

Baldomir Zajc, Franc Škedelj,  
Anton Mirnik  
Fakulteta za elektrotehniko  
Ljubljana, Tržaška 25

REFERAT

Proglazen za najbolji  
rad u komisiji.

## RAČUNALNIŠKA ANALIZA SILICIJEVE SONČNE CELICE

### COMPUTER-AIDED NUMERICAL ANALYSIS OF SILICON SOLAR CELLS

VSEBINA - Numerični algoritem za reševanje sistema parcialnih diferencialnih enačb, ki opisujejo dogajanje v polprevodniški strukturi, je prirejen tako, da je uporaben za analizo klasične silicijeve  $pnn^+$  sončne celice. S takim pristopom se izognemo klasičnim predpostavkam v zvezi z mobilnostmi, profilom primesi in električnim poljem v strukturi, ki so vedno prisotne pri analitičnem reševanju. Podano je nekaj rezultatov za tipičen primer BSF sončne celice.

ABSTRACT - A numerical algorithm for solving the system of partial differential equations which describe the behaviour in a semiconductor structure, is modified to be convenient for the computation of a classical silicon  $pnn^+$  solar cell. This approach allows solutions free of typical limiting assumptions relating to mobilities, doping profiles and electric field within the device, which are always present at the analytical solution. Some results for a typical BSF solar cell are plotted.

#### 1. UVOD

Zanimanje za sončno celico kot vir električne energije se je v zadnjih letih močno povečalo, še posebej zaradi napovedi, da bo v prihodnjih letih cena tako pridobljene energije nižja kot cena energije, pridobljene s pomočjo klasičnih virov.

S potrebo po čimbolj natančnih rezultatih analize sončne celice je nastala vrsta numeričnih algoritmov za reševanje s pomočjo računalnika. Nekateri avtorji linearizirajo sistem parcialnih diferencialnih enačb, ki opisujejo dogajanje v sončni celici tako, da uvedejo linearne aproksimacije za nekatere nelinearne pojave /4/. Tako dobljen linearen sistem diferencialnih enačb pa rešujejo numerično. Precej več avtorjev pa posebno v zadnjem času posveča pozornost reševanju neli-

nearnega sistema enačb /1,2,3,7/. Na takem pristopu temelji tudi tukaj opisana metoda, ki sloni na modificiranem Gummelovem algoritmu /5,6/.

Kompletna analiza sončne celice je zelo kompleksen problem, čeprav je to v bistvu preprost polprevodniški element. Pravilne odvisnosti parametrov, kot so: sprememba mobilnosti v odvisnosti od električnega polja in profila primesi, spremenljiva koncentracija primesi, ki nastane s tehnološkim postopkom difuzije, generacijsko rekombinacijske zakonitosti, spremenljive življenjske dobe nosilcev v odvisnosti od gostote primesi, temperaturne spremembe v strukturi ipd. še stopnjujejo težavnost analize.

Članek zajema enodimenzionalno analizo sončne celice pri obratovalnih pogojih, ki vladajo na zemeljskem površju. Analiza še vedno privzema nekatere predpostavke (neskončne rekombinacije na površini strukture, enakomerna porazdelitev temperature po strukturi, površino brez odboja svetlobe itd.), ki pa bistveno ne zmanjšujejočnosti analize.

## 2. METODA ANALIZE

### 2.1 Model fotoelektričnega efekta

Generacija parov elektron-vrzel je posledica absorpcije fotonov v polprevodnik. Odvisnost (1) sloni na predpostavki, da vsak absorbiran foton generira en par elektron-vrzel /7/.

$$G = \int_0^{\lambda_G} \alpha(\lambda) N(\lambda) \exp(-\alpha(\lambda)x) d\lambda \quad (1)$$

Pri tem je  $G$  število parov, generiranih na enoto časa in volumna,  $N$  je gostota vpadajočih fotonov,  $\alpha$  pa je absorpcijski koeficient, odvisen od valovne dolžine svetlobe. Ponavadi se vrednosti te funkcije določijo empirično za vsako posamezno valovno dolžino /4,8/. V izrazu (1) je predpostavljeno tudi, da na površini celice ni odbojev svetlobe. Za poenostavitev izraza (1) se celotno področje uporabnih valovnih dolžin svetlobe (od 0 do  $\lambda_G$ ) razdeli na  $n$  celic. Znotraj ene celice je predpostavljjen konstanten absorpcijski koeficient in gostota vpadlih fotonov.

$$G = \sum_{i=1}^n \alpha_i N_i \exp(-\alpha_i x) \quad (2)$$

V članku je uporabljena razdelitev spektra na 16 celic, vrednosti  $N$  in  $\lambda$  v vsaki celici pa so zbrane v tabeli 1 /8/.

$i$	srednja $\lambda$ (Å)	$N_i$ ( $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	$\alpha_i$ ( $\text{cm}^{-1}$ )
1	4000	16.3	$10^5$
2	4500	23.5	$3 \cdot 10^4$
3	5000	25.1	$1.3 \cdot 10^4$
4	5500	26.8	$8 \cdot 10^3$
5	6000	27.3	$5 \cdot 10^3$
6	6500	26.6	$3 \cdot 10^3$
7	7000	25.4	$2.2 \cdot 10^3$
8	7500	24.4	$1.7 \cdot 10^3$
9	8000	22.7	$10^3$
10	8500	21.5	$7 \cdot 10^2$
11	9000	20.3	$4 \cdot 10^2$
12	9500	19.2	$2 \cdot 10^2$
13	10000	18.3	70
14	10500	17.6	25
15	11000	16.8	7
16	11500	16.1	1

Tabela 1

## 2.2 Matematični model strukture in numerični algoritem

Enosmerne razmere v sončni celici dobro opisuje sitem parcialnih diferencialnih enačb (3) do (7), to je dve transportni, dve kontinuitetni in Poissonova enačba.

$$J_n = q\mu_n nE + qD_n \frac{dn}{dx} \quad (3)$$

$$J_p = q\mu_p pE + qD_p \frac{dp}{dx} \quad (4)$$

$$\frac{dJ_n}{dx} = q(U-G) \quad (5)$$

$$\frac{dJ_p}{dx} = -q(U-G) \quad (6)$$

$$\frac{dE}{dx} = \frac{q}{\epsilon} (p-n+N(x)) \quad (7)$$

Ta sistem je mogoče prevesti na reševanje sistema treh diferencialnih enačb, ki ga potem rešujemo iterativno. Algoritem zahteva začetni približek potencialne funkcije ter gostot elektronov in vrzeli. Ta približek je lahko zelo grob, saj na konvergenco metode ne vpliva, posledica slabega približka je le večje število iteracij. Pomembno je le, da čimbolj natančno določimo robne pogoje na robovih strukture /5,6/.

### 2.3 Modeliranje nelinearnih efektov

a) Generacijsko rekombinacijske zakonitosti modeliramo z enojnim Shockley - Read - Hallovim rekombinacijskim nivojem v sredini prepovedanega pasu.

$$U = \frac{p n - n_i^2}{\tau_{p0}^{(n+n_i)} + \tau_{n0}^{(p+n_i)}} \quad (8)$$

b) Življenjski dobi nosilcev  $\tau_{p0}$  in  $\tau_{n0}$  predpostavimo konstantni, čeprav al-algoritem dopušča tudi spremenljivi.

c) Difuzijski konstanti  $D_p$  in  $D_n$  sta v splošnem odvisni od električnega polja  $E(x)$  in gostote primesi  $N(x)$  ter ju opišemo n.pr. z izrazom (9).

$$D_{p,n} = \left( \frac{D_{\max} - D_{\min}}{(1+N/N_{\text{ref}})^{\alpha}} + D_{\min} \right) / \left( (1+(E/E_c)^{\beta})^{1/\beta} \right) \quad (9)$$

Vrednosti konstant v zgornji enačbi so zbrane v tabeli 2.

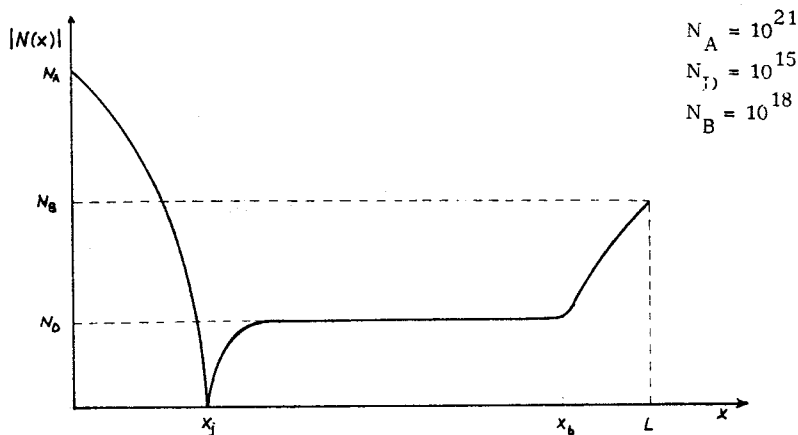
	$D_{\max}$	$D_{\min}$	$N_{\text{ref}}$	$E_c$	$\alpha$	$\beta$
vrzeli	495	47.7	$6.3 \cdot 10^{16}$	19.5	0.76	1
elektroni	1330	65	$8.5 \cdot 10^{16}$	8.0	0.72	2

Tabela 2

- d) Porazdelitve temperature ne upoštevamo, ker opazujemo delovanje celice na zemeljskem površju brez koncentrirane osvetlitve. Po vsej strukturi predpostavimo konstantno temperaturo  $25^{\circ}\text{C}$ .
- e) Odboj fotonov na površini celice zanemarimo.

#### 2.4 Opis strukture BSF (Back Surface Field) celice

Profil primesi in geometrijske dimenzije obravnavane sončne celice prikazuje slika 1. Smatramo, da sta difuziji na obeh straneh celice nanešeni s pomočjo konstantnega izvora (lahko s premazom kot izvorom), zato lahko spremenljivo koncentracijo primesi opišemo s pomočjo funkcije  $\text{erfc}$ .



Slika 1

$$N(x) = N_D - N_A \operatorname{erfc}(x / 2.85 \cdot 10^{-5}) \quad 0 < x < x_s \quad (10)$$

$$N(x) = N_D + N_B \operatorname{erfc}((L - x) / 4.25 \cdot 10^{-5}) \quad L > x > x_s$$

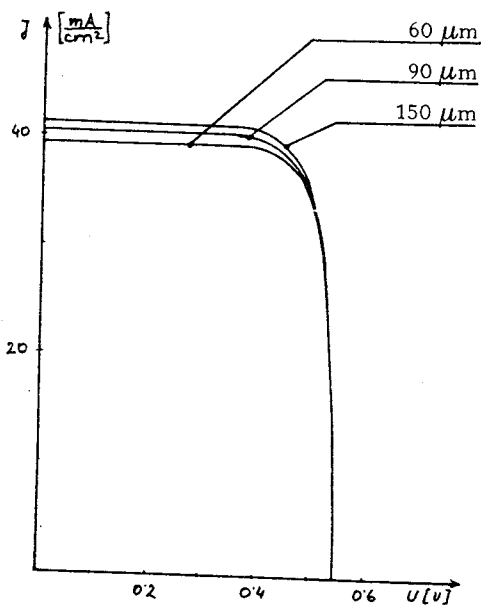
Difuzija sega na obeh straneh strukture 1 mikron v globino.

Izbrane vrednosti limitnih življenjskih dob so:

$$\begin{aligned} \tau_{p0} &= 10 \mu\text{s} \\ \tau_{n0} &= 4 \text{ ns} \end{aligned} \quad (11)$$

### 3. REZULTATI

Najbolj zanimiv podatek pri sončni celici je vsekakor njena U - I karakteristika. Iz nje lahko določimo najpomembnejše podatke o lastnostih celice. Slika 2 prikazuje U - I karakteristike za tri celice različnih debelin. Analiza pokaže, da razlike med 60 in 150-mikronsko celico niso bistvene, saj še tanjša struktura absorbira večji del koristnega spektra svetlobe. Vseeno pa to ni realna vrednost, saj je minimalna debelina, ki je mehansko še dovolj trdna, 150 mikronov.



Slika 2

Izkoristek celice podaja odvisnost (12) /1/:

$$\eta = \frac{FF J_{sc} U_{oc}}{P_{in}} \quad (12)$$

kjer posamezni simboli pomenijo:

$J_{sc}$  je kratkostični tok,  $U_{oc}$  napetost odprtih sponk,  $P_{in}$  je vpadajoča moč in je pri pogojih 1 SUN in AM0 (pogoji v vesolju na srednji razdalji Zemlje od Sonca)

135.3 mW/cm<sup>2</sup>. FF imenujemo krivuljni faktor, definira ga izraz (13)/1/

$$FF = \frac{U_M J_M}{U_{oc} J_{sc}} \quad (13)$$

Napetost  $U_M$  in tok  $J_M$  sta definirana v točki, kjer oddaja celica največjo moč.

Rezultati analize sončne celice so zbrani v tabeli 3.

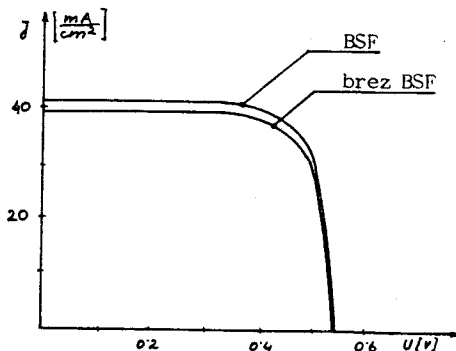
	L=60μm	L=90μm	L=150μm	L=150μm (brez BSF)
$\eta_{kv}$ (%)	71.5	72.75	74	71.5
$\eta$ (%)	12.9	13	13.1	12.5
$U_{oc}$ (V)	0.545	0.545	0.545	0.53
$J_{sc}$ (mA)	39.8	40.5	41.2	39.8
$J_M U_M$ (mW)	17.42	17.66	17.76	16.86
$\eta_{tot}$ (%)	10.7	10.9	10.9	10.4

Tabela 3

$\eta_{kv}$  je definiran z razmerjem med gostoto toka in gostoto vpadlih fotonov:

$$\eta_{kv} = J_{sc} / (qN) \quad (14)$$

Primerjavo med celico z vgrajenim električnim poljem in celico brez vgrajenega polja podaja slika 3.



Slika 3

Pri izračunu izkoristka nekateri avtorji /1,7/ upoštevajo konstantne izgubne faktorje, ki simulirajo naslednje lastnosti: izgube zaradi odboja na površini (0.905), lateralno serijsko upornost (0.96), kovinsko prekrivno plast na površini (0.96). Celoten izkoristek je tako:

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{FF J_{sc} U_{oc} 0.905 0.96 0.96}{P_{in}} \quad (15)$$

#### 4. ZAKLJUČEK

V članku je opisana učinkovita in natančna metoda za numerično analizo sončne celice. Metoda je primerna za načrtovanje sončnih celic, saj izračun optimalne strukture v okviru danih možnosti ne zahteva pretirano veliko računalniškega časa. Ker je na ta način uspela aplikacija metode numerične analize za trenutno zelo aktualen problem, bodo na voljo v nadaljevanju še drugi rezultati poleg navedenih v tem članku.

#### 5. LITERATURA

- /1/ Fossum: "Computer Aided Numerical Analysis of Silicon Solar Cells", Solid-State Electr., vol. 19, pp. 269-277, 1976
- /2/ Dunbar, Hauser: "Theoretical Effects of Surface Diffused Region Lifetime Models on Silicon Solar Cells", Solid-State Electr., vol. 20, pp. 697-701, 1977
- /3/ Spaderna, Navon: "Solar Cell Operation Under Concentrated Illumination", IEEE, vol. ED-25, No. 11, pp. 1290-1297, 1978
- /4/ Van Overstraeten, Nuyts: "Theoretical Investigation of the Efficiency of Drift Field Solar Cells", IEEE, vol. ED-16, No. 7, pp. 632-641, 1969
- /5/ Arandjelović: "Accurate Numerical Steady-State Solution for a Diffused One-Dimensional Junction Diode", Solid-State Electr., vol. 13, pp. 865-871, 1970
- /6/ Zajc, Škedelj: "Enodim. numer. analiza polprev. struktur", Informatica 79, Bled Zajc, Mirnik: "Dvodim. numer. analiza polprev. struktur", Informatica 79, Bled
- /7/ Fossum, Burges: "Silicon Solar Cell Designs Based on Physical Behaviour in Concentrated Sunlight", Solid-state Electr., vol 21, pp. 729-737, 1978
- /8/ Wolf: "Drift Fields in Photovoltaic Solar Energy Converter Cells", Proc. IEEE, vol. 51, pp. 674-693, 1963