

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET  
STRUČNI STUDIJ ELEKTROTEHNIKE

ZAVRŠNI RAD

**NUMERIČKA OBRADBA EKSPERIMENTALNOG  
TRANZIJENTNOG ODZIVA A-SI:H PIN FOTODIODE**

Rijeka, lipanj 2015

Marko Čović

0069043018

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET  
STRUČNI STUDIJ ELEKTROTEHNIKE

ZAVRŠNI RAD

**NUMERIČKA OBRADBA EKSPERIMENTALNOG  
TRANZIJENTNOG ODZIVA A-SI:H PIN FOTODIODE**

Mentor: Red. prof. dr. sc. Željko Jeričević, dipl. ing.

Komentor: Izv. prof. dr. sc. Vera Gradišnik, dipl. ing. el.

Rijeka, lipanj 2015

Marko Čović

0069043018

**TEHNIČKI FAKULET**

Povjerenstvo za završne ispite  
preddiplomskog stručnog studija elektrotehnike  
Br.: 602-05/15-14/32  
Rijeka, 06.03.2015.

**ZADATAK**  
za završni rad

Pristupnik: Marko Čović

Matični broj: 0069043018  
Lokalni matični broj: 08800028

Naziv zadatka: Numerička obradba eksperimentalnog tranzijentnog odziva a-Si:H pin fotodiode

Naziv zadatka na engleskom jeziku: Numerical processing of experimental transient response of a-Si:H pin photodiode

Sadržaj zadatka:


Potrebno je izmjeriti strujno-naponske karakteristike i odzive fotodiode na svjetlosni impuls i na svjetlosni impuls uz konstantno svjetlo. Računalnim metodama analizirati odzive fotodiode i iz rezultata odrediti odzivno vrijeme a-Si:H pin fotodiode. Analiza sumarnog signala bazira se na metodi najmanjih kvadrata i rezultira u separaciji eksponencijalnih funkcija iz sumarnog signala.

Zadano: 17.03.2015.


Mentor:

  
Red. prof. dr. sc. Željko Jeričević

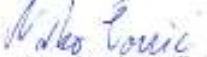
Predsjednica Povjerenstva:

  
Izv. prof. dr. sc. Vera Gradišnik

Sumentorica

  
Izv. prof. dr. sc. Vera Gradišnik

Zadatak preuzeo dana: 17.03.2015.

  
(potpis pristupnika)

Dostaviti:

- Predsjednica Povjerenstva
- Mentor
- Djelovoda Povjerenstva
- Evidencija studija
- Pristupnik
- Arhiva Zavoda

## **IZJAVA**

U skladu s člankom 9. Pravilnika o završnom radu i završenom ispitu na stručnim studijima Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno prema zadatku br. 602-05/15-14/32 od 17.03.2015.

Rijeka, 17.11.2015

---

Ime i prezime

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Eksponecijalni raspad.....	2
3. Metoda najmanjih kvadrata .....	4
3.1 Mono-eksponecijalna funkcija .....	7
3.2 Bi-eksponecijalna funkcija .....	8
3.3 Multi-eksponecijalna funkcija.....	10
4. a-Si:H PIN dioda.....	11
5. Mjerenja .....	18
6. Pohrana podataka .....	20
7. Rezultati .....	25
8. Zaključak.....	36
9. Literatura .....	37

## 1. Uvod

Ovaj završni rad sastoji se od dva dijela. Prvi dio se odnosio na eksperiment odnosno mjerenja odziva a-si:H p-i-n fotodiode na svjetlosni impuls superponiran na svjetlost konstantnog izvora svjetlosti iste valne duljine od 470 nm pri različitim reverznim naponima na fotiodi. Drugi dio je obrada podataka dobivenih mjerenjem koristeći metodu najmanjih kvadrata.

U drugom poglavlju ovoga rada definiran je eksponencijalni raspad i opisan algebarskom jednačbom. Treće poglavlje predočava što je metoda najmanjih kvadrata i kako se matematički definira, te su navedena dva slučaja kao primjer. Četvrto poglavlje posvećeno je fizikalnom opisu i strukturi a-Si:H pin fotodiode te njezinom radu u niskofrekventnom i visokofrekventnom području. U petom i šestom poglavlju opisana su mjerenja te sustav pripreme i obrade dobivenih podataka. U sedmom poglavlju predstavljeni su dobiveni rezultati a u osmom zaključci.

## 2. Eksponencijalni raspad

Zakon eksponencijalnog raspada opisuje radioaktivni raspad radionuklida, vrlo često se javlja u kemijskoj kinetici (pod nazivom kinetika prvog reda) i kod relaksacijskih procesa a definiran je sljedećom diferencijalnom jednačbom

$$\frac{dy}{dt} = -ky$$

Koja opisuje proces pada koncentracije (negativni predznak)  $y$  u vremenu  $t$ . Smanjenje koncentracije u svakoj vremenskoj točki je proporcionalno vrijednosti konstante raspada  $k$  koja se ne mijenja tokom procesa raspada i trenutačnoj koncentraciji  $y(t)$ .

Gornja diferencijalna jednačba se može integrirati jednostavnim postupkom separacije varijabli

$$\frac{dy}{dt} = -ky \Rightarrow \frac{dy}{y} = -kdt$$

$$\int_A^{y(t)} \frac{dy}{y} = -k \int_0^t dt$$

$$\ln y(t) - \ln A = -kt$$

$$\ln \frac{y(t)}{A} = -kt$$

$$y(t) = Ae^{-kt}$$

Gdje nam označuje:

$y(t)$  – koncentracija (količina) kroz vrijeme

$A$  – inicijalna količina kod  $t = 0$

$e$  – baza prirodnog logaritma

$k$  – konstanta raspada

$t$  – vrijeme

Rezultantna algebarska jednađba opisuje jedan proces raspada. U sluĉaju paralelnih procesa koji su međusobno neovisni, kao na primjer procesi radioaktivnog raspadanja u smijesi  $N$  radionuklida, imamo sumu  $N$  neovisnih procesa

$$y(t) = \sum_{i=1}^N A_i e^{-k_i t}$$



### 3. Metoda najmanjih kvadrata

Zbog nesavršenosti samog mjerenja i opreme nemoguće je dobiti krivulju koja je potpuno točan prikaz mjerenog rezultata. Da bi se približili što točnijem prikazu stvarne vrijednosti mjerenja koristimo numeričke metode za aproksimaciju funkcija. Jedna od tih metoda je metoda najmanjih kvadrata.

Metoda najmanjih kvadrata je matematička metoda aproksimiranja jedne (eksperimentalno dobivene) funkcije pomoću analitičke funkcije koja je puno pogodnija za analizu procesa.

Transformaciju iz eksperimentalne u analitičku funkciju postiže se upotrebom teorijskog modela i minimizacijom sume kvadrata odstupanja između modela i eksperimentalnih točaka. Metoda je ilustrirana u ovom poglavlju upotrebom pravca kao teorijske funkcije

Osnovni problem je naći regresijski pravac  $y = ax + b$  (za  $m \in \{1, \dots, M\}$ ) koji će prolaziti između parova točaka koje smo dobili eksperimentalno  $(x_m, y_m)$ .

Jednadžbe se izvode na sljedeći način

$$\sum_{m=1}^M \delta_m^2 = \sum_{m=1}^M [y_m - (ax_m + b)]^2 = \min$$

Gdje su  $x_m, y_m$  mjerene vrijednosti nezavisne i zavisne varijable. Traže se vrijednosti parametara  $a, b$  za koje je suma kvadrata odstupanja minimalna uz pretpostavku da je greška samo u zavisnoj varijabli  $y$ . U tom slučaju prve parcijalne derivacije gornje jednadžbe po parametrima  $a, b$  moraju biti jednake nuli

$$\frac{\partial}{\partial a} \sum_{m=1}^M (y_m - ax_m - b)^2 = -2 \sum_{m=1}^M (y_m - ax_m - b)x_m = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum_{m=1}^M (y_m - ax_m - b)^2 = -2 \sum_{m=1}^M (y_m - ax_m - b) = 0$$

Gornje jednadžbe se nazivaju normalne jednadžbe i u ovom primjeru su to dvije linearne jednadžbe u dvije nepoznanice  $(a, b)$

$$\sum_{m=1}^M y_m x_m - a \sum_{m=1}^M x_m^2 - b \sum_{m=1}^M x_m = 0$$

$$\sum_{m=1}^M y_m - a \sum_{m=1}^M x_m - bM = 0$$

Te jednažbe također se mogu iskazati u matričnom obliku

$$\begin{bmatrix} \sum_{m=1}^M y_m x_m \\ \sum_{m=1}^M y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^M x_m^2 & \sum_{m=1}^M x_m \\ \sum_{m=1}^M x_m & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$$

Vrijednosti od  $a$  i  $b$  koje minimiziraju grešku mogu se u ovom jednostavnom slučaju izračunati preko determinante ili nekom drugom metodom poput inverzije matrice. Za 2x2 matricu jednostavnije je riješiti sustav preko determinante

$$\det = \begin{vmatrix} \sum_{m=1}^M x_m^2 & \sum_{m=1}^M x_m \\ \sum_{m=1}^M x_m & M \end{vmatrix} = M \sum_{m=1}^M x_m^2 - \left( \sum_{m=1}^M x_m \right)^2$$

$$a = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{m=1}^M y_m x_m & \sum_{m=1}^M x_m \\ \sum_{m=1}^M y_m & M \end{vmatrix}}{\det} = \frac{M \sum_{m=1}^M y_m x_m - \sum_{m=1}^M x_m \sum_{m=1}^M y_m}{\det}$$

$$b = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{m=1}^M x_m^2 & \sum_{m=1}^M y_m x_m \\ \sum_{m=1}^M x_m & \sum_{m=1}^M y_m \end{vmatrix}}{\det} = \frac{\sum_{m=1}^M x_m^2 \sum_{m=1}^M y_m - \sum_{m=1}^M y_m x_m \sum_{m=1}^M x_m}{\det}$$

U ovom jednostavnom primjeru formule za izračuna parametara  $a$ ,  $b$  napisane su u jednom koraku

$$a = \frac{M \sum_{m=1}^M y_m x_m - \sum_{m=1}^M x_m \sum_{m=1}^M y_m}{M \sum_{m=1}^M x_m^2 - \left( \sum_{m=1}^M x_m \right)^2}$$

$$b = \frac{\sum_{m=1}^M x_m^2 \sum_{m=1}^M y_m - \sum_{m=1}^M y_m x_m \sum_{m=1}^M x_m}{M \sum_{m=1}^M x_m^2 - \left( \sum_{m=1}^M x_m \right)^2}$$

Eksponecijalni model raspada je nelinearan i ima dva parametra: nelinearni parametar  $k$  i linearni parametar  $A$ . Rješavanje ovakvih sustava mora se pronaći iterativno, a konvergencija u principu nije zagarantirana. Zbog toga je razvijena metoda linearizacije bazirana na numeričkoj integraciji.[1][2][3]

Primjeri koji sljede ilustriraju navedenu metodu linearizacije.

### **3.1 Mono-eksponencijalna funkcija**

$$y = Ae^{-kt}$$

Integrirajući ovaj izraz dobiva se

$$\int y dt = A \int e^{-kt} dt$$

$$\int y dt = \frac{A}{k} (1.0 - e^{-kt})$$

$$k \int y dt = -Ae^{-kt} + A$$

Supstitucijom se dobije

$$-y \approx -Ae^{-kt}$$

$$y \approx -k \int y dt + A$$

Prethodno dobivena jednačba se primjenjuje na svaku eksperimentalno dobivenu točku  $y(t)$  na sljedeći način

$$y(t_j) \approx -k \int_{t=0}^{t=t_j} y(t) dt + A$$

Kod izgrađivanja sistemske matrice, integrali se izračunavaju iz eksperimentalnih točaka primjenjujući numeričku integraciju. Postupak rješavanja se svodi na prezdani sustav  $M$  linearnih jednačbi u dvije nepoznanice

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_j \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_{t=0}^{t=t_1} y(t) dt & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \int_{t=0}^{t=t_j} y(t) dt & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \int_{t=0}^{t=t_M} y(t) dt & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix}$$

Sustav ima sljedeće rješenje ( $p_1, p_2$ ):

$$p_1 = -k$$

$$p_2 = A$$

### 3.2 Bi-eksponencijalna funkcija

$$y = A_1 e^{-k_1 t} + A_2 e^{-k_2 t}$$

Integrirajući gore navedeni izraz dobijemo

$$\int y dt = A_1 \int e^{-k_1 t} dt + A_2 \int e^{-k_2 t} dt$$

$$\int y dt = \frac{A_1}{k_1} (1.0 - e^{-k_1 t}) + \frac{A_2}{k_2} (1.0 - e^{-k_2 t})$$

$$k_1 k_2 \int y dt = k_2 A_1 - k_2 A_1 e^{-k_1 t} + k_1 A_2 - k_1 A_2 e^{-k_2 t}$$

$$k_1 k_2 \int y dt = k_2 (A_1 - A_1 e^{-k_1 t} - A_2 e^{-k_2 t} + A_2 e^{-k_2 t}) + k_1 (A_2 - A_1 e^{-k_1 t} - A_2 e^{-k_2 t} + A_1 e^{-k_1 t})$$

Supstitucijom se dobije

$$-y \approx -A_1 e^{k_1 t} - A_2 e^{k_2 t}$$

$$k_1 k_2 \int y dt \approx k_2 (A_1 - y) + k_2 A_2 e^{-k_2 t} + k_1 (A_2 - y) + k_1 A_1 e^{k_1 t}$$

Ponovljenom integracijom se dobije

$$\begin{aligned}
k_1 k_2 \iint y dt dt &\approx k_2 A_1 \int dt - k_2 \int y dt + A_2 (1.0 - e^{-k_2 t}) + k_1 A_2 \int dt - k_1 \int y dt + A_1 (1.0 - e^{-k_1 t}) \\
k_1 k_2 \iint y dt dt &\approx t \{k_2 A_1 + k_1 A_2\} - (k_1 + k_2) \int y dt - y + A_1 + A_2 \\
y &\approx -(k_1 + k_2) \int y dt - k_1 k_2 \iint y dt dt + A_1 + A_2 + t(k_2 A_1 - k_1 A_2)
\end{aligned}$$

Rješenje prezadanog linearnog sustava jednadžbi u četiri nepoznanice  $p_1, p_2, p_3, p_4$  je

$$p_1 = -k_1 - k_2$$

$$p_2 = -k_1 k_2$$

$$p_3 = A_1 + A_2$$

$$p_4 = A_1 k_2 + A_2 k_1$$

Nelinearni parametri  $k$  iz prvih  $N$  jednadžbi (u ovom primjeru dvije) mogu se izračunati nalaženjem korijena polinoma  $N$ -tog stupnja. Za gornji primjer bieksponencijalne funkcije  $k$ -ove su korišteni kvadratne jednadžbe

$$\begin{array}{l}
p_1 = -k_1 - k_2 \\
p_2 = -k_1 k_2
\end{array}$$

$$k_1 (p_1 - k_1) + p_2 = 0$$

$$-k_1^2 + p_1 k_1 + p_2 = 0$$

Za nalaženje korijena polinoma  $N$ -tog stupnja koriste se standardne numeričke metode [1].

Linearni parametri ( $A$ ) se izračunavaju uz poznate nelinearne parametre ( $k$ ) iz drugih  $N$  jednadžbi dobivenih rješavanjem metode najmanjih kvadrata:

$$\begin{array}{l}
p_3 = A_1 + A_2 \\
p_4 = A_1 k_2 + A_2 k_1
\end{array}$$

$$\begin{bmatrix} p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ k_2 & k_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}$$

### 3.3 Multi-eksponencijalna funkcija

Opće rješenje linearnog sustava jednažbi za sumu  $N$  eksponencijala  $y = \sum_{i=1}^N A_i e^{-k_i t}$

$$p_1 = -\sum_{i=1}^N k_i$$

[...]

$$p_n = -\sum_{i=1}^{\frac{N!}{(N-n)!n!}} \prod_1^n k_m \quad m \in ({}^N C_n) \quad {}^N C_n = \frac{N!}{(N-n)!n!}$$

[...]

$$p_N = -\prod_{i=1}^N k_i$$

$$p_{N+1} = \sum_{i=1}^N A_i$$

$$p_{N+2} = \sum_{i=1}^{i=N} A_i \sum_{j=1; j \neq i}^N k_j$$

[...]

$$p_{N+n} = \frac{1}{(n-1)!} \sum_{i=1}^N A_i \frac{(N-1)!}{(N-n)!(n-1)!} \prod_1^{n-1} k_m \quad m \in ({}^{N-1} C_{n-1}; m \neq i)$$

[...]

$$p_{2N} = \frac{1}{(N-1)!} \sum_{i=1}^N A_i \prod_{j=1; j \neq i}^N k_j$$

Opće rješenje [4] implementirano je na Linux sustavu uz upotrebu LINPACK and EISPACK programskih paketa i korišteno u analizi eksperimentalnih podataka. Analiza eksperimentalnih pogrešaka provedena je po [5].

#### 4. a-Si:H PIN Fotodioda

Struktura a-Si:H p-i-n fotodiode iz amornog silicija sastoji se od tri sloja a oni su: *p*-sloj, *n*-sloj i *i*-sloj. *p* i *n* su jako dopirani tanki slojevi te se nalaze se na rubovima fotodiode uz kontakte, dok je centralni dio fotodiode *i*-sloj odnosno intrinzično područje.

Fotostruja fotodiode za kratke valne duljine [6] je određena s izrazom

$$J_{ph} = q\mu_n n_0 \xi$$

$$J = q\mu_n n(x) \xi(x) + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{d\xi(x)}{dt}$$

gdje je prva komponenta struje „poljska komponenta struje“ a druga struja pomaka  $J_d$ .

Struja pomaka je jednaka

$$J_d = \frac{Q v_n}{A d}$$

gdje je

$Q$  – naboj koji se giba prema kontaktima brzinom  $v = dx/dt$

$A$  – poprečni presjek spoja

$d$  – debljina *i*-sloja

$v_n$  – brzina elektrona

Poljska komponenta fotostruje je jednaka

$$J = q\mu_n n(x) \xi(x) = q\mu_n G_{opt}(x) \tau_n \xi(x)$$

gdje je



$q$  – jedinični naboj elektrona

$\mu_n$  – pokretljivost elektrona

$n$  – koncentracija elektrona

$\xi$  – jakost električnog polja

$\tau_n$  – generacijsko vrijeme fotogeneriranih slobodnih nositelja naboja - elektrona

$G_{opt}$  – optičke generacije slobodnih nositelja naboja

Od tuda se može izraziti tranzijentno vrijeme  $\tau_0$  u kojem fotogenerirani nositelji dostignu kontakt od mjesta fotogeneracije

$$\tau_0 = \frac{d}{v_n} = \frac{d}{\mu_n \xi} = \frac{d^2}{\mu_n U}$$

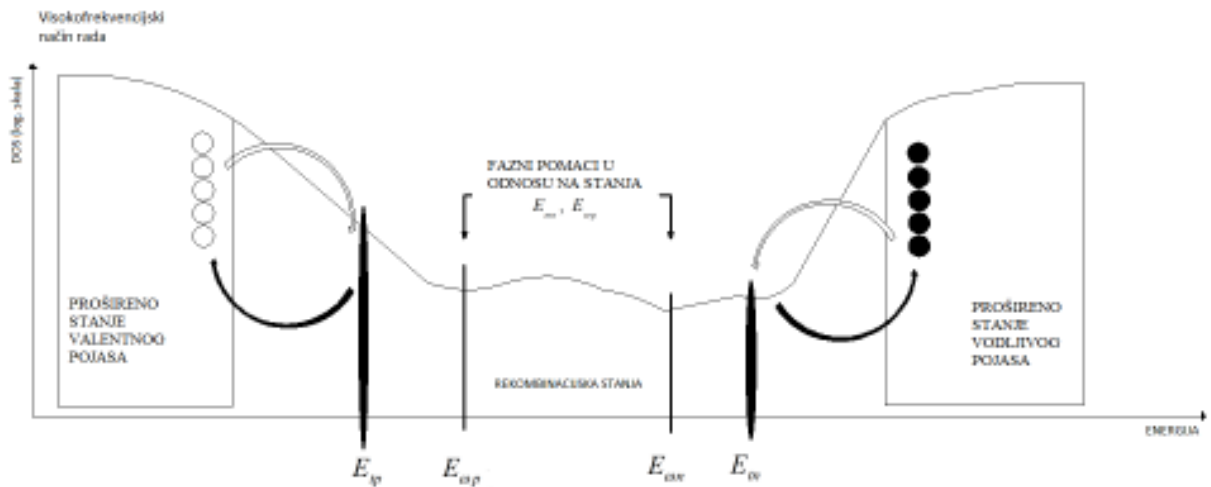
gdje je

$U$  – električni napon

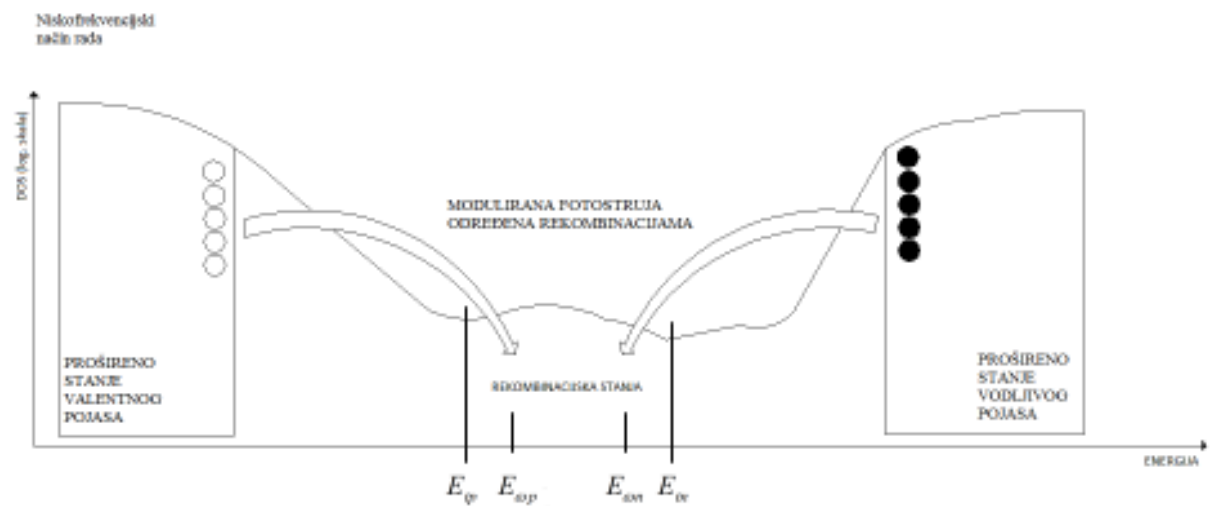
Za uzorak korišten u eksperimentu ta vrijednost iznosila je

$$\tau_0 = \frac{d^2}{\mu_n U} = \frac{(300 \cdot 10^{-7})^2}{10 \frac{cm^2}{Vs} 1V} = 3 \cdot 10^{-11} s$$

Gibanje slobodnih nositelja kroz  $i$ -sloj ograničeno je hvatanjem, termičkim opuštanjem, prijelazima unutar produženih stanja, kao i rekombinacijom slobodnih nositelja. Stanja unutar energijskog rascjepa mogu biti stanja hvatanja na rubovima energijskog rascjepa u blizini vodljivog, odnosno valentnog pojasa, tzv. repovi (*eng.* “tail states”) i zamke, odnosno duboka stanja (*engl.* deep trap) raspoređena po sredini energijskog rascjepa [7]. Na slici 4.1 prikazana je raspodjela energijskih stanja unutar energijskog rascjepa s mogućim prijelazima elektrona između ruba vodljivog pojasa i stanja kod niskih frekvencija i visokih frekvencija.



a)



b)

Slika 4.1 Raspodjela energijskih stanja unutar energijskog rascjepa s mogućim prijelazima elektrona između ruba vodljivog pojasa i stanja kod niskih frekvencija i visokih frekvencija.; a) hvatanje elektrona u zamke, odnosno duboka stanja (*engl.* deep trap) raspoređena po sredini energijskog rascjepa i b) hvatanje elektrona u rekombinacijske centre na sredini energijskog rascjepa, prema [7].

Osvjetlimo fotodiodu s monokromatskim svjetlom plave boje koje se sastoji iz dvije komponente i to konstante istosmjernje i pulsirajuće izmjenične i promatramo odziv fotodiode.

Fotostruja nakon isključenja pulsirajućeg svjetlosnog izvora (ali i pri konstantom osvjetljenju) opada zbog hvatanja slobodnih nositelja u dubokim zamkama s karakterističnom frekvencijom hvatanja. Time se smanjuje koncentracija slobodnih nositelja koji doprinose struji a to se odražava u tranzijentnom vremenu fotostruje pri odzivu fotodiode na promatrani svjetlosni impuls.

Zbog prisutnih opisanih stanja u amorfnom siliciju, tranzijentno vrijeme  $t_T$  sadrži dvije ili više vremenskih komponenti. Prva komponenta je vrijeme u kojem elektron prolazi i-sloj s energijom većom od ruba vodljivog pojasa,  $\tau_0$ , od mjesta generacije do kontakta i druga komponenta je vrijeme u kojem se slobodni nositelj zadržava u energijskom stanju hvatanja (zamkama) s frekvencijom pokušaja izlaska iz stanja (*engl.* “attempt-to-escape-frequency”),  $\nu_0$ . Stoga ukupno tranzijentno vrijeme možemo prikazati sljedećom formulom:

$$\tau_T = \tau_0 + \nu_0^{-1} \exp\left(\frac{E_i}{kT}\right)$$

gdje je

$$\tau_0 = \frac{d}{\mu_0 \xi}$$

$\nu_0$  – eksperimentalno dobivena vrijednost  $10^{-12}$  s.

$E_i$  – energija energijskog stanja

$k$  – Boltzmann-ova konstanta  $1,3806488(13) \cdot 10^{-23}$  J/K

$T$  – apsolutna temperatura 298,15K

Do sada smo naglašavali da su slobodni nositelji u ovom slučaju elektroni, a šupljine su zanemarene. To je zbog toga što na fizikalnoj razini šupljine kao nositelji provode mnogo više vremena u zamkama nego elektroni, stoga imaju manju pokretljivost od elektrona (10-100 puta manju) i zanemarivo doprinose k tranzijentnoj fotostruji.

Zadržavanje slobodnih nositelja naboja u repovima moguće je analizirati kada je pulsirani izvor svjetlosti superponiran konstantnom izvoru svjetlosti. U našem primjeru je korišten kratkovalni impuls plavog svjetla niske frekvencije. Kod takvih pobuda parovi elektron-šupljina se rekombiniraju na prednjem i stražnjem dijelu površine i-sloja. Jedan tip nositelja se giba direktno prema kontaktu dok drugi prolazi kroz sam uzorak. U našem slučaju, kad je fotodiode reverzno

polarizirana, šupljine se direktno gibaju prema kontaktu u blizini  $p/i$  spoja, dok se elektroni gibaju kroz  $i$ -sloj i do kontakta u blizini  $n/i$  spoja. U tom slučaju samo jedna vrsta nositelja (elektroni) doprinose fotostruji.

Energije energijskih stanja u kojima se zadržavaju elektroni slijede iz jednadžbe za  $\tau_0$

$$E_c - E_i = kT \ln \left( \frac{\tau_i}{\tau_0} \right)$$

gdje je

$E_c$  – energija ruba vodljivog pojasa

$E_i$  – energija energijskog stanja

Istosmjerna komponenta svjetlosti određuje položaj kvazi-Fermijeve energije za elektrone i za šupljine

$$n = n_i e^{\frac{E_{Fn} - E_{Fi}}{kT}}$$

$$p = n_i e^{\frac{E_i - E_{Fp}}{kT}}$$

gdje je

$E_{Fn}$  – kvazi Fermijeva razina energije za elektrone

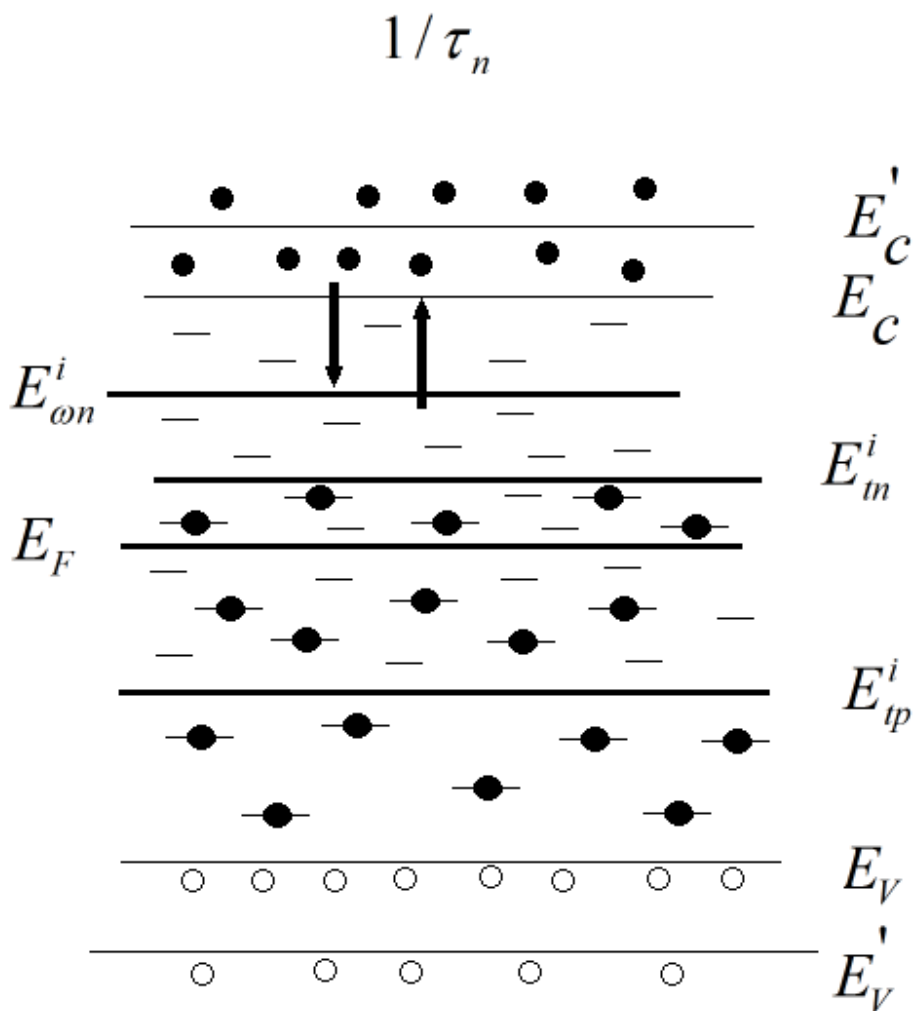
$E_{Fi}$  – intrinzična Fermijeva razina energije

$E_{Fp}$  – kvazi Fermijeva razina energije za šupljine

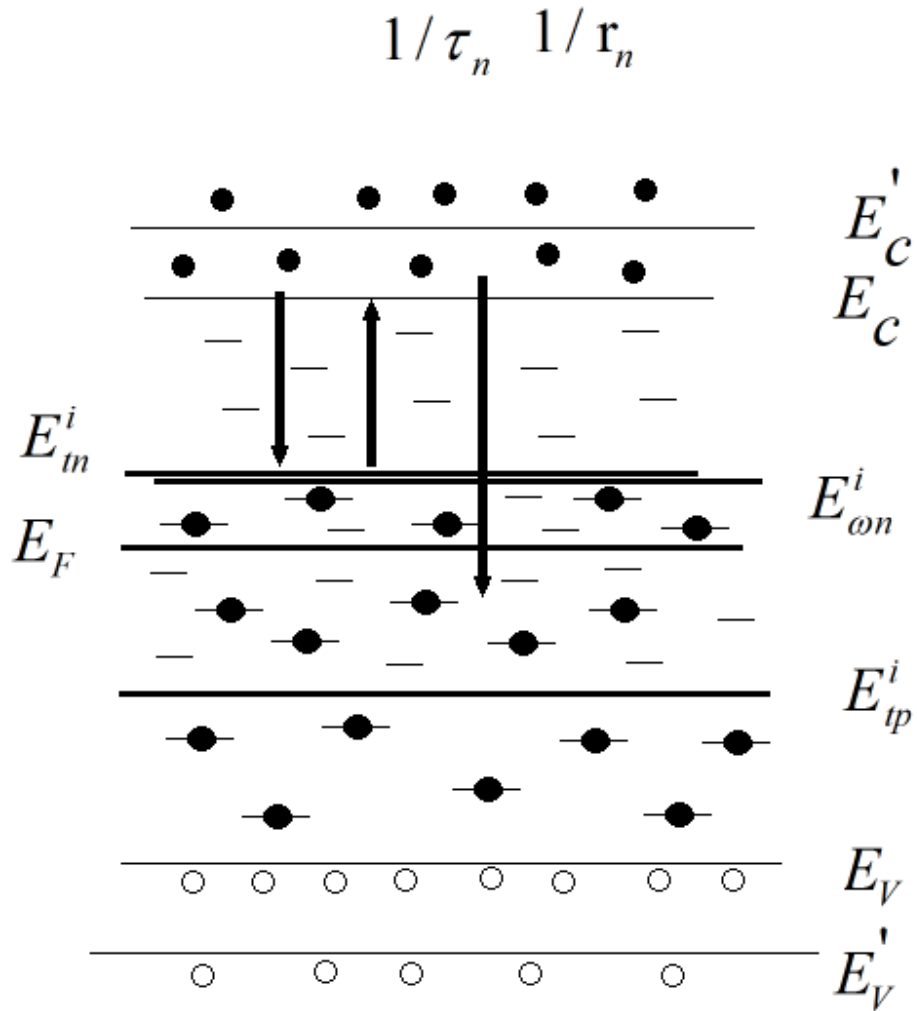
što za ovaj eksperiment daje vrijednost  $E_{Fn} - E_{Fp}$  od oko 0,3 eV s obzirom na ocijenjenu optičku snagu istosmjernog izvora svjetlosti LED kod struje od 20 mA.

S obzirom na frekveciju pobudnog svjetlosnog signala i karakterističnu frekvenciju energijskog stanja unutar zabranjenog pojasa dolazi do hvatnja ili rekombinacija slobodnih nositelja naboja. Ukoliko je frekvencija izmjeničnog signala svjetlosti puno veća od karakteristične frekvencije hvatanja govorimo o visokofrekvencijskom načinu rada, a ukoliko je manja o niskofrekvencijskom načinu rada [7]. Kod niskih frekvencija NF ukoliko su energijska stanja

hvatanja unutar kvazi-Fermijevih razina dolazi do rekombinacija slobodnih nositelja, a ukoliko su plića od kvazi-Fermijevih razina nastupa hvatanje i termičko opuštanje fotogeneriranih slobodnih nositelja, što prikazuje slika 4.2.



a)



b)

Slika 4.2 Kod niskih frekvencija NF a) hvatanje i termičko opuštanje fotogeneriranih slobodnih nositelja naboja kad su energijska stanja plicā od kvazi-Fermijevih razina; b) rekombinacije slobodnih nositelja naboja kad su energijska stanja hvatanja unutar kvazi-Fermijevih razina unutar energijskog rascjepa.

## 5. Mjerenja

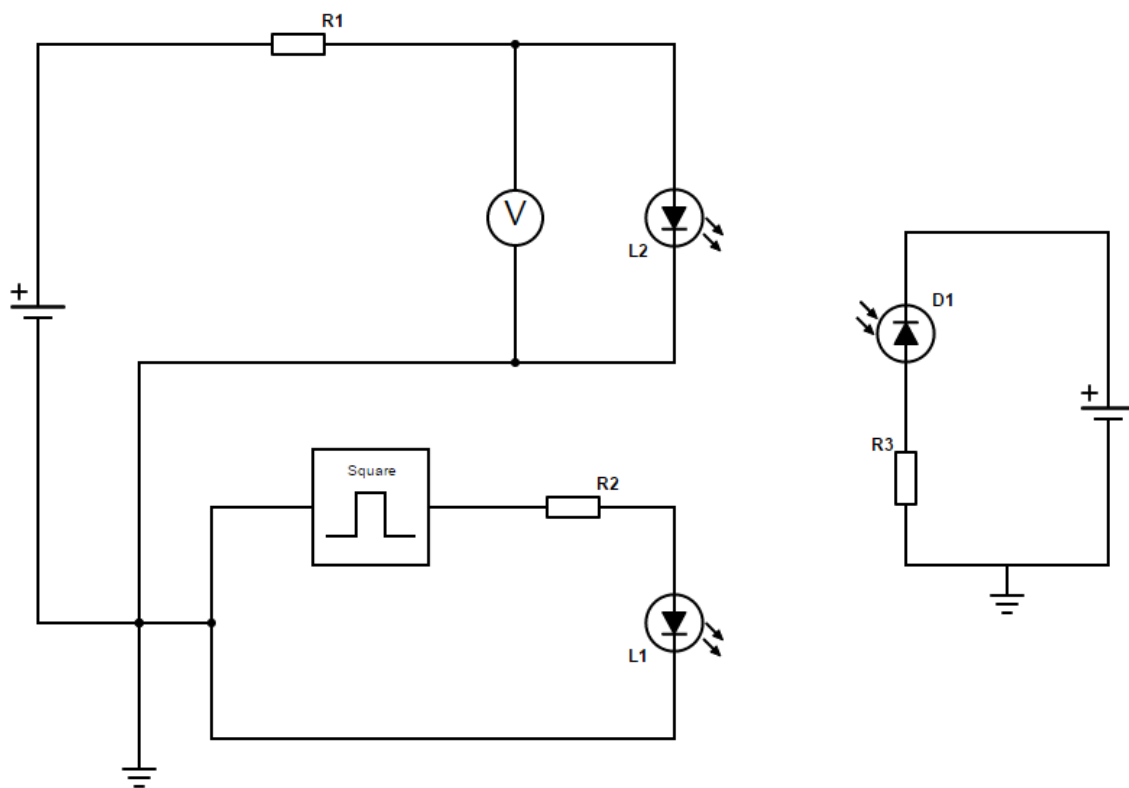
Podatci obrađivani u ovom radu dobiveni su mjerenjem odziva fotodiode na svjetlosni impuls superpniran na svjetlost konstantnog izvora svjetlosti iste valne duljine od 470 nm pri različitim reverznim naponima na fotiodi.

Korišteni instrumenti su:

- Agilent 34450A (digitalni multimeter, 5½ znamenki)
- Agilent E3630A (naponski izvor, 6V, 2.5A ±20V)
- Agilent E3631A (naponski izvor, 6V, 5A ±25V)
- Protek 9302 arbitrary and function generator (dvokanalni funkcijski generator)
- Gwinstek GDS-2204 (digitalni osciloskop, 4 kanala, 200MHz)

Cilj mjerenja je bio digitalnim osciloskopom snimiti odzive fotodiode pri određenim naponima i analizirati odzivna vremena tj. utjecaj defekata na odziv fotodiode. Da bi se postigao taj rezultat koristila su se dva zasebna strujna kruga. Primarni krug se sastoji iz konstantnog i izmjeničnog izvora svjetlosti, dvije LED plave boje (470 nm) napajane s konstantnim naponskim izvorom, odnosno funkcijskim generatorom kao izvorom pravokutnog signala konstantne amplitude i frekvencije od 333 Hz. Radi zaštite, postavlja se u seriju s LED otpornike ( $R_1 = R_2 = 46,5 \Omega$ ). Sekundarni strujni krug se sastojao od zasebnog nezavisnog naponskog izvora i fotodiode koja je bila u seriji sa otpornikom  $R_3$  od 220 k $\Omega$ . Digitalnim multimetrom smo na sekundarnom strujnom krugu mjerili istosmjerni napon na serijskom otporniku ( $R_3$ ) i fotiodi kako bi postavili željenu radnu točku na fotiodi.

U konačnici shema spajanja je izgledala kako je prikazano na slici 5.1



Slika 5.1 Shema mjernoga sustava

Mjerni sklop se sastoji iz izvora svjetlosti i fotodiode, kao i njihovih napajanja. Fotodiode se nalazila u svome zasebnom kućištu koji ju je štitiio od neželjene vanjske svjetlosti. Dvije led diode su bile integrirane u jedan element koji je bio prionut na otvor kućišta iz kojeg se osvjetljavala fotodiode.

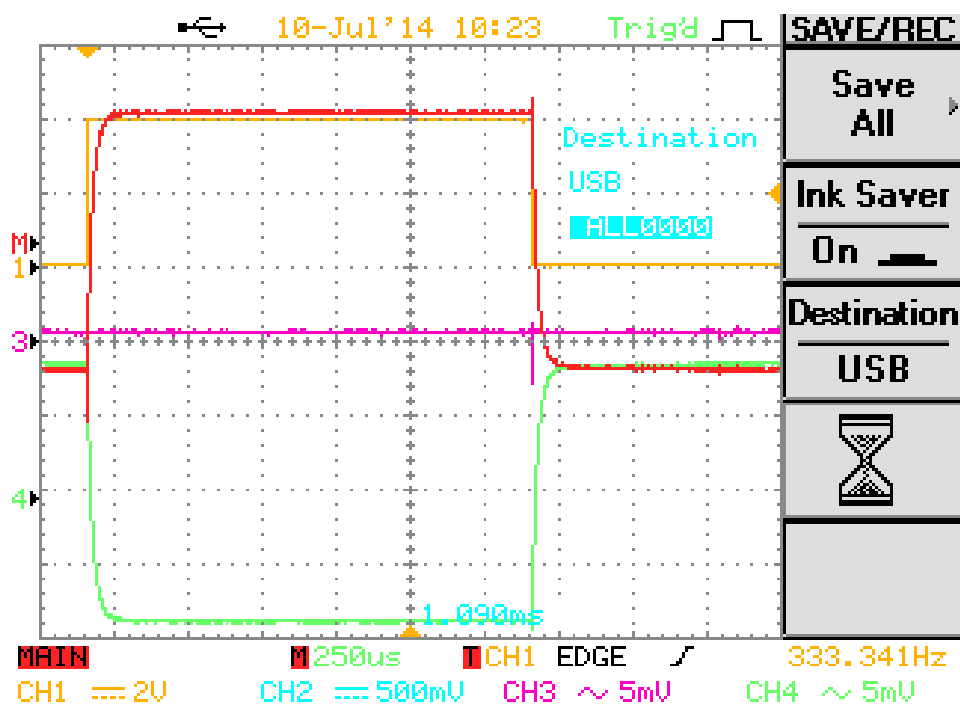
Mjerenje odziva fotodiode na svjetlosni impuls pri konstantnom osvjetljenju ponovljena su za narinute reverzne napone 0, 0.5, 1, 1.5 i 2 V na fotiodiidi. Jedna od LED dioda bila je spojena na konstantni istosmjerni napon, koji joj je omogućavao maksimalan intenzitet svjetlosti pri struji kroz nju od 20 mA, a druga je bila spojena paralelno na funkcijski generator neprekidnog pravokutnog signala od 333 HZ i amplitude 4,46 V.

Odzive na fotiodiidi i serijskom otporniku smo promatrali pomoću digitalnog osciloskopa što je prikazano na slici 6.1. Svaki odziv fotiodiode, pri pojedinom narinutom reverznom naponu od pet zadanih napona, je bio pohranjen po deset puta radi potreba izračunavanja devijacija i srednje vrijednosti mjerenja.



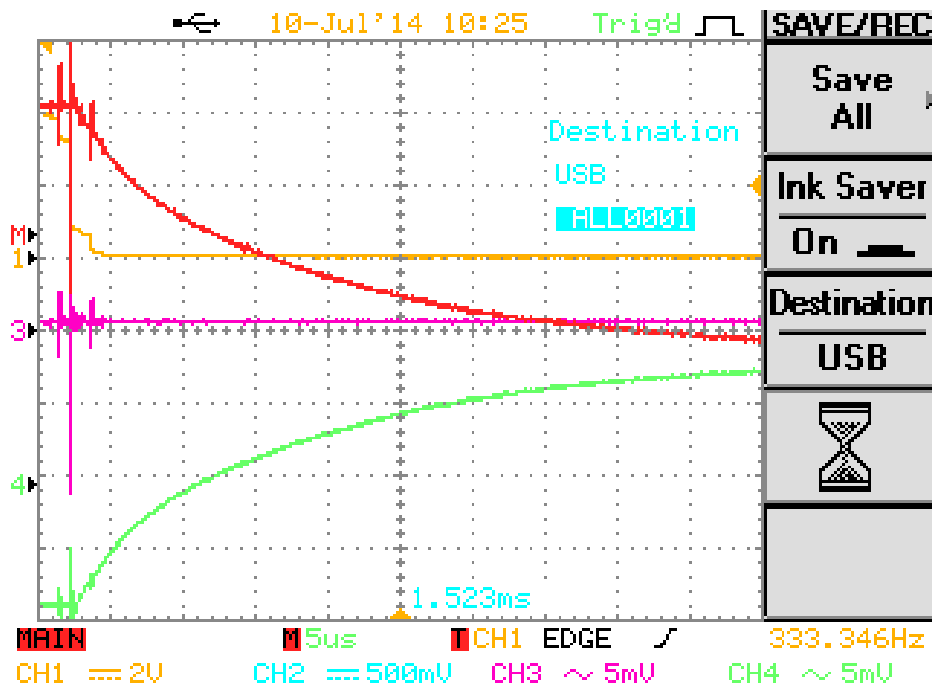
## 6. Pohrana podataka

GwInstek GDS-2204 osciloskop ima mogućnost pohranjivanja trenutno prikazane funkcije na svojem zaslonu u obliku tekstualnog podatka i u obliku digitalne slike. Osciloskop je automatski podešen na takav način da prvotno prikazuje cijeli signal odnosno jedan uzorak signala kako je prikazano na slici 6.1.



Slike 6.1 Prikaz cijelog signala na osciloskopu

Za potrebne daljnje obrade u ovom radu ovakav način pohranjivanja signala nije bio povoljan iz razloga što je rezolucija premalena da bi se moglo učinkovito obraditi dio padajućeg odziva fotodiode. Dodatnim podešavanjem rezolucije i ugađanjem parametara krivulja na zaslonu dobiven je zadovoljavajući izgled odziva prikazan na slici 6.2.

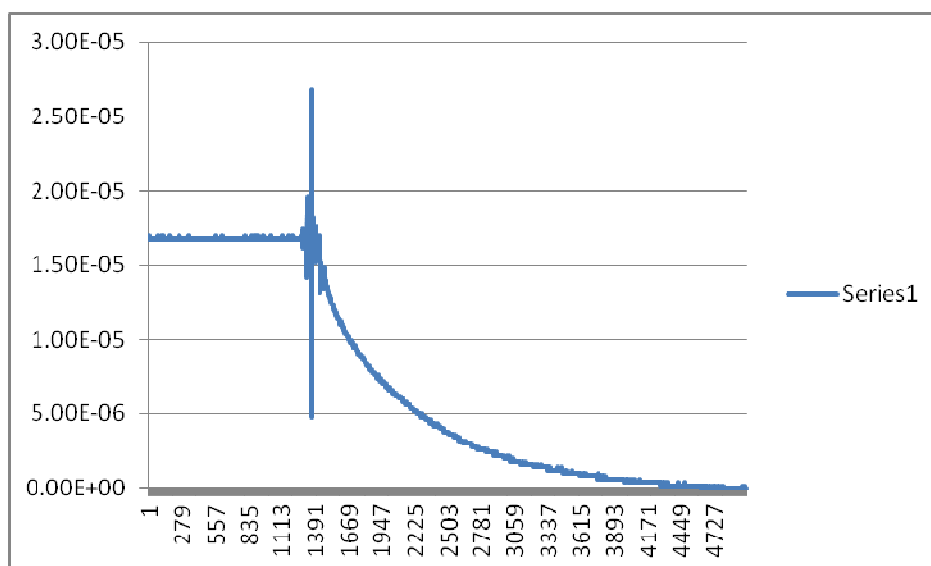


Slika 6.2 Prikaz signala na osciloskopu fokusiranog na padajući odziv signala

Kada je fokus i rezolucija krivulja zadovoljavajuća one se spremaju na vanjski prijenosni medij. Uz samu sliku signala osciloskop ima i opciju spremiti relevantne brožčane podatke u obliku teksta poput vremena, horizontalne i vertikalne skale, dužine memorije itd.

S obzirom da su mjerene vrijednosti iznimno male nastajali su problemi pri mjerenju s osciloskopom u kontekstu graničnih vrijednosti koje osciloskop može izmjeriti. Iz tog razloga mjerene krivulje nisu bile glatke već prikazane stepenasto. Početne oscilacije odziva su neizbježne i pripisujemo ih samoj fotiodiodi, odnosno šumu izvora, kao i osjetljivosti osciloskopa. Svaki početak pada ili rasta odziva ima prisutnu smetnju mjerenja. Te smetnje su su svojom veličinom utjecale na točnost obrade odziva, pa je bilo potrebno ukloniti („odrezati“) neobradive dijelove odziva fotiodiode. U tom dijelu odziva sakriven je fazni pomak, koji nije uzeti u obzir prilikom analize rezultata.

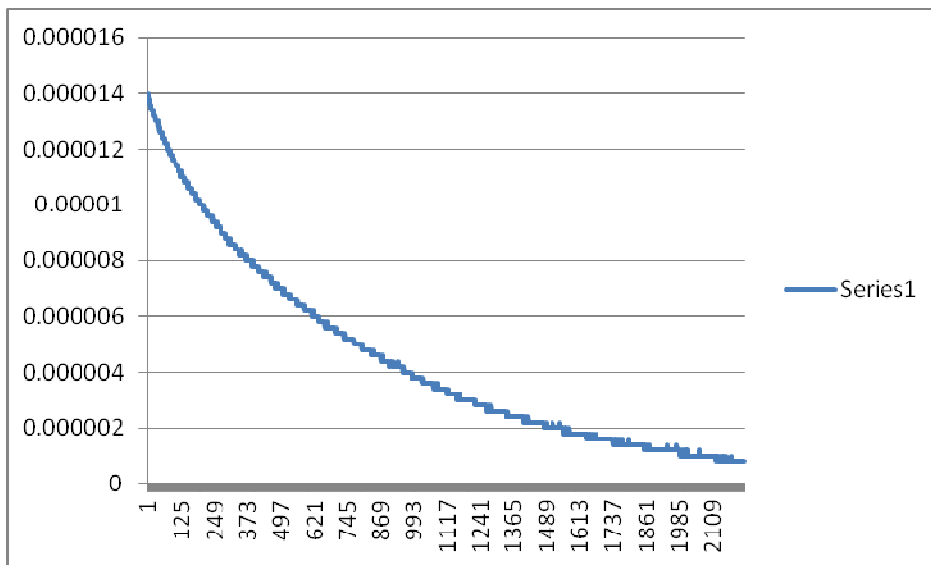
Na slici 6.3 je prikazan primjer mjenog odziva fotodiode kakav je originalno dobiven sa osciloskopom te naknadno obrađen u excelu



Slika 6.3 Potpuna krivulja odziva a-Si:H p-i-n fotodiode dobivena u Excel-u

Ovako dobivena krivulja odziva a-Si:H p-i-n fotodiode je u trenutnoj inačici programa neobrađiva odnosno i ako ju program uspješno obradi dobiveni rezultat neće imati koherentnu vrijednost zbog stohastičnosti točaka kod dijelova gdje su smetnje pa tako blisko zbijene a drastično različite točke daju krivu sliku rezultata. Također dodatni problem kod ovako dobivene krivulje je redundantni ravni dio koji također utječe na rezultat obrade stoga se početak i kraj krivulje (odnosno dugi nizovi istih točaka) također moraju skraćivati.

Rezultirajuća krivulja nakon skraćivanja redundantnih dijelova i eliminiranih smetnji je prikazana na slici 6.4.



Slika 6.4 Obradena krivulja odziva a-Si:H p-i-n fotodiode u Excel-u

Ovako dobivena krivulja je spremna za daljnju obradu pomoću programa expo\_fit međutim da bi podaci bili čitljivi programu prvo ih je potrebno prilagoditi potrebama računalnog programa. Program čita mjerene podatke iz .txt datoteke pa je potrebno izlistati nizove eksperimentalno dobivenih točaka u zadani oblik da bi se mogle efikasno očitati tokom obrade.

Poredak podataka je u obliku:

a      b      c

$y_1$

$y_2$

...

$y_n$

gdje je:

a – ukupan broj eksperimentalno dobivenih točaka u datoteci

b – početna vrijednost t za ekvidistantne točke (kod  $c > 0$ )

c – vremenski period između svake točke

y – niz pojedinih eksperimentalnih dobivenih točaka

Sama obrada je relativno jednostavna. Program se pokreće kroz Linux terminal te nakon toga u njemu je potrebno odrediti broj eksponencijalnih funkcija koje će program tražiti iz dane datoteke i u konačnici potrebno je pokrenuti samu obradu. Nakon što program obradi zadanu datoteku dobiju se tri zasebne datoteke kao rezultat.

Prva datoteka generičnog naziva *\_xxxpar\_yy.txt* sadrži izračunate vrijednosti pozadinske vrijednosti, preeksponencijalnog broja, polu raspada, relaksacijskog vremena, broj eksponenata i slično.

Druga datoteka generičnog naziva *grh\_in\_xx.txt* sadrži setove  $x,y$  točaka teorijskih i eksperimentalnih krivulja koje su dobivene iz unesenih točaka. Ovaj podatak omogućuje daljnju obradu podataka u drugim programima.

Treća datoteka generičnog naziva *grh\_out\_xx.txt\_xxx.pdf* sadrži vizualnu reprezentaciju rezultata.

Sama slika rezultata se dobiva u crno-bijelim bojama što je u ovom slučaju nepregledno zbog broja krivulja stoga su se dobiveni podatci naknadno izrađivali pomoću programa Octave radi čitljivosti.

## 7. Rezultati

Narinuti napon na fotodiodu reguliran je naponom baterije od 0V do 2V u reverznom smjeru s razmakom od 0.5V te je za svaki narinuti reverzni napon na fotodiodu, deset puta za redom izmjeren odziv fotodiode na impuls svjetlosti kod konstantnog osvjetljenja valne duljine 470nm. Za svaki napon dobivene su vrijednosti vremena poluraspada i vrijeme potpune relaksacije (pojedino za prvi i drugi eksponent). Njihova srednja vrijednost i odstupanje naknadno su izračunate.

Rezultati za svaki naponski korak prikazani su u sljedećim tablicama te je za svaku tablicu predočena jedna vizualna reprezentacija rezultata. Jedinica za sve vrijednosti poluraspada i relaksacije je sekunda.

Na svakoj slici boje označuju:

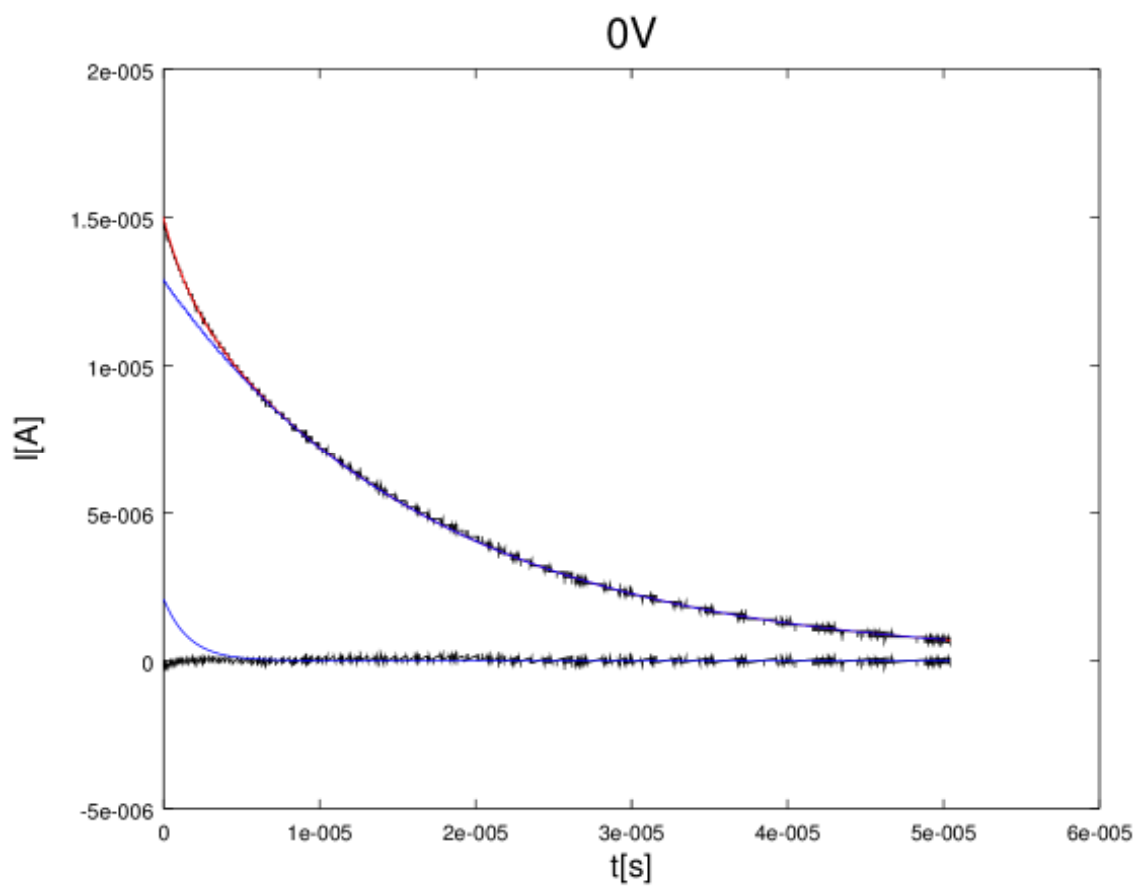
crvena – teorijska krivulja (suma svih eksponencijalnih krivulja)

crna – eksperimentalna krivulja i njena razlika od teorijske

plava – pojedine komponente u sumi eksponencijalnih funkcija

Tablica 7.1 Prikaz rezultata u sekundama za naponski korak od 0V

0V	poluraspad(1)	relaksacija(1)	poluraspad(2)	relaksacija(2)
Krivulja 1	1.1250490E-06	1.6231020E-06	1.1972940E-05	1.7273310E-05
Krivulja 2	1.1359250E-06	1.6387930E-06	1.1953630E-05	1.7245440E-05
Krivulja 3	1.1080880E-06	1.5986320E-06	1.1947860E-05	1.7237120E-05
Krivulja 4	1.0991680E-06	1.5857640E-06	1.1958860E-05	1.7252990E-05
Krivulja 5	1.1055890E-06	1.5950270E-06	1.1953500E-05	1.7245250E-05
Krivulja 6	1.1698940E-06	1.6878000E-06	1.2024300E-05	1.7347400E-05
Krivulja 7	1.1195920E-06	1.6152300E-06	1.1966900E-05	1.7264590E-05
Krivulja 8	1.1144400E-06	1.6077970E-06	1.1953840E-05	1.7245740E-05
Krivulja 9	1.1458440E-06	1.6531040E-06	1.2009360E-05	1.7325840E-05
Krivulja 10	1.2784640E-06	1.8444340E-06	1.1523630E-05	1.6625080E-05
<b>Srednja Vrijednost</b>	1.1402053E-06	1.6449683E-06	1.1926482E-05	1.7206276E-05
<b>Odstupanje</b>	2.2472025E-08	3.2420463E-08	2.7197638E-08	3.9238493E-08

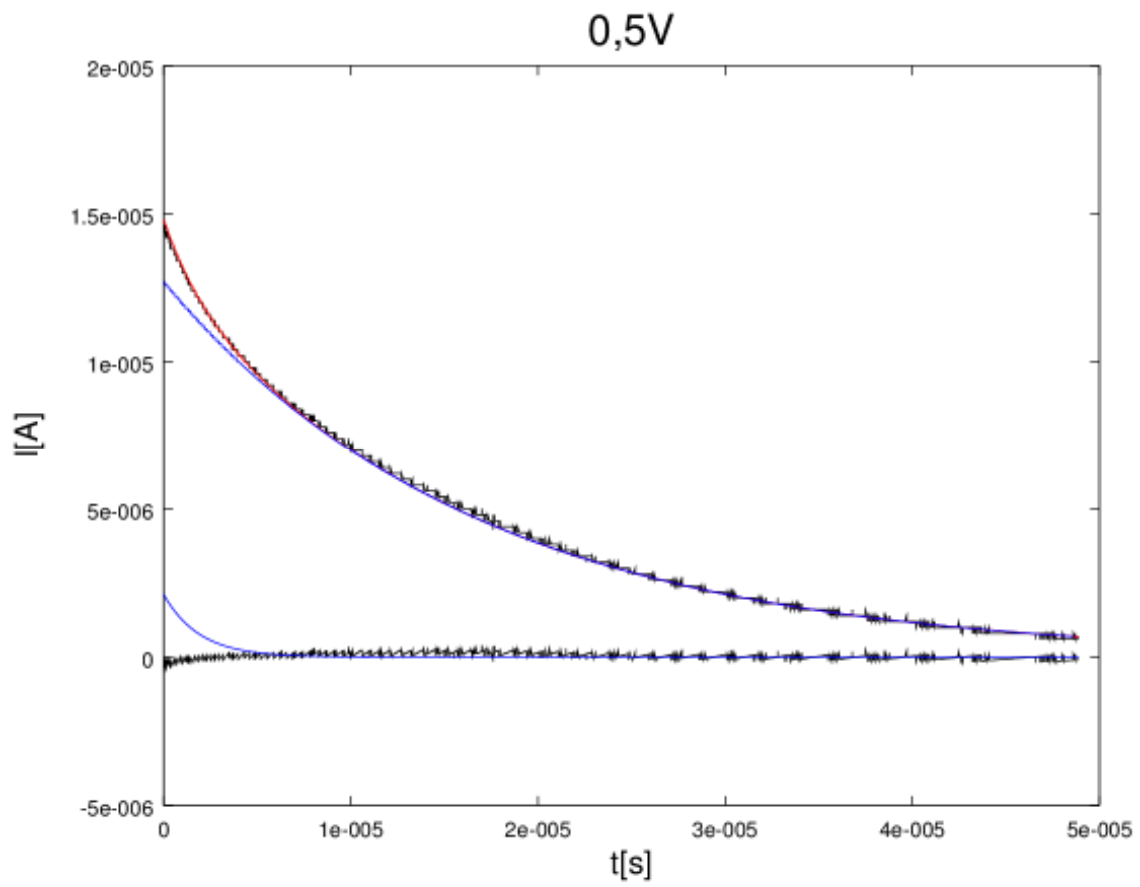


Slika 7.1 Krivulja 1 predočena kao primjer vizualne reprezentacije rezultata za 0V

Tablica 7.2 Prikaz rezultata u sekundama za naponski korak od 0,5V

<b>0,5V</b>	<b>poluraspad(1)</b>	<b>relaksacija(1)</b>	<b>poluraspad(2)</b>	<b>relaksacija(2)</b>
Krivulja 1	1.3174210E-06	1.9006360E-06	1.1617500E-05	1.6760510E-05
Krivulja 2	1.4618560E-06	2.1090120E-06	1.1626220E-05	1.6773090E-05
Krivulja 3	1.7525620E-06	2.5284130E-06	1.1632690E-05	1.6782420E-05
Krivulja 4	1.3705420E-06	1.9772740E-06	1.1646420E-05	1.6802230E-05
Krivulja 5	1.5791830E-06	2.2782790E-06	1.1605620E-05	1.6743380E-05
Krivulja 6	1.4844590E-06	2.1416220E-06	1.1599900E-05	1.6735110E-05
Krivulja 7	1.4863130E-06	2.1442970E-06	1.1593140E-05	1.6725370E-05
Krivulja 8	1.5005970E-06	2.1649040E-06	1.1590130E-05	1.6721020E-05
Krivulja 9	1.3509780E-06	1.9490490E-06	1.1576550E-05	1.6701440E-05
Krivulja 10	1.2000470E-06	1.7313020E-06	1.1604810E-05	1.6742210E-05
<b>Srednja Vrijednost</b>	1.4503958E-06	2.0924788E-06	1.1609298E-05	1.6748678E-05
<b>Odstupanje</b>	1.5261052E-07	2.2017061E-07	2.1348360E-08	3.0796703E-08

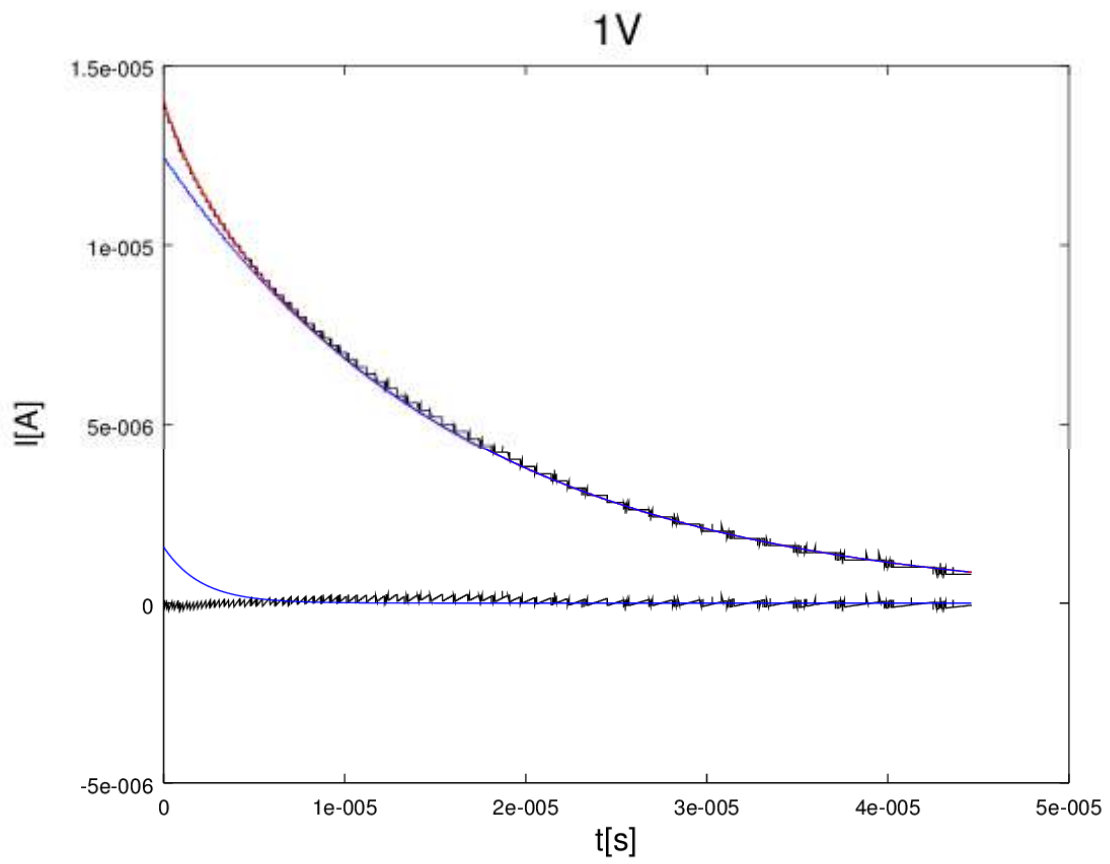




Slika 7.2 Krivulja 1 predočena kao primjer vizualne reprezentacije rezultata za 0,5V

Tablica 7.3 Prikaz rezultata u sekundama za naponski korak od 1V

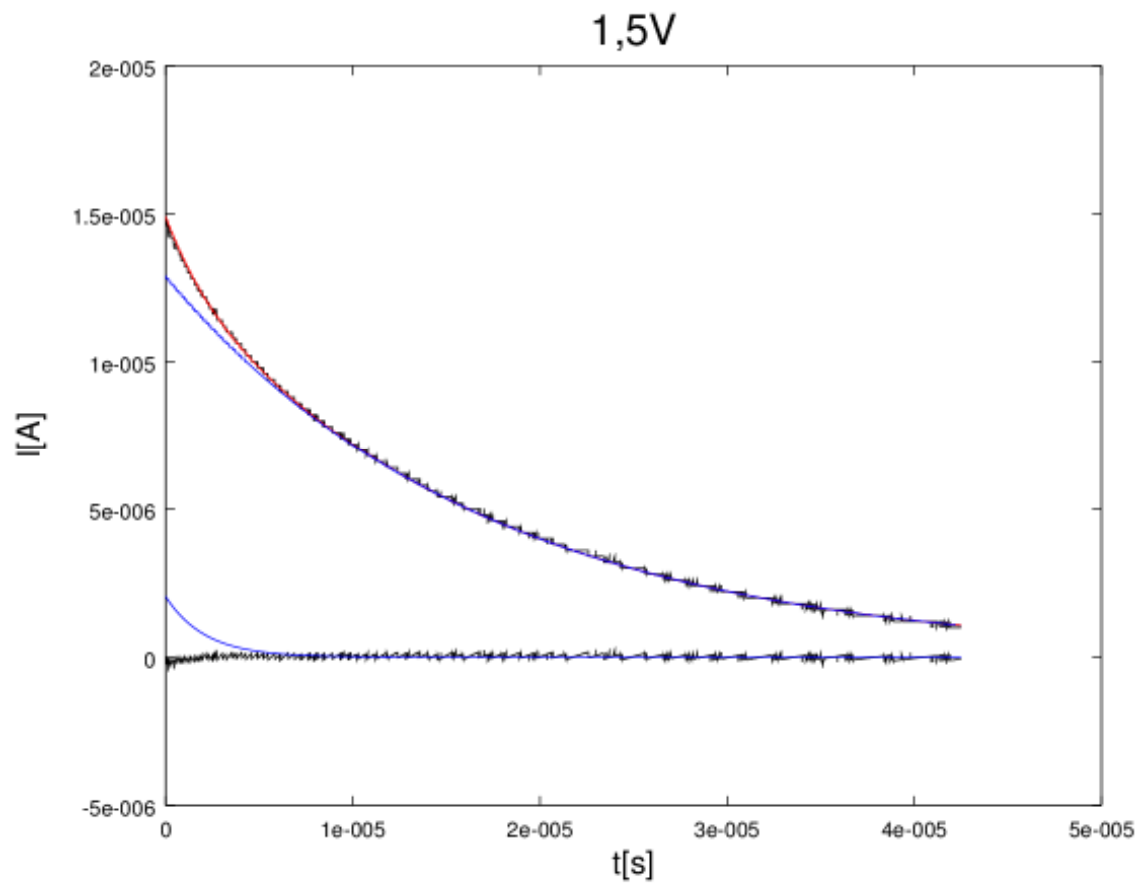
<b>1V</b>	<b>poluraspad(1)</b>	<b>relaksacija(1)</b>	<b>poluraspad(2)</b>	<b>relaksacija(2)</b>
Krivulja 1	2.1959620E-06	3.1681040E-06	1.1619810E-05	1.6763840E-05
Krivulja 2	1.6222720E-06	2.3404440E-06	1.1608190E-05	1.6747080E-05
Krivulja 3	1.5684060E-06	2.2627310E-06	1.1584820E-05	1.6713370E-05
Krivulja 4	1.4260540E-06	2.0573610E-06	1.1573110E-05	1.6696460E-05
Krivulja 5	1.7262440E-06	2.4904430E-06	1.1580690E-05	1.6707400E-05
Krivulja 6	1.5498300E-06	2.2359320E-06	1.1583910E-05	1.6712040E-05
Krivulja 7	1.6426540E-06	2.3698490E-06	1.1581500E-05	1.6708580E-05
Krivulja 8	1.9031770E-06	2.7457040E-06	1.1582010E-05	1.6709310E-05
Krivulja 9	1.4290550E-06	2.0616900E-06	1.1557890E-05	1.6674520E-05
Krivulja 10	1.8799930E-06	2.7122560E-06	1.1516940E-05	1.6615440E-05
<b>Srednja Vrijednost</b>	1.6943647E-06	2.4444514E-06	1.1578887E-05	1.6704804E-05
<b>Odstupanje</b>	2.4479511E-07	3.5316490E-07	1.8239679E-08	2.6312936E-08



Slika 7.3 Krivulja 4 predočena kao primjer vizualne reprezentacije rezultata za 1V

Tablica 7.4 Prikaz rezultata u sekundama za naponski korak od 1,5V

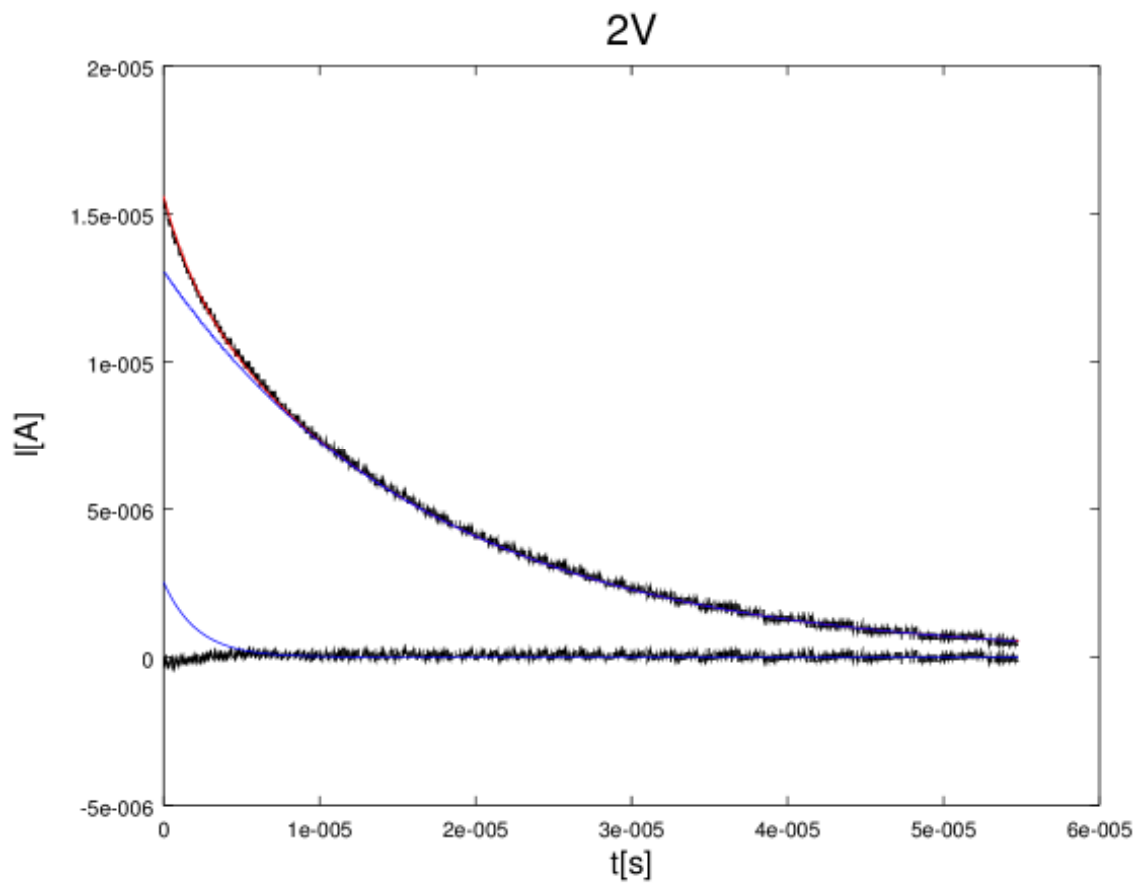
<b>1,5V</b>	<b>poluraspad(1)</b>	<b>relaksacija(1)</b>	<b>poluraspad(2)</b>	<b>relaksacija(2)</b>
Krivulja 1	1.4590590E-06	2.1049770E-06	1.1832640E-05	1.7070890E-05
Krivulja 2	1.4432330E-06	2.0821450E-06	1.1826500E-05	1.7062040E-05
Krivulja 3	1.4724040E-06	2.1242300E-06	1.1831190E-05	1.7068790E-05
Krivulja 4	1.4304920E-06	2.0637640E-06	1.1828370E-05	1.7064730E-05
Krivulja 5	1.4221720E-06	2.0517610E-06	1.1827690E-05	1.7063750E-05
Krivulja 6	1.4522230E-06	2.0951140E-06	1.1832690E-05	1.7070970E-05
Krivulja 7	1.4733220E-06	2.1255540E-06	1.1826750E-05	1.7062390E-05
Krivulja 8	1.4674760E-06	2.1171210E-06	1.1827540E-05	1.7063530E-05
Krivulja 9	1.4260400E-06	2.0573410E-06	1.1799270E-05	1.7022750E-05
Krivulja 10	1.3939930E-06	2.0111060E-06	1.1790670E-05	1.7010340E-05
<b>Srednja Vrijednost</b>	1.4440414E-06	2.0833113E-06	1.1822331E-05	1.7056018E-05
<b>Odstupanje</b>	2.5808786E-08	3.7234286E-08	1.4740440E-08	2.1265731E-08



Slika 7.4 Krivulja 1 predočena kao primjer vizualne reprezentacije rezultata za 1,5V

Tablica 7.5 Prikaz rezultata u sekundama za naponski korak od 2V

<b>2V</b>	<b>poluraspad(1)</b>	<b>relaksacija(1)</b>	<b>poluraspad(2)</b>	<b>relaksacija(2)</b>
Krivulja 1	1.4889930E-06	2.1481620E-06	1.1913910E-05	1.7188140E-05
Krivulja 2	1.5057400E-06	2.1723240E-06	1.1896180E-05	1.7162550E-05
Krivulja 3	1.4595130E-06	2.1056320E-06	1.1857720E-05	1.7107080E-05
Krivulja 4	1.4570800E-06	2.1021230E-06	1.1870370E-05	1.7125330E-05
Krivulja 5	1.4678020E-06	2.1175900E-06	1.1871860E-05	1.7127480E-05
Krivulja 6	1.4869090E-06	2.1451560E-06	1.1889180E-05	1.7152450E-05
Krivulja 7	1.5741020E-06	2.2709490E-06	1.1980080E-05	1.7283600E-05
Krivulja 8	1.6586050E-06	2.3928610E-06	1.2017180E-05	1.7337120E-05
Krivulja 9	1.6953400E-06	2.4458580E-06	1.2055240E-05	1.7392030E-05
Krivulja 10	1.5969160E-06	2.3038630E-06	1.2058640E-05	1.7396940E-05
<b>Srednja Vrijednost</b>	1.5391000E-06	2.2204518E-06	1.1941036E-05	1.7227272E-05
<b>Odstupanje</b>	8.9469541E-08	1.2907711E-07	7.1576563E-08	1.0326020E-07



Slika 7.5 Krivulja 1 predočena kao primjer vizualne reprezentacije rezultata za 2V

Po procijeni da je energija zračenja LED  $E_m - E_{ip} = 0,34 eV$  procijenjena vrijednost položaja kvazi-Fermijeve energije za elektrone  $E_c - E_m$  zbog konstantnog osvjetljenje s plavom bojom iznosi od  $0,1 eV$  do  $0,34 eV$  a izračunata vrijednost za  $E_{on}$  se mijenja od  $0.56 eV$  do  $0.72 eV$  .

Dobivene vrijednosti energija ukazuju da je odabrana frekvencija pulsiranog svijetla u području niskih frekvencija.



## 8. Zaključak

Analiza eksperimentalnih podataka provedena je uz pomoć metode najmanjih kvadrata. Nelinearni optimizacijski problem je pomoću uzastopne primjene numeričke integracije preveden u linearni. To je bitno pojednostavilo izračun parametara relaksacijskih procesa jer se linearni problemi mogu direktno rješavati, dok se nelinearni problemi moraju rješavati iterativno. Dodatna komplikacija kod nelinearnih problema je da konvergencija u globalni minimum u principu nije zagarantirana. Metoda obrade upotrebljena u ovom radu predstavlja novi i konzistentni način izračuna relaksacijskih parametara.

Sve krivulje odziva a-Si:H p-i-n fotodiode po isključenju impulsa svjetlosti kod konstantnog osvjetljenja s plavom bojom dobivene mjerenjem s osciloskopom u ovom radu su multiekspencijalne. Dobiveni rezultat mjerenjem ukazuje na to da prilikom gašenja odnosno prekidanja naponskog impulsa na LED, tj. gašenjem svjetlosti odziv a-Si:H p-i-n fotodiode ima dvije vremenske komponente  $\tau$ .

Na temelju izračuna energija unutar energijskog rascjepa kod konstantnog osvjetljenja i izračuna kvazi-Fermijeve razine za elektrone procijenjeni režim rada fotodiode pri frekvenciji pulsirajućeg signala svjetlosti od 333.33Hz je u području niskih frekvencija. Ovakav rezultat ukazuje na to da se slobodni nositelji naboja kod modulirane fotostruje direktno rekombiniraju u dubokim zamkama.

## 9. Literatura

- [1] Press, W.H. et all „Numerical Recipes in C“, 1994 Cambridge University Press, Cambridge
- [2] Foss, S.D., „Biometrics“, 26 (1970) 815-821
- [3] Matheson, „I.B.C., Anal. Instr.“, 16 (1978) 345-373
- [4] Jeričević, Z. „Method for Fitting a Sum of Exponentials to Experimental Data by Linearization Using Numerical Integration Approximation, and Its Application to Well Log Data“, USP #7,088,097, 2006
- [5] Y. Bard, „Nonlinear Parameter Estimation“, Academic Press, New York, 1974
- [6] D.S. Shen, S. Wagner, „Transient photocurrent in hydrogenated amorphous silicon and implications for photodetector devices“, American Institute of Physics, 1996, [S0021-8979(96)07102-0]
- [7] Jean-Paul Kleider, Cristophe Longeaud i Marie Estelle Gueunier, „The modulated photocurrent technique: a powerful tool to investigate band gap states in silicon based thin films“, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004