

KARAKTERIZACIJA POLPREVODNIKOV Z RASTRSKIM ELEKTRONSKIM MIKROSKOPOM

Gvido Bratina

1. UVOD

Rastrski elektronski mikroskop (REM) je postal nepogrešljiv pripomoček pri študiju lastnosti materialov in polprevodniki pri tem niso izjema. Elektroni v REM, s katerimi obstreljujemo vzorec, imajo energije od nekaj sto eV do nekaj deset keV. V primerjavi z vezavnimi energijami elektronov v atomih je 10 keV ogromno. Posledica tega je, da pride pri neelastičnih trkih takih elektronov z atomi v snovi do vrste pojavov, ki jih izkoriščamo za opis lastnosti vzorca.

Trki so lahko elastični, ali neelastični. Pri prvih se elektronom spremeni le smer, pri drugih pa poleg smeri še energija. Prav slednji so odgovorni za generacijo sekundarnih elektronov, ki nosijo informacijo o obliki površine vzorca, za nastanek rentgenskih žarkov, fotonov v vidnem in IR delu spektra, Augerjevih elektronov in ne nazadnje za kreacijo nosilcev naboja. In prav slednji pojav je najpomembnejši pri študiju lastnosti polprevodnikov, saj nam nudi informacije o kristalografskih napakah (dislokacijah, vključkih...), o napakah polprevodniških spojev (MOS, p-n) in napakah v integriranih vezjih. Spekter uporabe je torej zelo širok, kar je tudi razlog za razširjenost te metode v svetu.

V tem prispevku bom najprej opisal fizikalne osnove kreacije nosilcev naboja s hitrimi elektroni in izvor kontrasta pri kvalitativnem opisovanju vzorcev ter navedel primer uporabe te metode, v zadnjem delu pa bom navedel osnovna načela kvalitativnega določanja nekaterih značilnih količin.

2. VZBUJANJE POLPREVODNIKOV S HITRIMI ELEKTRONI

Vpadli curek na svoji poti po vzorcu kreira nosilce naboja. Trki hitrih elektronov z valenčnimi elektroni v snovi vzbudijo atome tako, da nastanejo v valenčnem

pasu luknje, v prevodnem pasu pa elektroni. Tako kreirani nosilci so v električno nevtralnem vzorcu v termodinamskem ravnovesju s kristalno mrežo. Trki z mrežnimi atomi spreminjajo njihovo pot in njihovo kolektivno gibanje je difuzno. Med difuzijo se nosilci nasprotnih znakov rekombinirajo, frekvenca rekombinacije je odvisna od preseka za rekombinacijo σ in N_t -gostote pasti. Pred rekombinacijo nosilec živi;

$$\tau = \frac{1}{\sigma N_t} v_{th}$$

dolgo. Tu je τ življenska doba nosilca in v_{th} je hitrost gibanja nosilca po mreži, dana z enačbo $\frac{1}{2} m v_{th}^2 = \frac{3}{2} kT$. (k = Boltzmannova konstanta in T = temperatura).

V vzorcu s homogeno porazdelitvijo pasti, se dodatno vzbujeni nosilci rekombinirajo s frekvenco, ki je sorazmerna z gostoto nosilcev. Nosilci pa zapuščajo določeno področje tudi z difuzijo in v ravnovesnem stanju jih morajo nadomestiti na novo generirani, za kar poskrbi curek vpadlih elektronov. To opisuje kontinuitetna enačba:

$$g - \frac{1}{q} \nabla \cdot J_n - \frac{\Delta p}{\tau} = \frac{d \Delta p}{dt} = 0$$

kjer je g pogostnost nastajanja nosilcev, Δp pa gostota dodatno vzbujenih nosilcev. V primeru, ko je gostota toka določena z difuzijo:

$$J_n = -q D_n \frac{\partial \Delta p}{\partial x}$$

ima kontinuitetna enačba rešitev v obliki:

$$\Delta p \propto e^{-x/L}$$

za $g = 0$, kjer je

$$L = \sqrt{D_n \tau_n}$$

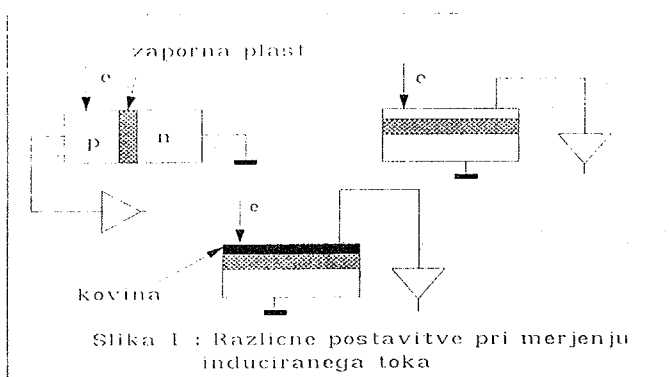
difuzijska dolžina manjšinskih nosilcev naboja, pomembna količina, ki pove povprečno pot med točko nastanka nosilca in točko njegove anihilacije.

Kot rečeno se v električno nevtralnem vzorcu dodatno vzbujeni nosilci gibljejo difuzno. Ob prisotnosti električnega polja pa se njihovo gibanje uredi in usmeri. Tako polje je vedno prisotno v p-n spojih, MOS spojih in Schottkijevih diodah, kjer se pojavi zaporna plast. Dodatno vzbujeni nosilci tako predstavljajo tok, ki se pojavi na mejah vzorca in znaša:

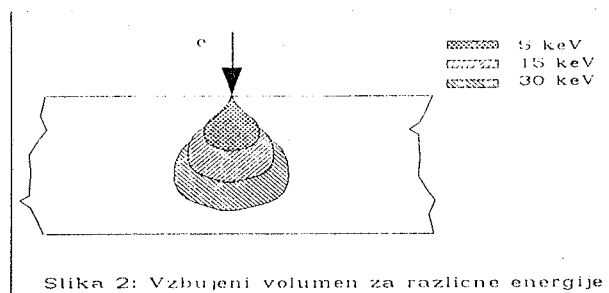
$$I_{ca} = \frac{I_e E_f}{E_{ph}}$$

Tu je I_b tok vpadlih elektronov, E njihova energija, f delež vpadlih elektronov, ki so sposobni kreirati pare in E_{ph} energija, potrebna za kreacijo para.

Pri merjenjih in opazovanjih običajno uporabljamo take postavitve, kot jih kaže slika 1. Pri delu pa moramo upoštevati tudi ločljivost; poleg debeline vstopnega curka, ki je določena pretežno z instrumentalnimi značilnostmi, vplivajo na ločljivost te metode procesi znotraj vzorca.



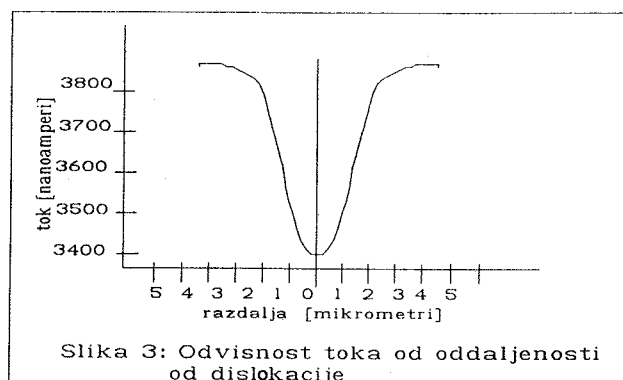
Zaradi trkov so tiri primarnih elektronov v snovi močno zlomljene črte. Množica elektronov generira nosilce v relativno širokem področju pod točko vstopa v vzorec. Govorimo o vzbujenem volumnu. Pri siliciju znaša za vpadle elektrone energije 15 keV, približno 2 kubična mikrona. Obliko in energijsko odvisnost vzbujenega volumna kaže slika 2.



Lahko torej zaključimo, da je ločljivost te metode reda mikrometra, česar se moramo zavedati predvsem pri kvalitativni karakterizaciji vzorcev.

3. KONTRAST

Nastali sunek se v ojačevalcu okrepi, ustrezne elektronske naprave pa ga preoblikujejo tako, da lahko krmili slikovno cev. Merilnik toka (pikoamperimeter) meri tok dodatno vzbujenih nosilcev v področju, nad katerim se nahaja curek primarnih elektronov. Zaradi lokalnega spreminjanja rekombinacije v vzorcu se torej spreminja tudi izmerjeni tok in s tem tudi svetlost na slikovni cevi. Na spodnji sliki vidimo odvisnost zbranega toka I_{cc} od oddaljenosti točke vzbujanja od dislokacije, pri prehodu curka vpadlih elektronov prek nje v Si pri 15 keV. Sam

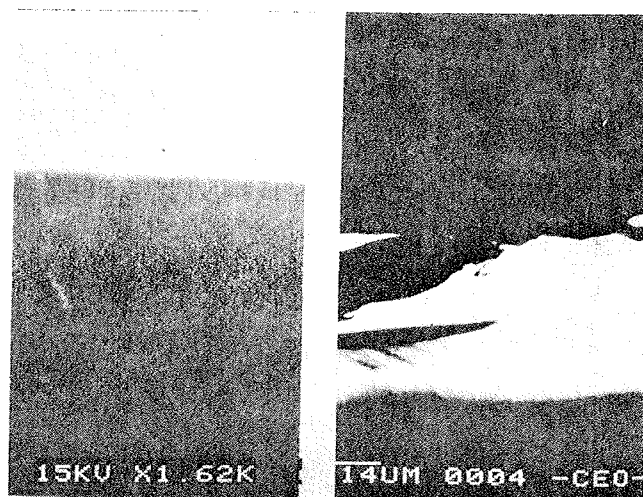


proces merjenja toka je sestavljen iz treh faz: kreacije para, difuzije proti zaporni plasti in samega merjenja. Vsak faktor, ki vpliva na eno izmed teh faz, lahko spreminja merjeni tok.

Na kreacijo parov lahko vplivajo faktorji, ki spreminjajo povratno sipanje primarnih elektronov. S sta-

lišča merjenja toka predstavlja povečano število odbitih elektronov izgubo, saj ti ne morejo več generirati novih parov. Take in podobne vplive (topografske značilnosti) izločimo s primerjavo slik narejenih z ostalimi detektorji. Vsak proces, ki spremeni hitrost difuzije proti zaporni plasti, njihovo življensko dobo ali difuzijsko dolžino nosilcev, učinkuje tudi na zbrani tok. Taki faktorji so lahko:

- neenakomerna porazdelitev rekombinacijskih centrov na površini vzorca,
- tanki (20 nm) kontaminacijski sloji na površini vzorca
- dislokacije, kjer je poudarjena difuzija dopantov, kar spremeni potek zaporne plasti.



Slika 1.: Površina in zaporna plast pri diodi

4. KVALITATIVNA UPORABA

V tem delu si pogledjmo, kako lahko interpretiramo fotografije, narejene z merjenjem toka generiranih nosilcev naboja.

Kot vzorec smo vzeli Zennerjevo Si diodo. Postavili smo jo na poseben nosilec za merjenje inducirane toka in sicer tako, da je bil presek diode obrnjen proti curku. Na levi fotografiji je prikazana površina p-n spoja v sekundarni emisiji, poleg nje pa slika istega področja narejena z merjenjem inducirane toka. Temnejša proga predstavlja zaporno plast na meji med obema tipoma polprevodnikov. Od tam namreč ni prišlo nič nosilcev. Lahko izmerimo njeno širino in opazujemo njeno homogenost. Svetla črta prek zaporne plasti pomeni, da je na tem mestu tok stekel prek p-n spoja. Sklepamo lahko, da je v notranjosti vzorca (vzbujeni volumen!) prisoten električno aktiven defekt.

Poleg tega primera je na voljo še nekaj možnosti uporabe. Med njimi je Schottkyjeva dioda zelo pomembna pri karakterizaciji polprevodniških rezin.

Na rezino naparimo (napršimo) tanko plast kovine tako, da se na prehodu med kovino in polprevodnikom ustvari zaporna plast, ki ločuje kreirane nosilce.

Na ta način lahko opazujemo defekte tudi v neprocesiranih rezinah ter določimo kvaliteto vstopnih ali izstopnih materialov, pač odvisno od tega, v kateri

fazi tehnološkega postopka se nahajamo. To metodo rutinsko uporabljajo pri večini proizvajalcev integriranih vezij. Obstajajo rastrski elektronski mikroskopi, ki so posebej prirejani (posebni nosilci vzorcev) za "on-line" testiranje čipov. Z njimi lahko opazujemo potek električnih signalov po vezjih in na ta način hitro lokaliziramo morebitne napake in vzroke nepravilnega delovanja integriranega vezja.

5. KVANTITATIVNA UPORABA

Določevanje difuzijske dolžine in življenske dobe nosilcev naboja v polprevodnikih je najbolj razširjena kvantitativna uporaba merjenja inducirane toka.

Ko doseg primarnih elektronov v vzorcu presega trikratno vrednost difuzijske dolžine, lahko v izračunih vzamemo, da je vzbujeni volumen točkast. Tedaj lahko na robu zaporne plasti postavimo $\Delta n = 0$ in ob upoštevanju, da je tok nosilcev ravno $i_{0,AP}$ dobimo za merjeni tok:

$$i_{0,AP} \approx i_{\max} \exp\left(-\frac{x}{L}\right)$$

Registracija $\ln(i_{0,AP})$ med premikanjem curka vpadlih elektronov pravokotno na zaporno plast, nam da linearno rast s strmino L .

Poleg L lahko merimo še τ , če nenadno prekinemo curek primarnih elektronov in s tem vzbujanje nosilcev, lahko opazujemo padanje toka s časom, kar nam da informacijo o življenski dobi nosilcev.

Z uporabo toplo-hladnih nosilcev vzorcev v komori mikroskopa lahko merimo tudi temperaturno odvisnost obeh količin.

6. ZAKLJUČEK

Merjenje induciranege toka v rastrskem elektronskem mikroskopu je hitra in enostavna metoda za karakterizacijo polprevodnikov. Omogoča kvantitativna merjenja difuzijske dolžine in življenske dobe nosilcev naboja. Pri tem je površinska rekombinacija omejitveni faktor, ki onemogoča, da bi dosegli boljšo natančnost kot 10 %.

To je tudi glavni razlog za to, da se je ta metoda razširila predvsem kot kvalitativna pri karakterizaciji vhodnih/izhodnih materialov in pri testiranju integriranih vezij.

7. LITERATURA

H.J. Leamy, J. Appl. Phys. 53 (6), June 1982

A. Armigliato, U. Valdre, Microscopia elettronica a scansione e microanalisi, parte I, Università degli studi Bologna, 1980

D.B. Holt, M. Lesniak, SEM (AMF O'Hare) 1985/1 (67-86)

Gvido Bratina, dipl. ing.

Iskra Center za elektrooptiko

Stegne 7, pp 59

61210 Ljubljana

INTEGRIRANI SENZORJI NA SILICIJU

V tajništvu MIDEM, Ljubljana, Titova 50, ali po telefonu 061-316-887 (Pavle Tepina) lahko naročite kopije ilustracij uporabljenih v predavanju R.S. Popovića "SILICON INTEGRATED SENSORS", predstavljenega na XV. jugoslovanskem posvetovanju o mikroelektroniki, MIEL 87, 14. - 16. maja 1987 v Banja Luki. Ilustracije so opremljene s kratkim spremnim tekstom. Zgoščen tekst predavanja je tiskan v Zborniku MIEL 87, knjiga II, str. I-25 do I-37.

Kopije vam bomo poslali po pošti in jih boste lahko plačali po povzetju. Cena kompleta je šest tisoč dinarjev (6.000 din).

Ponudba velja do 1.5.1988.