

SILICIJEVE USMERNIŠKE DIODE

B. Kren, I. Šorli, R. Ročak
 MIKROIKS d.o.o., Ljubljana, Slovenija
 S. Stradar, Z. Zupančič
 Iskra SEMICON d.d., Trbovlje, Slovenija

Ključne besede: diode usmerniške, diode silicijeve usmerniške, diode hitre, diode ultra hitre, parametri električni, pn spoji, karakteristike I-U, napetost prebojna, čas vzpostavitveni zaporni, tipi diod, Zener diode, Schottky diode, diode supresorske, možnosti uporabe, tehnologija izdelave, obvladovanje kakovosti, ugotavljanje zanesljivosti, TQM vodenje kakovosti totalno, SPC kontrola procesna statistična, diode spojne

Povzetek: V prispevku obravnavamo v pregledni obliki silicijeve usmerniške diode. V prvem delu definiramo posamezne električne parametre diode ter primerjamo njihove realne vrednosti z idealnimi, oz. teoretičnimi vrednostmi. Sledi pregled različnih tipov diod. Predvsem nas zanimajo usmerniške, hitre, ultrahitre, Zener, Schottky in supresorske diode ter njihove možnosti uporabe. V četrtem poglavju obravnavamo različne tehnologije izdelave silicijevih diod. Bolj podrobno opišemo slojno in planarno tehnologijo ter njune prednosti in slabosti. V petem poglavju poudarimo najprej pomembnost sistema celovitega obvladovanja kakovosti pri izdelavi diod, potem pa opišemo nekatere osnovne teste, s katerimi izvajamo ugotavljanje zanesljivosti diod.

Silicon Rectifying Diodes

Key Words: rectifying diodes, silicon rectifying diodes, fast diodes, ultra fast diodes, electrical parameters, pn junctions, I-V characteristics, breakdown voltage, reverse recovery time, diode types, Zener diodes, Schottky diodes, suppressor diodes, application possibilities, production technology, quality management, reliability assurance, TQM, Total Quality Management, SPC, Statistical Process Control, junction diodes

Abstract: Fifty years ago, right after the Second World War, a first working contact transistor was invented by a group of scientists from Bell Laboratories. Couple of years later, a first junction transistor came followed soon by first integrated circuit on silicon. So, in the late fifties microelectronics was born which led to fast development of telecommunication and information technologies.

Always present, but also always in the shadow of integrated microelectronics, discrete semiconductor components industry (production of components like diodes and transistors) has its own development. After all, p-n junction is a basic building block of all integrated circuits and diode theory forms basic theory for understanding working principles of all other semiconductor components.

In this overview article we cover as much of the subject regarding silicon diodes, as possible. First, some basic electrical parameters for forward conduction, as well as for reverse state, are defined and compared to theoretical values. An overview of all basic diode types follows. We focus on rectifying, fast, ultrafast, Zener, Schottky and suppressor diodes, including their basic application circuits. Among technologies used for silicon diode production we describe basic plane and planar technologies stressing their specific advantages. Typical flow charts, as well as cross sections are given. In the last part of the article we first stress the importance of Total Quality Management approach to the diode production and then we give the description of some basic tests used for diode Reliability Assurance Program.

Modern diode production technology has been strongly improved compared to the one fifteen years ago. New processing steps, new materials, cleaner processing, SPC system lead to higher yields, better quality and higher productivity. Diode factory needs also to conduct strategy of a development factory. Not only it must efficiently produce a large volume product, but it must also have a large range of nonstandard products to fulfill as much as possible the market demand for several different diode types (rectifying, fast, ultrafast, Zener, Schottky, suppressor,).

1.0 UVOD

Petdeset let nazaj, takoj po drugi svetovni vojni, je skupina znanstvenikov v laboratorijih ameriške firme Bell uspela izdelati prvi delujoči kontaktni tranzistor, /1/. Temu je v nekaj letih sledila izdelava spojnega tranzistorja, nato prvega integriranega vezja in kmalu smo bili priča rojstvu nove panoge v elektroniki - mikroelektronike, kateri pripisujemo začetek tretje industrijske revolucije in brez katere ne bi bilo moderne informacijske in telekomunikacijske tehnologije.

Vemo, da danes znamo v integrirana vezja vgraditi večino aktivnih in pasivnih električnih elementov, ki jih potrebuje elektronika (dioda, MOS tranzistor, bipolarni tranzistor, kondenzator, upor). Vemo tudi, da veliko večino integriranih vezij gradimo na siliciju, ki se je izkazal kot najboljši material za mikroelektroniko.

Vzporedno z mikroelektroniko, vendar v njeni senci, so se razvijale tehnologije, ki so omogočale izdelavo diskretnih elementov na siliciju: diod, tranzistorjev in njihovih izpeljank. Kljub razmahu mikroelektronike, bo potreba po tovrstnih elementih še vedno obstajala verjetno še nekaj časa. Zaradi tega tudi največje mikroelektronske firme imajo v svojem programu proizvodnjo diskretnih elementov, ki jih delajo navadno v ločenih tovarnah, ali pa jih za njih delajo specializirane zunanje firme. Veliko jih je v vzhodnih deželah in nekaj tudi v Evropi. V Sloveniji sta trenutno dve: Iskra Semicon v Trbovljah in Diopin v Ljubljani.

Spojna dioda je osnovni gradnik integriranih vezij, teorija p-n spoja pa tvori osnovo za pojasnjevanje in predvidevanje delovanja vseh ostalih polprevodniških elementov.

2.0 OSNOVNE DIODNE ENAČBE IN PARAMETRI

2.1 IDEALNA DIODNA ENAČBA

Osnove delovanja p-n spoja je prvi teoretično obdelal Shockley, /1/. Teorijo je kasneje dopolnjevalo in razširjalo več avtorjev. Na sliki 1 prikazujemo primerjavo med idealno in realno tokovno-napetostno karakteristiko silicijeve diode. Idealno I-V karakteristiko diode podaja znana Shockleyeva enačba, /1/, /2/, /3/:

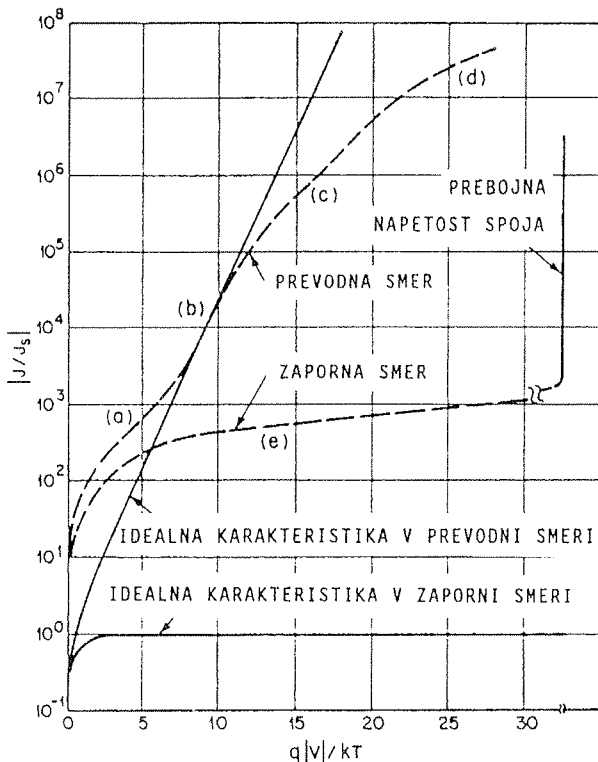
$$I = J_s \cdot S \cdot (\exp^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (1)$$

J_s - površinska gostota diodnega toka

S - površina p-n spoja

V - napetost na p-n spoju

Vzroki za odstopanje od te idealne karakteristike so za prevodno smer naslednji, /2/:



Slika 1: Primerjava med idealno in realno I-V karakteristiko silicijeve spojne diode
a) generacijsko-rekombinacijsko območje
b) območje difuzijskega toka
c) območje visoke injkcije nosilcev
d) vpliv serijske upornosti
e) zaporni tok zaradi generacij parov in površinskih tokov v osiromašenem področju

- površinski efekti, ki so povezani s prisotnostjo nabojev na ali zunaj površine polprevodnika lahko povzročijo različne prevodne kanale, oz. zaporna področja na površini
- pri pogojih visoke injkcije nabojev, ki nastopi, ko je koncentracija injciranah manjšinskih nosilcev nabojev enaka ali večja osnovni koncentraciji v polprevodniku, osnovna diodna teorija ne velja več
- visoka serijska upornost diode, ki pride do izraza zlasti pri višjih tokovih

V zaporni smeri pa je potrebno poleg difuzijskega toka diode upoštevati še generacijski tok zaradi generacije parov elektron - vrzel v osiromašenem področju, slika 1; v primeru p+n diode velja, /2/:

$$J_R = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D}} + \frac{q \cdot w \cdot n_i}{\tau_e} \quad (2)$$

D_p - difuzijska konstanta vrzeli

W - širina osiromašenega področja

τ_p - življenjski čas manjšinskih nosilcev naboja - vrzeli

τ_e - efektivni življenjski čas

N_D - koncentracija šibko dopirane strani p-n spoja

n_i - intrinzična koncentracija

Drugi člen v enačbi 2, generacijski tok, pri silicijevih diodah prevladuje nad difuzijskim pri sobni temperaturi. Napetostni potek zapornega toka je definiran s spreminjanjem širine osiromašenega področja, oz. je sorazmeren s \sqrt{V} .

Temperaturno obnašanje zapornega toka narekuje parameter n_i , kar pomeni, da pri dovolj visokih temperaturah prevladuje difuzijski tok nad generacijskim (kvadratična odvisnost od n_i).

Kot komentar zgornjima enačbama naj povemo, da v praksi seveda želimo doseči idealno I-V karakteristiko diode. Zaradi že opisanih efektov to ni mogoče, zato je velika večina dela usmerjena ravno v poznavanje, karakterizacijo in zmanjševanje pojavov, ki povzročajo ta odstopanja.

2.2 PREBOJ p-n SPOJA

2.2.1 Idealni preboj ravnega spoja

Pri dovolj visoki zaporni napetosti, p-n spoj "prebije", oz. skozi diodo steče izredno velik tok. Preboj lahko povzročijo trije mehanizmi:

- temperaturni pobeg
- tunelski efekt in
- plazovita ionizacija

Temperaturni pobeg: relativno visok tok pri visoki pritisnjeni zaporni napetosti povzroči določeno segrevanje p-n spoja. Višja temperatura ponovno povzroči povečanje toka, ki zopet bolj segreje p-n spoj, kar v končni fazi

pripelje do termičnega pobega, oz. hitrega povečanja toka in preboja diode.

Tunelski efekt nastopi pri p-n spojih, kjer sta obe strani močno dopirani, širina osiromašenega področja pa zelo majhna. Že relativno majhna pritisnjena zaporna napetost povzroči visoko električno polje ($E > 10^6$ V/cm) na p-n spoju in nosilci naboja lahko tunelirajo skozi osiromašeno področje, kar ima za posledico povečanje toka, oz. preboj.

V primeru stopničastega p-n spoja (ena stran spoja je močno dopirana, druga pa ne) je glavni mehanizem preboja plazovita ionizacija. Širina osiromašenega področja je dovolj velika, da je tunelski efekt zanemarljiv. Pri takšnem spoju tok v zaporni smeri narašča z rastočo pritisnjeno zaporno napetostjo. Večanje zaporne napetosti povzroča vedno večjo električno poljsko jakost v osiromašenem področju. Če je energija pospešenih nosilcev dovolj velika, da na svoji poti povzročajo ionizacijo novih parov elektron-vrzel, pride do plazovite ionizacije, kar povzroči ogromen tok skozi diodo.

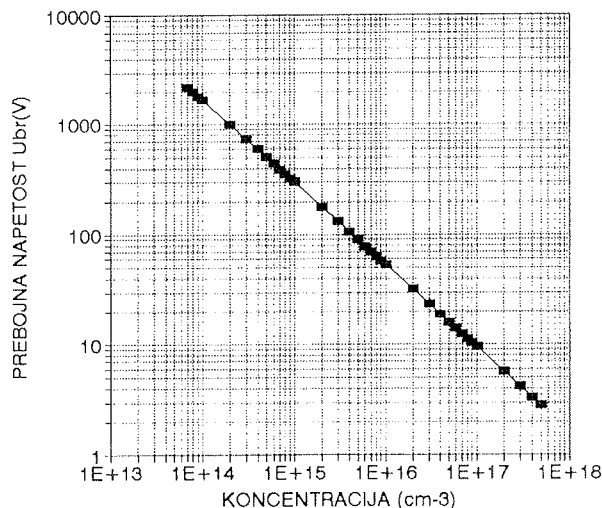
Z načrtovalskega stališča sta za nas zanimiva predvsem zadnja dva mehanizma preboja p-n spoja. Ker je preboj sam po sebi odstopanje od idealne I-V karakteristike, je razumljivo, da želimo izdelati diode s prebojno napetostjo, ki je čim bližja teoretični vrednosti.

Enačba, ki določa prebojno napetost pri plazovitem preboju STOPNIČASTEGA RAVNEGA spoja, in ki jo lahko uporabljamo za praktično načrtovanje prebojne napetosti diode je:

$$V_B = 5.302 \cdot 10^{13} (N_B)^{-3/4}, V \quad (3)$$

N_B - koncentracija šibko dopirane strani p-n spoja, /cm³

Iz zgornje enačbe vidimo, da prebojno napetost diode določamo s koncentracijo šibko dopiranega področja.



Slika 2 : Odvisnost prebojne napetosti stopničastega p-n spoja od koncentracije

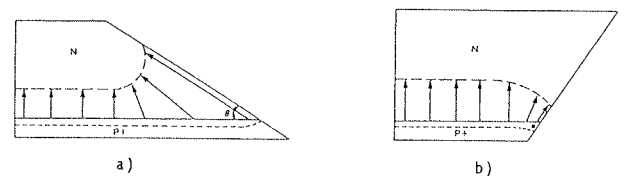
Čim nižja je koncentracija, tem višja je prebojna napetost, slika 2.

Podobna enačba velja tudi za tki. gradientni spoj, le da v njej namesto absolutne koncentracije nastopa gradient koncentracije, vendar se bomo zaradi nazornosti v tem prispevku omejili le na stopničaste spoje.

Redkokatera dioda, ki jo v resnici izdelamo, ima raven p-n spoj, saj ima diodna tabletko končne fizične dimenzije. Tako so v praksi prebojne napetosti nižje, kot jih določa zgornja enačba in poleg koncentracije dopantov njeno vrednost določa še način zaključitve p-n spoja. Različne praktične zaključitve p-n spoja obravnavamo v naslednjem poglavju.

2.2.2 Zaključitvene strukture z negativnim, oz. pozitivnim naklonom

Na sliki 3 prikazujemo dve možni zaključitvi p-n spoja: s pozitivnim, oz. negativnim naklonom na nivoju tabletko. V obeh primerih je desna ploskev stranska ploskev diodne tabletko in jo ponavadi definiramo z žaganjem skozi rezino in naknadnim jedkanjem površine.

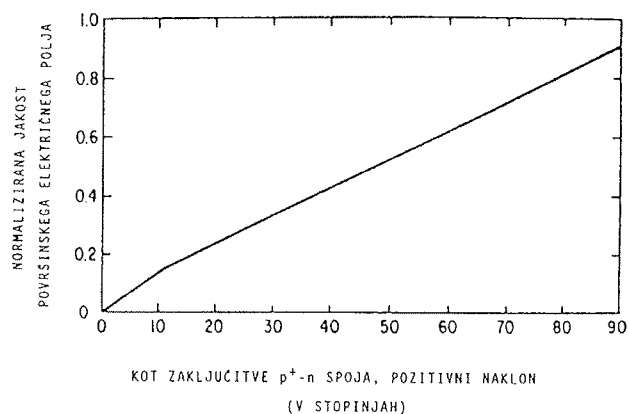


Slika 3 : Zaključitev p-n spoja
a) pozitivni naklon
b) negativni naklon

Naklon določa kot med šibko in močno dopirano stranjo p-n spoja. Kot manjši od 90° da pozitiven, kot večji od 90° pa negativni naklon. Za oba primera je na sliki 3 prikazana tudi oblika osiromašenega področja in shematska porazdelitev električnega polja. V primeru pozitivnega naklona je zaradi ohranitve naboja na obeh straneh p-n spoja širina osiromašenega področja ob površini v manj dopiranem substratu večja kot v notranosti. Vsled tega je jakost električnega polja na površini manjša kot v notranosti, kar je idealno za zaključitev p-n spoja, saj zagotavlja preboj strukture v notranosti tabletko. Prebojna napetost take diode bi morala biti blizu napovedane, enačba 2. Temu ni tako v praksi, saj je ionizacijski koeficient na površini, zaradi prisotnih površinskih defektov, večji kot v notranosti. Do preboja tako le pride na površini. Zaradi slednjega je v praksi potrebno zagotoviti površinsko jakost električnega polja vsaj za 50% nižjo kot v notranosti, če želimo doseči preboj v notranosti tabletko, tj. blizu teoretične vrednosti za raven spoj.

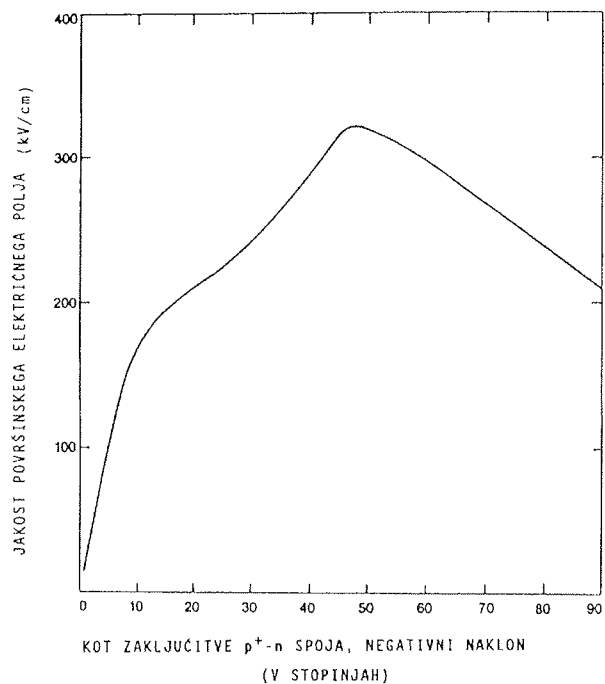
Po podrobni analizi velikega števila spojev s pozitivnim naklonom, z različnimi dopiranjem ter normalizaciji vrednosti električnega polja na površini glede na polje v notranosti, pridemo do splošno uporabne krivulje, ki nam podaja odvisnost normalizirane jakosti površinskega električnega polja v odvisnosti od kota zaključitve p-n spoja, slika 4.

S slike je razvidno, da koti pod 60° zagotavljajo ustrezno majhno jakost električnega polja na površini, oz. preboj v notranjosti. Koti pod 30° niso priporočljivi, saj pomenijo izgubo učinkovite površine tabletko.



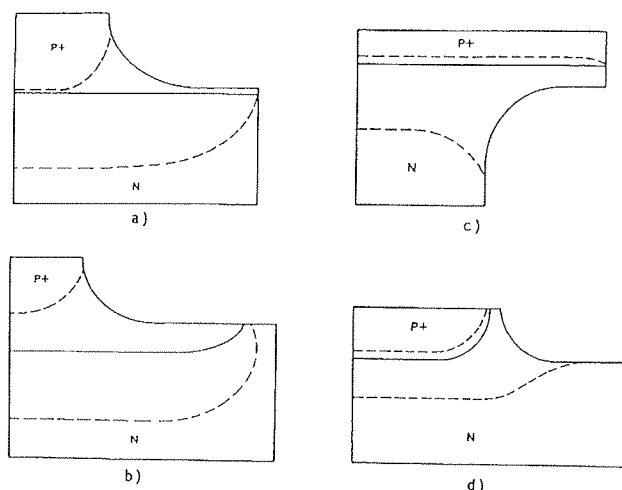
Slika 4: Normalizirana jakost površinskega električnega polja v odvisnosti od kota zaključitve p+-n spoja, pozitivni naklon.

V primeru negativnega naklona, slika 5, pa je situacija ravno obratna. Če bi želeli zmanjšati električno polje na površini, bi morali bodisi zmanjšati kot, bodisi znižati koncentracijo p+ področja, kar bi omogočilo širjenje osiromašenega področja tudi na p+ stran in s tem posredno zmanjšanje električnega polja na površini.



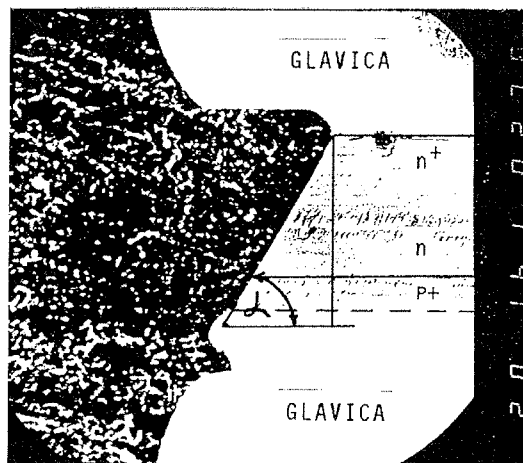
Slika 5: Jakost površinskega električnega polja v odvisnosti od kota zaključitve p+-n spoja, negativni naklon

Na sliki 6 prikazujemo več možnih variant zaključitve p-n spoja s pozitivnim, oz. negativnim naklonom na nivoju rezine. Stransko ploskev definiramo z jedkanjem kanalov med tabletkami že takoj po difuziji p+ področja.



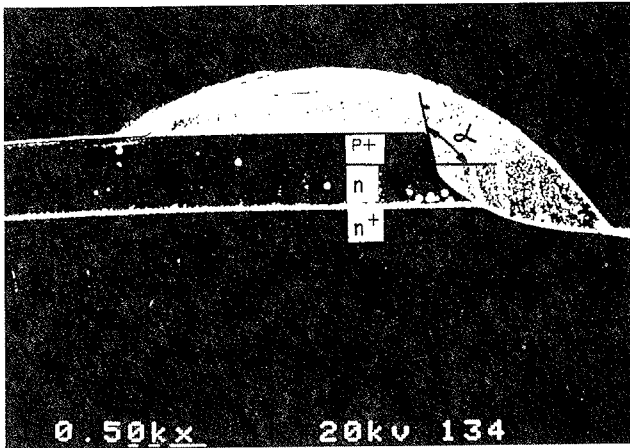
Slika 6: Zaključitvena struktura s kanalom:
a) negativni naklon, ravni spoj
b) negativni naklon, planarni spoj
c) pozitivni naklon, ravni spoj
d) pozitivni naklon, planarni spoj

Kot primer zgoraj naštetih zaključitvenih struktur je na sliki 7 prikazana diodna tabletko že pritrjena na priključne žičke. Lepo je viden natančno definiran pozitivni kot 60° med p+ in n področjem. Do točno definiranega kota smo prišli najprej z žaganjem rezine z žaginim listom s točno določenim naklonom in nato z jedkanjem v bazičnem jedkalu. Izmerjena maksimalna prebojna napetost za prikazano strukturo je 1600 V. To je 80% od izračunanega preboja za stopničast raven p-n spoj, ki je 1990 V pri specifični upornosti n substrata $50 \Omega\text{cm}$.



Slika 7: Diodna tabletko s pozitivnim naklonom p-n spoja, $\alpha = 60^\circ$

Podobno je na sliki 8 prikazana diodna tabletko z jedkanim kanalom in negativnim naklonom 70° med $p+$ in n področjem. Kanale smo jedkali po difuziji $p+$ področja. Kot maska za kislno jedkalo je služil silicijev dioksid. Izmerjena prebojna napetost za tako strukturo je 160 V. To je 80% od izračunanega preboja za stopničast raven $p-n$ spoj, ki je 200 V pri specifični upornosti n substrata 2.8 Ωcm .



Slika 8: Diodna tabletko z negativnim naklonom $p-n$ spoja, $\alpha = 110^\circ$

2.2.3 Zaključitvene strukture v planarni tehnologiji

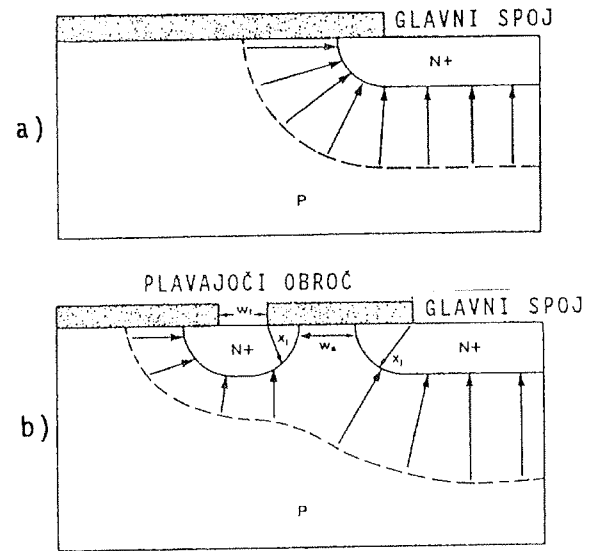
S planarno tehnologijo izdelujemo tridimenzionalne strukture diod na silicijevi rezini, kar pomeni, da se $p-n$ spoji zaključijo na površini tabletko namesto na njenem robu, slika 9. Ukrivljenost osiromašenega področja na robu $p-n$ spoja je glavni razlog za manjšo vrednost prebojne napetosti v primerjavi z idealnim ravnim spojem, ki ima neskončen krivinski polmer. Tehnik za povečanje krivinskega polmera, oz. zmanjšanje ukrivljenosti je več. Med najbolj popularnimi sta dve, ki sta zlasti uporabni za izdelavo vertikalnih diskretnih polprevodniških elementov:

- zaključitev s plavajočimi obroči
- zaključitev s poljsko elektrodo

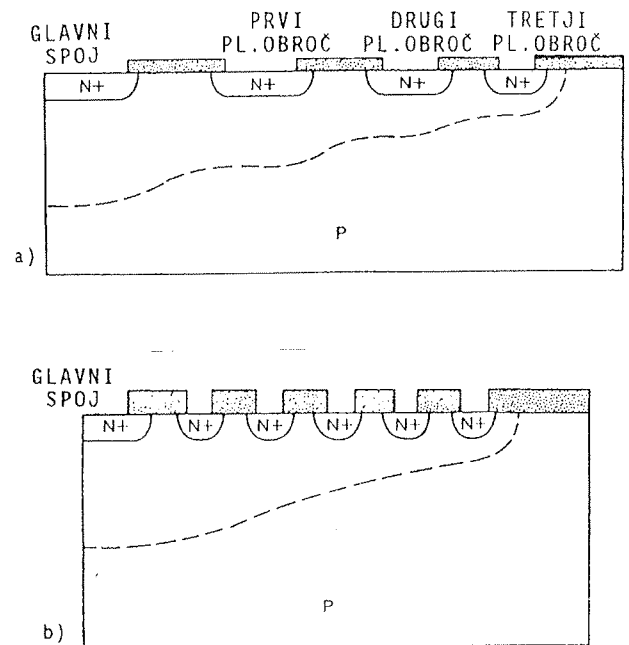
Zaključitvena struktura s plavajočim obročem

Primerjava porazdelitve električnega polja med strukturo z in brez plavajočega obroča pri pritisnjeni zaporni napetosti je razvidna s slike 9. Pri strukturi s plavajočim obročem se namreč pri določeni napetosti osiromašeno področje dotakne obroča; nadaljnje zviševanje zaporne napetosti povzroči širjenje osiromašenega področja od glavnega spoja navzdol, oz od obroča navzdol in vstran. Na ta način učinkovito povečamo krivinski polmer strukture, porazdelimo padec napetosti med glavnim spojem in obročem in s tem posredno povečamo prebojno napetost.

Glavni spoj lahko zaključimo z enim ali več plavajočimi obroči. Optimalno prebojno napetost dosežemo le s pravilnim načrtovanjem razdalje obročev od glavnega spoja, njihove širine in medsebojne razdalje, sliki 10 in 11.



Slika 9: Presek strukture in porazdelitev električnega polja:
a) planarni spoj
b) planarni spoj z enim plavajočim obročem

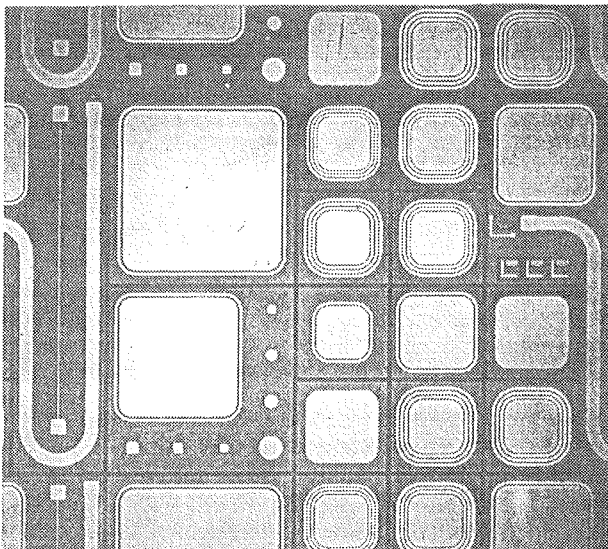


Slika 10: Dva možna načina načrtovanja plavajočih obročev:
a) spreminjajoče širine obročev in spreminjajoče medsebojne razdalje
b) konstantne širine in enake razdalje med obroči

V praksi ponavadi ne uporabljamo več kot tri plavajoče obroče.

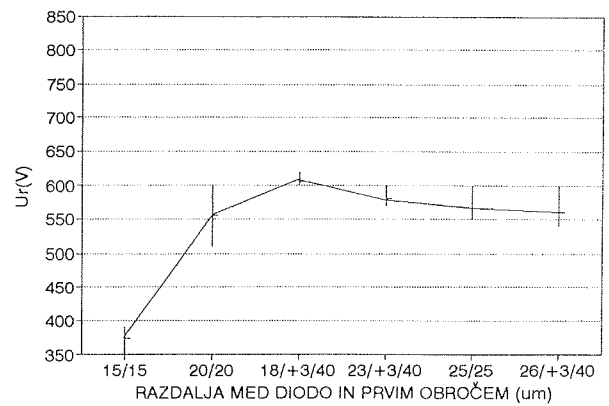
Zgoraj omenjene trditve smo preizkusili tudi v praksi. Tako je na sliki 11 prikazano testno vezje z diodami z različnimi zaključitvenimi strukturami s plavajočimi obroči, na sliki

12 pa rezultati meritev prebojnih napetosti na nekaterih diodah na prikazanem testnem vezju. Diode smo izdelali na substratu s specifično upornostjo $18 \Omega\text{cm}$, globina spoja pa je bila $8 \mu\text{m}$. Preboj ravnega spoja na tem substratu je 876 V , planarnega pa 272 V . Pri zaključitveni strukturi z enim obročem se je izkazalo, da je optimalna risana razdalja med glavnim spojem in obročem okoli $29 \mu\text{m}$ (dosegli smo 60% vrednosti prebojne napetosti ravnega spoja in 190% vrednosti prebojne napetosti planarnega spoja), medtem ko se je pri treh obročih kot optimalna izkazala struktura z obroči, med katerimi se je razdalja povečevala za $3 \mu\text{m}$ od $18 \mu\text{m}$ naprej (dosegli smo 69% vrednosti prebojne napetosti ravnega spoja in 220% vrednosti prebojne napetosti planarnega spoja).



Slika 11: Testno vezje z različnimi geometrijami diod ter zaključitvenimi strukturami s plavajočimi obroči, [7]

ODVISNOST U_r OD RAZDALJE W_{dr} TRIJE p+ OBROČI



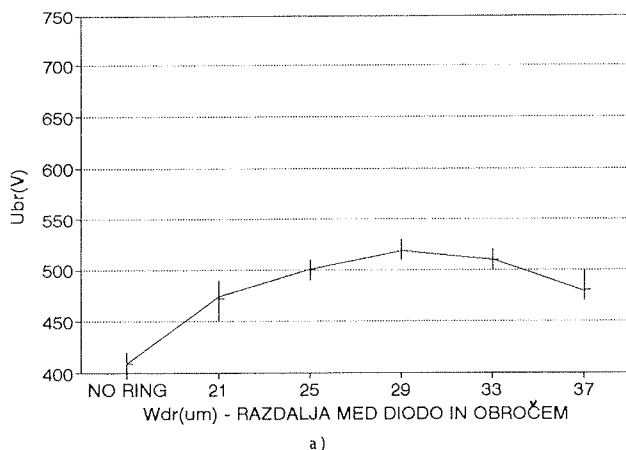
b)

Slika 12: Odvisnost prebojne napetosti od tipa plavajočega obroča
a) en obroč
b) trije obroči

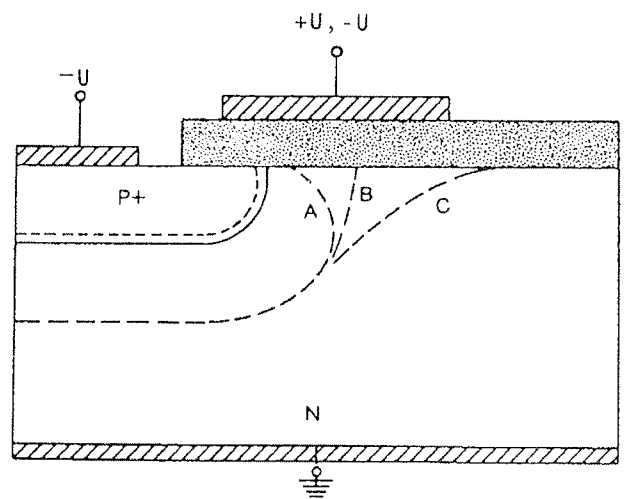
Zaključitvena struktura s poljsko elektrodo

Že Grove, [4], je za povečanje prebojne napetosti pri planarnih diodah predlagal ločeno napajanje prevodne elektrode na oksidu, katera je speljana preko p-n spoja, slika 13. S spremembo potenciala na njej spreminjamo obliko, oz. ukrivljenost osiromašenega področja. Za substrat tipa n velja, da s priključitvijo pozitivne napetosti na elektrodo pritegnemo elektrone na površino, ki oblikujejo osiromašeno področje, kot ga prikazuje krivulja A. S priključitvijo negativne napetosti pa elektrone odbijemo od površine, s čimer povečamo osiromašeno področje pod elektrodo, oz. povečamo krivinski polmer področja, krivulja C, in s tem povečamo prebojno napetost.

ODVISNOST U_{br} OD RAZDALJE p+ obroč

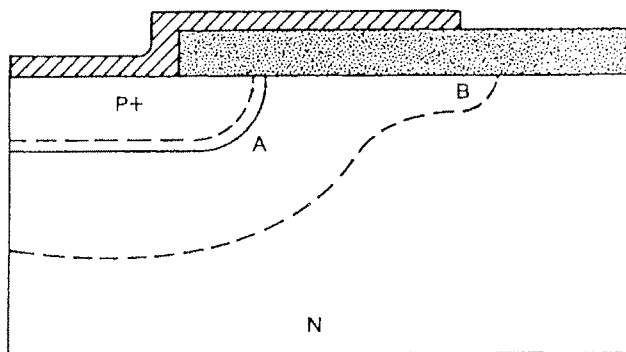


a)



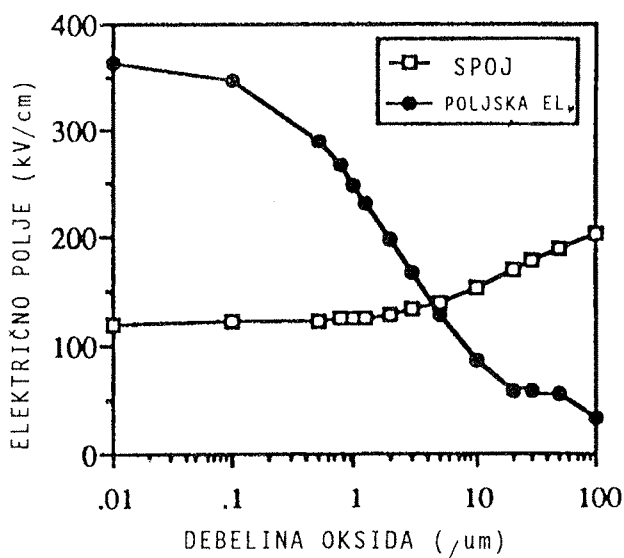
Slika 13: Oblika osiromašenega področja za različne napetosti na poljski elektrodi

V praksi je nepraktično ali včasih celo nemogoče izvesti ločeno napajanje za kontrolo potenciala poljske elektrode. Le-ta je zato ponavadi izvedena kot podaljšek kontaktne metalizacije p+, slika 14. V primeru zaporne napetosti na diodi (negativna napetost na p+ področju glede na n področje), se osiromašeno področje razširi po površini do roba poljske elektrode in dobimo podoben efekt kot pri krivulji C, slika 13. Električno polje v točki B, slika 14, je manjše samo v primeru, če pravilno izberemo debelino oksida pod poljsko elektrodo ter dolžino poljske elektrode nad spojem, saj mora priti do popolnega osiromašenja polprevodnika pod oksidom. Oksid mora biti dovolj tanek, da pride do izrazitega poljskega efekta in hkrati dovolj debel, da ne pride do prezgodnjega preboja oksida na robu poljske elektrode.



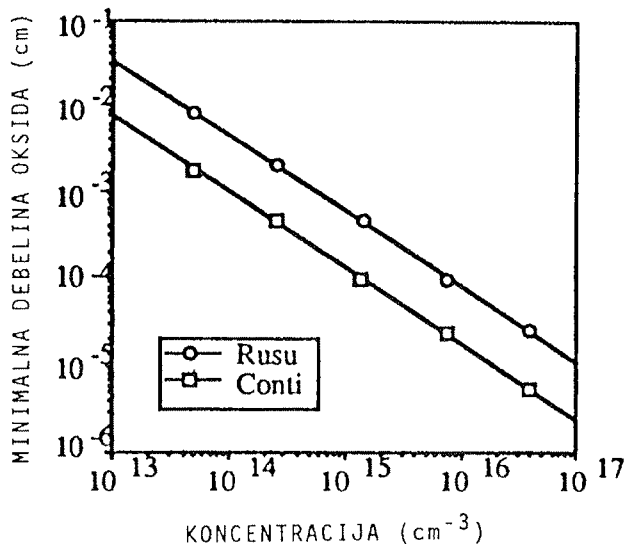
Slika 14: Struktura diode s poljsko elektrodo, ki je vezana na p+ kontakt

Načrtovanje pravilne geometrije poljske elektrode za doseg optimalnega preboja je relativno komplicirano. Iz literature poznamo nekaj osnovnih napotkov, /4/, /5/. Na sliki 15 prikazujemo odvisnost maksimalnega električnega polja od debeline oksida; druga krivulja prikazuje električno polje na ukrivljenosti osiromašenega področja.



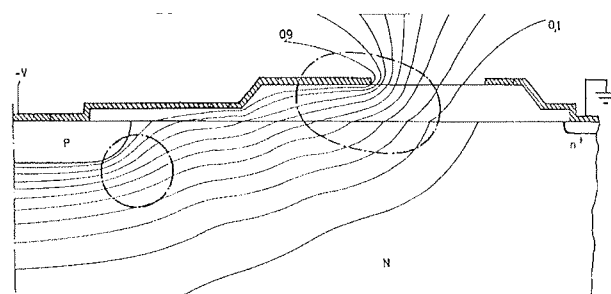
Slika 15: Odvisnost električnega polja na robu poljske elektrode od debeline oksida; druga krivulja prikazuje električno polje na ukrivljenosti osiromašenega področja

nega polja na koncu poljske elektrode in polja na ukrivljenosti osiromašenega področja od debeline oksida. Podobno je na sliki 16 prikazana minimalna debelina poljskega oksida, ki je potrebna, da izenačimo električni polji na robu poljske elektrode in na ukrivljenosti osiromašenega področja. Iz slednje slike je razvidno, da je zaključitev s poljsko elektrodo efektivna le pri srednje in močno dopiranih substratih, saj bi bila pri šibko dopiranih substratih zahtevana debelina oksida prevelika (npr. za koncentracijo substrata $1\text{E}13/\text{cm}^3$ je zahtevana debelina poljskega oksida okoli $100\ \mu\text{m}$, kar v praksi ni realno dosegljivo !)



Slika 16: Minimalna potrebna debelina poljskega oksida, ki je potrebna za izenačitev električnih polj na robu poljske elektrode in na ukrivljenosti osiromašenega področja

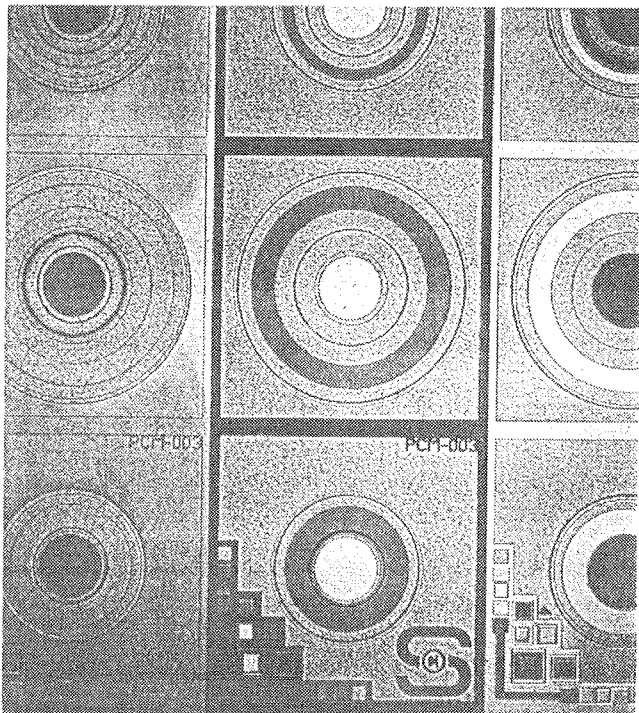
Pri debelih poljskih oksidih je maksimalno električno polje locirano na robu pn spoja, saj je poljski efekt neizrazit. Do preboja bo torej prišlo na p-n spoju. S padajočo debelino oksida jakost polja na p-n spoju pada, povečuje pa se poljski efekt. Maksimalno električno polje se preseli na rob poljske plošče. Porazdelitev potenciala v diodi s poljsko elektrodo je prikazana na sliki 17. Na tej sliki je poleg poljske elektrode viden tudi ekvipotencialni obroč.



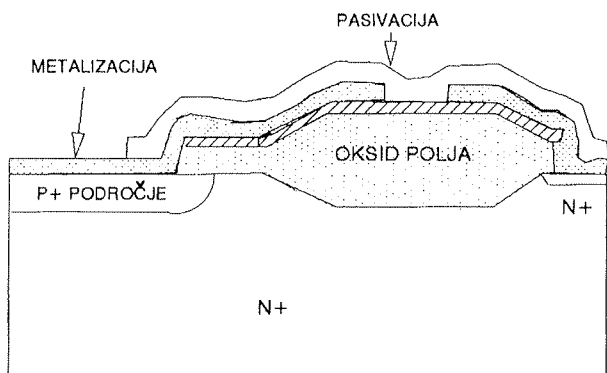
Slika 17: Porazdelitev potenciala v strukturi diode s poljsko elektrodo

na robu strukture, ki definira ničelni potencial, saj je vezan na substrat.

Na sliki 18 je prikazano testno vezje z diodami z zaključitvijo p-n spoja s poljsko elektrodo. Posamezne strukture se razlikujejo predvsem v lateralnih dimenzijah poljske elektrode, slika 19.



Slika 18: Testno vezje z diodami z zaključitvijo p-n spoja s poljsko elektrodo

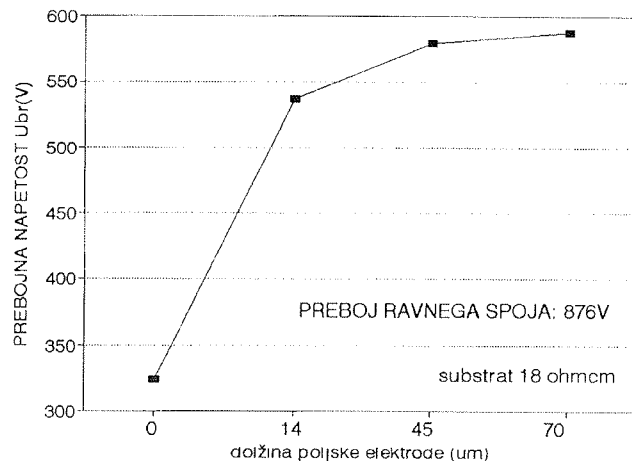


Slika 19: Presek diode s poljsko elektrodo, struktura s testnega vezja na sliki 18

Na sliki 20 so prikazani rezultati meritev prebojnih napetosti teh struktur izdelanih na substratu z upornostjo 18 Ωcm in globino p+n spoja 8 μm . Preboj ravnega spoja na tem substratu bi bil 876 V, planarnega pa 272 V. Maksimalno prebojno napetost smo dosegli pri poljski

elektrodi, katere rob je podaljšan za 45 μm stran od glavnega spoja (dosegli smo 575 V, kar je 66% vrednosti prebojne napetosti ravnega stopničastega spoja in 211% vrednosti prebojne napetosti planarnega spoja).

Odv. Ubr od dimenzij poljske elektrode



Slika 20: Odvisnost prebojne napetosti diode od lateralnih dimenzij poljske elektrode

2.2.4 Zenerjev preboj

Zenerjev preboj nastopi pri p-n spojih, kjer sta obe strani močno dopirani, širina osiromašenega področja pa je zelo majhna. Že relativno majhna pritisnjena zaporna napetost povzroči visoko električno polje ($E > 10^6 \text{ V/cm}$) na p-n spoju in nosilci naboja lahko tunelirajo skozi osiromašeno področje, kar ima za posledico povečanje toka, oz. preboj.

Čprav v praksi izdelujemo "Zenerjeve diode" v širokem spektru prebojnih napetosti (1.8 - 200 V), moramo vedeti, da so mehanizmi preboja pri različnih napetostih različni in sicer:

$V_R \approx 0.5 - 3 \text{ V} \rightarrow$ območje Zenerjevega preboja

$V_R \approx 3 - 8 \text{ V} \rightarrow$ območje Zenerjevega in plazovitega preboja (prehodno območje)

$V_R \approx 8 \text{ V}$ naprej \rightarrow območje plazovitega preboja

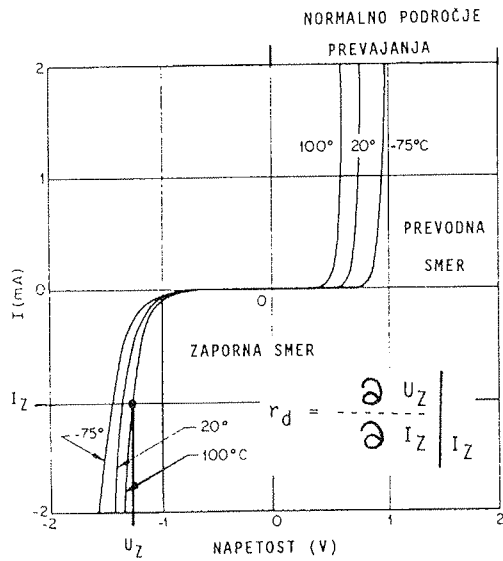
I-V karakteristiko tipične "Zenerjeve diode" prikazujemo na sliki 21.

Področje preboja opišemo z dvema parametroma:

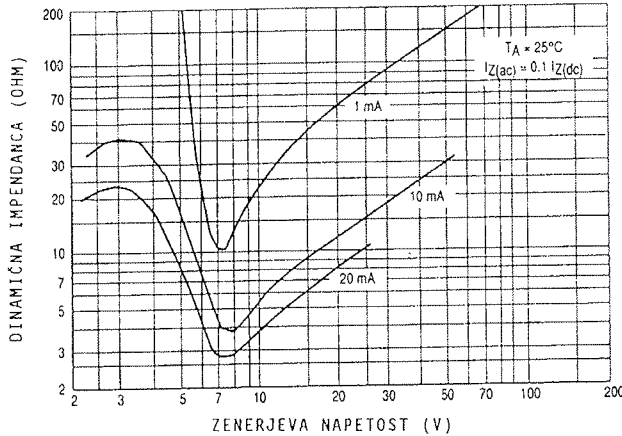
- Zenerjevo napetostjo, V_Z in
- dinamično impedanco, r_D

Zenerjeva napetost je ponavadi definirana pri točno določenem zapornem toku I_Z (nekaj mA, odvisno od tipa

diode); dinamično impedanco merimo pri delovnem zapornem toku I_Z , s sinusnim signalom z amplitudo $0.1 \cdot I_Z$ in frekvenco 1kHz. Tipična odvisnost dinamične impedance od delovnega zapornega toka in Zenerjeve napetosti je prikazana na sliki 22. Minimum dinamične impedance se pojavi ravno v prehodnem območju, ko preboj definirata dva mehanizma, kot smo že opisali.

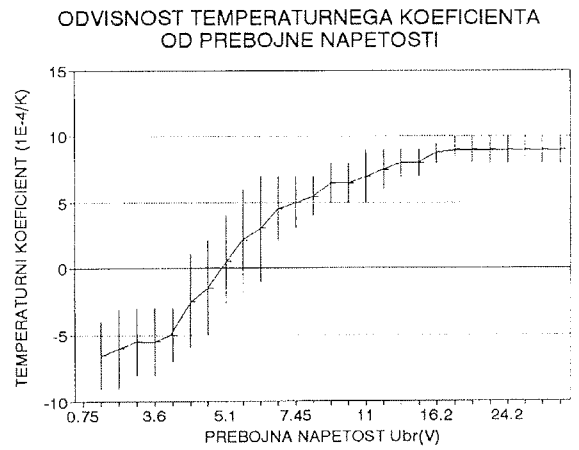


Slika 21: I-V karakteristika Zenerjeve diode



Slika 22: Potek dinamične impedance v odvisnosti od prebojne napetosti Zener diode

Zanimiv je tudi potek temperaturnega koeficienta prebojne napetosti. Tunelski preboj ima negativni, plazoviti preboj pa pozitiven temperaturni koeficient, saj pri tunelskem preboju višja temperatura pospešuje emisijo nosilcev naboja, medtem ko se pri plazovitem preboju, prosti nosilci naboja z večanjem temperature bolj sipajo na kristalni mreži, kar znižuje celotni tok, slika 23. Na sliki sta lepo vidni obe področji preboja (tunelski in plazoviti), oz. tudi prehod med njima.

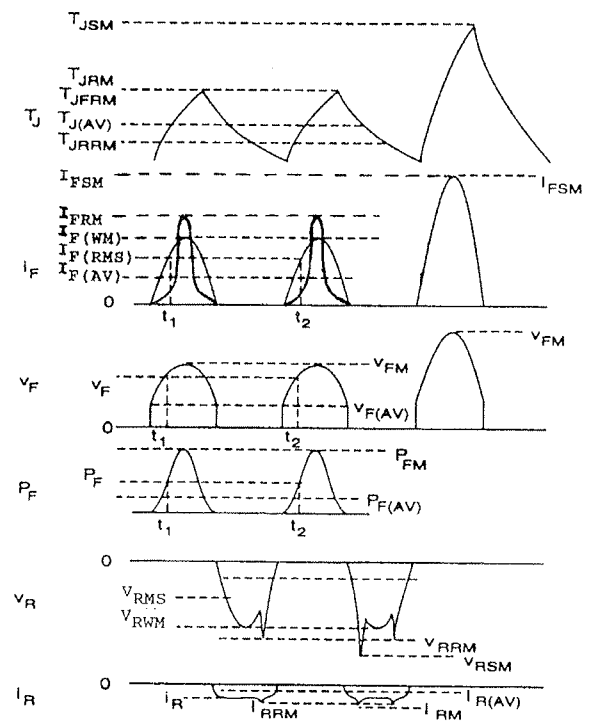


Slika 23: Napetostni potek temperaturnega koeficinta prebojne napetosti Zener diode

2.3 REALNI ELEKTRIČNI PARAMETRI DIODE

Električni parametri diode so odvisni od velikega števila dejavnikov; med njimi naj naštejemo le najbolj pomembne:

- tehnologija izdelave in posamezni tehnološki postopki (slojna/planarna tehnologija, globina difuzij, plastne upornosti p+ in n področja, čistost procesa, ipd..)
- lastnosti silicijevega substrata (specifična upornost, debelina, orientacija)
- velikost tabletko (površina, debelina)



Slika 24: K definiciji posameznih električnih parametrov diode

- način zaključitve in pasivacije p-n spoja (žagan/jedkan kanal, planarni spoj, pasivacija s silikonom, poliimidom ali steklom ipd..)
- vrsta montaže (spajkan čip, plastično ohišje, stekleno ohišje,)

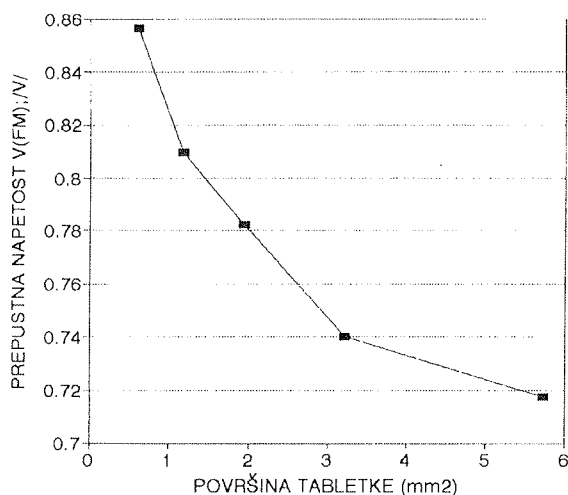
V tem poglavju se bomo omejili samo na nekatere tipične in najbolj pogosto podajane parametre, ki so direktno povezani z I-V karakteristiko diode. Na sliki 24 so nazorno prikazani opisani parametri.

Prepustna napetost (V_{FM})

Parameter določa največji dovoljeni padec napetosti v prevodni smeri, ki ga podajamo pri točno določenem toku za posamezen tip diode.

Določamo ga s površino in debelino tabletkе, znotraj parametrov tehnologije pa z izbiro specifične upornosti substrata in pogoji difuzije močno dopirane strani.

Na sliki 25 prikazujemo odvisnost parametra V_{FM} od površine diode pri prevodnem toku 1A.



Slika 25: Prepustna napetost v odvisnosti od površine tabletkе pri toku 1A, planarna tehnologija

Povprečni prepustni tok ($I_{F(AV)}$)

Parameter določa povprečno vrednost toka v prevodni smeri, ki ga priporoča proizvajalec za normalno delovanje diode pri določeni temperaturi spoja. Podatek ponavadi velja za polvalno usmerjanje.

Ponovljeni temenski prepustni tok (I_{FRM})

Parameter določa največjo dovoljeno vrednost toka v prevodni smeri za ponavljajoči se signal kakršnekoli oblike (tudi nesinusni signali).

Udarni prepustni tok (I_{FSM})

Parameter določa največjo dovoljeno vrednost toka v prevodni smeri, ki se pojavi pri vklopu usmernika, ko je gladilni kondenzator prazen. Parameter je ponavadi definiran le za polvalno usmerjen sinusni signal (trajanje 10 ms pri 50 Hz). Če skozi diodo teče tak tok, bo temperatura spoja narasla nad dovoljeno mejo in do naslednjega vklopa mora miniti nekaj sekund.

Zaporni tok (I_R)

To je tok, ki teče skozi diodo pri maksimalni dovoljeni ponavljajoči se zaporni napetosti podani za določen tip diode. Ponavadi podajamo vrednost zapornega toka pri dveh temperaturah: 25°C in 150°C.

Zaporna napetost (V_R)

Parameter določa največjo zaporno napetost, ki je lahko konstantno pritisnjena na diodi brez posledic.

Ponovitvena temenska zaporna napetost (V_{RRM})

Parameter določa največjo dovoljeno vrednost zaporne napetosti za ponavljajoči se signal kakršnekoli oblike.

Neponovitvena temenska zaporna napetost (V_{RSM})

Parameter določa temensko zaporno napetost na diodi, za katero lahko predpostavimo, da se le redko pojavi. Ta vrednost, čeprav zelo kratkotrajna, nikakor ne sme biti presežena.

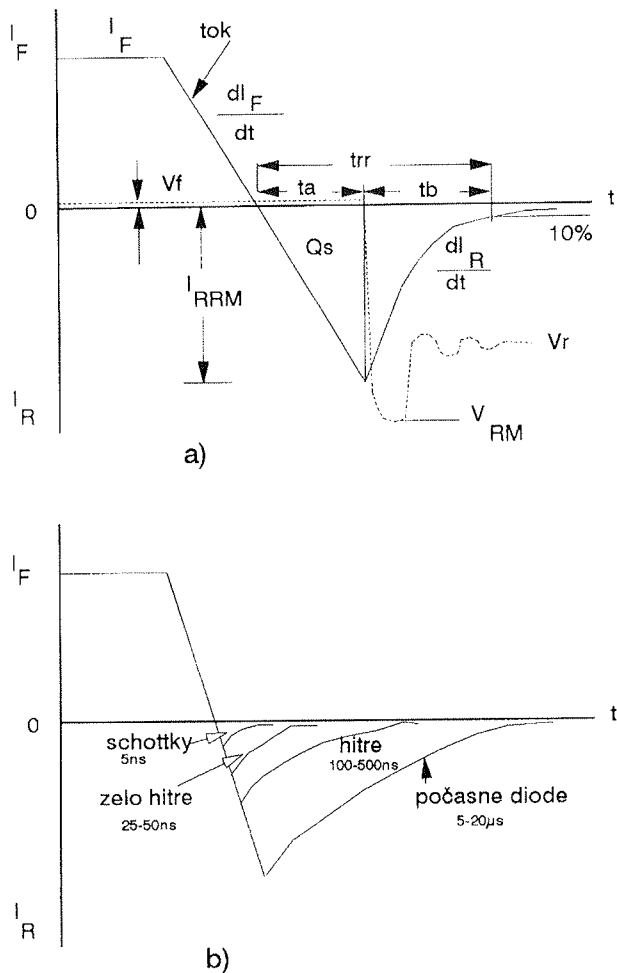
Pri načrtovanju diodne strukture in njenih električnih karakteristik ponavadi pazimo, da element vzdrži višje temenske napetosti v zaporni smeri, oz. temenske tokove v prevodni smeri, kot so največje dovoljene.

Še en parameter, na katerega morajo biti posebej pozorni uporabniki diod, je maksimalna moč, ki jo dioda prenese. Pri pulznem načinu delovanja so napetostni in tokovni impulzi lahko višji (ampak še vedno znotraj predpisanih maksimalnih vrednosti) kot pri konstantni obremenitvi, saj se v slednjem primeru dioda segreje na višjo delovno temperaturo. V vsakem primeru, če obstaja nevarnost, da se dioda segreje nad predpisano maksimalno temperaturo, je potrebno poskrbeti za dodatno odvajanje toplote (hladilniki, prisilno hlajenje ...).

2.4 ZAPORNI VZPOSTAVITVENI ČAS DIODE

V stanju prevajanja se v šibko dopiranem področju diode nabirajo manjšinski nosilci naboja, katerih koncentracija je sorazmerna velikosti toka. Ko diodo obremenimo z zaporno napetostjo, le-ta ne more v trenutku preiti iz stanja prevajanja v stanje zapore. Kratek čas pred popolno zapore, je dioda v kratkem stiku, saj prevaja tok v zaporni smeri toliko časa, dokler ne odvede vsega naboja, ki se je nabral v diodi med prevajanjem. Odvajanje naboja poteka skozi električni tokokrog in z rekombinacijo nosilcev.

binacijami manjšinskih nosilcev naboja. Tipičen čas potreben za preklop iz stanja prevajanja v stanje zapore je pri "počasnih" diodah reda velikosti 5 do 50 μs . Odstranitev tega naboja ima za posledico generacijo tokovne špice, ki povzroči tudi napetostno špico, slika 26. Omenimo naj, da sta oblika signala in zaporni vzpostavitveni čas odvisna od naslednjih dejavnikov: toka v prevodni smeri pred preklopom, frekvence preklopa, oblike signala (sinusni, pravokotni, ...), impedanca tokokroga, temperature in tipa uporabljene diode. Za počasne diode ponavadi ne podajamo zapornega vzpostavitvenega časa, saj vrednosti tega parametra ne kontroliramo. Nasprotno velja za "hitre" diode, katerih preklopni časi se gibljejo v intervalu nekaj ns do 1 μs . Primerjava izhodnih signalov za obe vrsti diod je prikazana na sliki 27.

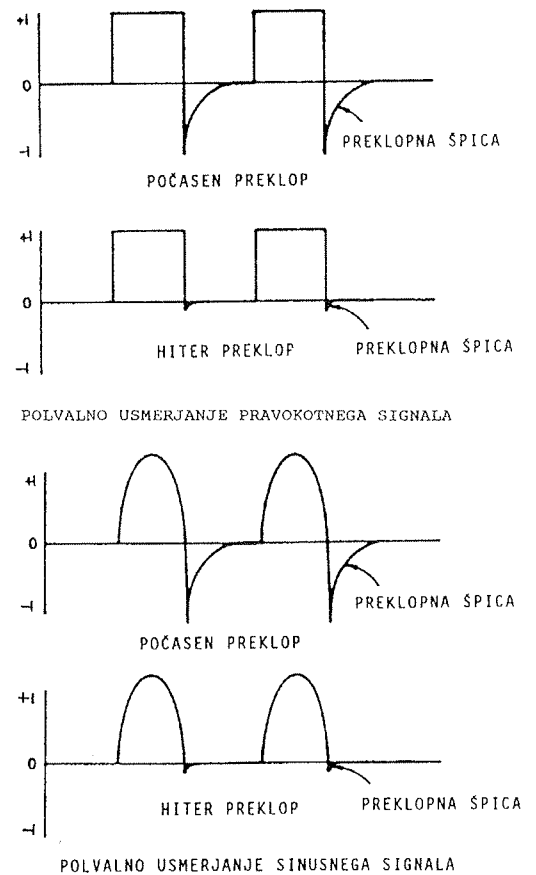


Slika 26: Tokovni impulz pri preklopu diode iz prevodnega v zaporno stanje
a) definicija parametrov
b) oblika impulza pri različno hitrih diodah

Tokovni impulz ob preklopu diode opišemo z naslednjimi parametri, slika 26a:

- prepustni tok, I_F

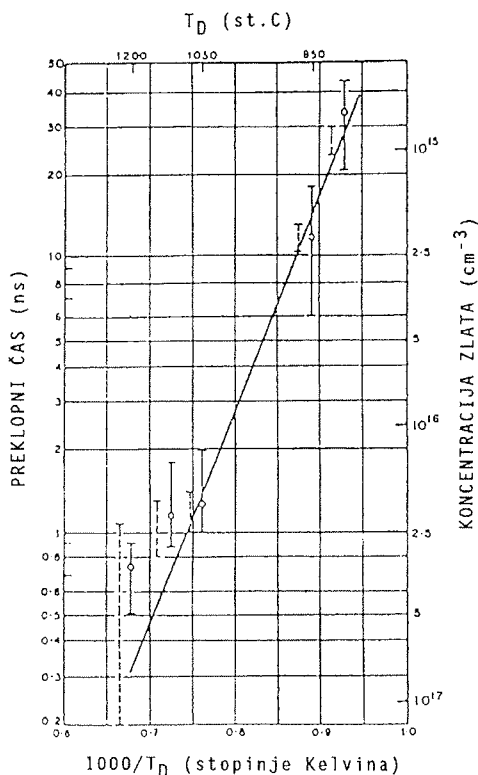
- hitrost spreminjanja toka pri prehodu iz prevajanja v zaporo, dI_F/dt
- temenski zaporni tok, I_{RRM}
- čas, ki je potreben, da tok doseže maksimalno vrednost v zaporni smeri, t_a
- čas, ki je potreben, da tok pade na 10% maksimalne vrednosti v zaporni smeri, t_b
- zaporni vzpostavitveni čas diode, $t_{rr} = t_a + t_b$, ki je dejansko merilo za hitrost preklopa diode iz prevodnega stanja v stanje zapore
- shranjeni naboj, Q_s , ki ga je potrebno odvesti
- hitrost spreminjanja toka pri zmanjševanju tokovne špice, dI_R/dt



Slika 27: Primerjava izhodnih signalov med počasnimi in hitrimi diodami

Temenski zaporni tok, ki se pojavi pri preklopu, ima lahko negativne posledice za vezje, v katerega je vgrajena dioda, saj lahko povzroči elektromagnetne (EM) motnje. Zaradi tega je zaželeno, da je parameter dI_R/dt čim manjši pri čim krajšem času t_b , oz. prehod v zaporo čim mehkejši.

Zaporne vzpostavitvene čase diod v praksi ponavadi definiramo s kontrolirano difuzijo zlata, oz. platine v šibko dopirano področje diode, [6]. Temperature difuzije se gibljejo v območju 850 - 1100°C, doseženi preklopni časi



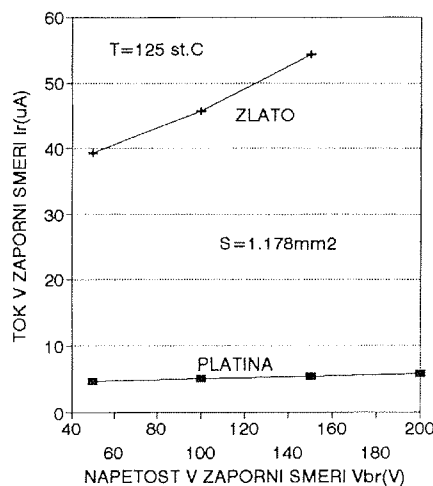
Slika 28: Odvisnost preklopnega časa od temperature difuzije zlata

pa med 0.5 - 50 ns, slika 28. Na žalost pa vnos zlata pokvari nekatere druge električne parametre diode.

Tabela 1:

VRSTA DIODE	ELEKTRIČNI PARAMETER	TOK USMERJANJA I _F (AV)	PREPUSTNA NAPETOST V _{FM}	ZAPORNA NAPETOST V _R	ZAPORNI VZP. ČAS τ _{rr}	NAMEN UPORABE
USMERNIŠKE DIODE	standardne * močnostne **	0.5A do 10A 6A do 300A	1V do 1.1V < ali = 1.5V	50V do 1600V 50V do 1600V	5000ns do 20000ns + 50000ns	za nizke frekvence do 1kHz in visoke napetosti in tokove
HITRE USMERNIŠKE DIODE	fast ultrafast ultrafast	0.5A do 10A 0.5A do 10A 0.5A do 10A	1V do 1.3V 1V 1.7V	50V do 1000V do 400V do 1000V	< ali = 500ns 50ns 75ns	za frekvence do 100kHz za frekvence do 1MHz
SCHOTTKY DIODA		0.5A do 100A	0.6V	50V	5ns	nizke izgube; nizka zap.nap. in za visoke frekv.do nekaj MHz
SIGNALNA DIODA		do 200mA	1V	do 200V	2ns do 50ns	za male VF signale

EL.PARAMETER	MOČ	ZAP. NAPETOST	POSEBNOSTI
VRSTA DIODE	P	V _R	NAČIN DELOVANJA
ZENER DIODA	1W do 12.5W (50W)	2.7V do 33V (200V)	Uz je delovna napetost / stalni
OMEJILNE NIZKONAPETOSTNE DIODE	1W do 1.5W	0.8 do 6.4V	Uz je delovna napetost stalni ali impulzni način delovanja
SUPPRESSOR DIODA	400W do 1500W oz. (5-15kW) v 1ms	6.8V do 400V	Uz je delovna napetost impulzni način delovanja



Slika 29: Primerjava tokov puščanja med diodama dopiranih z zlatom, oz. platino

Prevodni padec napetosti, kakor tudi tok puščanja se večata s količino zlata v diodi. Kontrola preklopnih časov s platino je primernejša kot z zlatom, saj so tokovi puščanja s platino dopiranih diod skoraj za red velikosti manjši pri enakih vrednostih preklopnih časov, slika 29.

3.0 OSNOVNI TIPI DIOD

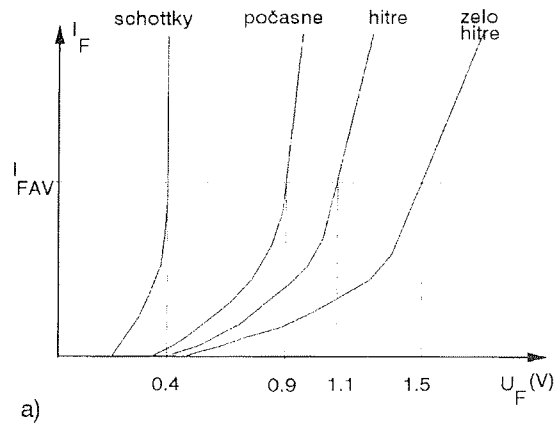
Osnovna funkcija diod je usmerjanje izmeničnih signalov. Od diode zahtevamo, da se čim bolj približa idealnemu stikalu. oz. da ima čim manjšo prepustno napetost, čim

manjši zaporni tok, čim višjo prebojno napetost ter ustrezno hitro in mehko preklopno karakteristiko.

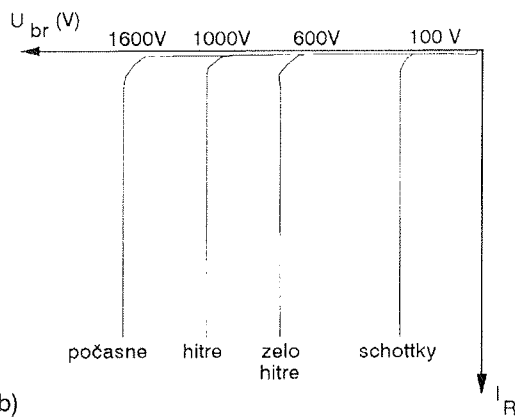
Izmenični signali, katere želimo usmeriti, so po svojem izvoru in parametrih različni in sicer:

- povprečni prepustni tok: od nekaj mA do nekaj 100 A
- zaporna napetost: od nekaj V do nekaj 10kV
- frekvenca delovanja: od nekaj Hz do nekaj GHz

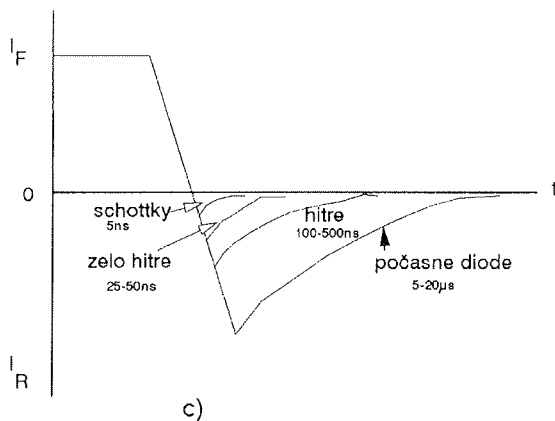
Temu primerno so tudi v tabeli 1 razdeljene diode z različnimi električnimi parametri, ki naj bi pokrivala cel spekter uporab in signalov, ki jih je potrebno usmeriti.



a)



b)



c)

Slika 30: Kvalitativna primerjava električnih karakteristik posameznih tipov diod
a) prevodna smer
b) zaporna smer
c) preklop iz prevajanja v zaporo

Na sliki 30 je podana nazorna primerjava med električnimi karakteristikami posameznih tipov diod.

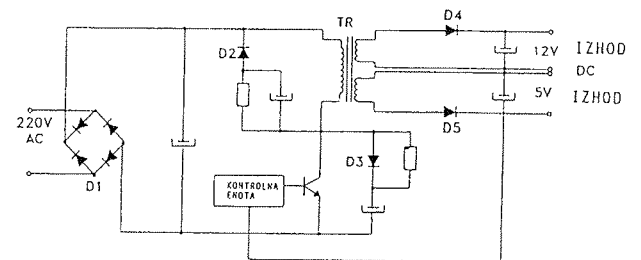
3.1 HITRE IN ULTRAHITRE USMERNIŠKE DIODE

Navadne usmerniške diode uporabljamo za usmerjanje nizkofrekvenčnih, nizkonapetostnih/tokovnih in visokonapetostnih/tokovnih signalov.

Hitre in ultrahitre diode uporabljamo za usmerjanje signalov v frekvenčnem območju od nekaj kHz do 1 MHz. Ena od najbolj razširjenih in popularnih uporab ultrahitrih diod je v stikalnih napajalnikih (Switch Mode Power Supply - SMPS). Mejne frekvence delovanja teh napajalnikov se vse bolj približujejo 1 MHz, zato je razumljiva vse večja potreba po hitrih in ultrahitrih diodah.

Tipična električna shema SMPS napajalnika je razvidna iz slike 31. Sestoji se iz naslednjih podsestavov: vhodni usmernik s filtrom, kontrolna enota z razsmernikom, visokofrekvenčni transformator in izhodni usmernik s filtrom. Izmenično napetost vhodne linije tak usmernik razseka s frekvenco 20 do 200 kHz, katero potem usmeri izhodni usmernik. Vhodna dioda D1 je standardna usmerniška dioda, medtem ko izhodni diodi D4 in D5 delata na visoki frekvenci. D4 je ponavadi ultrahitra dioda, D5 pa Schottky dioda, ki ima izredno nizek padec napetosti v prevodni smeri. Visokonapetostni diodi D2 in D3 sta bodisi hitri, oz. ultrahitri diodi.

- Razmerje med uporabljenimi diodami je tako sledeče:
- 25% standardna usmerniška dioda
 - 75% hitra ali ultrahitra dioda



Slika 31: Primer uporabe usmerniških diod v SMPS napajalniku

Pomembna parametra ultrahitrih diod pri načrtovanju uporabe v SMPS sta:

- prepustna napetost, V_{FM} , ki mora biti čim nižja, saj so izgube v prevodni smeri temu direktno sorazmerne
- zaporni vzpostavilveni čas, ki naj bo čim krajši, sama oblika preklopne karakteristike pa čim mehkejša, s čimer se ognemo indukciji EM motenj v napajalniku in izgubam v zapori

Vsi osebni računalniki, monitorji, TV sprejemniki, naprave za izkoriščanje sončne energije, napetostni regulatorji in brezprekinitvene napajalne naprave vsebujejo SMPS.

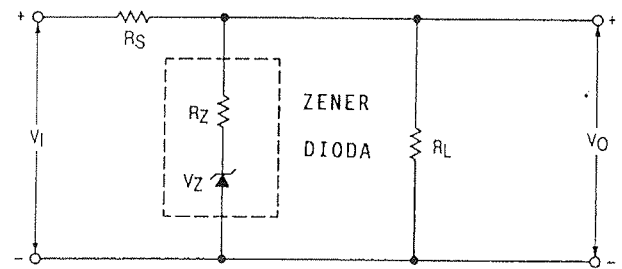
Tabela 2: Električne karakteristike ultrahitrih diod UF 400x iz programa Iskre SEMICON d.d.

Parameter	Simbol	En.	UF4001	UF4003	UF4005	UF4007
Neponovitvena temenska zaporna napetost	V_{RSM}	V	60	240	720	1200
Ponovitvena temenska zaporna napetost	V_{RRM}	V	50	200	600	1000
Povprečni prepustni tok $T_a = 25^\circ\text{C}$	I_{FAV}	A	1			
Udarni prepustni tok, 1 cikel, 10 ms, sinusni signal, $T_j=25^\circ\text{C}$	I_{FSM}	A	30			
Zaporni vzpostavitevni čas $I_F=0.5\text{A}, I_R=1\text{A}, I_{tr}=0.25\text{A}$	τ_{tr}	ns	50	75		
Zaporni tok pri $V_{RRM}, T_j=25^\circ\text{C}$	I_R	μA	10			
Zaporni tok pri $V_{RRM}, T_j=125^\circ\text{C}$	I_R	μA	50			
Prepustna napetost pri 1 A, $T_j=25^\circ\text{C}$	V_{FM}	V	1	1.7		
Tipični termični upor, spoj - izvod	R_{thjl}	K/W	25			
Delovna in temperatura skladiščenja	T_{op}	$^\circ\text{C}$	-65 do + 150			

V tabeli 2 smo zbrali tipične električne karakteristike ultrahitrih diod iz proizvodnega programa Iskre SEMICON d.d. iz Trbovelj.

3.2 ZENER DIODE

Osnovna raba Zenerjevih diod je v vezjih za regulacijo napetosti. Osnovna inačica regulatorja napetosti je prikazana na sliki 32. Izhodna napetost V_O naj bo čim manj občutljiva na spremembe vhodne napetosti, V_I , toka skozi breme, I_L , in spremembe temperature T . Velja najprej:



Slika 32: Osnovno vezje za regulacijo napetosti z Zener diodo

$$V_O = V_Z + V_I \frac{1}{\frac{R_S}{R_L} + \frac{R_S}{R_Z} + 1} \quad (4)$$

in še

$$\Delta V_O = \frac{\Delta V_I}{1 + \frac{R_S}{R_Z} + \frac{R_S}{R_L}} - \frac{R_S R_Z}{R_S + R_Z} \Delta I_L + TC \cdot \Delta T \cdot V_Z \quad (5)$$

Pogoji za dobro napetostno regulacijo so:

- nizka serijska upornost Zenerjeve diode
- absolutno majhen temperaturni koeficient spremembe Zenerjeve napetosti

Tudi upor R_S moramo tako izbrati, da Zenerjev tok ne pade pod neki minimalni tok $I_{Z(\min)}$, ko Zenerjeva dioda ne bi več delovala v področju preboja, s čimer bi bila onemogočena napetostna regulacija.

V tabeli 3 smo zbrali tipične električne karakteristike Zener diod iz proizvodnega programa Iskre SEMICON d.d. iz Trbovelj.

Tabela 3: Električne karakteristike 1.3 W Zener diod iz programa Iskre SEMICON d.d.

Tip	U_z pri I_z		I_z	I_z maks. pri $\theta_{amb} = 45^\circ\text{C}$	r_z maks. pri I_z	U_a min. pri $I_R = 10\mu\text{A}$
	min.	maks.				
	(V)	(V)	(mA)	(mA)	(Ω)	(V)
BZX 85 C5 V1	4,80	5,40	100	215	5	0,7
BZX 85 C5 V6	5,20	6,00	100	190	2	1,5
BZX 85 C6 V2	5,80	6,60	100	180	2	2
BZX 85 C6 V8	6,40	7,20	100	155	2	3
BZX 85 C7 V5	7,00	7,90	100	140	2	5
BZX 85 C8 V2	7,70	8,70	100	127	2	6
BZX 85 C9 V1	8,50	9,60	50	115	4	7
BZX 85 C10	9,40	10,6	50	105	4	7,5
BZX 85 C11	10,4	11,7	50	95	7	8,5
BZX 85 C12	11,4	12,6	50	85	7	9
BZX 85 C13	12,4	14,1	50	78	9	10
BZX 85 C15	13,8	15,8	50	70	9	11
BZX 85 C16	15,3	17,1	25	63	10	12
BZX 85 C18	16,8	19,1	25	57	11	14
BZX 85 C20	18,8	21,2	25	52	12	15
BZX 85 C22	20,8	23,3	25	48	13	17
BZX 85 C24	22,8	25,6	25	42	14	18
BZX 85 C27	25,1	28,9	25	38	15	20
BZX 85 C30	28	32	25	35	20	22,5
BZX 85 C33	31	35	25	31	20	25

3.3 SCHOTTKY DIODE

I-V karakteristika Schottky diode, oz. diode s spojem kovina/polprevodnik, je zelo blizu idealni. Odlikujeta jo zlasti nizek padec napetosti v prevodni smeri ter izredno nizki preklopni časi, saj tok v Schottky diodi prevajajo večinski nosilci naboja. Žal, z današnjo tehnologijo lahko izdelamo le Schottky diode s prebojnimi napetostmi pod 100 V in visokimi tokovi puščanja, ki postanejo še posebej izraziti pri visoki temperaturi. Poleg uporabe v mikrovalovni tehniki, je zlasti razširjena uporaba teh diod v vezjih za SMPS, poglavje 3.1. V tabeli 4 podajamo tipične električne karakteristike Schottky diode 1N5825 iz kataloga firme MOTOROLA.

Tabela 4: Tipične električne karakteristike Schottky diode 1N5825 firme MOTOROLA

Parameter	Simbol	Enota	Vrednost
Neponovitvena temenska zaporna napetost	V_{RSM}	V	48
Ponovitvena temenska zaporna napetost	V_{RRM}	V	40
Povprečni prepustni tok	$I_{F(AV)}$	A	15
Udarni prepustni tok	I_{FSM}	A	500
Zaporni tok		mA	25°C
			100°C
Prepustna napetost	V_{FM}	V	3 A
			5 A
			15.7 A

3.4 SUPRESORSKE DIODE

Supresorske diode, SD, so posebne Zener diode namenjene omejitvi prenapetosti, ki se lahko pojavi na napajalni liniji, oz. zaščiti občutljivih elektronskih komponent pred napetostno-tokovnimi špicami. Če napetost na diodi preseže Zenerjevo napetost, dioda začne prevajati, oz. mora prevzeti vso energijo impulza na sebe v zelo kratkem času. Tej zahtevi morajo biti ustrezno izbrani tehnologija izdelave tabletk, tehnologija montaže in ohišje.

Tipične moči, ki jih mora prenesti SD se gibljejo v območju 400 - 5000 W, kar pomeni 0.55 - 7 J absorbirane energije v času do 1 ms. Tipične Zenerjeve napetosti pa se gibljejo v območju od nekaj voltov do nekaj sto voltov.

SD niso edine komponente, ki jih lahko uporabimo za prenapetostno zaščito. Varistorji, plinski odvodniki, iskrišča in raznovrstni filtri, bodisi posamezno ali pa kot medsebojne kombinacije so pogosto v rabi. V tabeli 5 podajamo primerjavo med SD in kovinskooksidnimi varistorji.

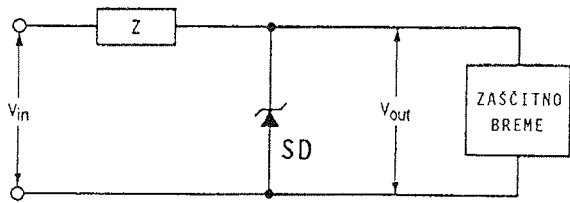
Tabela 5: Primerjava med kovinskooksidnimi varistorji in supresorskimi diodami

KOVINSKOOKSIDNI VARISTOR	SUPRESORSKA DIODA
omejilna napetost se bistveno razlikuje od delovne	omejilna napetost je blizu delovni
ima simetrično dvosmerno I-V karakteristiko	standardne SD se obnašajo kot Zener diode; na razpolago so tudi SD s simetrično dvosmerno I - V karakteristiko
absorpcija moči na enoto cene je večja kot pri SD, za doseg definirane omejitve napetosti pa bi morali močno predimenzionirati element, kar bi podražilo sistem	dobro definirana omejitvena napetost, kar v končni fazi poceni sistem
vgrajeni notranji mehanizmi povzročajo degradacijo omejitve napetosti z vsakim impulzom	ni notranjega mehanizma, ki bi povzročil degradacijo omejitve napetosti
idealen za grobo zaščito AC linij	idealen za natančno zaščito DC in AC linij
zmožnost enkratne absorpcije velikih tokovnih špic	zmožnost absorpcije večkratnih srednje visokih tokovnih špic
v primeru prenapetosti degradira	v primeru prenapetosti pride v kratek stik
zdrži visoke napetosti	omejena uporaba pri visokonapetostnih špicah, razen če ne uporabimo več SD v seriji
slabo omejuje nizkonapetostne špice	zmožnost omejevanja nizkonapetostnih špic

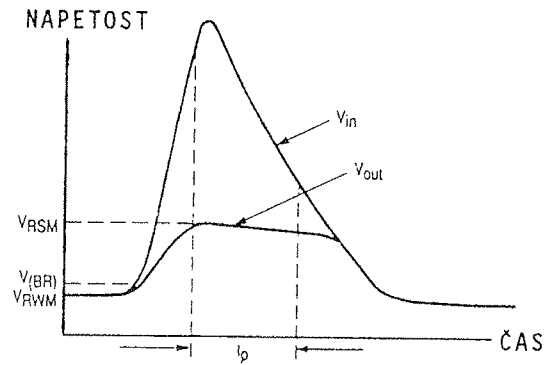
SD priključimo vzporedno z elementom, ki ga želimo ščititi, saj na ta način lahko energijsko špico učinkovito usmerimo na zaščitni element, slika 33. Pri izbiri SD moramo biti pozorni na naslednje električne parametre, slika 34:

- V_{RWM} : temenska delovna napetost, ko SD še ne pravaja toka, oz. tok ki teče skozi SD je le tok puščanja diode v reverzni smeri
- $V_{(BR)}$: prebojna napetost
- V_{RSM} : temenska zaporna (omejilna) napetost, ki jo podajamo skupaj z I_{RSM}
- I_{RSM} : neponovitveni temenski zaporni tok, pri čemer ne sme biti presežena največja dovoljena poraba moči na SD pri trajanju impulza 1 ms

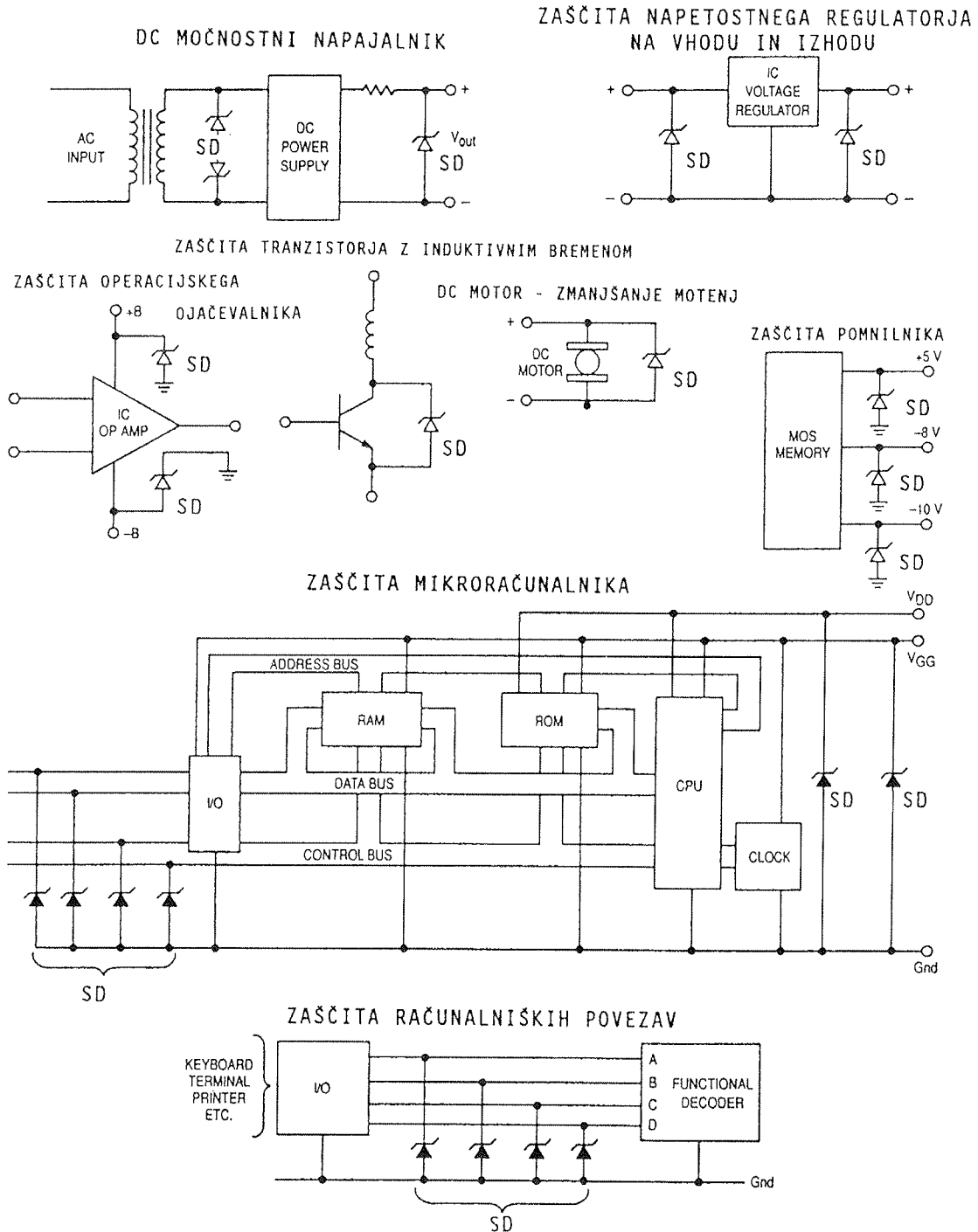
V praksi izberemo tako SD, katere parameter V_{RWM} je nekoliko višji od specificirane največje delovne napetosti elementa, ki ga ščitimo. Pri normalnih pogojih skozi SD teče majhen tok. Ko nastopi špica, SD deluje kot element z zelo nizko dinamično upornostjo, na njej pa se razvije napetost, ki je nekoliko višja od $V_{(BR)}$. Dejanska vrednost omejitve napetosti na SD je določena s tokovno špico skozi SD.



Slika 33: Zaščita elementa s SD



Slika 34: K definiciji električnih parametrov za SD



Slika 35: Primeri uporabe SD

Nekaj tipičnih primerov vezij z vgrajeno SD zaščito je prikazanih na sliki 35, v tabeli 6 pa podajamo kratko preglednico tipičnih električnih parametrov nekaterih SD firme MOTOROLA.

Tabela 6 Preglednica električnih parametrov nekaterih SD firme MOTOROLA

TIP SD	V _{BR} V	@ I _R mA	V _{RWM} V	I _R @ V _{RWM} μA	I _{RSM} A	V _{RSM} pri I _{RSM} V
1N6373	6.0	1.0	5.0	300	160	9.4
1N6389	52.9	1.0	45	2.0	19	78.9
1N6299	150	1.0	121.0	5.0	7.0	215.0
1N6303	200	1.0	162	5.0	5.2	287

4.0 TEHNOLOGIJE ZA IZDELAVO SILICIJEVIH USMERNIŠKIH DIOD

Obstaja veliko različnih tehnologij za izdelavo silicijevih diod. Izbira ustrezne tehnologije je odvisna od tega, kakšen končen izdelek želimo. S tem predvsem mislimo na njegove električne in zanesljivostne karakteristike ter ceno, ki jo lahko dosežemo na trgu.

Določeni tehnološki koraki so skupni vsem tehnologijam, drugi so zopet značilni le za nekatere. V vsakem primeru je substrat silicijeva rezina točno določene specifične upornosti, v katero, s pomočjo postopka difuzije iz trdnih, tekočih ali plinskih izvorov, vnesemo dopante n (fosfor) in p (bor) tipa. Diodno tabletko je potrebno pasivirati in metalizirati, s čimer omogočimo spajkanje na zunanje priključke. Sledi zapiranje v stekleno, oz. v večini primerov plastično ohišje, temu meritev električnih karakteristik in na koncu označevanje.

Glede na to, kdaj in kako definiramo geometrijo diodne tabletko, ločimo tehnologije za izdelavo diod v dve veliki skupini:

- **slojna tehnologija:** velikost diodne tabletko določimo po postopkih difuzije in metalizacije z žaganjem, oz. jedkanjem čipa; ravno tako je pasivacija ponavadi izvedena po tem, ko je diodna tabletko že zaspajkana na priključne žičke; p-n spoj je raven z negativno ali pozitivno zaključitvijo na robu tabletk
- **planarna tehnologija:** vse operacije vključno s pasivacijo in metalizacijo izvedemo na nivoju rezine; geometrija tabletko je določena z uporabo mask, z žaganjem samo razkosamo rezino na tabletko; p-n spoj je bodisi raven z negativno/pozitivno zaključitvijo ali pa planaren brez oz. z zaključitvijo s plavajočimi obroči, oz. poljsko elektrodo.

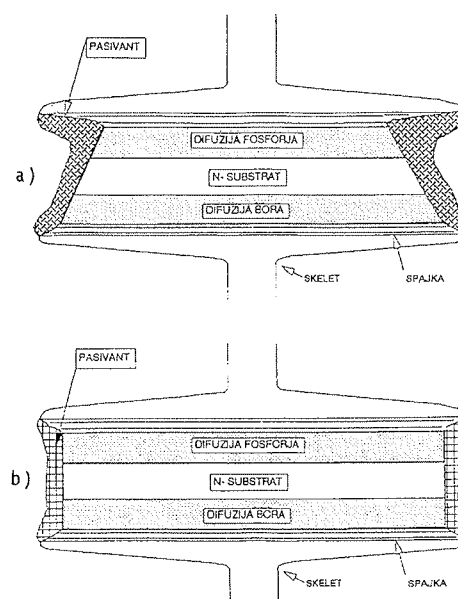
4.1 SLOJNA TEHNOLOGIJA

Tipični potek korakov za izdelavo slojnih diod je naslednji:

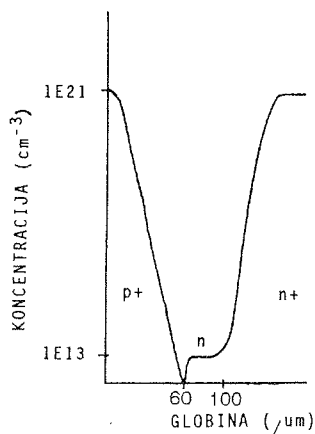
- Silicijeva rezina, debelina okoli 205 μm, specifična upornost 40 - 60 Ωcm, dopirana s fosforjem
- Čiščenje rezin in priprava površine
- Dvostranska difuzija bora in fosforja iz lističev, 1250°C, nekaj ur
- Kratka oksidacija površine v pari
- Jedkanje, čiščenje in priprava površine
- Nanos izvora zlata na rezine, sušenje*
- Difuzija zlata, 850 - 1000°C, N₂*
- Jedkanje, čiščenje in priprava površine
- Nanos niklja na obe strani
- Legiranje niklja
- Jedkanje, čiščenje in priprava površine
- Nanos drugega niklja in zlata na obe strani
- Razrez rezine na tabletko (ravni ali žagin list z naklonom)
- Spajkanje tabletk na priključne žičke
- Jedkanje tabletk
- Izpiranje, čiščenje, sušenje
- Nanos pasivacije (silikonska guma, poliimid)
- Polimerizacija
- Zapiranje v plastiko
- Staranje plastike
- Kositrnanje priključkov
- Električne meritve

* difuzijo zlata izvajamo po potrebi za kontrolo zapornega vzpostavitvenega časa

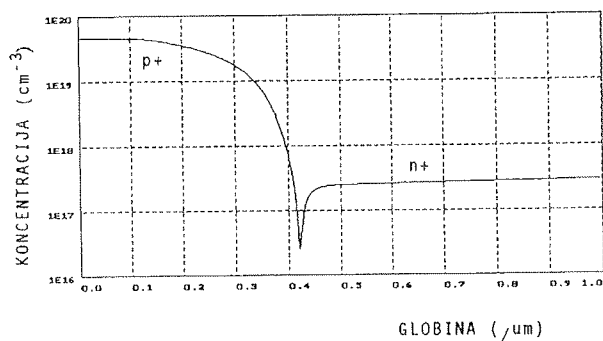
Na sliki 36 prikazujemo presek na ta način izdelane diode, na sliki 37 pa profil dopantov skozi celotno strukturo diode.



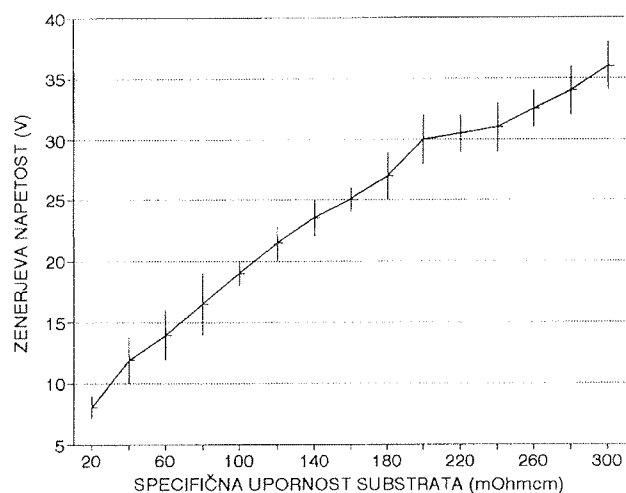
Slika 36: Presek diode izdelane s tki PPS (Pasivacija Po Spajkanju) slojno tehnologijo a) zaključek p-n spoja z naklonom b) raven zaključek p-n spoja



Slika 37: Profil dopantov v slojni diodi



Slika 38: Profil dopantov v Zener diodi



Slika 39: Odvisnost Zenerjeve napetosti od specifične upornosti substrata

Na zgoraj opisani način izdelujemo usmerniške diode s prebojnimi napetostmi do 1600 V, hitre usmerniške diode s prebojnimi napetostmi od 400 V do 1200 V, Zener diode s prebojnimi napetostmi od 10 V naprej, supresorske diode ipd...

Tehnologija izdelave Zener diod je nekoliko specifična in se od zgoraj naštetih razlikuje v naslednjih korakih:

- Specifična upornost silicijevih rezin je bistveno manjša (od 20 mΩcm naprej)
- Difuzija p+ je plitvejša z ostrim koncentracijskim profilom

To je lepo razvidno s slike 38, kjer prikazujemo profil dopantov v nizkonapetostni Zener diodi. Na sliki 39 pa podajamo eksperimentalno dobljeno odvisnost Zenerjeve napetosti od specifične upornosti substrata.

4.2 PLANARNA TEHNOLOGIJA

Tipični potek korakov za izdelavo planarnih signalnih diod v steklenem ohišju na 100 μm rezinah je naslednji:

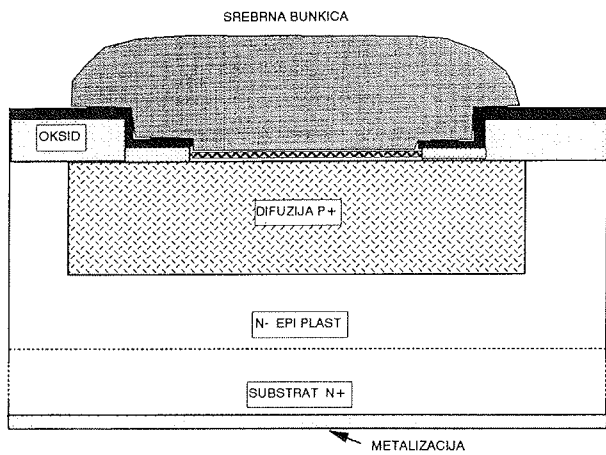
- Silicijeva rezina debeline okoli 500 μm, substrat As, specifična upornost 5 - 15 mΩcm, EPI plast 15 - 20 μm, specifična upornost 2 - 20 Ωcm*, dopirana s fosforjem
- Čiščenje površine
- Osnovna oksidacija
- Priprava površine, nanos fotorezista
- I.MASKA za difuzijo p+, jedkanje oksida, odstranjevanje fotorezista
- Predepozicija bora iz trdnega izvora
- Difuzija bora
- Nanos LPCVD silicijevega nitrida (primarna pasivacija)
- Priprava površine, nanos fotorezista
- II.MASKA za kontakte, jedkanje nitrida in oksida, odstranjevanje fotorezista
- Nanos izvora zlata ali platine na rezine, sušenje
- Difuzija zlata/platine
- Nanos in legiranje paladija v kontaktih
- Tanjšanje rezin
- Nikljanje hrbtne strani
- Srebrenje kontaktov
- Legiranje metalizacije
- Razrez rezine na tabletk
- Zapiranje tabletk v steklena ohišja
- Kositrnanje priključkov
- Električne meritve

* z debelino in plastno upornostjo EPI plasti določamo prebojne karakteristike diode; planarne signalne diode iz programa Iskre SEMICON imajo prebojne napetosti do 250 V.

Na sliki 40 prikazujemo presek na ta način izdelane diode, na sliki 41 pa profil dopantov v taki strukturi.

Nekoliko drugače izdelujemo ultrahitne diode s stekleno pasivacijo. Zahteve po nizkih preklopnih časih, nizkih padcih napetosti v prevodni smeri in nizkih prebojnih napetostih (do 250 V) relativno lahko realiziramo s tehnologijo izdelave na rezinah z EPI plastjo in plitkimi p+n spoji. Potek korakov je naslednji:

- Silicijeva rezina debeline okoli 500 μm, substrat Sb, specifična upornost 25 mΩcm, EPI plast 20-30 μm, specifična upornost 2 - 20 Ωcm*, dopirana s fosforjem

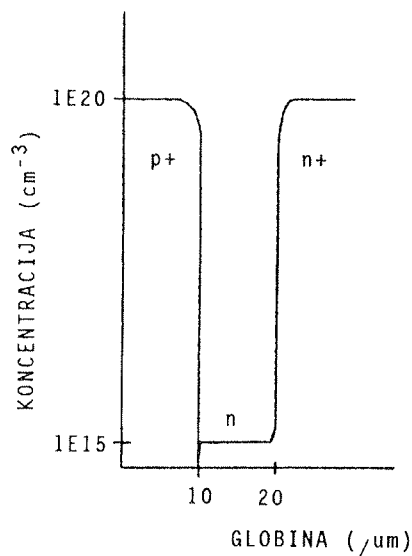


Slika 40: Presek planarne signalne diode

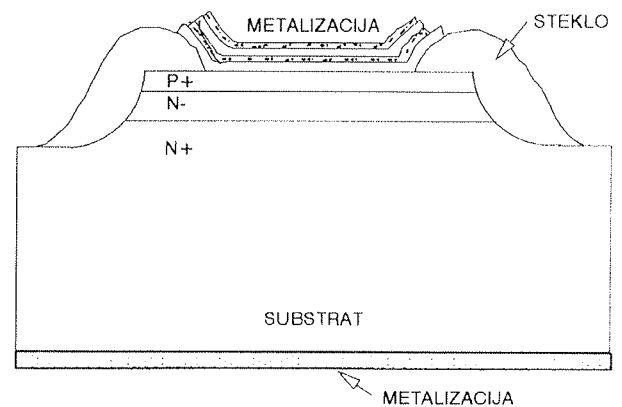
- Nanos metalizacije na čelno stran rezine
- Priprava površine, nanos fotorezista
- III.MASKA za metalizacijo, jedkanje metalizacije, odstranjevanje fotorezista
- Nanos metalizacije na hrbtno stran rezine
- Legiranje metalizacije
- Razrez rezine na tabletk
- Spajkanje tabletk na priključne žičke
- Zapiranje v plastiko
- Staranje plastike
- Kositranje priključkov
- Električne meritve

* z debelino in plastno upornostjo EPI plasti določamo prebojne karakteristike diode; ultrahitri diode iz programa Iskre SEMI-CON imajo prebojne napetosti do 250 V

Na sliki 42 prikazujemo presek na ta način izdelane diode, na sliki 43 pa profil dopantov skozi celotno strukturo diode.

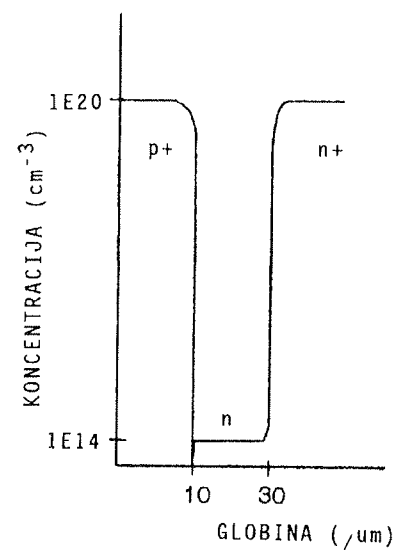


Slika 41: Profil dopantov v planarni signalni diodi



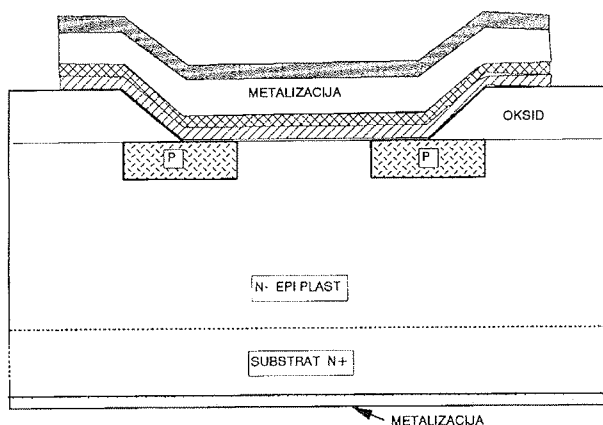
Slika 42: Presek planarne ultrahitri diode z jedkanim kanalom

- Čiščenje površine
- Predepozicija bora iz trdnega izvora
- Difuzija bora
- čiščenje površine
- Osnovna oksidacija
- Priprava površine, nanos fotorezista
- I.MASKA za jedkanje kanalov, jedkanje oksida, odstranjevanje fotorezista
- Jedkanje silicija, cca 30 μm, jedkanje oksida
- Nanos izvora zlata ali platine na rezine, sušenje
- Difuzija zlata/platine
- Nanos mešanice stekla in fotorezista, sušenje
- II.MASKA za pasivacijo, osvetljevanje
- Sežig fotorezista in formiranje stekla pri 850°C
- Priprava površine pred nanosom metalizacije



Slika 43: Profil dopantov v planarni ultrahitri diodi

Tudi Schottky diode ponavadi izdelujemo s planarno tehnologijo. Osnovnega p-n spoja v tem primeru ni, saj gre za stik kovina - polprevodnik, čeprav moramo na robovih stika difundirati varovalni obroč p tipa. Na sliki 44 prikazujemo presek Schottky diode izdelane na rezini z debelino EPI plasti 4 μm in specifično upornostjo okoli 1.7 Ωcm , /8/.



Slika 44: Presek tipične Schottky diode

5.0 KVALITETA IN ZANESLJIVOST DIOD

Govoriti in pisati o kvaliteti izdelkov je nevhvaležna zadeva. Zlasti za področje polprevodnikov in mikroelektronike že dolgo časa ne govorimo več o ugotavljanju ali zagotavljanju kakovosti, temveč o TQM - sistemu celovitega obvladovanja kakovosti, /9/. Uvedba tega sistema v vsakdan podjetja pomeni spremembo kulture vedenja in dela zaposlenih. Na vseh nivojih podjetja, od vodstva pa do čistilke, vsi morajo biti udeleženi v omenjenem procesu. Gre torej za obvladovanje tehničnih, ekonomskih, administrativnih in človeških faktorjev, da se preprečijo kakršnekoli neskladnosti in pomanjkljivosti. Obvladovan proces mora torej v vsakem trenutku kupcu zagotoviti proizvod, ki ga ta pričakuje.

Stvar se začne že pri ustrezni definiciji izdelka za potrebe trga. Temu sledi razvoj novega izdelka, v katerega je potrebno vgraditi zanesljivost tako, da bo čim manj občutljiv na procesno - tehnološke variacije. Naslednji korak je izdelava prototipa in njegova evaluacija, ko je potrebno pazljivo spremljati obnašanje izdelka, odziv kupcev ter ustrezno odpravljati morebitne napake.

Uvajanje izdelka v proizvodnjo, ki sledi fazi razvoja, zahteva sodelovanje več služb kot npr. razvoja, nabave in proizvodnje. V procesu uvajanja je potrebno definirati ustrezne specifikacije vhodnih materialov, nabavnih poti in zlasti identificirati kritične tehnološke korake in parametre, ki jih je potrebno spremljati in uvrstiti v program SPC - statistične kontrole procesa.

Po določenem času proizvodnje izdelka je potrebno te SPC parametre analizirati, ugotoviti razloge za odstopanja od pričakovanih vrednosti in ustrezno ukrepati.

Ponovljivost in kontrolabilnost vseh parametrov sta pogoj za doseganje tki. zmogljivosti procesa, kar je merilo, da smo zmožni proizvajati izdelek konsistentno v skladu z zahtevanimi parametri.

Kljub vsem naporom in zagotovitvam o vgrajeni zanesljivosti na vseh nivojih proizvodnega in upravnega procesa neke tovarne, mora oddelek za kontrolo kvalitete in zanesljivosti vsaj občasno izvajati UGOTAVLJANJE ZANESLJIVOSTI v skladu z nekim vnaprej definiranim programom za ugotavljanje zanesljivosti. V nadaljevanju bomo našli nekatere tipične teste, ki jih izvajamo na silicijevih diodah v okviru tega programa.

AVTOKLAVA

Avtoklava je test, kjer ugotavljamo odpornost izdelka na prodor vlage in odpornost na galvansko korozijo. To je izredno pospešen in destruktiven test.

Tipični testni pogoji: $T_A = 121^\circ\text{C}$, $r_h = 100\%$, $p = 1 \text{ bar}$,
 $t = 8 - 96 \text{ ur}$

Tipične oblike odpovedi: spremembe električnih parametrov, visoki tokovi puščanja

Tipični mehanizmi odpovedi: korozija tabletk, kontaminacija v ohišju, slabo tesnenje ohišja

H3TRB test

(High Humidity High Temperature Reverse Bias)

Pri tem testu merimo odpornost proti vlagi v plastično ohišje zaprte diode. Diodo priključimo na napetost, s čimer ustvarimo elektrolitsko celico, kar pospeši korozijo metalizacije. S časom je to destruktiven test.

Tipični testni pogoji: $T_A = 85^\circ\text{C}$, $r_h = 85\%$,
napetost = $80\%V_{RRM}$, $t = 1000 \text{ ur}$

Tipične oblike odpovedi: sprememba toka puščanja

Tipični mehanizmi odpovedi: korozija tabletk, kontaminacija ohišja, slabo tesnenje ohišja

HTRB test (High Temperature Reverse Bias)

Namen tega testa je ob povišani temperaturi in s pomočjo električnega polja sprožiti gibanje gibljivih nabojev v strukturi in tako inducirati poti površinskega puščanja na spoju.

Tipični testni pogoji: $T_A = 150^\circ\text{C}$, napetost : U_{RRM} ,
 $t = 120 - 1000 \text{ ur}$ (tipično 168 ur)

Tipične oblike odpovedi: sprememba toka puščanja

Tipični mehanizmi odpovedi: ionska kontaminacija roba tabletk, oz. površine pod metalizacijo tabletk

HTSL test (High Temperature Storage Life)

Namen testa je pospešiti mehanizme odpovedi, ki se aktivirajo termično na povišani temperaturi.

Tipični testni pogoji: $T_A = 150^\circ\text{C}$, brez napetosti,
 $t = 24 \text{ do } 2500 \text{ ur}$

Tipične oblike odpovedi: sprememba toka puščanja

Tipični mehanizmi odpovedi: defekti znotraj tabletk, difuzijski defekti

MEHANSKE OBREMENTIVNE

Namen testa je ugotoviti zmožnost izdelka, da prenese nenadne mehanske obremenitve, ki se lahko pojavijo med rokovanjem, transportom ali med uporabo.

Tipični testni pogoji: pospešek=1500 g, orientacija X1, Y1, Y2 ravnina, $t=0.5$ ms

Tipične oblike odpovedi: odprte sponke, kratek stik, mehanski defekti, prekomerno puščanje

Tipični mehanizmi odpovedi: počena tabletk, defekti v ohišju

SPAJKLJIVOST

Namen testa je ugotoviti spajkljivost izvodov po določenem času skladiščenja.

Tipični testni pogoji: staranje v pari: 8 ur, fluks=R, spajka =Sn60, $T = 230^{\circ}\text{C}$, $t=2$ s

Tipične oblike odpovedi: luknjice, slaba omočljivost

Tipični mehanizmi odpovedi: slabo kositranje, kontaminacija izvodov

TEMPERATURA SPAJKANJA

Namen testa je ugotoviti, ali izdelek prenese temperature, ki se lahko pojavijo pri avtomatskem spajkanju. Končni test je električni.

Tipični testni pogoji: temperatura spajke : 260°C , $t = 10$ s

Tipične oblike odpovedi: spremembe električnih parametrov, mehanske odpovedi

Tipični mehanizmi odpovedi: slabo ohišje

SSOL test (Steady State Operating Life)

Namen testa je ugotoviti stabilnost notranjosti tabletk in ustvariti defekte, ki se kažejo kot časovno - napetostno odvisne odpovedi.

Tipični testni pogoji: $T_A=25^{\circ}\text{C}$, napetost: V_{RRM} , $t = 16 - 1000$ ur (tipično 168 ur)

Tipične oblike odpovedi: spremembe električnih parametrov, katastrofalne odpovedi

Tipični mehanizmi odpovedi: tujki, počena tabletk, metalizacija, slabo spajkanje

IOL test (Intermittent Operating Life)

Namen testa je enak kot pri SSOL, le da želimo s termično obremenitvijo dodatno testirati neoporečnost spajkanja tabletk na izvode.

Tipični testni pogoji: $P_d =$ maksimalna specificirana vrednost, $t_{ON} = 5$ s pri $T_j=145^{\circ}\text{C}$, $t_{OFF}=10$ s pri $T_j=45^{\circ}\text{C}$, število ciklov: 42 - 30000 (tipično 10000)

Tipične oblike odpovedi: spremembe električnih parametrov, katastrofalne odpovedi

Tipični mehanizmi odpovedi: tujki, razpoke v tabletki, poškodbe metalizacije

TERMIČNI ŠOKI

Namen testa je ugotoviti zmožnost izdelka, da prenese tako visoke/nizke temperature, kakor tudi nenadne prehode med obema temperaturnima maksimumoma.

Tipični testni pogoji: $T_A = -65$ do 200°C , število ciklov 10 do 1000, $t = 10$ min

Tipične oblike odpovedi: spremembe električnih parametrov (V_{FM} , I_R), katastrofalne odpovedi

Tipični mehanizmi odpovedi: razpoke v tabletki, odpovedi v ohišju

ROBUSTNOST IZVODOV DIOD

Namen testa je ugotoviti vzdržljivost pri nategu, zvijanju in sukanju.

Tipični testni pogoji: sila natega: 50 N, $t = 10$ s, sila upogiba: 5 N, $t = 2-3$ s, sukanje $0^{\circ} - 180^{\circ} - 0^{\circ}$

Sledi vizuelni pregled in električne meritve.

Tipične oblike odpovedi: povečanje V_{FM} , povečanje toka puščanja, odprte sponke

Tipični mehanizmi odpovedi: odtrgana tabletk, poškodovana tabletk, poškodovani izvodi

6.0 ZAKLJUČEK

Spojna dioda je osnovni gradnik integriranih vezij, teorija p-n spoja pa pomeni osnovo za pojasnjevanje delovanja vseh ostalih polprevodniških elementov.

Čeprav na prvi pogled enostaven element, tehnologija izdelave diskretne diode pa pogostokrat mačehovsko obravnavana, industrijska izdelava silicijevih diod zahteva podobne prijeme kot katerakoli druga proizvodnja mikroelektronskih elementov.

V primerjavi s tehnologijo izdelave diod izpred let, današnja tehnologija uvaja nekatere nove tehnološke prijeme in materiale, katerih cilj je povečanje produktivnosti, izplenov in kvalitete izdelka. Tipična tovarna diod mora danes obvladovati ne samo širokoserijsko proizvodnjo enega ali nekaj tipov izdelkov, temveč mora biti sposobljena voditi vzporedno tudi strategijo razvojne tovarne. Tisti, ki bo danes trgu ponudil široko paleto različnih tipov diod (usmerniške, močnostne, hitre, ultrahitre, signalne, Zener, supresor, Schottky, ipd.) ima veliko več možnosti prilagajanja in s tem obstanka na trgu.

7.0 LITERATURA

- /1/ W. Shockley, "The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistor", Bell Syst. Tech. J., 28, 435, (1949); Electrons and Holes in Semiconductors, D. Van Nostrand, Princeton, N.J., 1950
- /2/ S.M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, J. Wiley and Sons, 1981
- /3/ J. Furlan, Teorija nelinearnih elementov, Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, Ljubljana, 1984
- /4/ B.J. Baliga, Modern Power Devices, J. Wiley and Sons, 1987
- /5/ F. Conti, M. Conti, "Surface Breakdown in Silicon Planar Diodes Equipped with Field Plate", Solid State Electronics, 1972, vol. 15, pp 93 - 105
- /6/ I. Šorli, B. Kren, R. Ročak, Z. Bele, "Comparison of Gold and Platinum Doped Silicon Diodes", Proceedings of MIEL-SD'94, Bled 1994, Slovenia
- /7/ B. Kren, I. Šorli, R. Ročak, Z. Bele, M. Stipančič, A. Delač, Z. Zupančič, M. Kramberger, "Testchip for Evaluation of Silicon Planar Diodes", Proceedings of MIEL-SD'93, Bled, Slovenia
- /8/ A. Pintar, J. Razingar, A. Keržič, "Notranji fizikalni pojavi na prehodu kovina - polprevodnik pri Schottkyjevi diodi", Zbornik referatov XXV. Jugoslovanskega simpozija o elektronskih sestavnih delih in materialih - SD89, Maribor, 1989, MIDEM
- /9/ I. Pompe, "Sistem celovitega obvladovanja kakovosti - TQM", Informacije MIDEM 25(1995)1, marec 1995

*mag. Brane Kren, dipl.ing.,
mag. Iztok Šorli, dipl.ing.,
dr. Rudolf Ročak, dipl.ing.*

*MIKROIKS d.o.o., Dunajska 5,
61000 Ljubljana, Slovenija*

*tel. +386 (0)61 312 898,
fax. +386 (0)61 319 170*

*Stane Stradar, dipl.ing.,
Zmago Zupančič, dipl.ing.*

*Iskra SEMICON d.d., Gabrsko 12,
61420 Trbovlje, Slovenija*

*tel. +386 (0)601 27425,
fax. +386 (0)601 27 374*

Prispelo (Arrived): 03.07.1995 Sprejeto (Accepted): 11.07.1995