninama vezja	L	1-100 μm
gostota tekočega stekla	ρ	1 g/cm^3
kotna hitrost	ω	3000-8000 vrt./min
oddaljenost prehoda od osi vrtenja	r_0	2,5-10 cm
nazivna debelina plasti tekočega stekla	d_N	1-10 μm
viskoznost	η	0,1-10 $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
koeficient površinske napetosti	γ	0,02-0,04 kg s^{-2}

2.2.3 Ocena uporabnosti modela

V primerjavi s starejšimi modeli, pri katerih je za normalizacijo razdalj v normalni smeri glede na površino rezine služila nominalna debelina plasti planarizacijskega materiala, je nova normalizacija dala dobre rezultate v širšem področju pogojev nanašanja tekočega stekla. Model zelo natančno opisuje dogajanje pri nanašanju tekočega stekla, njegovo utrjevanje pa le približno. Huda pomanjkljivost sicer obetavnega pristopa je, da (po dostopnih podatkih) še ni doživel potrditve kot osnova simulacijskega modula kakega programa za modeliranje procesnih korakov. Druga pomanjkljivost predstavljenega modela je, da ni uporaben za simulira-

nje planarizacije s tanko plastjo dopiranega silicijevega dioksida, nanešenega iz plinske faze.

2.3 Model nizkega sita

Omenimo še tretji pristop k modeliranju planarizacijske plasti, ki planarizacijsko plast obravnava kot nizko sito za prehode. Tak pristop je še najbližji elektrotehniškemu pristopu analize vezij z metodo "črne škatle". Pri problemu poznamo vhodne podatke (topografijo vezja) in želene rezultate (planarizirano topografijo vezja). S planarizacijsko plastjo moramo priti od vhodnih podatkov do želenega rezultata. Lastnosti planarizacijske plasti so ekvivalentne prevajalni funkciji pri reševanju problemov v vezjih /11/.

2.3.1 Osnovni princip modela

Planarizacijske lastnosti tekočega stekla modeliramo z dvema parametroma. Prehodi med ravninama vezja imajo, glede na njihove različne gostote, tudi različne prostorske frekvence in zaporedje prehodov lahko obravnavamo kot periodičen signal. Planarizacijska plast je namenjena filtriranju visokih frekvenc tega signala. En parameter predstavlja planarizacijske lastnosti tekočega stekla pri tečenju, z drugim pa modeliramo gostoto prehodov /11/. Konkretno vrednosti parametrov dobimo po primerjavi merjenih rezultatov in rezultatov simulacij. S spreminjanjem vrednosti parametrov prilagajamo in izboljšujemo ujemanje napovedi modela z merilnimi rezultati.

2.3.2 Ocena uporabnosti modela

Pri tem modelu je bistveno prilagajanje parametrov modela na eksperimentalne podatke. Zaradi takega določanja parametrov je to empirični model, ki se lahko izkaže šele v razmerah, ko je na voljo veliko eksperimentalnih podatkov. V takem primeru je model primeren tudi za razvijanje novih postopkov. Model je uporabljen kot samostojen program, ki simulira postopek planarizacije in bi se ga verjetno dalo hitro vključiti v obstoječe programe, ki simulirajo tudi druge procesne korake. Po drugi strani pa model, ki temelji na prilagajanju parametrov, ni zanesljiv v vseh primerih. Če nek empirični model za procesni korak vključimo med modele za ostale procesne korake, med katerimi je še kakšen empiričen model, je izredno težko ugotoviti napovedi katerega modela se ne ujema z meritvami.

2.4 Prihodnost modelov procesa planarizacije

Primerjava vseh treh pristopov kaže, da so rezultati simulacij po vseh treh metodah uporabni, vendar ne brez zadržkov in omejitev. Trenutno ni modela, ki bi bil splošno uporaben za simuliranje vseh načinov planarizacije. Zaradi velikega zanimanja mikroelektronske industrije v zadnjem letu (1994) nastaja več modelov za kemo-mehansko poliranje. Modeli, ki temeljijo na fizikalnih osnovah kemo-mehanskega poliranja se bistveno razlikujejo od modelov za planarizacijo s tankimi plastmi tekočega stekla ali dopiranega silicijevega dioksida. Zaradi novega načina planarizacije, ki deluje na povsem drugih mehanizmi, se je področje za simulacije planarizacije razširilo in ostaja še naprej odprto.

Ta prispevek temelji na delu doktorske disertacije, ki jo je prvi avtor predložil Fakulteti za elektrotehniko in računalništvo v Ljubljani.

3. Literatura

- /1/ Chen J. Y., "CMOS Devices and Technology for VLSI", pp. 38-70, Prentice-Hall Inc., USA, 1990
- /2/ Pack R. (TMA), Bariya A. (Stanford Univ.), Predavanje "Etching Simulators", PEUG, Palo Alto, USA, 12. 4. 1990
- /3/ Skidmore K., "Techniques for Planarizing Device Topography", Semiconductor International, Vol. 11, No. 5, pp. 114-119, 1988
- /4/ Chaung T. J., Rice J. R., Acta Met., Vol.21, pp.1625-1628, 1973
- /5/ Bronštejn J. N., Semendjajev K. A.: "Matematični priročnik", šesti ponatis, p. 298, 1980
- /6/ Leon F. A., "Numerical Modeling of Glass Flow and Spin-on Planarization", IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst., Vol. 7, No. 2, pp. 168-173, USA, 1988
- /7/ Gralenski N., "Advanced APCVD: BPSG Film Quality and Production Reliability Report", Watkins-Johnson Company report
- /8/ Peurrung L. M., Graves D. B., "Film Thickness Profiles Over Topography in Spin Coating", J. Electrochem. Soc., Vol. 138, No. 7, pp. 2115-2124, USA, 1991
- /9/ Munson B. R., Young D. F., Okishi A., "Fundamentals of Fluid Mechanics", J. Wiley & Sons, NY, USA, 1994
- /10/ Parekh N., Allen R., Yao W., Fuls R., Jang C., "Plasma Planarization Utilizing a Spin-on Glass Sacrificial Layer", V-MIC Conference Proceedings, p. 221, 1987
- /11/ White L. K., "Approximating Spun-On, Thin Film Planarization Properties on Complex Topography", J. Electrochem. Soc. Solid State Science and Technology, Vol. 132, No. 1, pp. 169-172, USA, 1985

mag. Boštjan Gspan, dipl. ing.
prof. dr. Radko Osredkar
Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo
Laboratorij za mikroelektroniko
Tržaška 25
61000 Ljubljana
tel.: +386 61 176-8358
fax: +386 61 273-578

Prispelo (Arrived): 10.07.95

Sprejeto (Accepted): 29.08.95