

RAZLAGA MOČNEGA KAPACITIVNEGA EFEKTA V NIN STRUKTURI IZ AMORFNEGA SILICIJA

Jože Furlan, Franc Smole
Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, Ljubljana

Ivan Skubic
ISKRA, Industrija kondenzatorjev in opreme, Semič

Ključne besede: a-Si silicij amorfni, NIN strukture polprevodnikov, SCLC prevajanje, efekt kapacitivni, frekvence nizke, admitanca diferencialna, kapacitivnost diferencialna, prevodnost ohmska

Povzetek: Pred kratkim je bil ugotovljen močan kapacitivni efekt pri nizkih frekvencah v amorfni silicijevih NIN strukturah. Ta efekt, ki je odvisen od priključene enosmerne prednapetosti in od frekvence majhnih vzbujevalnih signalov, je razložen s pomočjo faznega premika, ki ga povzroča mehanizem zakasnjene lovljenja in ponovne emisije elektronov na lokaliziranih stanjih v mobilnostni reži amorfne silicija.

Explanation of Strong Capacitive Effect in Amorphous Silicon NIN Structure

Key words: a-Si, amorphous silicon, NIN semiconductor structures, SCLC conduction, capacitive effect, low frequencies, differential admittance, differential capacity, ohmic conductivity

Abstract: Steady-state and small-signal characteristics of various amorphous silicon NIN samples, differing in fabrication steps and having different I-layer thicknesses, were measured using HP 4140B pA meter and HP 4284 A 20Hz-1MHz LCR meter. DC current-voltage characteristics showed SCLC conduction mechanisms described in the literature. Small signal AC measurements showed a strong capacitive effect in all measured NIN devices. In the low frequency range the measured capacitance was up to few thousand times higher than the static capacitance $C_0 = \epsilon(S/L)$ and it decreased with the increasing frequency of AC signal. The capacitance increased strongly with the increasing DC bias voltage on NIN device. The parallel small signal conductance was also measured. It increased by increasing both, frequency and DC bias voltage.

The main physical effect causing the high capacitive effect of NIN diode at low frequencies is the delay of small signal trapped carrier concentration Δn_t following the injected free carrier concentration Δn . This delay is governed by electron capturing and emission mechanisms at localised states in the gap of a-Si. This delay is strongly influenced by density of states in the gap. It also depends on DC bias and the frequency of AC excitation. Small-signal trapped electron concentration can not follow high frequency free electron variations so that capacitance at high frequencies is low and depends mainly on stored electron concentration. In the low frequency range however, trapped carriers Δn_t follow free carriers Δn . Space-charge pertaining to carrier concentrations Δn and Δn_t are causing small-signal electric field, which is connected with terminal voltage ΔU (by integrating electric field ΔE over the I-layer thickness).

At low frequencies however, the variations of trapped carriers Δn_t predominate over free carriers Δn , influencing dominantly small signal electric field ΔE and terminal voltage ΔU on NIN device terminals.

A small-signal equivalent analytical model of NIN diode is developed which agrees well with experimental results. Using this model it is shown that an increasing frequency of signal excitation moves the energy region of gap states engaged in delaying action towards the conduction band resulting in strongly decreasing capacitive and increasing conductive effect of NIN device.

1. UVOD

Če bi bila plast polprevodnika med dvema prevodnima kontaktnima oblogama zelo slabo prevodna, bi bila med zunanjsima priključkoma kapacitivnost $C_0 = \epsilon(S/L)$, kjer je L razdalja med kontaktnima oblogama, S je površina oblog in ϵ je permeabilnost polprevodnika.

Ker pa je v I-plasti NIN zgradbe iz amorfne silicija možno prevajanje z elektroni, se pri vsaki spremembi ΔU okoli enosmerne prednapetosti U pojavi pripadajoča sprememba injektorje elektronov na enem NI-spoju in ekstrakcije elektronov na drugem NI-spoju. Zaradi spre-

memb koncentracij injiciranih prostih elektronov in zaradi lovljenja ter reemisije elektronov na lokaliziranih stanjih v energijski reži se v I-plasti prerazporedi prostorski naboj. Če bi bila sprememba prostorskega naboja Δq zaradi sprememb koncentracij prostih in ujetih elektronov Δn in Δn_t trenutna, bi lahko kapacitivnost NIN strukture (tako kot kapacitivnost osiromašene plasti PN-spoja) izrazili z razmerjem $C = \Delta Q / \Delta U$, kjer pomeni ΔQ spremembo naboja v I-plasti zaradi majhne spremembe zunanje napetosti ΔU . Pri tem je za NIN strukturo iz a-Si značilno, da v ΔQ sodeluje predvsem ujeti naboj (saj je $n_t \gg n$ in $\Delta n_t \gg \Delta n$), ta pa je odvisen od porazdelitve gostote stanj v mobilnostni reži a-Si.

Pri predpostavki eksponencialnega poteka repa akceptorskih stanj v energijski reži pod prevodnim pasom in pri zanemaritvi difuzijskega toka je Rose ugotovil [1], da bi se zaradi $\Delta n_t(\Delta U)$ kapacitivnost lahko povečala od C_0 največ na vrednost $2C_0$. Z analizo enosmernih lastnosti a-Si NIN zgradbe, pri kateri je zanemarjena difuzijska komponenta toka, se da dokazati približno odvisnost takšne kapacitivnosti od porazdelitve lokaliziranih stanj v reži. Analiza pokaže [2], da z rastočo strmino repa stanj pod prevodnim pasom kapacitivnost upada od $2C_0$ (pri konstantni gostoti stanj v vsej reži) do C_0 (pri nenadni spremembi gostote stanj na robu prevodnega pasu).

Meritve diferencialne admitance NIN strukture pa so pokazale [3], da je kapacitivnost lahko tudi nekaj 1000 krat večja od medelektrodne kapacitivnosti C_0 . Merjena kapacitivnost je odvisna od izbrane mirovne delovne točke in od frekvence izmeničnega signala. Tudi izmerjena ohmska diferencialna prevodnost je močno odvisna od enosmerne delovne točke in od frekvence.

Glavni razlog za zelo povečani kapacitivni efekt je zakasnitev izmeničnega ujetega naboja Δn_t za injiciranim nabojem Δn , ki se pojavlja zaradi lovljenja elektronov v lokalizirana stanja ter njihove ponovne emisije v prevodni pas. Posledice tega so zakasnitve prostorskega naboja, električnega polja in potenciala za injiciranimi prostimi elektroni ter kompleksni karakter admitance NIN strukture.

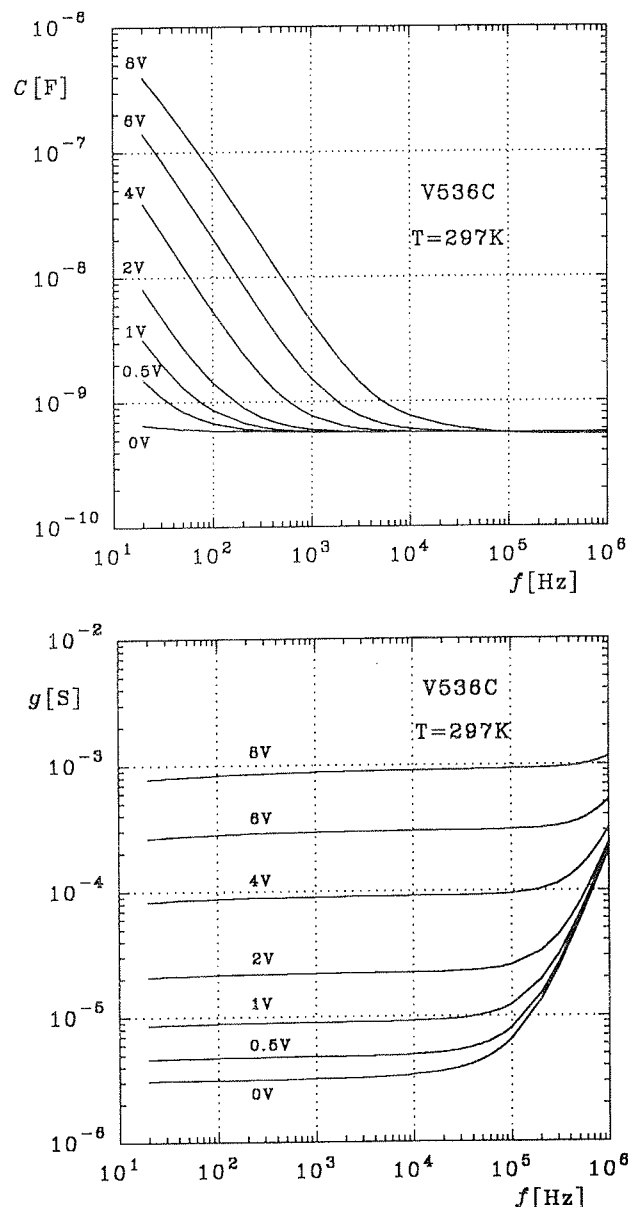
V članku je podana fizikalna slika delovanja NIN strukture pri vzbujanju z majhnimi izmeničnimi signali pri različnih enosmernih prednapetostih. Opisano je tudi zanimiv pojav, da pri višanju frekvence signalov pri konstantni enosmerni prednapetosti sodelujejo lokalizirana stanja v reži z energijami vedno bližjimi prevodnemu pasu. To pa ima za posledico, da se z rastočo frekvenco signalov zakasnitve ujetja in sproščanja elektronov zmanjšujejo. Kapacitivni efekt zato upada, diferencialna ohmska prevodnost pa narašča.

2. MERJENE KARAKTERISTIKE NIN STRUKTURE

Enosmerne karakteristike in kompleksne admitance treh različnih NIN struktur (razlike pri tehnološkem procesu, razlike geometrijskih razsežnosti) so bile izmerjene s HP 4140B pikoampermetrom ter HP 4284A 20Hz-1MHz LCR metrom.

Izmerjene enosmerne tokovno-napetostne karakteristike so pokazale tipični potek SCLC prevajanja (tok omejen s prostorskim nabojem), ki je opisan v literaturi [4]. Električne lastnosti pri vzbujanju z majhnimi signali pa pokažejo, da lahko NIN strukturo nadomestimo z vzporedno vezavo ohmske prevodnosti in kapacitivnosti, ki pa sta obe odvisni od izbrane enosmerne delovne točke in od frekvence.

Slične admitance so bile izmerjene pri vseh NIN vzorcih. Kot primer kaže slika 1 poteke kapacitivnosti in prevodnosti za NIN strukturo z debelino I-plasti $1.25 \mu\text{m}$ ter s kontaktnimi površinami 0.06 cm^2 .



Slika 1: Izmerjena diferencialna kapacitivnost in ohmska prevodnost NIN strukture v odvisnosti od enosmerne prednapetosti in od frekvence

Izmerjeni grafi kompleksne admitance NIN diode kažejo, da kapacitivnost te zgradbe upada od velike vrednosti pri nizkih frekvencah proti mnogo manjši kapacitivnosti pri visokih frekvencah, komponenta realne prevodnosti pa s frekvenco raste. Obe komponenti naraščata z rastočo enosmerno prednapetostjo na NIN strukturi.

3. OPIS FIZIKALNIH UČINKOV NA ADMITANCO NIN DIODE

Glavni vzrok za veliko kapacitivnost pri nizkih frekvencah izmeničnih signalov so zakasnitve ujetih elektronov pri reemisiji iz lokaliziranih stanj v energijski reži v pre-

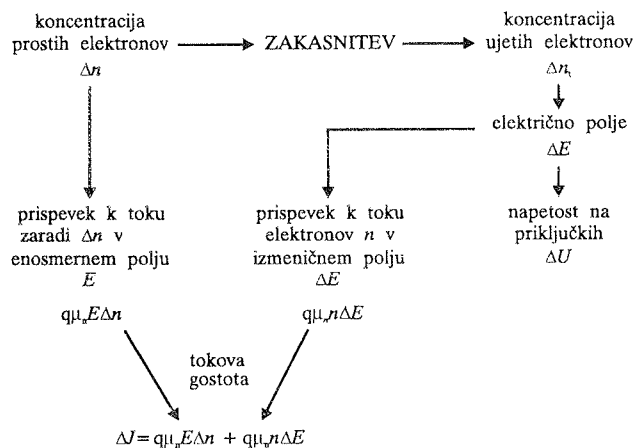
vodni pas. Pri visokih frekvencah so spremembe krmilnih izmeničnih signalov tako hitre, da jim elektroni, ki prehajajo med prevodnim pasom in lokaliziranimi nivoji, ne morejo več slediti. Zato teče elektronski tok le s premiki prostih elektronov v prevodnem pasu. Ker se pri teh premikih javljajo zakasnitve med toki in napetostmi, se kaže to kot kapacitivni učinek, ki pa je zaradi izredno kratkih zakasnitev mnogo manjši od tistega zaradi časovnih zakasnitev ujetih elektronov na lokaliziranih stanjih pri nizkih frekvencah.

Poleg visokofrekvenčne kapacitivnosti zaradi zakasnitev prostih elektronov pri prehodu preko I-plasti je prisotna seveda tudi kapacitivnost $C_0 = \epsilon(S/L)$ zaradi poljskega toka $J = \epsilon(dE/dt)$.

Nov in najbolj zanimiv je učinek izredno visoke kapacitivnosti pri nizkih frekvencah [3]. Fizikalno sliko te kapacitivnosti si najlažje predstavljamo, če izhajamo iz injektorije elektronov na enem NI-spoju ter ekstrakcije elektronov na drugem NI-spoju. Takšno delovanje nastane, ko je na NIN strukturo priključena enosmerna prednapetost.

Če enosmerni koncentraciji elektronov n v I-plasti dodamo še neko majhno harmonično komponento $\Delta n \exp(j\omega t)$, povzroča kompleksor presežka prostih elektronov Δn še zakasnjeni presežek ujetih elektronov Δn_t . Ta je v a-Si pri počasnih signalih po vrednosti mnogo večji od vrednosti Δn . Koncentracija Δn_t s svojim prostorskim nabojem povzroča izmenično električno poljsko jakost ΔE , ki je z integralom preko dolžine I-plasti povezana z majhnim izmeničnim signalom ΔU na zunanji priključkih.

Če pri nizkih frekvencah predpostavimo, da so spremembe Δn_t v fazi z ΔE , te pa v fazi z ΔU , je izmenična komponenta majhnih signalov tokove gostote ΔJ povzročena s premikom enosmerne koncentracije prostih elektronov n zaradi izmeničnega polja ΔE ter s premikom izmenične komponente koncentracije elektronov Δn pod



Slika 2: Komponente izmenične tokove gostote v NIN strukturi

$$\frac{\Delta J}{J} = \frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta E}{E} + \frac{\Delta n}{n} = \frac{\Delta U(g + j\omega C)}{I} = \frac{\Delta U}{U} \frac{g + j\omega C}{G}$$

vplivom enosmernega električnega polja E , kot kaže shematično graf na sliki 2.

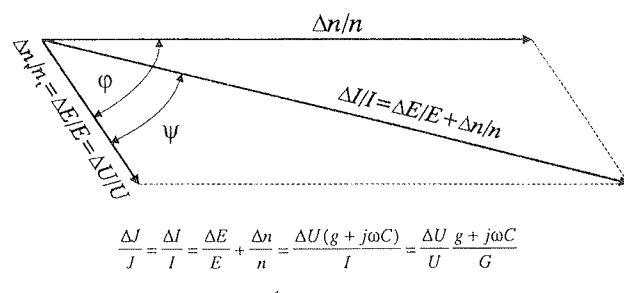
Če dalje upoštevamo, da teče v I-plasti električni tok, ki je omejen s prostorskim nabojem (SCLC delovanje), lahko opišemo tipično krajevno odvisnost električnega polja v I-plasti s parabolo

$$E(x) = E(L)(x/L)^m$$

Pri zanemaritvi vseh zakasnitev, razen tiste med Δn in Δn_t , se da z rešitvijo Poissonove enačbe ugotoviti, da so normirane komponente malih signalov ujetega naboja, električnega polja in napetosti na priključkih med seboj enake

$$\frac{\Delta n_t}{n_t} = \frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta U}{U}$$

Pri teh pogojih dobimo enostaven kazalčni diagram signalov na sliki 3. Zaradi zakasnitve ϕ med Δn in Δn_t se pojavi kompleksna admitanca $y = g + j\omega C$ s faznim kotom ψ med tokom ΔI in napetostjo ΔU .



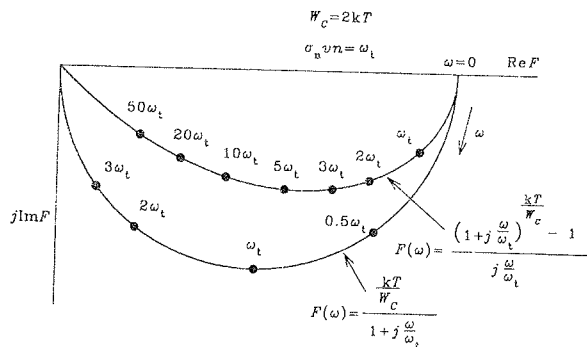
Slika 3: Kazalčni diagram izmeničnih signalov v NIN strukturi

Kapacitivni učinek je pri nizkih frekvencah skrit v zvezi med kompleksorjema Δn in Δn_t . To zvezo se da dobiti iz splošnih enačb za amorfní silicij pri vzbujanju z majhnimi signali [5] preko integracije zasedenih stanj akceptorskega tipa v energijski režiji med valenčnim in prevodnim pasom a-Si [2]

$$\Delta n_t = \int_{E_v}^{E_c} \Delta f_A g_A dE = \Delta n \frac{n_t}{n} \frac{(1 + j \frac{\omega}{\omega_c})^{\frac{kT}{w_c}} - 1}{j \frac{\omega}{\sigma_n \nu n}} = \Delta n \frac{n_t}{n} F(\omega)$$

kjer je σ_n prerez ujetja elektronov v nevtralnih akceptorskih stanjih, ν je termična hitrost in w_c energijska konstanta pri eksponencialni porazdelitvi gostote akceptorskih stanj v režiji a-Si. Frekvenčni potek funkcije $F(\omega)$, ki vsebuje zakasnitev med Δn in Δn_t , je pri tipičnih vrednostih osnovnih konstant a-Si pri eni izmed izbranih delovnih točk prikazan na sliki 4. Ta potek je soroden poteku funkcije $kT/w_c(1+j\omega/\omega_t)$, ki opisuje tipično zvezo med napetostjo in tokom pri paralelni vezavi konstantne kapacitivnosti in upornosti. Prav odstopanje izračuna-

nega poteka $F(\omega)$ od tipične zakasnilne funkcije pa je razlog za upadanje kapacitivnosti ter naraščanje prevodnosti z rastočo frekvenco.



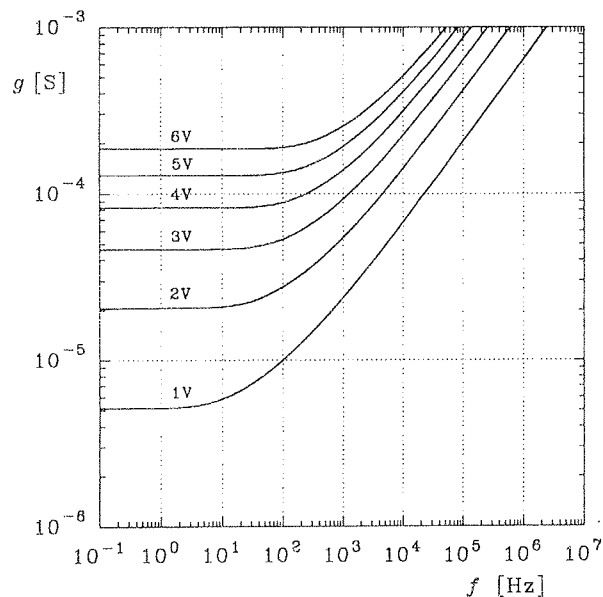
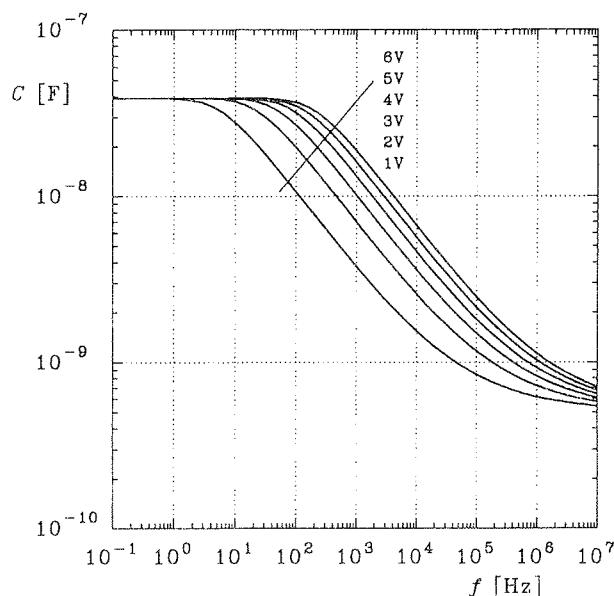
Slika 4: Potek frekvenčno odvisne zveze $F(\omega)$ med prostim in ujetim nabojem

Tudi v a-Si bi dobili zvezo med Δn in Δn_t preko člena $(1+j\omega/\omega_t)$, če bi pri vseh frekvencah elektroni iz prevodnega pasu izmenjavali mesta z istimi lokaliziranimi nivoji v energijski reži. Podrobnejša analiza pokaže, da sodelujejo pri izmeničnih signalih lokalizirani nivoji v okolici kvazifermijske energije E_{Fn} . Z višanjem frekvence signalov se spreminja verjetnost zasedenost v reži. Pri višjih frekvencah so prispevki k Δn_t pri energijah, malo nižjih od E_{Fn} močnejše slabljeni kot prispevki stanj pri energijah, nekoliko višjih od E_{Fn} (zasedenost se pri nižjih energijah v reži močnejše zmanjšuje). To pomeni, da pri višjih frekvencah izmeničnih signalov sodelujejo s svojimi zakasnitvami vedno bolj plitva lokalizirana stanja, bližja prevodnemu pasu. Pri teh stanjih pa so hitrejša reemisije ujetih elektronov v prevodni pas, kar se navzven pokaže kot znižanje zakasnitve Δn_t za Δn in kot zmanjšanje kapacitivnega učinka.

Opisani premik sodelujočih lokaliziranih stanj pa ima za posledico tudi naraščanje realne prevodnosti z rastočo frekvenco krmilnega signala. Ko sodelujejo vedno plitvejša stanja, je zaostajanje Δn_t za Δn manjše, kot če bi bila udeležena vedno ista stanja okoli E_{Fn} . Hkrati pa absolutna vrednost Δn_t upada (oboje kaže tudi izračunani potek $F(\omega)$ na sliki 4). Temu pa ustrezajo manjše vrednosti električnega polja ΔE in napetosti ΔU . Zaradi tega je pri istem toku ΔI prevodnost $\Delta I/\Delta U$ bližje realni prevodnosti, ta pa z rastočo frekvenco raste.

Primer izračunanih potekov realne prevodnosti in kapacitivnosti NIN strukture pri različnih enosmernih prednapetostih v odvisnosti od frekvence kaže slika 5. Razmeroma dobro ujemanje izračunanih lastnosti po poenostavljeni analitični poti z izmerjenimi lastnostmi na sliki 1 vodi do sklepa, da opisana fizikalna dogajanja v NIN zgradbi primarno učinkujejo na frekvenčno in napetostno odvisnost nadomestne admittance pri vzbujanju z majhnimi signali.

Iz rezultatov prikazane obravnave lahko ugotovimo zelo važno potencialno uporabno lastnost, in sicer zelo visoko kapacitivnost NIN strukture pri nizkih frekvencah.



Slika 5: Analitična izračuna poteka kapacitivnosti in ohmske prevodnosti od enosmerne delovne točke in od frekvence

Primerno bi bilo raziskati poleg a-Si še druge snovi, ki imajo veliko gostoto lokaliziranih stanj, preko katerih ni možno neposredno prevajanje električnih nabojev, ki pa so sposobna loviti in sproščati z zakasnitvami velike količine vstopajočih električnih nabojev. To bi lahko vodilo k izdelavi kondenzatorjev, ki bi v področju nižjih frekvenc izkazovali veliko kapacitivnost v majhnem volumnu zgradbe.

4. ZAKLJUČEK

Podan je bil fizikalni opis dogajanj v NIN strukturi iz amorfne silicija. Za visoko kapacitivnost pri nizkih frekvencah so odgovorna lokalizirana stanja v energijski reži polprevodnika, ki jih z zakasnitvami polnijo in praznijo prevodni elektroni. Zakasneni prostorski naboj uje-

tih elektronov povzroča zakasnjeno napetost na zunan-
jih priključkih in zato močan kapacitivni karakter NIN
strukture.

LITERATURA

- /1/ A. Rose, *Concepts in photoconductivity and allied problems*,
Interscience Publ., 4. pogl., 1963.
- /2/ J. Furlan, osebni zapiski.
- /3/ I. Skubic, J. Furlan, E. Bassanese, Proc. MIEL-93, Bled, 1993,
str. 241.
- /4/ M. A. Lampert, P. Mark, *Current injection in solids*, Academic
Press, New York, 1970.
- /5/ J. Furlan, E. Bassanese, J. Non-Cryst. Solids 146, 1992, str. 175.

*Prof. dr. Jože Furlan, dipl. ing.,
Doc. dr. Franc Smole, dipl. ing.,
Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo,
Univerza v Ljubljani,
Tržaška 25, 61000 Ljubljana
tel. +386 61 123 22 66
fax +386 61 264 990*

*Mag. Ivan Skubic, dipl. ing.,
Iskra industrija kondenzatorjev in opreme, Semič
Vrtača 1, p.p. 1, 68333 Semič
tel. +386 68 67 709
fax +368 68 67 110*

Prispelo(Arrived): 18.11.1994 Sprejeto(Accepted): 07.03.1995