

DIFUZIJSKA ZAPORA TiN V MIKROELEKTRONIKI

A. Žabkar, M. Godec, P. Panjan, B. Navinšek

V prispevku je na kratko prikazana problematika difuzijskih zapor v mikroelektronskih vezjih VLSI in dejavnost na tem področju, ki poteka v okviru Inštituta J. Stefan.

Zanesljivost mikroelektronskih vezij je eden izmed najpomembnejših parametrov v sodobnih tehnologijah, zato ji posvečamo veliko pozornost že pri načrtovanju in izdelavi. Zmanjševanje dimenzij posameznih elementov v vezjih zelo obsežne integracije (VLSI) je že poseglo v področje okrog 1 μm in celo manj. S tem so povezane tudi manjše debeline plasti, oz. zahteve po drugačnih lastnostih materialov za te plasti. Klasičen primer je metalizacija silicijevih rezin z aluminijem. Tako aluminij, kot silicij odlično ustrezata vsak za svoj namen, nista pa stabilna, če sta v neposrednem stiku.

Elektromigracijske probleme lahko delno ublažimo s primesmi bakra in silicija. Danes v ta namen pretežno uporabljajo zlitini AlCu (4 %) Si (1 %) in AlSi (1 %). Evtektična temperatura za sistem Al-Si je 851 K. Že pri nizkotemperaturni toplotni obdelavi pride do reakcije. Na meji se silicij raztaplja v aluminiju. Difuzija silicija v aluminiju privede do povečanja kontaktne upornosti, do prebojev (spikes) in v končni fazi do porušitve kontaktov.

Problema se lahko lotimo tudi na bolj radikalen način, s plastjo, ki naj prepreči mešanje silicijeve podlage s prevodno plastjo aluminijske. Med kandidati za difuzijsko zaporo so bili v preteklosti deležni velike pozornosti razni silicidi (n.pr. PtSi, Pd₂Si, NiSi, TiSi, MoSi₂), ki pa že pri 700 K ne morejo preprečiti difuzije vzdolž meja zrn v silicidni plasti. Zadnja faza v razvoju difuzijskih zapornih plasti za VLSI vezja so intermetalne spojine, najboljše je zlitina WTi (10 %), ki so v kombinaciji s silicidi uporabne do 770 K in spojine težko taljivih kovin. Boridi, karbidi in nitridi refraktornih kovin so

kemijsko in termodinamsko zelo obstojne spojine. Odlikuje jih dobra električna prevodnost (TiN je na primer dvakrat boljši prevodnik kot čisti titan), visoko tališče, kemijska inertnost in močne atomske vezi. Njihove lastnosti so znane že dlje, šele v zadnjih letih pa je rešen problem nanašanja plasti. Najugodnejša tehnika je reaktivno naprševanje.

Difuzija v tankih plasteh se loči od "navadne" v več pogledih (1). Zaradi majhne velikosti zrn so vsi atomi relativno blizu proste površine. Število meja zrn in strukturalnih defektov je zelo veliko. To pa so glavne poti za difuzijske procese. Pogosto so v takih plasteh mehanske napetosti in nečistoče, oboje kot posledica tehnološkega postopka. Difuzijo pospešujejo povišana temperatura, električne napetosti in velike gostote električnega toka. Kritične so majhne debeline. Pri masivnih materialih lahko difuzijo do globine nekaj nm zanemarimo, v tankoplastnih strukturah pa jo seveda moramo upoštevati.

Tankoplastne strukture so torej temperaturno nestabilne in skušajo doseči ravnotežno stanje s transportom snovi in s kemijskimi reakcijami med diskretnimi plastmi. Difuzijo poganjajo koncentracijski, temperaturni in električni gradienti. Pri nizkih temperaturah prevladuje difuzija po mejah zrn in dislokacijah, pri visokih temperaturah pa mrežna difuzija. V že omenjenem primeru metalizacije silicija z aluminijem poteka difuzija že precej pod evtektično temperaturo. Posledica je tvorba intermetalnih spojin, puščanje tokov in kratki stiki.

Da bi preprečili mešanje posameznih plasti, mora biti difuzijska zapora "gosta" in termodinamsko stabilna. Dobro se mora oprijemati plasti, ki jih loči; imeti mora dobro električno in toplotno prevodnost, enakomerno debelino in strukturo, mora biti odporna na mehanske in toplotne obremenitve. Zelo važno je dobro prekrivanje stopnice (odsotnost mikrorazpok). Za praktično uporabo je seveda pogoj tudi ustreznost za nanašanje in skladnost

s tehnološkimi postopki (na primer fotolitografija) v LSI in VLSI tehnologiji. Razumljivo je torej, da vseh naštetih zahtev ne moremo izpolniti v željeni meri z enim samim materialom in moramo pristati na kompromis.

Med najbolj obetavnimi materiali je titanov nitrid TiN. Uporablja se za izboljšanje Schottkyjevih kontaktov (pretežno v sistemih Al-TiN-TiSi₂-Si in Al-TiN-Si), v tehnologiji Si sončnih celic (na primer shema Ag-TiN-Si namesto Ag-Pd-Ti-Si) pa tudi v najmodernejših tehnologijah na osnovi InP in GeAs (na primeru Au-TiN-InP in Ag-TiN-Pt-GaAs).

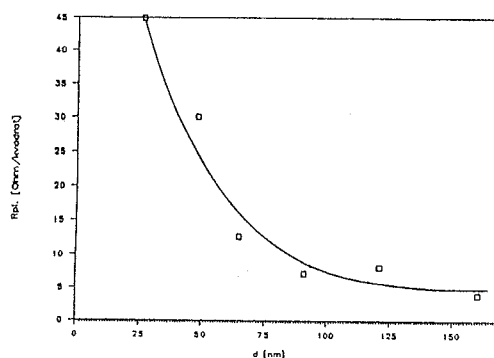
Titanov nitrid je t.i. pasivna zapora (2). Takšne zapore so kemijsko inertne in imajo nizko topnost za oba materiala, ki ju ločujemo.

Lastnosti TiN plasti so močno odvisne od izbranega postopka in od okoliščin med nanašanjem (3). Za praktičen uspeh je treba pri vsaki napravi določiti optimalne parametre nanašanja. Najpogosteje nanašajo TiN za difuzijske zapore z reaktivnim naprševanjem v magnetronskih sistemih. Optimalni parametri za nanašanje plasti so kljub številnim aplikacijam še vedno predmet zelo obsežnih in temeljitih raziskav (3-6). Ključne lastnosti so predvsem stabilnost, nizka kontaktna upornost in selektivnost pri jedkanju. Za difuzijsko zaporo je najustreznejši TiN s stehiometrijsko sestavo. Električna upornost ima takrat minimum. Primesi kisika znatno povečajo kontaktno upornost plasti, poveča se difuzija skozi plast, zmanjša pa se število odpovedi pri ciklični toplotni obremenitvi (6).

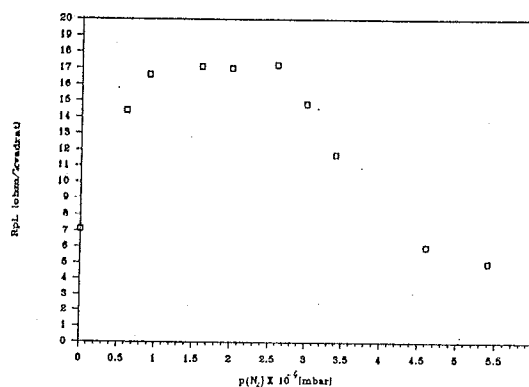
Tlačne napetosti v plasteh povzročajo največ težav; še posebno velike so, če je v plasti nekaj faze Ti₂N.

Na Institutu "J. Stefan" se že nekaj let ukvarjamo z nanašanjem titanovega nitrida. Predmet naših raziskav so lastnosti difuzijske zapore v metalizaciji silicijevih rezin in osnovni parametri nanašanja za doseganje optimalnih karakteristik (7,8). Osnovna tehnika nanašanja, ki jo uporabljamo, je naprševanje s plazemsko napravo Sputron. Velika fleksibilnost naprave odtehta nekoliko manjšo hitrost nanašanja (v primerjavi s planarnim magnetronom). Velik del raziskav poteka v tesnem sodelovanju z Iskro - Mikroelektroniko (9).

Na sliki 1 je prikazana plastna upornost TiN v odvisnosti od debeline, na sliki 2 pa v odvisnosti od delnega tlaka dušika med nanašanjem. Masiven TiN (sintiran) ima specifično upornost 22 $\mu\Omega\text{cm}$, naše napršene plasti pa so imele 62,5 $\mu\Omega\text{cm}$, kar je manj kot

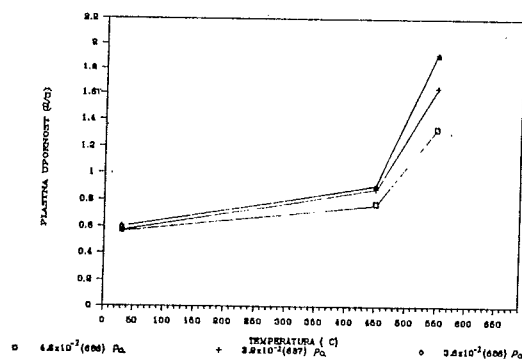


Sl. 1



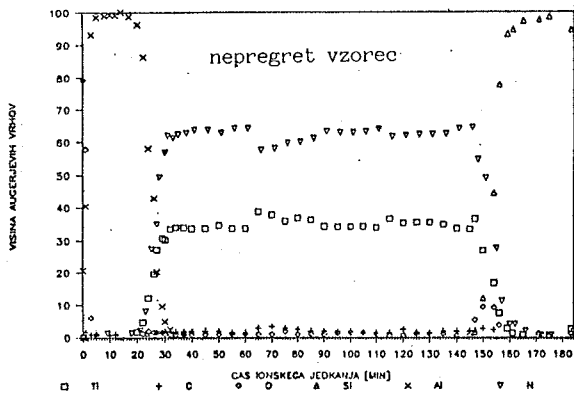
Sl. 2

pri titanu (88,7 $\mu\Omega\text{cm}$). Tankoplastno strukturo Si-TiN-Al smo pregrevali v dušikovi atmosferi z dodatkom vodika (6 %). Pregrevanje 30 min. na 723 K je eden izmed standardnih postopkov pri izdelavi integriranega vezja. Na sliki 3 je odvisnost plastne

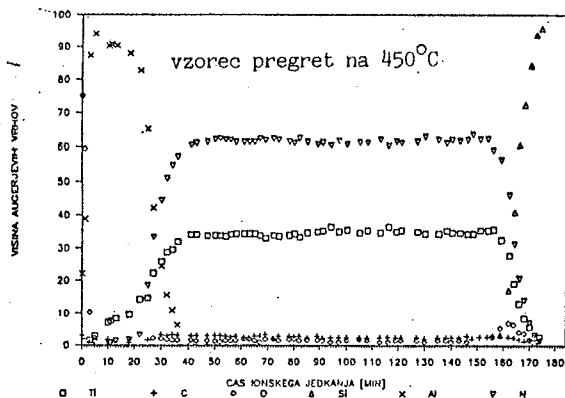


Sl. 3

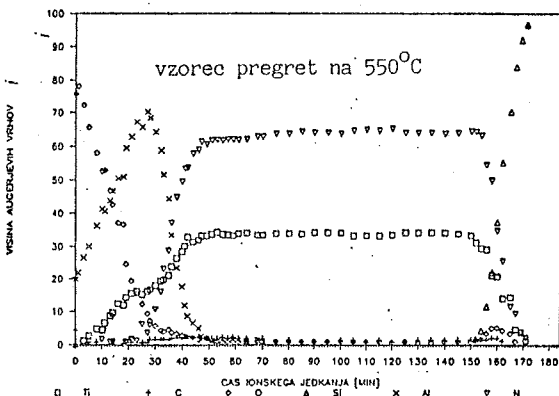
upornosti od temperature pregrevanja. Parameter je delni tlak dušika med nanašanjem. Delna difuzija aluminija v plasti TiN in povečana vsebnost kisika sta glavna razloga za povečano plastno upornost. Analiza globinskih profilov z Augerjevo spektrometrijo (na Institutu za elektroniko in vakuumsko tehniko) je poka



Sl. 4



Sl. 5



Sl. 6

zala, da TiN zapora zdrži celo polurno segrevanje na 820 K. Na slikah 4, 5 in 6 so prikazani globinski profili za različne obdelane strukture na Si rezinah. Debelina TiN zapore je tu 125 nm. Vidimo lahko, da potekajo med pregrevanjem spremembe le na mejnih površinah, predvsem na meji Al/TiN. Sama zapora ohrani lastnosti tudi po pregrevanju 30 min. na 820 K. Na polikontaktnih uporovnih verigah smo dosegli 25 - kratno zmanjšanje kontaktne upornosti (25 Ω \rightarrow 1 Ω na kontakt). Na difuzijskih kontaktnih verigah so se pojavile poškodbe ob večjih stopnicah v vezju, kjer smo naprševali tudi aluminij. Kompatibilnosti postopkov bo zato treba posvetiti še dodatno pozornost.

Vzporedno potekajo v odseku za tanke plasti in površine na IJS tudi raziskave drugih nitridov (ZrN je kandidat za zaporno plast, TaN je zanimiv za visokostabilne upore) in razvoj postopkov za reaktivno naprševanje.

Literatura:

1. R.W. Balluffi and J.M. Blakely, TSF 25 (1975), 363
2. M.A. Nicolet, TSF 52 (1978), 415
3. H.P. Kattelus et. al., JVST A4 (4) (1986), 1850
4. J. Stimmel, JVST B4 (6) (1986), 1377
5. J.E.Sundgren, TSF 40 (1985), 6090
6. N. Kumar et al., TSF 153 (1987), 287
7. B. Navinšek, MIEL - XIII, Ljubljana 1985
8. A. Žabkar, P. Panjan in B. Navinšek, Zbornik SD-86, Otočec 1986, str. 221
9. M. Godec, Diplomsko delo na FNT - Montanistika, Ljubljana 1987

Dr. Anton Žabkar

Peter Panjan, dipl. ing.

Dr. Boris Navinšek

Institut Jožef Stefan, Ljubljana

Matjaž Godec, dipl. ing.

ISKRA MIKROELEKTRONIKA

Ljubljana