

koji dovode do strukturalnih i hemijskih promena kontakata. U tom smislu granica aluminijum-silicijum se ne može smatrati stabilnom.

Nestabilnost kontakta aluminijum-silicijum proistice iz osobine aluminijuma da gradi sa silicijumom čvrste rastvore. Rastvorljivost silicijuma u aluminijumu zavisi od temperature i povećava se do granice od 1,65% na 577^oC [1]. U toku procesiranja IK neizbezan je proces odžarivanja metalnog filma u cilju poboljšanja odhezije i smanjenja naprezanja u deponovanom filmu, koji se obično vrši u temperaturnom intervalu od 400-500^oC [2]. U toku tog procesa i dolazi do oštećenja kontakta aluminijum-silicijum. Oštećenja se pre svega odnose na stvaranje jamica u površinskom sloju monokristala silicijuma, ali se u toku hlađenja zbog smanjene rastvorljivosti izdvaja višak silicijuma u vidu manje-više diskontinualnog sloja [3].

Kinetiku formiranja jamica je detaljno proučavao Vaidya [4]. On je našao da je gustina jamica kod uzoraka odžarivanih na 450^oC u trajanju od 30 min. u atmosferi H₂ u granicama od 2-5 x 10⁷ cm⁻². Srednja veličina jamica je 1,2 μm i linearno zavisi od kvadratnog korena vremena odžarivanja. Vaidya nije merio dubinu jamica, ali navodi podatak da je ona 1,4 puta manja od dužine ivice jamice merene na površini substrata. To znači da je dubina jamica bila manja od 1 μm. Kako je dubina pn-spojeva kod savremenih IK manja od 5 μm nametnuta je potreba uvođenja novih materijala. Vrlo efikasan način sprečavanja formiranja jamica je korišćenje legura aluminijuma koje sadrže silicijum. Tako Learn [5] navodi da se pri odžarivanju legure Al/4% Cu/o,8% Si čak i posle dva časa odžarivanja na 500^oC ne stvaraju jamice dublje od 0.25 μm. Kod legure Al/4% Cu ova dubina se postiže već posle 5 min. Ali primenu ovih legura često ograničava povećana kontaktna otpornost posebno na n⁺-kontaktima, kao i povećana specifična otpornost u odnosu na čist aluminijum [6,7].

Primenu titana kao barijere sa gledišta metalizacije IK analizirao je veći broj autora. Tako se navodi da je primenom titana kao barijernog sloja između aluminijuma i silicijuma poboljšana elektromigraciona otpornost, smanjena veličina i gustina "hillock"-ova i ostvarena termička stabilnost kontakta metal-silicijum [6]. Međutim, Bower [7] je našao da stabilnost kontakta u velikoj meri zavisi od debljine sloja titana. U toku odžarivanja se stvara sloj TiAl₃ između titana i aluminijuma, koji kada dodje u kontakt sa silicijumom slično aluminijumu. Bower je istražio i kinetiku formiranja ovog materijala

debljina sloja titana (X) koji se odnosi na aluminijumovu za vreme (t) na temperaturi (T) jednaka:

$$X^2 = D_0 \cdot \exp(E_a/kT) \cdot t \quad /1/$$

gde je $D_0 = 0,15 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$, a $E_a = 1,85 \text{ eV}$.

Kinetikom formiranja TiAl_3 su se bavili i Huang i Wittmer [8] i našli da je $D_0 = 2,9 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$, a $E_a = 2,05 \text{ eV}$.

Nisu, međutim, navedeni podaci o stepenu oštećenja silicijuma usledi dejstva TiAl_3 . U ovom radu su prilazani rezultati takvih istraživanja, a procena stepena oštećenja je data na osnovu gustine i veličine jamica koje se formiraju u silicijumu.

2. EKSPERIMENT

Pripremljene su dve grupe uzoraka i označene sa A i B.

Uzorci A. Na pločicama silicijuma orijentacije $\langle 100 \rangle$, prethodno oksidovanim i obradjenim fotolitografski, deponovan je aluminijum debljine $2 \mu\text{m}$. Deponicija je vršena pomoću elektronskog topa u uređaju AIRCO TEMESCAL 2550 pri vakuumu od $2 \times 10^{-3} \text{ Pa}$, brzinom od $4,5 \text{ nm} \cdot \text{sec}^{-1}$. Uzorci su zatim odžarivani na 100°C , odnosno 500°C u trajanju od 10 i 60 min u atmosferi N_2/H_2 . Aluminijum je zatim uklonjen rastvaranjem u smeši $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}$.

Uzorci B. Na pločicama silicijuma orijentacije $\langle 100 \rangle$, pripremljenim pre deponovanja metala kao i uzorci A, deponovan je sloj titana debljine 40 nm brzinom od $3 \text{ nm} \cdot \text{sec}^{-1}$, a zatim sloj aluminijuma debljine $1,8 \mu\text{m}$ brzinom od $4,5 \text{ nm} \cdot \text{sec}^{-1}$, oba pri vakuumu od $2,5 \times 10^{-4} \text{ Pa}$. Uzorci su zatim odžarivani na 400 , 450 i 500°C u trajanju od 10 i 60 min. Sloj aluminijuma je zatim uklonjen kao u prethodnom slučaju, a sloj TiAl_3 i sloj Ti u rastvoru $\text{HF}/\text{H}_2\text{O}$.

Veličina jamica je određivana pomoću optičkog mikroskopa metodom udvajanja likova. Gustina jamica je određivana prebrojavanjem unutar otvora u oksidnom filmu poznate površine.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Uzorak A

Kod uzoraka označenih sa A utvrđene su jamice u svim slučajevima. Veličina i gustina jamica je bila različita, zavisno od uslova odžarivanja. Ovi rezultati su u punoj saglasnosti sa rezultatima koje je objavio Vaidya [4]. U

Uzorak B

Kod uzoraka sa slojem titana nisu uočeni bilo kakvi defekti kada je temperatura odžarivanja 400 i 450°C, a vreme 10 min. U svim ostalim slučajevima gustina jamica je bila istog reda veličine. U tabeli 2 su prikazane izmerene vrednosti gustine i veličine jamica, a na slici 2 fotografije izgleda površine silicijuma posle uklanjanja oba metalna filma.

Tabela 2

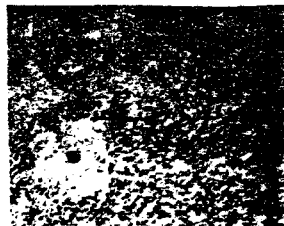
t T °C	10 min		60 min	
	G(cm ⁻²)	L(μm)	G(cm ⁻²)	L(μm)
400	-	-	<10 ⁵	0,35 - 0,85
450	-	-	5,84 × 10 ⁴	1,00 - 2,10
500	0,94 × 10 ⁴	4,2 - 6,8	1,00 × 10 ⁴	4,1 - 7,5



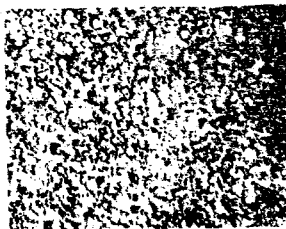
a. 400°C, 60 min.
(uvećanje 128x)



b. 450°C, 60 min.
(uvećanje 128x)



c. 500°C, 10 min.
(uvećanje 128x)



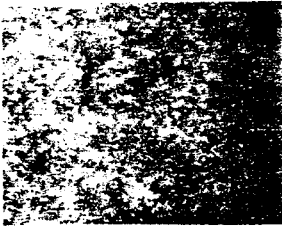
d. 500°C, 60 min.
(uvećanje 128x)

S1.2 Fotografije površine silicijuma posle odžarivanja i uklanjanja metalnih filmova

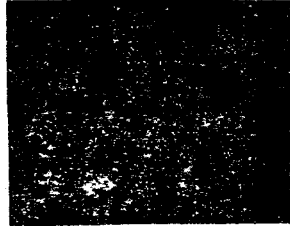
tabeli 1 su prikazane izmerene vrednosti gustine (G) i sirine ivice jamice (L), merene na površini silicijuma, a na slici 1 su prikazane fotografije površine silicijuma posle rastvaranja silicijuma.

Tabela 1

T °C \ t	10 min		60 min	
	G (cm ⁻²)	L (μm)	G (cm ⁻²)	L (μm)
400	1,46x10 ⁷	0,6	1,36x10 ⁶	0,7 - 1,7
500	-	0,7 - 1,5	2,46x10 ⁷	1,5 - 2,5



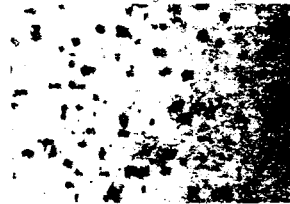
a. 400°C, 10 min.
(uvećanje 320x)



b. 400°C, 60 min.
(uvećanje 320x)



c. 500°C, 10 min.
(uvećanje 320x)



d. 500°C, 60 min.
(uvećanje 320x)

S1.1. Fotografije površine silicijum
posle odzariivanja i uklanjanja
metalnog filma

Dužina jamica je izračunata na osnovu sirine ivice jamica i iznosi od 0,9 - 1,6 μm za uzorke odzarena na 500°C u trajanju od 60 min, a 0,5 - 1,2 μm za uzorke odzarena na 400°C u trajanju od 06 min. Za temperaturu odzariivanja od 500°C i vreme od 10 min. je takodje odredjena gustina jamica ciji je red velicine bio 10⁹ cm⁻², ali je kod tih uzoraka izdvojeni silicijum ometao prebrojavanje jamica, pa je i greska velika. Zbog toga rezultat nije naveden u tabeli.

U svim ostalim slučajevima se formiraju jamice kod uzoraka odžarivanih na 500°C se uočava katastrofalno razaranje površinskog sloja silicijuma. Gustina i veličina jamica se odnose samo na one jamice oko kojih se uočava krug unutar koga su oštećenja nešto manja (sl.2c). Većina tih jamica ima zaravnjeno dno, što se na fotografijama ne može da uoči. Nema jamica pravougaonog oblika, karakterističnih za za Al-(100)Si kontakte. Ako se uporede gustine jamica za uzorke A i B, odžarivane pod istim uslovima, vidi se veliko smanjenje gustine jamica od 100 -1000 puta, ali je sa porastom temperature veličina jamica kod uzoraka B znatno veća.

U tabeli 3 su prikazane izračunate vrednosti debljine titana koji reaguje sa aluminijumom gradeći TiAl_3 u zavisnosti od uslova odžarivanja. Izračunavanja su vršena na osnovu podataka datih u referenci [7].

Tabela 3

T	t	10 min.	60 min.
	400°C		11,2 nm
450°C		33,1 -"-	79,4 -"-
500°C		87,1 -"-	213,8 -"-

Iz ovih podataka se vidi da je samo na 400°C debljina titana od 40 nm dovoljna da spreči formiranje jamica. Već na 450°C to važi samo vreme odžarivanja od 10 min. Formiranje jamica kod uzoraka B na temperaturi od 400°C i vreme odžarivanja 60 min. i njihov izostanak na temperaturi od 450°C i vreme od 10 min. ukazuje na neuniformno gradjenje TiAl_3 , zbog čega do kontakta sa silicijumom ne dolazi frontalno već na pojedinim mestima gde se formiraju najveće jamice. Kada sa aluminijumom izreaguje sav titan razaranja površine silicijuma postaju katastrofalna.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata može da se zaključi da je titan dobra barijera sa gledišta metalizacije kontakata kod IK, ali da pri tome strogo mora da se vodi

računa o uniformnosti debljine titana kao i efektima u njemu. Isto tako ne bi trebalo da se odričivamo od nižih temperatura iznad 150°C , jer to zahteva veće debljine titana, što uzrokuje druge probleme koji nisu tema ovog rada.

L I T E R A T U R A

1. R.P.Elliott, Constitution of Binary Alloys, New York, Mc Graw-Hill Book Company, 1965
2. J.M.Poate, K.N.Tu and J.W.Mayer, Thin films: interdiffusion and reactions, New York, John Sons, 1978
3. G.J.van Gorp, "Diffusion-limited Si precipitation in evaporated Al/Si films", J.Appl.Phys., vol.44, pp 2640-2650, maj, 1973
4. S.Vaidya, "Pit formations at Al/(100)Si contact windows", J.of Electronic Materials, vol.10, pp 337-348, februar, 1981
5. A.J.Learn, "Aluminum alloy film deposition and characterization", Thin Solid Films, vol.20, pp 261-279, 1974
6. M.M.Farahani, T.E.Turner and J.S.Barnes, "Evaluation of Titanium as a Diffusion Barrier Between Aluminum and Silicon for $1.2\ \mu\text{m}$ CMOS Integrated Circuits", J.Electrochem.Soc., vol.134, pp 2835-2845, novembar, 1987
7. R.W.Bower, "Characteristics of aluminum-titanium electrical contacts on silicon", Appl.Phys.Lett., vol.23, pp 99-101, july, 1973
8. H.C.W.Huang and M.Wittmer, in Thin Films and Interfaces, vol.25, p 157, MRS Symposium, Proceedings, New York, 1984

