

ELEKTROFIZIČKE KARAKTERISTIKE INDIJUM ANTIMONIDA: Upotreba za projektovanje detektora na temperaturi tečnog azota

Livada G. Branko

KLJUČNE REČI: poluprovodnici, poluprovodnički materijali, indijum antimonid, elektrofizičke karakteristike, parametri, koeficijent apsorpcije, koeficijent refleksije, sopstvena koncentracija, difuziona konstanta, fotodetektor, infracrveni detektor, InSb detektor, hladeni detektor

KRAKATK SADRŽAJ: Analiziraju se elektrofizičke karakteristike i parametri indijum antimonida na temperaturi tečnog azota. Formiran je model parametara koji se mogu koristiti u analizi i projektovanju InSb hlađenih detektora. Model uključuje: koeficijent apsorpcije, koeficijent refleksije, sopstvenu koncentraciju, pokretljivost, vreme života manjinskih nosilaca, difuzionu konstantu i difuzionu dužinu. Pri formulisanju modela korišćeni su rezultati teorijskih i eksperimentalnih istraživanja uz primenu odgovarajućih postupaka ekstrapolacije i korekcije. Sumirane su vrednosti parametara n-InSb u opsegu koncentracija $1 \cdot 10^{13}$ do $2 \cdot 10^{19} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ i p-InSb u opsegu koncentracija $1 \cdot 10^{13}$ do $6 \cdot 10^{16} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$

INDIUM ANTIMONIDE ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS: Use for liquid nitrogen temperature infrared detector design.

KEY WORDS: semiconductors, semiconductor materials, indium antimonide, electrophysical characteristics, parameters, absorption coefficient, reflection coefficient, intrinsic concentration, diffusion constant, photodetectors, infrared detectors, InSb detectors, cooled detectors

ABSTRACT: Indium antimonide liquid nitrogen temperature electrophysical characteristics and parameters are analyzed. A model for the parameters which can be used in the analysis and design of the InSb cooled detectors, is set. This model includes: absorption coefficient, reflection coefficient, intrinsic concentration, mobility, minority carriers lifetime, diffusion constant and diffusion length. The results of the theoretical and experimental investigations commonly with the suitable methods for corrections and extrapolation are used in the model formulation. The parameters numerical values for n-type InSb ($n = 1 \cdot 10^{13}$ to $2 \cdot 10^{19} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$) and p-type InSb ($p = 1 \cdot 10^{13}$ to $6 \cdot 10^{16} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$) are summarized.

1 UVOD

Indijum antimonid (InSb) se široko koristi za izradu infracrvenih detektora osetljivih u spektralnom opsegu 3 - 5 μm pri čemu se proizvode različiti tipovi fotodetektora (fotootporni, fotonaponski, fotoelektromagnetni). InSb detektori imaju široke primene u industriji (merenje temperature, termovizija) i u vojnim uređajima i sistemima (senzori u sistemima vođenih i samonavedenih raketa, senzori u sistemima inteligentne municije, senzori u sistemima za izviđanje, osmatranje i praćenje).

Iako je InSb dobro poznat i izučen materijal¹⁻⁴ u literaturi postoje samo oskudni podaci o elektrofizičkim parametrima koji se mogu koristiti u postupku analize i projektovanja infracrvenih detektora koji rade na temperaturi tečnog azota (77 K). U ovom radu je izvršena analiza dostupnih rezultata teorijskih i eksperimentalnih istraživanja elektrofizičkih osobina InSb sa aspekta primene ovih rezultata za analizu i simuliranje hlađenih detektora. Korišćenjem pogodnih postupaka aproksimacije i ekstrapolacije formulisan je model za elektrofizičke parametre InSb koji se odnosi na tehnološki idealno proizveden polazni materijal bez strukturnih i drugih defekata. Razmatraju se sledeće karakteristike InSb na temperaturi tečnog azota: koeficijent apsorpcije, koeficijent refleksije, sopstvena koncentracija, pokretljivost elektrona i šupljina, brzina površinske rekombinacije, vreme života, difuziona konstanta i difuziona dužina.

2 ELEKTROFIZIČKE KARAKTERISTIKE InSb

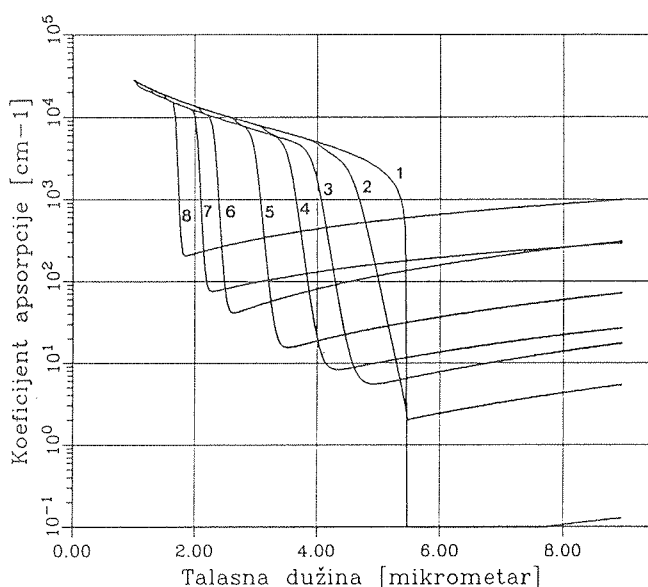
Elektrofizički parametri materijala bitno utiču na kvantnu efikasnost i karakteristike fotodetektora. Kako vrednosti elektrofizičkih parametara zavise od radne temperature, koncentracije i tipa primesa to analiza njihovog uticaja na parametre fotodetektora kombinovana sa zavisnošću koeficijenta apsorpcije od koncentracije i temperature može dati kompletniju sliku o ponašanju fotodetektora dobijenih na materijalima različitog nivoa kvaliteta pri različitim radnim temperaturama.

Zbog tehnoloških ograničenja primene sistema za hlađenje i karakteristika InSb najčešće se koristi radna temperatura $T_r = 77\text{K}$ (temperatura ključanja tečnog azota). Zbog toga su u ovom radu analizirane vrednosti elektrofizičkih parametara InSb na temperaturi tečnog azota i formiran je model elektrofizičkih parametara InSb koji je primenljiv za projektovanje i analizu parametara i funkcionisanja infracrvenih detektora.

Zavisnost elektro fizičkih parametara od koncentracije koja se koristi u modelu dobijena je uz korišćenje eksperimentalnih i teorijskih rezultata i odgovarajućih postupaka aproksimacije i ekstrapolacije. Pri tome su korišćeni rezultati publikovani u otvorenoj literaturi kao i rezultati izračunavanja opisanih u ovom radu.

2.1 Koeficijent apsorpcije

Koeficijent apsorpcije bitno utiče na kvantnu efikasnost i spektralne karakteristike fotodetektora. U literaturi postoji malo podataka za zavisnost koeficijenta apsorpcije InSb od koncentracije. Zavisnost koeficijenta apsorpcije InSb od koncentracije i talasne dužine zračenja je prikazana na slici 1. i dobijena je izračunavanjima u modelu⁹ koji uključuje koeficijent apsorpcije za međuzonske prelaze i koeficijent apsorpcije na slobodnim elektronima. Za izračunavanja koeficijenta apsorpcije za međuzonske prelaze korišćen je model Andersona⁷ i rezultati Kejnovog kp zonalnog modela^{5,6} InSb. Za izračunavanje koeficijenta apsorpcije na slobodnim elektronima korišćen je semiempirijski pristup. Rezultati izračunavanja su verifikovani poređenjem sa postojećim eksperimentalnim rezultatima^{8,9} pri čemu je pokazano odlično slaganje teorije i eksperimenta.



Slika 1: Izračunate vrednosti koeficijenta apsorpcije^{8,9} za InSb na 77 K: (p-tip: 1 - nezavisno od koncentracije; n-tip: 1 - $n = 1 \cdot 10^{16}$; 2 - $n = 1 \cdot 10^{17}$; 3 - $n = 4 \cdot 10^{17}$; 4 - $n = 8 \cdot 10^{17}$; 5 - $n = 2 \cdot 10^{18}$; 6 - $n = 6 \cdot 10^{18}$; 7 - $n = 1 \cdot 10^{19}$; 8 - $n = 2 \cdot 10^{19}$;

2.2 Koeficijent refleksije

Koeficijenti refleksije sa razdvojnih površina strukture (vazduh materijal - R1; i sa razdvojnih površina unutar strukture detektora - R2) zavise od koncentracije slobodnih elektrona i šupljina preko koeficijenta apsorpcije. Koeficijent refleksije na razdvojnoj površini vazduh - poluprovodnik je:

$$R1 = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (1)$$

Realni deo (n) i imaginarni deo (k) indeksa prelamanja vezani su sa dielektričnom konstantom preko disperzionih relacija:

$$\epsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (2a)$$

$$\epsilon_2 = 2nk \quad (2b)$$

odnosno:

$$n = \frac{\sqrt{\epsilon_1 + \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}}}{\sqrt{2}} \quad (3a)$$

$$k = \frac{\epsilon_2}{2n} \quad (3b)$$

gde su ϵ_1 i ϵ_2 realni i imaginarni deo kompleksne dielektrične konstante a n i k realni i imaginarni deo indeksa prelamanja. Za analizu uticaja indeksa prelamanja na koeficijent refleksije može se uzeti $n = \sqrt{\epsilon_\infty}$. Imaginarni deo indeksa prelamanja vezan je sa koeficijentom apsorpcije preko relacije:

$$\alpha = \frac{2\omega k}{c} = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (4)$$

Za talasnu dužinu $\lambda = 5 \mu m$ i koeficijent apsorpcije $\alpha = 1 \cdot 10^4 cm^{-1}$ je $k=0.39$ što je mnogo manje od $n = \sqrt{\epsilon_\infty}$ što znači da se uticaj apsorpcije može zanemariti. Pri visokom nivou dopiranja n sloja u okviru strukture detektora optičke osobine sloja se menjaju, zbog zavisnosti koeficijenta apsorpcije od koncentracije, pa bi se ukupan koeficijent apsorpcije sa strukture trebao računati po formulama za tanak apsorbujući sloj na neprozirnoj podlozi¹⁰⁻¹². Međutim rezultati merenja koeficijenta refleksije^{13,14} za $\lambda < 5 \mu m$ pokazuju minimalne razlike koje potvrđuju opravdanost uvođenja sledeće aproksimacije: koeficijent refleksije R1 se računa korišćenjem izraza:

$$R1 = \frac{(\sqrt{\epsilon_\infty} - 1)^2}{(\sqrt{\epsilon_\infty} + 1)^2} \quad (5)$$

pri čemu je $\epsilon_\infty = 15.68$, a $R2 = 0$.

Ovako izračunate vrednosti koeficijenta refleksije mogu se koristiti pri proračunima karakteristika fotodetektora kod kojih nije nanosen antirefleksioni sloj na upadnoj površini. U slučaju da postoji antirefleksioni sloj umesto R1 uzima se izmerena ili proračunska vrednost koeficijenta refleksije. Uticaj refleksije sa zadnje površine detektora, kod najvećeg broja struktura detektora, je zanemarljiv ili se uzima vrednost karakteristična za konkretnu strukturu.

2.3 Sopstvena koncentracija

Sopstvena koncentracija je važan parametar koji se koristi u modelu i njemu se posvećuje značajna pažnja u literaturi. Međutim, za InSb na temperaturi tečnog azota postoji malo podataka o vrednosti n_i iako se javlja više izraza koji se mogu koristiti za izračunavanja^{1,2,25} ali koji nisu potpuno primenljivi za temperaturu tečnog azota:

$$n_i = (N_c \cdot N_v) \cdot \exp\left(-\frac{E_G(0)}{2 \cdot k_B \cdot T}\right) \quad (6a)$$

$$n_i = 2 \cdot \left(\frac{2\pi k_B T}{h^2}\right)^{3/2} \cdot (m_p^* \cdot m_n^*)^{3/4} \cdot \exp\left(-\frac{E_G}{2k_B T}\right) \quad (6b)$$

odnosno približni numerički izrazi za izračunavanje n_i :

$$n_i = 4.9 \cdot 10^{15} \cdot \left(\frac{m_n^* \cdot m_p^*}{m_0^2} \right)^{3/4} \cdot T^{3/2} \cdot \exp \left(- \frac{0.125}{k_B T} \right) [cm^{-3}] \quad (7a)$$

$$n_i = 2.2 \cdot 10^{14} \cdot T^{3/2} \cdot \exp \left(- \frac{0.125}{k_B T} \right) [cm^{-3}] \quad (7b)$$

koji važe u temperaturnom opsegu 180-300 K i

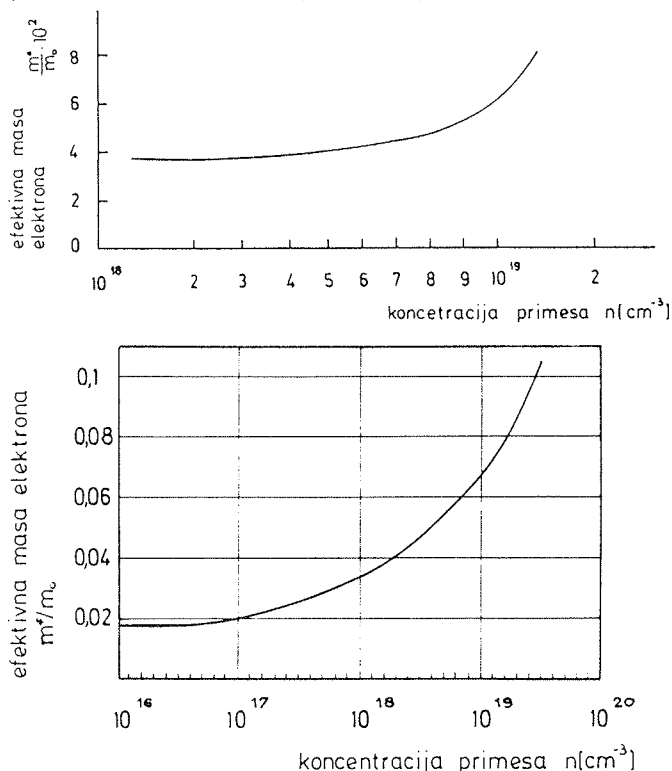
$$n_i = 6 \cdot 10^{14} \cdot T^{3/2} \cdot \exp \left(- \frac{\Delta E(T)}{k_B T} \right) [cm^{-3}] \quad (7c)$$

pri čemu je $\Delta E(T) = 0.27 - 3 \cdot 10^{-4} \cdot T$ (eV) i $k_B T$ izraženo u eV. Primenom numeričkih izraza (7) dobijaju se vrednosti $n_i = 2-4 \cdot 10^9 cm^{-3}$. Primenom izraza (6b) koji važi za poluprovodnike sa parabolničnim zonama pri čemu su uzete vrednosti za efektivne mase koje su dostupne u literaturi dobija se vrednost $n_{i0} = 1.3 \cdot 10^9 cm^{-3}$, što je u ovom radu usvojeno za vrednost sopstvene koncentracije u nedegenerisanom InSb.

Za degenerisani InSb n tipa efektivna masa elektrona zavisi od koncentracije pa i efektivna gustina stanja zavisi od koncentracije. Zavisnost n_i od koncentracije se može izraziti kroz efektivno smanjenje energetskog procepa²⁶ δE_G tako da je:

$$n_B = n_0^2 \cdot \exp \left(\frac{\delta E_G(n)}{k_B T} \right) \quad (8)$$

Zavisnost m^*/m_0 od koncentracije elektrona prikazana na slici 2 pokazuje da je $\delta E_{G \max} \approx 2 \cdot k_B \cdot T$ zbog čega se pri modelovanju fotoodziva najčešće može zanemariti uticaj koncentracije na n_i , jer n_i najviše utiče pri proračunu širine oblasti prostornog naelektrisanja u n



Slika 2: Zavisnost efektivne mase elektrona od koncentracije²³ u InSb n tipa na 77 K

sloju strukture. Pri visokoj koncentraciji u n oblasti osiromašena oblast na n strani minimalno utiče na fotodziv u strukturi koja se analizira.

Zavisnost sopstvene koncentracije od koncentracije slobodnih elektrona korišćena je za korekciju Ožeevog vremena života nosilaca naelektrisanja u materijalu n tipa tako da se u izrazima za Ožeevo rasejanje uzima efektivna vrednost sopstvene koncentracije.

2.4 Pokretljivost elektrona i šupljina

Kretanje nosilaca naelektrisanja kroz poluprovodnike bilo zbog procesa difuzije bilo zbog uticaja ugrađenog ili spoljašnjeg električnog polja ograničeno je procesima interakcije elektrona sa kristalnom rešetkom (akustički i optički fononi); primesama (jonizovanim i neutralnim) ugrađenim u rešetku i defektima rešetke. Pri tome je najznačajniji uticaj procesa rasejanja koji zavise od vrste, koncentracije i energetskih karakteristika centara rasejanja. Procesi rasejanja (rekombinacije) bitno utiču na pokretljivost μ (vreme života τ) nosilaca naelektrisanja koji su osnovni makroskopski parametri koji opisuju transportne procese u poluprovodniku.

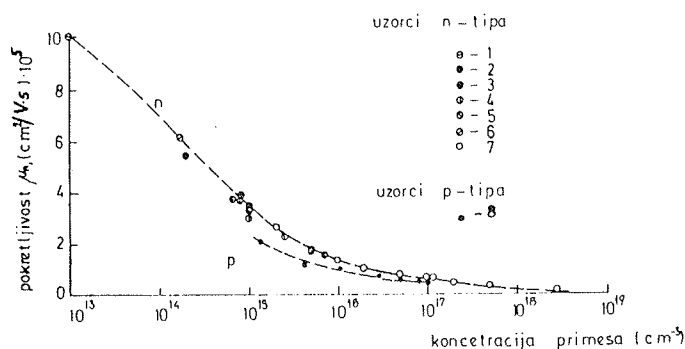
Modelovanje procesa rasejanja i njihovog ukupnog doprinosa pokretljivosti je težak zadatak zbog teškoća identifikacije centara rasejanja (koncentracija, uticaj) i određivanje dominantnih procesa rasejanja i njihovog modelovanja. U ovom radu, je zbog toga, usvojen pristup po kome se koriste eksperimentalni rezultati objavljeni u otvorenoj literaturi^{1,2,15,18} za formulisanje zavisnosti pokretljivosti manjinskih nosilaca od koncentracije primesa.

Tipični dijagrami zavisnosti pokretljivosti od koncentracije za InSb n i p tipa na 77K dati su na sl. 3 i sl. 4.

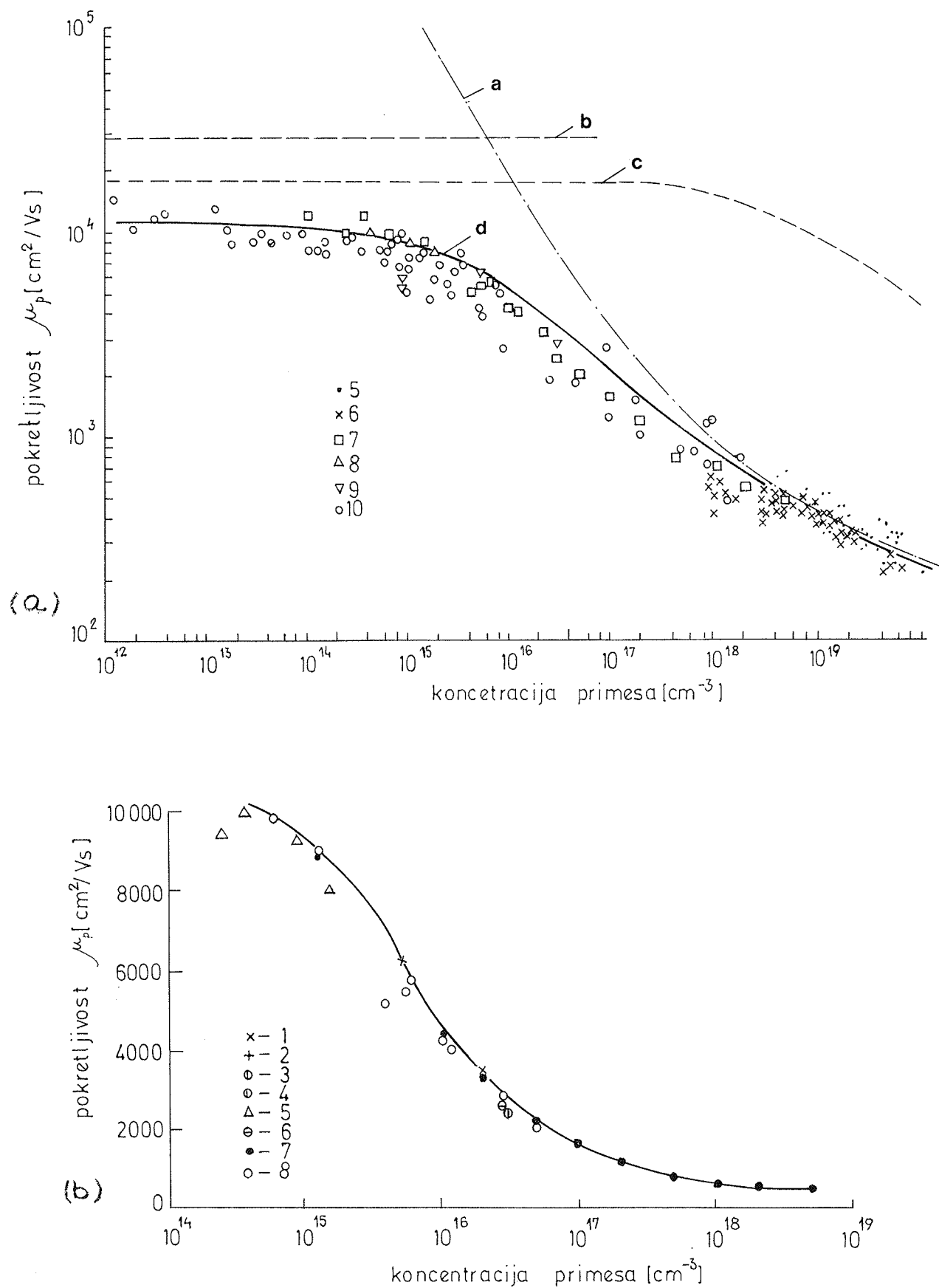
Pokretljivost manjinskih i većinskih nosilaca naelektrisanja na temperaturama $T > 200K$ vezane su relacijom²:

$$b = \frac{\mu_{pn}}{\mu_{nn}} \approx \frac{\mu_{pp}}{\mu_{np}} \approx 6.7 \cdot \sqrt{T} \quad (9)$$

što za temperaturu tečnog azota iznosi 59. Za InSb pri temperaturi 77 K je taj odnos¹ manji od 50.



Slika 3: Zavisnost pokretljivosti elektrona² od koncentracije u InSb p i n tipa



Slika 4: Zavisnost pokretljivosti šupljina od koncentracije u p-InSb na 77 K
 (a) rezultati proračuna i merenja^{1,5} (teorijske vrednosti pri rasejanju na: a - jonima; b - optičkim fononima; c - akustičkim fononima; d - ukupno)
 (b) merene vrednosti^{1,5}

Korišćenjem eksperimentalnih vrednosti dobijena je zavisnost pokretljivosti manjinskih nosilaca od koncentracije prikazana u Tabelama 1 i 2 pri čemu je odnos pokretljivosti elektrona i šupljina oko 60. Ovako formulirana zavisnost pokretljivosti od koncentracije odnosi se na idealan polazni materijal i korisna je za upotrebu pri analizi uticaja koncentracije na parametre fotodetektora. Kako pokretljivost za odgovarajuću koncentraciju zavisi i od vrste primesa i stepena kompenzacije to realne vrednosti mogu biti i do 30% niže u InSb zadovoljavajućeg kvaliteta izrade materijala.

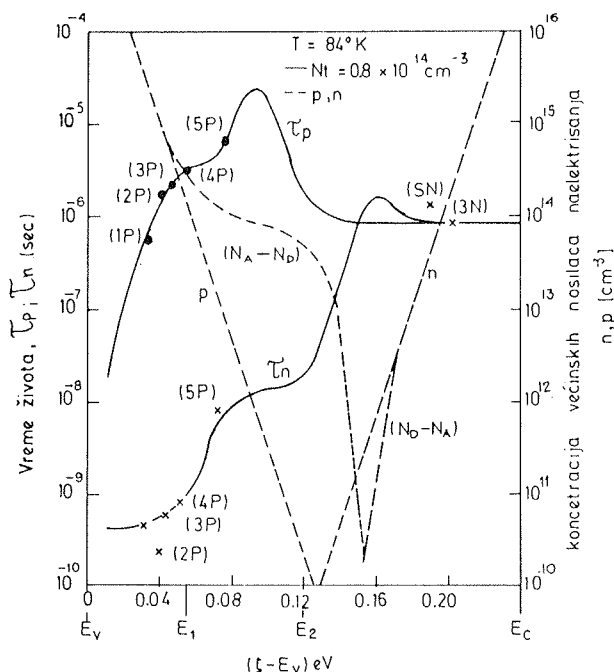
2.5 Vreme života elektrona i šupljina

Zavisnost vremena života elektrona i šupljina od koncentracije i temperature je od izuzetne važnosti za modelovanje odziva (kvantne efikasnosti) fotodetektora a time i za projektovanje fotodiode pošto utiče na fotosignal (preko L_{pn} , L_{np}), vremensku konstantu odziva i šum fotodiode a time i na detektivnost. Vreme života nosilaca zavisi od dominantnog procesa rekombinacije.

Analiza vremenskih konstanti odziva za fotoprovodni efekat ($\tau_{PC} = f(\tau_n, \tau_p, b)$) i fotoelektromagnetni efekat ($\tau_{PEM} \approx \tau_n$) pokazuje da za niže vrednosti koncentracije primesa $n, p < 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ dominira uticaj Šokli-Ridovih rekombinacionih procesa^{1,2,15}, i tada se za određivanje vremena života nosilaca naelektrisanja može koristiti dijagram sa sl. 5.

Za visoko dopirani InSb n-tipa dominantan je proces Ože rekombinacije. Na osnovu teorijskih analiza^{16,20-24} je:

$$\tau_{pp} \approx \tau_{pn} \approx \tau_{A1} \approx \frac{2\tau_{A1}^i}{1 + \left(\frac{n}{n_i}\right)^2} \approx \frac{2\tau_{A1}^i}{\left(\frac{n}{n_i}\right)^2} \approx \frac{2\tau_{A1}^{Nc}}{\left(\frac{n}{N_C}\right)^2} \quad (10)$$



Slika 5: Zavisnost vremena života nosilaca naelektrisanja u InSb (77 K) pri rasejanju na Šokli-Ridovim centrima rasejanja

pri čemu je:

$$\tau_{A1}^i = 3.8 \cdot 10^{-18} \cdot \epsilon_{\infty}^2 \cdot \left(\frac{m_0}{m_n^*}\right) \cdot \left(1 + \frac{m_n^*}{m_p^*}\right)^{1/2} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{m_n^*}{m_p^*}\right) \cdot \left(\frac{E_G}{k_B T}\right)^{3/2} \cdot (F_1 F_2)^2 \cdot \exp \left(\frac{\left(1 + 2 \cdot \frac{m_n^*}{m_p^*}\right) \cdot \frac{E_G}{k_B T}}{\left(1 + \frac{m_n^*}{m_p^*}\right)} \right) \quad (11)$$

Zamenom numeričkih vrednosti dobije se:

$$\tau_{A1}^i = 6.5 \cdot 10^6 \text{ s} \quad \tau_{A1} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ s}$$

$$\text{za } n = N_C = 7.43 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}.$$

Za visoko dopirani InSb p tipa je:

$$\tau_{np} \approx \tau_{A7} \approx \frac{2\tau_{A7}^i}{1 + \left(\frac{p}{n_i}\right)^2} \approx \frac{2\tau_{A7}^i}{\left(\frac{p}{n_i}\right)^2} \quad (12)$$

pri čemu je:

$$\frac{\tau_{A7}^i}{\tau_{A1}^i} = 6 \cdot \frac{\left(1 - \frac{5E_G}{k_B T}\right)}{\left(1 - \frac{3E_G}{2k_B T}\right)} \quad (13)$$

Za InSb na 77 K odnos izražen jednačinom (13) ima vrednost 20. Za jako dopirani InSb p tipa postoje i eksperimentalne vrednosti¹⁷ koje su u ovom radu i korišćene.

Korišćenjem izraza (10) i (11); uz uračunavanje korekcije za zavisnost n_i od koncentracije dobijene su vrednosti za vreme života manjinskih nosilaca naelektrisanja u InSb n tipa koje su sumirane u Tabeli 1.

Korišćenjem eksperimentalnih vrednosti i vrednosti za vreme života sa dijagrama na sl. 5, dobijene su vrednosti za vreme života manjinskih nosilaca u InSb p tipa koje su sumirane u Tabeli 2.

Za InSb p tipa sa koncentracijama višim od vrednosti datih u Tabeli 2 vreme života je ograničeno Ožeovom rekombinacijom i tada se mogu primenjivati izrazi (12) i (13) pri čemu se ne vrši korekcija vrednosti sopstvene koncentracije pošto je efektivna masa šupljina velika i slabo zavisi od koncentracije.

Pri izračunavanjima koristi se relacija:

$$\frac{1}{\tau_{uk}} = \frac{1}{\tau_{S-R}} + \frac{1}{\tau_A} \quad (14)$$

koja daje efektivno vreme života nosilaca naelektrisanja i objedinjuje uticaj dominantnih procesa rasejanja.

2.6 Brzina površinske rekombinacije

Brzina površinske rekombinacije najviše zavisi od načina obrade površine poluprovodnika i karakteristika izvedenih kontakata. Kod mehanički poliranih površina je $S = 10^4 - 10^6 \text{ cm/s}$, a kod elektrohemijski poliranih

Tabela 1: Zavisnost transportnih parametara n InSb od koncentracije na temperaturi 77 K

rb	n	$\frac{n}{N_c}$	$\frac{n_{ie}}{n_0}$	Pokretljivost		K_μ	D_{pn}	Vreme života, s		L_{pn}	S_0 pri t
				$cm^2 / V s$				$\tau_{pn}^{S-R} = 8 \cdot 10^{-7} s$			
				μ_{nn}	μ_{pn}			τ_{A1}	τ_{pn}		
	cm^{-3}						$\frac{cm^2}{s}$			μm	$10 \mu m$
N1	$1 \cdot 10^{13}$	0.00135	1.	$9.5 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^4$	1.	100.	0.21	$8.0 \cdot 10^{-7}$	89.	$1.0 \cdot 10^5$
N2	$2 \cdot 10^{13}$	0.00269	1.	$9 \cdot 10^5$	$1.4 \cdot 10^4$	1.	93.	0.055	$8.0 \cdot 10^{-7}$	86.	$9.2 \cdot 10^4$
N3	$4 \cdot 10^{13}$	0.00538	1.	$8.5 \cdot 10^5$	$1.3 \cdot 10^4$	1.	87.	0.014	$8.0 \cdot 10^{-7}$	83.	$8.7 \cdot 10^4$
N4	$6 \cdot 10^{13}$	0.00808	1.	$8.0 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^4$	1.	83.	$6.0 \cdot 10^{-3}$	$8.0 \cdot 10^{-7}$	80.	$8.0 \cdot 10^4$
N5	$8 \cdot 10^{13}$	0.0108	1.	$7.5 \cdot 10^5$	$1.1 \cdot 10^4$	1.	74.	$3.4 \cdot 10^{-3}$	$8.0 \cdot 10^{-7}$	76.	$7.4 \cdot 10^4$
N6	$1 \cdot 10^{14}$	0.0134	1.	$7.0 \cdot 10^5$	$1.0 \cdot 10^4$	1.	67.	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$8.0 \cdot 10^{-7}$	73.	$6.7 \cdot 10^4$
N7	$2 \cdot 10^{14}$	0.0269	1.	$6.5 \cdot 10^5$	$9.0 \cdot 10^3$	1.	60.	$5.5 \cdot 10^{-4}$	$8.0 \cdot 10^{-7}$	69.	$6.0 \cdot 10^4$
N8	$4 \cdot 10^{14}$	0.0538	1.	$6.0 \cdot 10^5$	$8.5 \cdot 10^3$	1.	57.	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$8.0 \cdot 10^{-7}$	67.	$5.7 \cdot 10^4$
N9	$6 \cdot 10^{14}$	0.0807	1.	$5.5 \cdot 10^5$	$8.0 \cdot 10^3$	1.	54.	$6.0 \cdot 10^{-5}$	$8.0 \cdot 10^{-7}$	65.	$5.4 \cdot 10^4$
N10	$8 \cdot 10^{14}$	0.0108	1.	$5.0 \cdot 10^5$	$7.5 \cdot 10^3$	1.	50.	$3.4 \cdot 10^{-5}$	$8.0 \cdot 10^{-7}$	63.	$5.0 \cdot 10^4$
N11	$1 \cdot 10^{15}$	0.134	1.	$4.0 \cdot 10^5$	$7.0 \cdot 10^3$	1.	47.	$2.1 \cdot 10^{-5}$	$8.0 \cdot 10^{-7}$	61.	$4.7 \cdot 10^4$
N12	$2 \cdot 10^{15}$	0.269	1.	$3.5 \cdot 10^5$	$6.0 \cdot 10^3$	1.	40.	$5.5 \cdot 10^{-6}$	$7.0 \cdot 10^{-7}$	53.	$4.0 \cdot 10^4$
N13	$4 \cdot 10^{15}$	0.538	1.	$3.0 \cdot 10^5$	$5.5 \cdot 10^3$	1.	37.	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$5.0 \cdot 10^{-7}$	43.	$3.7 \cdot 10^4$
N14	$6 \cdot 10^{15}$	0.808	1.	$2.5 \cdot 10^5$	$5.0 \cdot 10^3$	1.	33.	$6.0 \cdot 10^{-7}$	$3.4 \cdot 10^{-7}$	33.	$3.4 \cdot 10^4$
N15	$8 \cdot 10^{15}$	1.08	1.	$2.0 \cdot 10^5$	$4.5 \cdot 10^3$	1.	30.	$3.4 \cdot 10^{-7}$	$2.4 \cdot 10^{-7}$	26.	$3.1 \cdot 10^4$
N16	$1 \cdot 10^{16}$	1.35	1.	$1.8 \cdot 10^5$	$4.0 \cdot 10^3$	1.	27.	$2.1 \cdot 10^{-7}$	$1.7 \cdot 10^{-7}$	21.	$2.9 \cdot 10^4$
N17	$2 \cdot 10^{16}$	2.69	1.	$1.5 \cdot 10^5$	$3.0 \cdot 10^3$	1.	20.	$5.5 \cdot 10^{-8}$	$5.1 \cdot 10^{-8}$	10.5	$2.6 \cdot 10^4$
N18	$4 \cdot 10^{16}$	5.38	1.	$1.0 \cdot 10^5$	$2.0 \cdot 10^3$	1.	13.5	$1.4 \cdot 10^{-8}$	$1.3 \cdot 10^{-8}$	4.34	$4.2 \cdot 10^4$
N19	$6 \cdot 10^{16}$	8.08	1.	$9.5 \cdot 10^4$	$1.7 \cdot 10^3$	1.5 !	17.	$6.0 \cdot 10^{-9}$	$6.0 \cdot 10^{-9}$	3.2	$5.3 \cdot 10^4$
N20	$8 \cdot 10^{16}$	10.8	1.	$9.0 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^3$	2.1 !	22.5	$3.3 \cdot 10^{-9}$	$3.3 \cdot 10^{-9}$	2.75	$8.0 \cdot 10^4$
N21	$1 \cdot 10^{17}$	13.5	1.	$8.0 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^3$	6.0 !	28.	$2.1 \cdot 10^{-9}$	$2.1 \cdot 10^{-9}$	2.45	$1.1 \cdot 10^5$
N22	$2 \cdot 10^{17}$	26.9	1.07	$6.5 \cdot 10^4$	$1.1 \cdot 10^3$	9.0 !	36.	$6.2 \cdot 10^{-10} *$	$6.2 \cdot 10^{-10}$	1.44	$2.4 \cdot 10^5$
N23	$4 \cdot 10^{17}$	53.8	1.14	$4.7 \cdot 10^4$	$8.0 \cdot 10^2$	14. #	42.	$1.8 \cdot 10^{-11} *$	$1.8 \cdot 10^{-11}$	0.85	$4.9 \cdot 10^5$
N24	$6 \cdot 10^{17}$	80.8	1.21	$4.1 \cdot 10^4$	$7.0 \cdot 10^2$	14.0 #	65.	$9.0 \cdot 10^{-11} *$	$9.0 \cdot 10^{-11}$	0.74	$8.7 \cdot 10^5$
N25	$8 \cdot 10^{17}$	108.	1.28	$3.8 \cdot 10^4$	$6.5 \cdot 10^2$	25. #	100.	$5.6 \cdot 10^{-11} *$	$5.6 \cdot 10^{-11}$	0.72	$1.4 \cdot 10^6$
N26	$1 \cdot 10^{18}$	135.	1.35	$3.5 \cdot 10^4$	$6.0 \cdot 10^2$	31.5 #	125.	$4.0 \cdot 10^{-11} *$	$4.0 \cdot 10^{-11}$	0.7	$1.8 \cdot 10^6$
N27	$2 \cdot 10^{18}$	268.	1.55	$3.2 \cdot 10^4$	$5.5 \cdot 10^2$	96.2 #	355.	$1.3 \cdot 10^{-11} *$	$1.3 \cdot 10^{-11}$	0.67	$5.3 \cdot 10^6$
N28	$4 \cdot 10^{18}$	538.	1.75	$2.6 \cdot 10^4$	$4.5 \cdot 10^2$	191. #	576.	$4.2 \cdot 10^{-12} *$	$4.2 \cdot 10^{-12}$	0.49	$1.2 \cdot 10^7$
N29	$6 \cdot 10^{18}$	808.	1.95	$2.3 \cdot 10^4$	$4.1 \cdot 10^2$	286. #	767.	$2.4 \cdot 10^{-12} *$	$2.4 \cdot 10^{-12}$	0.40	$1.9 \cdot 10^7$
N30	$8 \cdot 10^{18}$	1076.	2.15	$2.2 \cdot 10^4$	$4.0 \cdot 10^2$	381. #	1023.	$1.6 \cdot 10^{-12} *$	$1.6 \cdot 10^{-12}$	0.39	$2.6 \cdot 10^7$
N31	$1 \cdot 10^{19}$	1345.	2.39	$2.0 \cdot 10^4$	$3.5 \cdot 10^2$	476. #	1190	$1.2 \cdot 10^{-12} *$	$1.2 \cdot 10^{-12}$	0.38	$3.1 \cdot 10^7$
N32	$2 \cdot 10^{19}$	2691.	2.80	$1.8 \cdot 10^4$	$3.0 \cdot 10^2$	952. #	1920	$4.4 \cdot 10^{-13} *$	$4.4 \cdot 10^{-13}$	0.28	$6.8 \cdot 10^7$
! Zawadski ²⁵ # prema jednačini (18) ²⁴ * korigovano sa $\left(\frac{n_{ie}}{n_0}\right)^2$											

Tabela 2 Zavisnost transportnih parametara p InSb od koncentracije na temperaturi 77 K

rb	p cm ⁻³	Pokretljivost cm ² / V s		D _{np} $\frac{cm^2}{s}$	Vreme života τ _{np} , s	L _{np} μm
		μ _{pp}	μ _{np}			
P1	1.10 ¹³	1.00 10 ⁴	5.0 10 ⁵	3350	4.0 10 ⁻⁹	36.60
P2	2.10 ¹³	1.00 10 ⁴	4.8 10 ⁵	3220	2.0 10 ⁻⁹	25.40
P3	4.10 ¹³	1.00 10 ⁴	4.6 10 ⁵	3080	1.0 10 ⁻⁹	17.50
P4	6.10 ¹³	1.00 10 ⁴	4.4 10 ⁵	2950	8.0 10 ⁻¹⁰	15.40
P5	8.10 ¹³	1.00 10 ⁴	4.2 10 ⁵	2850	6.0 10 ⁻¹⁰	13.00
P6	1.10 ¹⁴	1.00 10 ⁴	4.0 10 ⁵	2680	4.0 10 ⁻¹⁰	10.35
P7	2.10 ¹⁴	1.00 10 ⁴	3.6 10 ⁵	2410	3.8 10 ⁻¹⁰	9.56
P8	4.10 ¹⁴	1.00 10 ⁴	3.3 10 ⁵	2200	3.3 10 ⁻¹⁰	8.12
P9	6.10 ¹⁴	1.00 10 ⁴	3.0 10 ⁵	2000	3.0 10 ⁻¹⁰	7.21
P10	8.10 ¹⁴	1.00 10 ⁴	2.5 10 ⁵	1670	2.6 10 ⁻¹⁰	6.50
P11	1.10 ¹⁵	0.95 10 ⁴	2.0 10 ⁵	1340	2.3 10 ⁻¹⁰	5.50
P12	2.10 ¹⁵	0.90 10 ⁴	1.8 10 ⁵	1200	2.0 10 ⁻¹⁰	4.90
P13	4.10 ¹⁵	0.80 10 ⁴	1.6 10 ⁵	1070	1.6 10 ⁻¹⁰	4.14
P14	6.10 ¹⁵	0.70 10 ⁴	1.4 10 ⁵	940	1.3 10 ⁻¹⁰	3.50
P15	8.10 ¹⁵	0.60 10 ⁴	1.2 10 ⁵	800	1.0 10 ⁻¹⁰	2.80
P16	1.10 ¹⁶	0.50 10 ⁴	1.0 10 ⁵	670	8.0 10 ⁻¹¹	2.30
P17	2.10 ¹⁶	0.40 10 ⁴	0.8 10 ⁵	540	6.5 10 ⁻¹¹	1.80
P18	4.10 ¹⁶	0.30 10 ⁴	0.6 10 ⁵	400	5.0 10 ⁻¹¹	1.40
P19	6.10 ¹⁶	0.20 10 ⁴	0.5 10 ⁵	335	3.0 10 ⁻¹¹	1.02

površina je vrednost brzine površinske rekombinacije znatno niža i iznosi $S = 10^2 - 10^4$ cm/s^{1,2}. U slučaju idealnog omskog kontakta na površini brzina površinske rekombinacije ima beskonačnu vrednost.

Pri izračunavanjima uticaja brzine površinske rekombinacije mogu se koristiti vrednosti brzine površinske rekombinacije u opsegu ($10^2 < S < 10^7$) pri analizi uticaja površinske rekombinacije na parametre fotoodziva. Uticaj površinske rekombinacije na n strani je naročito izražen ako je $S_{pn} > S_0$ pri čemu je:

$$S_0 = \frac{D_{pn}}{L_{pn}} \cdot \text{cth} \left(\frac{t}{L_{pn}} \right)$$

Vrednosti za S_0 pri debljini n oblasti $t = 10 \mu m$ sumirane su u Tabeli 1 za InSb od n tipa.

2.7 Difuziona konstanta i difuziona dužina

Difuziona konstanta za nedegenerisane poluprovodnike zavisi od pokretljivosti i određuje se primenom Anštajnovе relacije koja za Maksvel - Bolcmanovu energetsku raspodelu nosilaca naelektrisanja ima oblik:

$$D_{pn} = \frac{k_B T}{q} \cdot \mu_{pn} = D_{pn}^{M-B} \quad (16a)$$

$$D_{np} = \frac{k_B T}{q} \cdot \mu_{np} = D_{np}^{M-B} \quad (16b)$$

Za degenerisane poluprovodnike n tipa (Fermi-Dirakova energetska raspodela nosilaca naelektrisanja) primenjuje se generalizovana Anštajnova relacija²⁴:

$$D_{pn}^{F-D} = \frac{k_B \cdot T}{q} \cdot \mu_{pn} \cdot K_\mu = D_{pn}^{M-B} \cdot K_\mu \quad (17)$$

gde je K_μ faktor proporcionalnosti koji zavisi od koncentracije (redukovanoг Fermijevog nivoa η) prema približnoj jednačini²⁴:

$$K_\mu = \frac{F_{1/2}(\eta)}{F_{-1/2}(\eta)} \approx 1 + 0.35355 \cdot \left(\frac{n}{N_c} \right) - 4.95 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{n}{N_c} \right)^2 + 1.484 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{n}{N_c} \right)^3 - 4.43 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{n}{N_c} \right)^4 + \dots \quad (18)$$

koja se primenjuje za poluprovodnike sa paraboličnim zonama. Za poluprovodnike sa neparaboličnim zonama koeficijenti u jednačini (18) imaju nešto drugačije vred-

nosti. Za InSb koji nema parabolične zone izračunate su vrednosti²⁵ za $n < 6 \cdot 10^{17}$ koje se ne razlikuju bitno od vrednosti koje se dobiju primenom izraza (18) pri čemu su uzeta u obzir samo prva dva člana.

Izračunate vrednosti za K_μ koje su korišćene u ovom radu dobijene su kombinacijom rezultata detaljnog proračuna i primenom izraza (18) i sumirane su u Tabeli 1.

Difuzione dužine manjinskih nosilaca određuju se primenom izraza:

$$L_{pn} = \sqrt{D_{pn} \cdot \tau_{pn}} \quad (19a)$$

$$L_{np} = \sqrt{D_{np} \cdot \tau_{np}} \quad (19b)$$

Vrednosti za difuzionu konstantu i difuzionu dužinu koje su odabrane za modelovanje sumirane su u Tabeli 1 za n tip materijala i Tabeli 2 za p tip materijala.

3. ZAKLJUČAK

Sistem parametara InSb na temperaturi tečnog azota prikazan u ovom radu dobijen je na osnovu poznatih teorijskih i eksperimentalnih rezultata. Međutim, dostupni rezultati ne pokrivaju ceo opseg koncentracija od interesa za projektovanje i analizu InSb detektora pa je primenom odgovarajućih aproksimacija, analogija i korekcija izvršena ekstrapolacija i za vrednosti koncentracija za koje ne postoje objavljeni rezultati. Time je omogućeno da se formira celovit sistem parametara koji je primenljiv za analizu i projektovanje InSb detektora različitih tipova i strukture. Ovako formulisani sistem parametara je korišćen pri analizi InSb fotodioda n⁺-p tipa⁹ pri čemu se rezultati modelovanja vrlo dobro slažu sa eksperimentalnim rezultatima.

Pri korišćenju razmatranog modela elektrofizičkih parametara InSb treba voditi računa da je on formulisani za idealno proizveden monokristalni InSb i da daje vrednosti parametara koje se dobro slažu sa publikovanim rezultatima za najbolje uzorke kristala InSb. Upotrebom ovog modela parametara pri modelovanju InSb detektora mogu se dobiti maksimalne vrednosti parametara detektora koje se u analiziranoj strukturi mogu realizovati, i analizirati uticaj promene koncentracije nosilaca naelektrisanja u pojedinim elementima strukture, što zajedno daje dobru osnovu za optimizaciju parametara odabrane strukture detektora.

4 LITERATURA

- 1) Hilsom C., Rose-Innes A. C.: "Semiconducting III-V compounds", (1961), Pergamon Press, Oxford;
- 2) Madelung O.: "Physics of III-V compounds", (1964), John Wiley & Sons, New York;
- 3) Hogarth C. A.: "Materials used in semiconductor devices", (1964), Interscience Publishers, New York;
- 4) Baranskii P. I., Klochkov V. P., Potykievich I. V.: "Poluprovodnikova elektronika. Spravotchnik", (1975), Naukova Dumka, Kiev;
- 5) Kane E. O.: "Band Structure of Indium Antimonide", (1957), Phys. Chem. Solids, vol. 1, 249-261;

- 6) Kane E. O.: "The kp method", (1966), Semiconductors and Semimetals (ed. Willardson R. K., Beer C. A.), vol. 1, Academic Press, New York;
- 7) Anderson W. W.: "Absorption Constant of Pb1-xSnxTe and Hg1-xCdxTe Alloys", (1980), Infrared Physics, vol. 20, 363-372;
- 8) Livada B., Đurić Z.: "Koeficijent apsorpcije za jako dopirani InSb", (1983), Zbornik radova sa XXVII Jugoslovenske konferencije ETAN-a, Struga, 6-10. juna 1983, V331-V337;
- 9) Livada B.: "Uticaj Mos-Burštajnovog efekta na neke parametre InSb n⁺-p fotodioda", (1990), magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu;
- 10) Livada B.: "Teorijski osnovi analize interakcije IC zračenja sa jako dopiranim poluprovodnicima" (neobjavljeno);
- 11) Bilenko D. I. i sar.: "Opredelenie parametrov rezko neodnorodnyh poluprovodnikovoyh struktur po infrakrasnym spektram otzraheniya sveta", (1971), Fizika Tekhnika Poluprovodnikov, vol. 5, No7, 1423-1427;
- 12) Gopal V.: "Analysis of IR Plasma Reflectivity Spectra: Surface Characterization", (1981), Infrared Physics, vol. 21, 159-165;
- 13) Livada B.: "Određivanje nekih parametara jako dopiranih poluprovodnika iz spektralne zavisnosti koeficijenta refleksije", Naučno tehnički pregled, (1984) vol. XXXI, No7, 32-38;
- 14) Livada B., Jović V.: "Ispitivanje epitaksijalnih slojeva InSb korišćenjem metode određivanja plazma minimuma refleksivnosti", (1987), Zbornik radova sa XXXI Jugoslovenske konferencije ETAN-a, Bled, 1-5 juna 1987. god.;
- 15) Kruse P. W.: "Indium Antimonide Photoconductive and Photoelectromagnetic Detectors", (1970), Semiconductors and Semimetals (ed. Willardson R. K., Beer C. A.), vol. 5, Academic Press, New York;
- 16) Striha M. B.: "Ozshe rekombinacija dyrok cherez glubokye donory v InSb n-tipa", (1984), Fizika Tekhnika Poluprovodnikov, vol. 18, No3, 441-444;
- 17) Bartoli F., i sar.: "Auger-Limited Carrier Lifetimes in HgCdTe at High Excess Carrier Concentrations", (1974), Journal of Applied Physics, vol. 45, No5, 2150-2154;
- 18) Volkov A. S., Galavanov V. V.: "Rekombinacionnye processy u p-InSb", (1967), Fizika Tekhnika Poluprovodnikov, vol. 1, No2, 163-171;
- 19) Galavanov V. V.: "O mehanizme rasejanija dyrok v InSb", (1970), Fizika Tekhnika Poluprovodnikov, vol. 4, No5, 853-859;
- 20) Pines M. Y.: "Surface Effects in n-Type InSb Photoconductors", (1979), Infrared Physics, vol. 19, 559-561;
- 21) Rogalski A., Orman Z.: "Band to Band Recombination in InAs1-xSbx", (1985), Infrared Physics, vol. 25, No3, 551-560;
- 22) Pines M. Y.: "Recombination Processes in Intrinsic Semiconductors Using Ionization Capture Cross Section in Indium Antimonide and Mercury Cadmium Telluride", (1980), Infrared Physics, vol. 20, 73-91;
- 23) Pines M. Y.: "Characteristics of n-Type InSb", (1979), Infrared Physics, vol. 19, 563-569;
- 24) Kroemer H.: "The Einstein Relation for Degenerate Carrier Concentration", (1978), IEEE Trans. El. Dev., vol. ED-25, 850;
- 25) Zawadzki W.: "Electron Transport Phenomena in Small-Gap Semiconductors", (1974), Advances in Physics, vol. 23, 435-522;
- 26) Marshak A. H., i sar.: "Rigid Band Analysis of Heavily Doped Semiconductor Devices", (1981), IEEE Trans. El. Dev., vol. ED-28, 293-298;

Livada (Gojko) Branko
dipl. inž. magistar elektrotehnike
Vojnotehnički institut KoV
11000 Beograd Katanićeva 15

Prispelo: 25.01.91

Sprejeto: 06.03.91