

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**SENZOR SVJETLOSTI - GENERATOR ULAZNOG SIGNALA
U MIKROKONTROLER**

Rijeka, srpanj 2016.

Boris Josipović

0069051700

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**SENZOR SVJETLOSTI - GENERATOR ULAZNOG SIGNALA
U MIKROKONTROLER**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Vera Gradišnik dipl. ing. el.

Rijeka, srpanj 2016.

Boris Josipović

0069051700

TEHNIČKI FAKULET

Povjerenstvo za završne ispite
preddiplomskog stručnog studija elektrotehnike
Br.: 602-04/16-14/6
Rijeka, 14.03.2016.

Z A D A T A K

za završni rad

Pristupnik: Boris Josipović

Matični broj: 0069051700
Lokalni matični broj: 11800003

Naziv zadatka: **SENZOR SVJETLOSTI - GENERATOR ULAZNOG SIGNALA
U MIKROKONTROLER**


Title (*English*): **LIGHT SENSOR - MICROCONTROLLER INPUT SIGNAL
GENERATOR**


Polje znanstvenog područja: 2.03. Elektrotehnika
Grana znanstvenog područja: 2.03.03 elektronika

Izraditi prototip senzora za detekciju osnovnih boja svjetlosti iz vidnog dijela spektra kao generatora ulaznog signala u mikrokontroler. Potrebno je ispitati odzive Si fotodiode na impulse svjetlosti LED diode (svjetleće diode) osnovnih monokromatskih boja: crvene, zelene i plave, kao i na impulse kromatskih boja nastalih miješanjem osnovnih boja. Primijeniti model na sklopu za upravljanje mjerenja struja i napona kod Van der Pauw metode.

Mentor:

Predsjednica Povjerenstva:


Izv.prof. dr. sc. Vera Gradišnik, dipl.ing.


Izv. prof. dr. sc. Vera Gradišnik, dipl.ing.

Student:


Boris Josipović

Završni radovi moraju biti u skladu s „Uputama za pisanje završnog / diplomskog rada“.

IZJAVA

Ja, Boris Josipović, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad pod naslovom „Senzor svjetlosti – generator ulaznog signala u mikrokontroler“ prema zadatku br. 602-04/16-14/6 od 14. ožujka 2016. u skladu s člankom 9. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku stručnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci. Završni rad sam izradio pod mentorstvom izv.prof.dr.sc. Vere Gradišnik, dipl. Ing.

Boris Josipović

U Rijeci, 04. srpanj 2016.

ZAHVALA

Ponajprije bih se zahvalio svojoj profesorici i mentorici Veri Gradišnik na ukazanom strpljenju i pomoći prilikom izrade, na srdačnosti i ljubaznosti. Hvala Vam što ste me naučili nečem novom, proširili moje znanje i što ste mi ukazali povjerenje prilikom mentorstva.

Posebna zahvala ide i mojim roditeljima koji su sa strpljenjem čekali ovaj dan, bili mi podrška i vjerovali u mene od prvog dana fakultetskog obrazovanja.

Hvala mojoj djevojci Josipi koja je bila uz mene, bodrila me, pružila puno razumijevanja i ljubavi.

Veliko Hvala svima!

SADRŽAJ:

1. Uvod	7
2. Svojstva poluvodiča	8
3. PN spoj	9
3.1. PN spoj u termičkoj ravnoteži	9
3.2. Propusno polariziran PN spoj	11
3.3. Nепropusno polariziran PN spoj	12
4. Fotoničke komponente	13
4.1. LED	13
4.2. Fotodioda	14
4.2.1. Kvantna iskoristivost	14
4.2.2. Odzivnost	14
4.2.3. Detektivnost	15
4.2.4. Brzina odziva	15
5. Mjerenja	16
5.1. Strujno-naponske karakteristike	16
5.1.1 Strujno-naponska karakteristika LED diode	16
5.1.2. Strujno-naponska karakteristika fotodiode	18
5.2. Pulsiranje svjetlosti	23
5.3. Van der Pauw metoda	26
6. Simulacija u računalnom programu	30
6.1. Princip rada komponenata	30
6.1.1. 7448 upravljački sklop za 7 segment display	30
6.1.2. 74138 3/8 dekodер	31
6.1.3. Komparator	33
6.2. Simulacija u Electronics Workbench-u	34
6.3. Simulacija u NI Multisim-u	36
7. Zaključak	40
8. Literatura	41
9. Sažetak i ključne riječi	42

1. UVOD

Suvremeni elementi digitalne logike, kao i telekomunikacija i računarstva sve više postaju optoelektronički elementi. Za dvosmjerni prijenos putem optičkih vlakana i obradu sve većeg broja i veličine podataka koristi se svjetlosni signali i multipleksiranje s raspodjelom po valnim duljinama. Nova tehnologija uključuje emisiju svjetlosti, prijenos i detekciju s elektro-optičkim elementima. Izvori svjetlosti mogu biti svjetleće diode (*engl.* Light emitting diode - LED), koje emitiraju svjetlost valne duljine iz vidnog dijela spektra od 400 do 780 nm. Postoje i RGB LED koje u istom kućištu imaju smještene LED osnovnih monokromatskih boja: crvenu (*engl.* **Red**), zelenu (*engl.* **Green**) i plavu (*engl.* **Blue**). Njihovom kombinacijom dobije se cijeli spektar boja emitirane svjetlosti. Osnovna kvantna jedinica energije zračenja svjetlosti je foton. Detektori svjetlosti su fotodiode pn ili pin strukture iz silicija ili drugih poluvodičkih elemenata. U novije vrijeme i polimera. Fotodioda je svjetlostno aktiviran multipleksor/demultipleksor s optičkim pojačanjem u vidnom dijelu spektra. Ova tehnologija je znatno učinkovitija i jeftinija od postojeće.

U ovom završnom radu nakon karakterizacije izvora svjetlosti LED i detektora svjetlosti fotodiode, PD, prikazana je mogućnost multipleksiranja/demultipleksiranja svjetlosnog signala dobivenog s kombinacijom triju osnovnih monokromatskih boja istog intenziteta. Prototip senzora za detekciju osnovnih boja i njihovih kombinacija, kao i generatora logičke riječi ispitan je eksperimentalno i modeliran. Potom je model primjenjen na primjeru Van der Pauw-ove metode.

Ovaj rad se sastoji od dva dijela. Prvi dio je uvod u kojem je dana fizikalna slika poluvodičkih elemenata upotrebljenih za ostvarenje zadatka. Drugi dio se sastoji od opisa sklopa za svjetlosno generiranje ulaznog signala (logičkog podatka) u mikrokontroler, mjernog sklopa i prikaza dobivenih rezultata mjerenjem.

U drugom poglavlju kratko su opisana svojstva poluvodiča. Treće poglavlje opisuje pn spoj kao osnovni spoj poluvodičkih elemenata, te rad kod propusne i nepropusne polarizacije. Četvrto poglavlje opisuje rad fotoničkih komponenata (LED i fotodiode). U petom poglavlju opisan je postupak mjerenja i rezultati navedenih. U posljednjem poglavlju je napravljena simulacija u računalnim programima i prikazani dobiveni rezultati.

2. SVOJSTVA POLUVODIČA

Poluvodiči (*engl.* Semiconductors) su materijali kod kojih je električna vodljivost veća od izolatora, a manja od vodiča (od 10^{-6} do 10^3 Scm^{-1}). Njihova svojstva ovise o temperaturi, stupnju nečistoća u p ili n tipu i osvjetljenju. Na vrlo niskim temperaturama poluvodič je izolator. Uglavnom poluvodiči imaju negativni temperaturni koeficijent (NTC) jer s porastom temperature smanjuje se specifična električna otpornost.

Najvažniji predstavnici poluvodiča su silicij (Si) i germanij (Ge) koji su kristalne strukture. Kako se nalaze u četvrtoj skupini periodnog sustava elemenata znači da u zadnjoj (valentnoj) ljusci sadrže četiri elektrona koji tvore kovalentnu vezu. Djelovanjem vanjske energije (toplina, električno polje, svjetlost, itd.) elektron napušta atom i postaje slobodan elektron. Time atom postaje pozitivan ion i na mjestu gdje se nalazio elektron ostaje šupljina (*engl.* holes). Elektroni i šupljine su slobodni nositelji naboja u poluvodiču i doprinose struji elektrona i šupljina.

3. PN SPOJ

Ako se čistom poluvodiču tehnološkim postupkom doda (kontrolirano dodavanje male količine nečistoća) peterovalentan element kao što je arsen (As) ili fosfor (P), poluvodič postaje n-tip jer su većinski slobodni (majorski) nositelji naboja elektroni.

Suprotno tome, ako se silicij dopira trovalentnim elementom borom (B) ili aluminijem (Al), većinski (majorski) nositelji naboja su šupljine i poluvodič je p-tip.

Spajanjem navedena dva tipa, dobiva se PN spoj koji čine osnovu svih poluvodičkih elemenata kao što su: dioda, LED, fotodioda i bipolarni tranzistori. Svojstva PN spoja je da u jednom (propusnom smjeru) provodi struju, odnosno u drugom (nepropusnom smjeru) ne provodi struju ili jako malu struju.

3.1. PN spoj u termičkoj ravnoteži

PN spoj u termičkoj ravnoteži nije pod utjecajem vanjske energije (električna energija, toplina, svjetlost, itd.). Kada se p i n tip poluvodiča spoje u pn spoj, većinski slobodni nositelji naboja šupljine, p, i elektroni, n, kreću se difuzijom preko spoja. Šupljine iz p-tipa difundiraju u n-tip odnosno elektroni iz n-tipa difundiraju u p-tip poluvodiča. Proces difuzije će prestati kada inducirano električno polje na području oko spoja postane dovoljno jako da se u potpunosti suprotstavi pojavi difuzije. Šupljine će se u n-tipu rekombinirati s većinskim elektronima, suprotno tomu elektroni iz n-tipa rekombiniraju se sa šupljinama u p-tipu na udaljenosti difuzijske duljine za šupljine, L_p , odnosno elektrone, L_n . Elektroni pri prijelazu iz n-tipa u p-tip iza sebe ostavljaju pozitivno nabijene fiksne ione donora, a šupljine pri prijelazu iz p-tipa u n-tip negativno nabijene ione akceptora. Između tih fiksnih naboja stvorit će električno polje koje se suprotstavlja difuziji i tjera manjinske nositelje naboja da se driftno gibaju u suprotnom smjeru spoja.

Difuzijski napon naziva se još napon koljena zato jer dioda naglo počinje voditi struju. Za silicij iznosi oko 0.7 V, a germanij oko 0.3 V. To je onaj napon koji proizvode nepomični ioni s pozitivne i negativne strane.

Difuzijski napon jednak je:

$$U_D = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = \frac{q}{2\varepsilon} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} W^2 \quad (3.1.)$$

gdje je:

k	Boltzmannova konstanta
T	temperatura
q	električni naboj
N_A	koncentracija akceptorskih primjesa
N_D	koncentracija donorskih primjesa
n_i	koncentracija elektrona ili šupljina
ε	dielektrična konstanta
W	širina osiromašenog područja

Područje gdje je koncentracija slobodnih nositelja naboja elektrona i šupljina malena u odnosu na ravnotežnu koncentraciju u neutralnom dijelu poluvodiča, naziva se osiromašeno područje. U termičkoj ravnoteži kroz to područje nema mrežnog toka struje elektrona i šupljina.

Širina osiromašenog područja u p-tipu jednaka je:

$$X_{dp} = \sqrt{\frac{2\varepsilon N_D U_D}{q N_A (N_A + N_D)}} \quad (3.2.)$$

gdje je:

- ε dielektrična konstanta
- N_D koncentracija donorskih primjesa
- U_D difuzijski napon
- q električni naboj
- N_A koncentracija akceptorskih primjesa

Širina osiromašenog područja u n-tipu jednaka je:

$$X_{dn} = \sqrt{\frac{2\varepsilon N_D U_D}{q N_D (N_A + N_D)}} \quad (3.3.)$$

gdje je:

- ε dielektrična konstanta
- N_D koncentracija donorskih primjesa
- U_D difuzijski napon
- q električni naboj
- N_A koncentracija akceptorskih primjesa

Ukupna širina osiromašenog područja jednaka je:

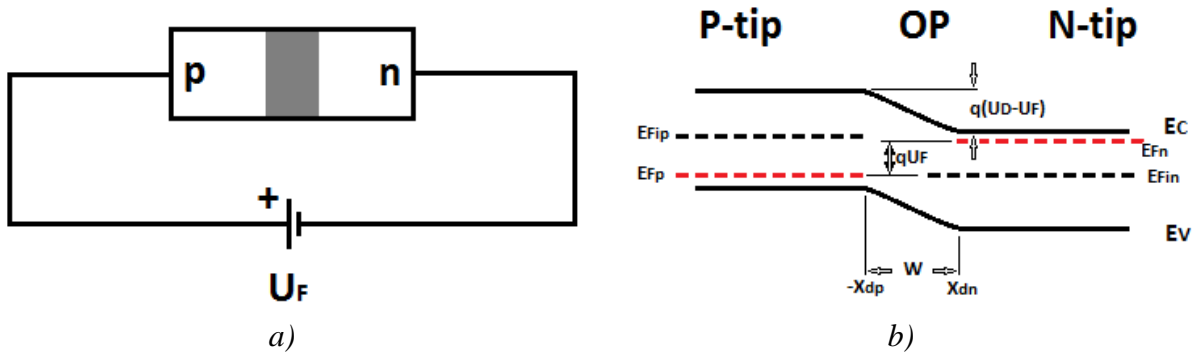
$$W = X_{dp} + X_{dn} = \sqrt{\frac{2U_D \varepsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \quad (3.4.)$$

gdje je:

- X_{xp} širina osiromašenog područja u p-tipu
- X_{dn} širina osiromašenog područja u n-tipu
- U_D difuzijski napon
- ε dielektrična konstanta
- q električni naboj
- N_A koncentracija akceptorskih primjesa
- N_D koncentracija donorskih primjesa

3.2. Propusno polariziran PN spoj

Ako se na p-tip narine pozitivan propusni napon U_F , plus pol privlači elektrone, a minus pol šupljine, narinti napon će smanjiti potencijalnu barijeru na pn spoju i osiromašeno područje će se suziti. Dolazi do rekombinacije (spajanja) elektrona i šupljina, te PN spoj postaje vodljiv.



Slika 3.1. a) shema spoja kod propusne polarizacije, b) energijski dijagram.

Širina osiromašenog područja kod propusne polarizacije jednaka je:

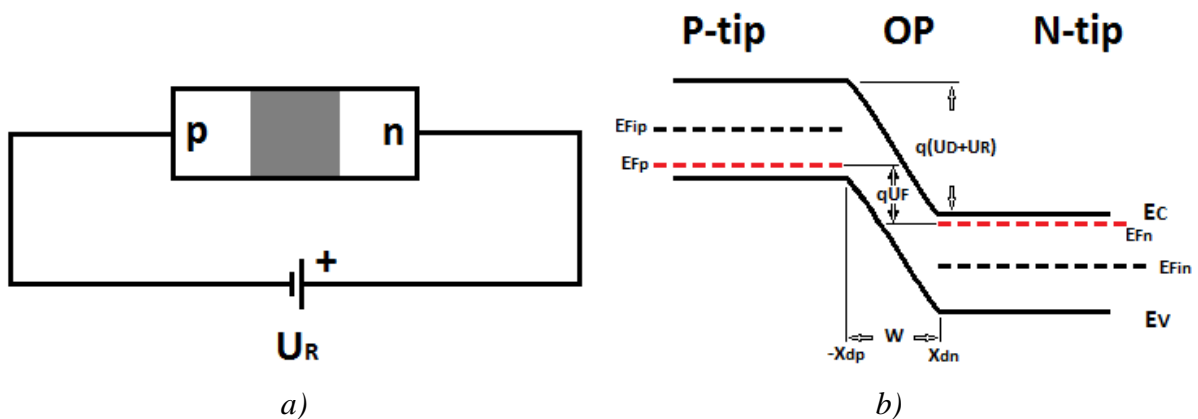
$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} (U_D - U_F) \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \quad (3.5.)$$

gdje je:

- ε dielektrična konstanta
- q električni naboj
- U_D difuzijski napon
- U_F propusno polariziran napon
- N_A koncentracija akceptorskih primjesa
- N_D koncentracija donorskih primjesa

3.3. Nepropusno polariziran PN spoj

Kod nepropusne polarizacije osiromašeno područje se širi jer se na plus pol povlače šupljine dok na minus pol elektroni. Strujnim krugom teče veoma malena reverzna struja (struja manjinskih nositelja) koja ovisi o temperaturi PN spoja, na sobnoj temperaturi je vrlo malena.



Slika 3.2. a) shema spoja kod nepropusne polarizacije, b) energijski dijagram.

Širina osiromašenog područja kod nepropusne polarizacije jednaka je:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} (U_D + U_R) \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \quad (3.6.)$$

gdje je:

- ε dielektrična konstanta
- q električni naboj
- U_D difuzijski napon
- U_R nepropusno polariziran napon
- N_A koncentracija akceptorskih primjesa
- N_D koncentracija donorskih primjesa

4. FOTONIČKE KOMPONENTE

Komponente kod kojih foton kao elementarna čestica ima glavnu ulogu. LED emitira, a fotodioda apsorbira svjetlost.

4.1. LED

LED (fotoemitirajuća) dioda je poluvodički element koji pri propusnoj polarizaciji pretvara električni signal u svjetlost. Elektroni prelaskom iz vodljivog u valentni pojas rekombiniraju se sa šupljinama pri čemu se oslobađa energija u obliku fotona tj. emitiraju se fotoni energije veće ili jednake energiji energijskog rascjepa. Svaki materijal ima različitu širinu energijskog rascjepa, stoga emitira svjetlost različite valne duljine. Za LED crvene boje to svojstvo ima (GaAsP), LED plave boje (GaN) i LED zelene boje (GaP). LED se koristi kao rasvjeta, u optici kao izvor svjetlosti za udaljenosti manje od 10 km, matrični displeji, optokapleri ili optoizolatori.

Kod idealne LED diode za svaki rekombinirani par elektron-šupljina, emitiran je jedan foton.

Osnovno svojstvo LED diode je kvantna učinkovitost.

Interna kvantna učinkovitost dana je izrazom:

$$\eta_{in} = \frac{\text{broj emitiranih fotona u sekundi}}{\text{broj injektiranih elektrona u sekundi}} \quad (4.1.)$$

Svaki foton ne mora biti emitiran u prostor, tj. može se reflektirati natrag u strukturu LED. Zbog mehaničke nesavršenosti kristala svi fotoni ne bivaju emitirani u željenom smjeru u prostor.

Koeficijent efikasnosti emitiranja dana je izrazom:

$$\eta_{extraction} = \frac{\text{broj emitiranih fotona u prostor u sekundi}}{\text{broj fotona oslobođenih sa aktivne površine u sekundi}} \quad (4.2.)$$

Eksterna kvantna učinkovitost dana je izrazom:

$$\eta_{ex} = \frac{\text{broj emitiranih fotona u prostor u sekundi}}{\text{broj injektiranih elektrona u sekundi}} = \eta_{in} * \eta_{extraction} \quad (4.3.)$$

Ovaj izraz pokazuje odnos korisne svjetlosti u odnosu na broj elektrona emitiranih s aktivne površine.

U radu se koristila FULL COLOR RGB LED dioda (LF81WAEMBGMBC) koja može proizvesti bilo koju boju iz vidljivog spektra kombinacijom osnovnih monokromatskih boja svjetlosti: crvene (R), zelene (G) i plave (B).

4.2. Fotodioda

Fotodioda je poluvodički element kroz koju kod nepropusne polarizacije pod utjecajem svjetlosti teče fotostruja. Kada fotodioda nije osvijetljena njome teče vrlo mala struja manjinskih nosilaca naboja (struja mraka). Kada se fotodioda osvijetli sa svjetlošću energije veće ili jednake energiji energijskog rascjepa generiraju se parovi elektron-šupljina, te se poveća broj slobodnih nosioca naboja, koji pod utjecajem električnog polja doprinose poljskoj komponenti struje u reverznom smjeru. Najčešći element za izradu fotodioda je silicij (Si), ali mogu još biti germanij (Ge) i selen (Se). U radu se koristila silicijska fotodioda (BPW21R).

4.2.1 Kvantna iskoristivost

Definira koji je broj generiranih parova elektron-šupljina po upadnom fotonu:

$$\eta = \frac{I_{ph}/q}{P_0/h\nu} \quad (4.4.)$$

gdje je:

I_{ph} fotogenerirana struja
 P_0 optička snaga svjetlosti
 $h\nu$ energija fotona

4.2.2. Odzivnost

Odzivnost (*engl.* responsivity) karakterizira fotodiodu i povezana je s kvantnom iskoristivošću sljedećom relacijom:

$$\mathfrak{R} = \frac{I_p}{P_0} = \frac{nq}{h\nu} = \frac{\eta\lambda(\mu m)}{1.24} \left[\frac{A}{W} \right] \quad (4.5.)$$

Ovaj parametar je vrlo pogodan pošto definira fotostruju koja se generira po jedinici optičke snage.

Kod osvijetljenja fotodiode s kromatskom svjetlošću ukupna fotostruja fotodiode jednaka je iz jednadžbe (4.6.) [2] zbroju pojedinih komponenti fotostruje nastale zbog apsorpcije svjetlosti osnovnih monokromatskih komponenta boje.

$$I_{ph} = p_R \mathfrak{R}_R + p_G \mathfrak{R}_G + p_B \mathfrak{R}_B \quad (4.6.)$$

4.2.3 Detektivnost

Za efikasan rad fotodetektora, odnosno fotodiode važno je da šum bude sveden na minimum. Pošto su izvori šuma neovisni procesi, detektivnost je mjera koja ih opisuje:

$$D^* = \frac{\sqrt{AB}}{NEP} [cm\sqrt{Hz}/W] \quad (4.7.)$$

gdje je:

A promatrano područje

B frekvencijski opseg

NEP (*engl.* Noise Equivalent Power) snaga ekvivalentna šumu

4.2.4. Brzina odziva

Brzina odziva fotodiode određuje: vrijeme preleta elektron-šupljina pod utjecajem električnog polja preko osiromašenog područja, kapacitetom osiromašenog područja i difuzijom nositelja naboja izvan osiromašenog područja.

Kada je osiromašeno područje dovoljno široko većina svjetlosti će se apsorbirati, osiromašeno područje ne smije biti preusko kako kapacitet ne bi previše povećao vremensku konstantu, a ni preširoko da se ne bi ograničio frekvencijski odziv.

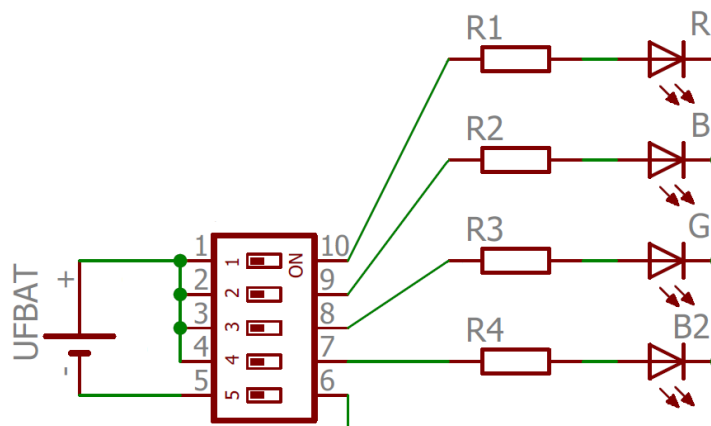
5. MJERENJA

5.1. Strujno-naponska karakteristika

5.1.1. Strujno-naponska karakteristika LED diode

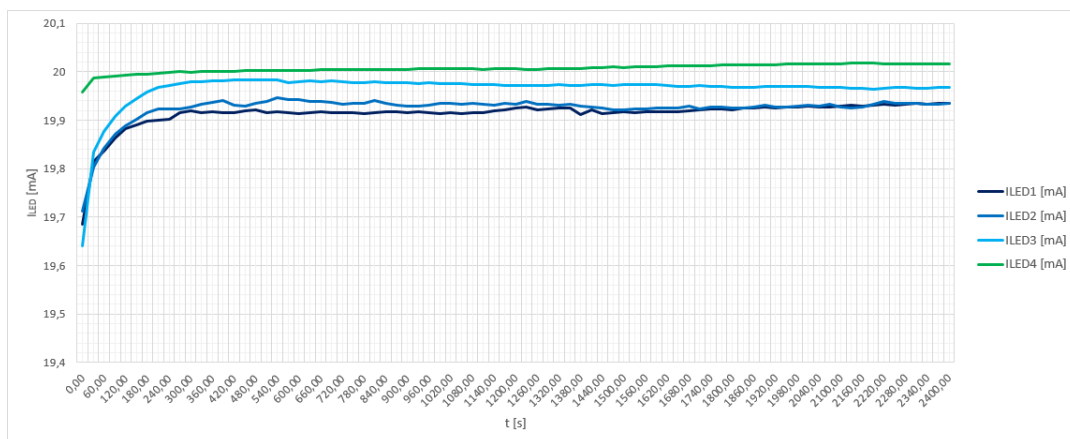
Instrumenti koji su korišteni za mjerenja:

- Agilent E3631 (naponski izvor, 0-6V, 5A/0-±25V, 1A)
- Agilent 334450A (digitalni multimeter, 5½ znamenki)
- Keysight U1232A (digitalni multimeter)



Slika 5.1. Shematski prikaz mjerenog sklopa.

Prikazanom shemom na slici 5.1. proučavan je rad LED diode kod propusne polarizacije (U_F). Proizvođač propisuje za pojedinu LED intenzitet, odnosno optičku snagu emitirane svjetlosti od 105 mW kod struje od 20 mA. Uvjet je zadovoljen kod napona na LED crvene boje od 5.1 V, zelene 5.25 V i plave 4.15 V. Radi zaštite otpornici su spojeni u seriju s LED diodom, njihove vrijednosti su različite za svaku boju, crvena (150 Ω), plava (28 Ω) i zelena (150 Ω).



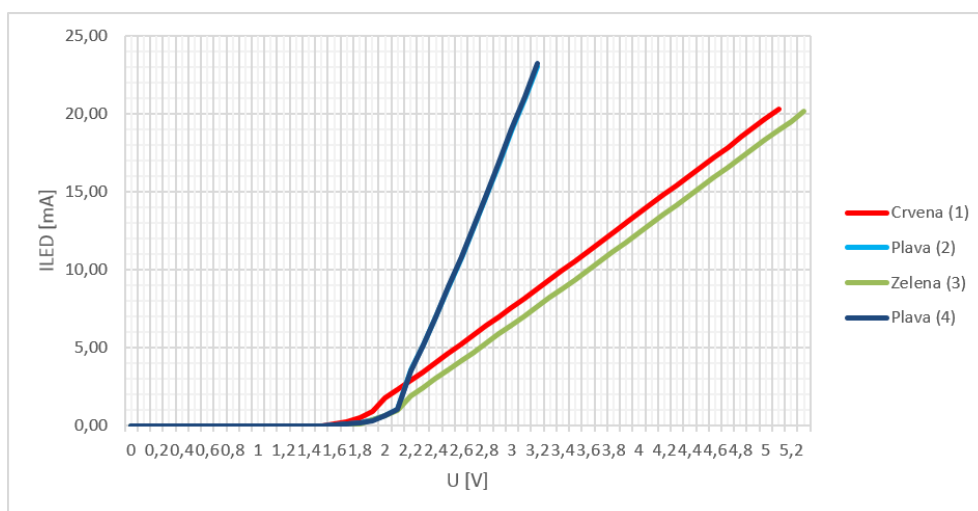
Slika 5.2. Struja u ovisnosti o vremenu.

Ispitana je stabilnost LED na sobnoj temperaturi mjerenjem konstantne struje od 20 mA u vremenskom razmaku od 0 s do 40 min, očitavanjem vrijednosti struje svakih $\Delta t = 30$ s. Na slici 5.2. prikazana je struja u ovisnosti o vremenu za plavu i zelenu boju. U tijeku mjerenja praćena je temperatura okoline. Utvrđeno je da s promjenom temperature dolazi do oscilacija struje. U Tablici 5.1. su prikazane vrijednosti temperature okoline za plavu i zelenu LED na početku i na kraju mjerenja.

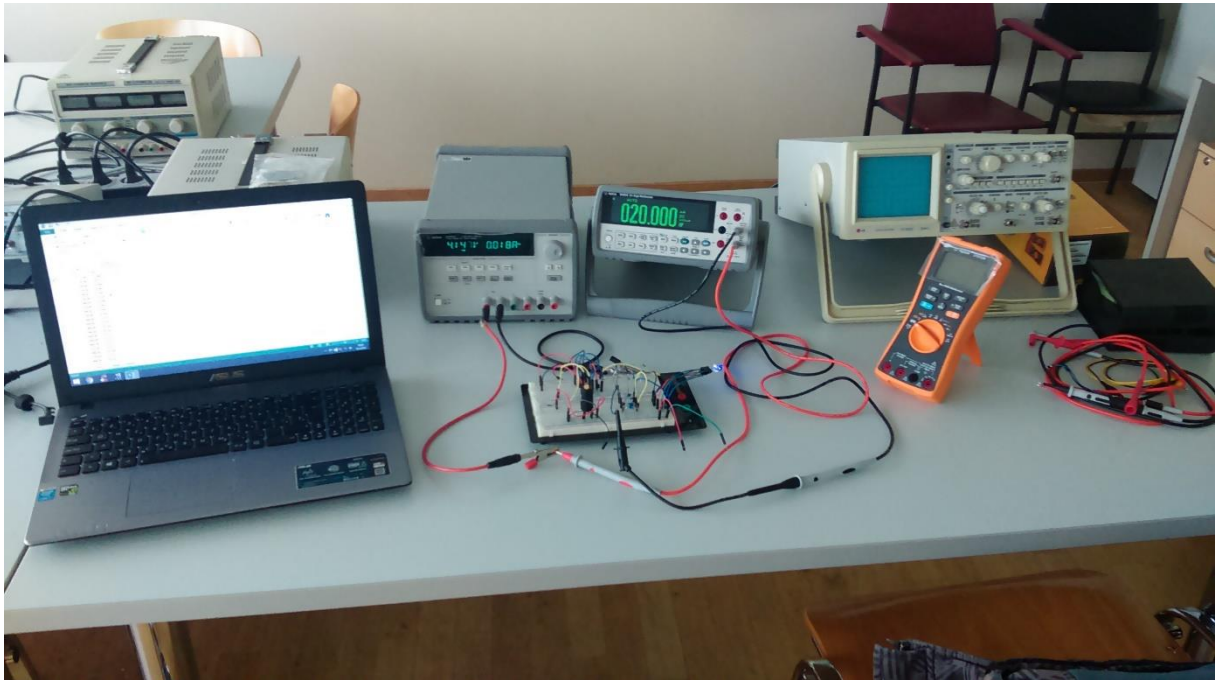
Tablica 5.1. Temperature na početku i kraju mjerenja.

Boja	plava (2)	plava (2)	plava (2)	zelena (3)
T [°C]	21,00-21,00	18,9-20,04	19,8-19,9	18,3-20,00
UBAT [v]	4,147	4,131	4,23	5,28

Mjerenje strujno-naponske, $I_{LED}-U_{LED}$ karakteristike mjerena je deset puta za raspon napona $0 \text{ V} \div 5.3 \text{ V}$, s korakom napona $\Delta U_F = 0.1 \text{ V}$. Izračunata je prosječna vrijednost dobivenih rezultata mjerenja. Ampermetar je spojen u seriju s izvorom napajanja, dok je voltmetar spojen između čvorova grane u kojoj je LED dioda. LED pojedine boje počne svijetliti (struja počinje rasti) za napone: crvena (1.4 V), plava (2.9 V), zelena (1.9 V) što se može uočiti na I-U karakteristici na slici 5.3.



Slika 5.3. I-U karakteristika RGB LED.

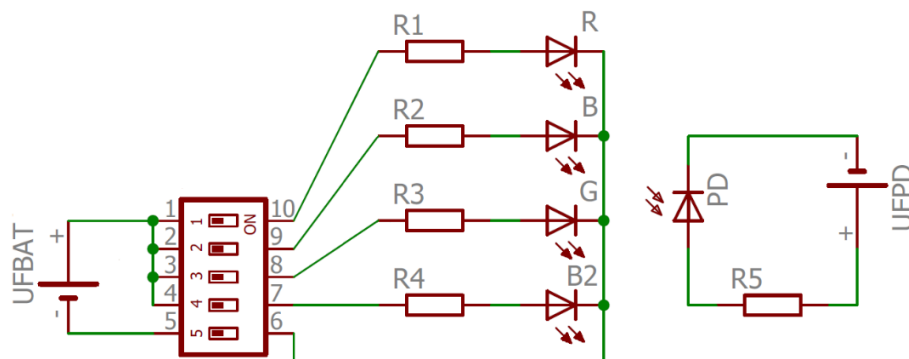


Slika 5.4. Prikaz mjernog sklopa.

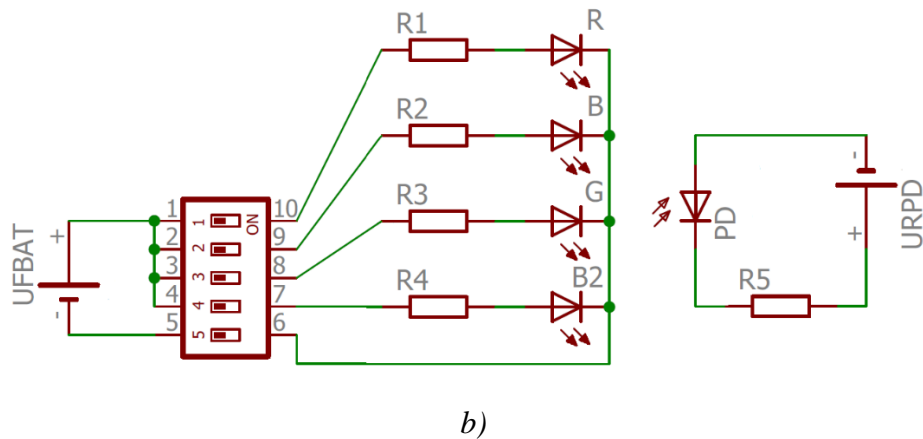
5.1.2. Strujno-naponska karakteristika fotodiode

Instrumenti koji su korišteni za mjerenja:

- Agilent E3631 (naponski izvor, 0-6V, 5A/0-±25V, 1A)
- Agilent 334450A (digitalni multimetar, 5½ znamenki)
- Keysight U1232A (digitalni multimetar)

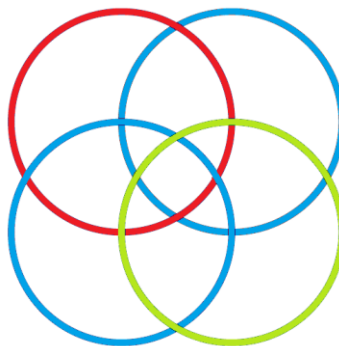


a)

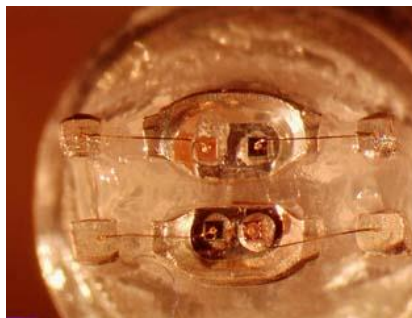


Slika 5.5. Propusna i nepropusno polarizirana fotodiode.

Slika 5.5. prikazuje sheme spoja za a) propusnu i b) nepropusnu polarizaciju fotodiode. U seriju s fotodiodom spojen je otpornik vrijednosti $1\text{ k}\Omega$. Kako bi se što više izbjegle vanjske smetnje (okolna svjetlost i temperatura), LED dioda i fotodiode su smještene u crnu kutiju. Aktivna površina LED diode i fotodiode su približno paralelne, kako bi zraka upadnog svjetla padala okomito na aktivnu površinu fotodiode. Idealno bi bilo kada bi taj kut bio 90° za svaku boju. Zbog prostornog razmještaja R, G, B LED u kućištu svaka boja ocrtava svoju „kružnicu“ kao što je prikazano na slici 5.6. Stoga se ne može postići potpuna pokrivenost iste aktivne površine fotodiode. Razlog tome je to što su različiti spojevi (GaAsP za crvenu, GaN za plavu, i GaP za zelenu) nisu sadržani u jednoj točki već pomaknuti, slika 5.7.



Slika 5.6. Skica osvjetljenja aktivne površine fotodiode s RGB LED.

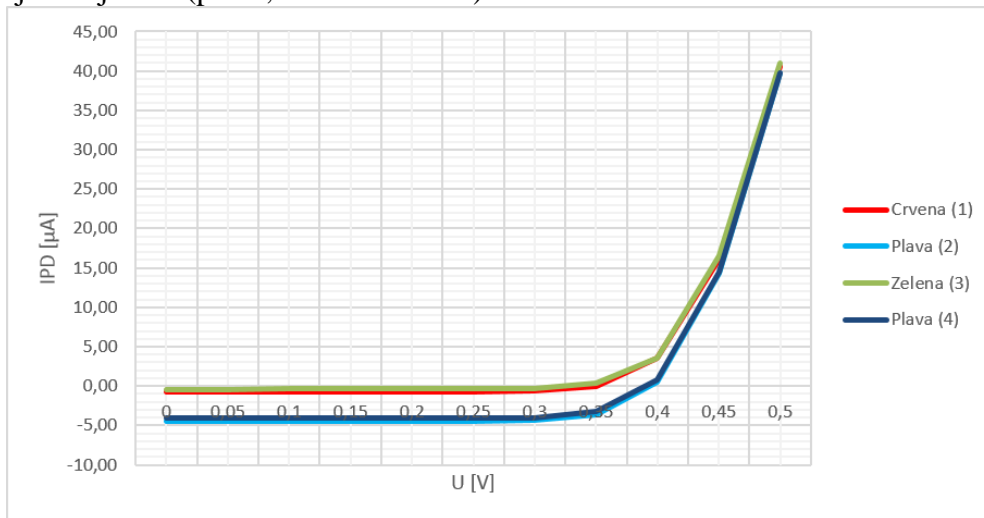


Slika 5.7. RGB LED pod mikroskopom [<http://education.mrsec.wisc.edu/background/LED/>].

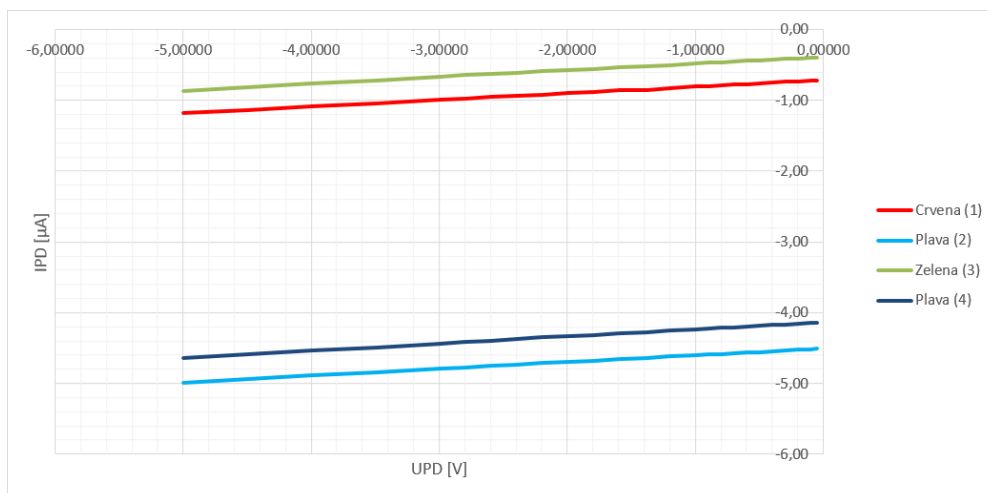
Strujno-naponska, I_{PD} - U_{PD} karakteristika fotodiode kod propusne polarizacije mjerena je deset puta za narinute napone ($0\text{ V} \div 0.6\text{ V}$), s korakom $\Delta U_F = 0.05\text{ V}$, odnosno kod nepropusne polarizacije ($0\text{ V} \div 5\text{ V}$), s korakom $\Delta U_R = 0,1\text{ V}$. Izračunata je prosječna vrijednost dobivenih rezultata mjerenja.

Specificirani intenzitet svjetlosti svake LED od strane proizvođača postignut je narinutim konstantnim naponom na pojedinu LED diodu pri struji od 20 mA. Pri navedenom osvjetljenju fotodiode mjerena je pad napona na i struja kroz fotodiodu u propusnom i nepropusnom smjeru. slika 5.8. prikazuje strujno naponsku, I_{PD} - U_{PD} karakteristiku fotodiode pri osvjetljenju s LED triju osnovnih boja kod propusne polarizacije. slika 5.9. prikazuje strujno naponsku karakteristiku u reverznom smjeru. slika 5.10. za ostale boje koje se dobivaju kombinacijom osnovnih boja, a to su:

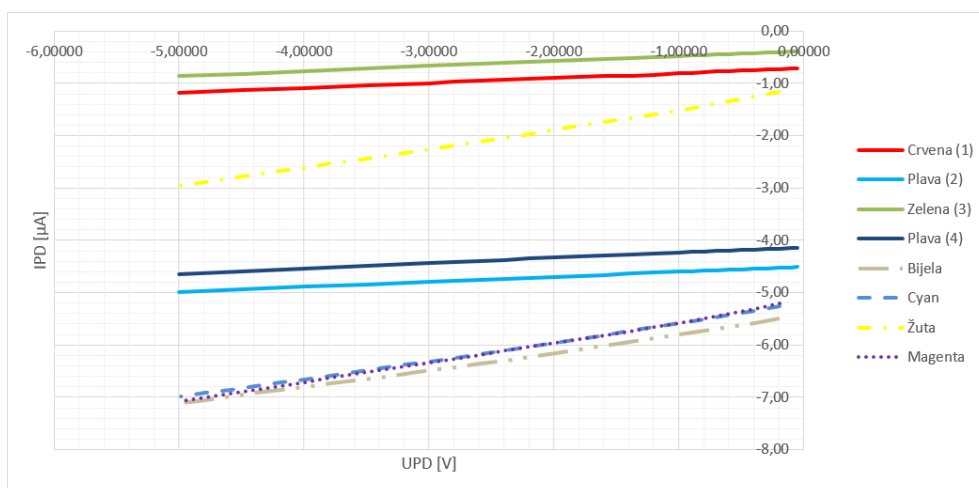
- plavozelena boja (plava i zelena)
- ružičasta boja (plava i crvena)
- žuta boja (crvena i zelena)
- bijela svjetlost (plava, zelena i crvena)



Slika 5.8. Strujno naponska karakteristika fotodiode u propusnoj polarizaciji.

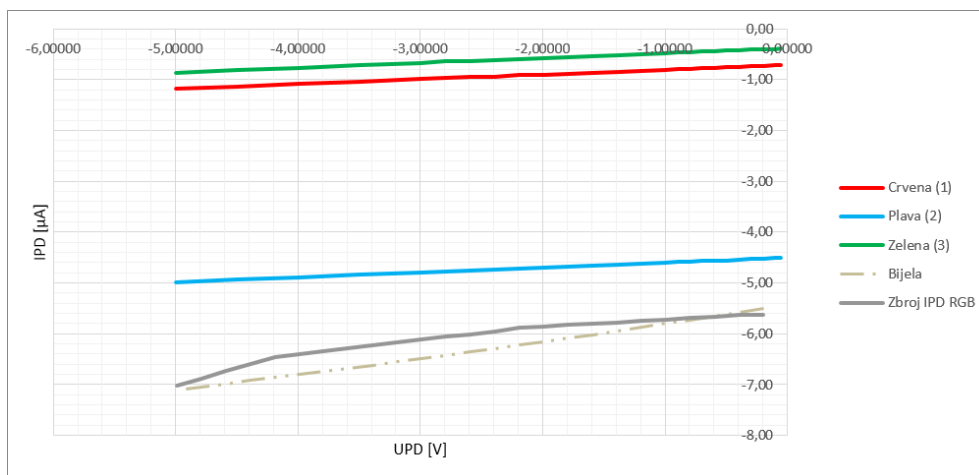


Slika 5.9. Strujno naponska karakteristika fotodiode u nepropusnoj polarizaciji za osnovne boje.



Slika 5.10. Strujno naponska karakteristika fotodiode u nepropusnoj polarizaciji za ostale boje.

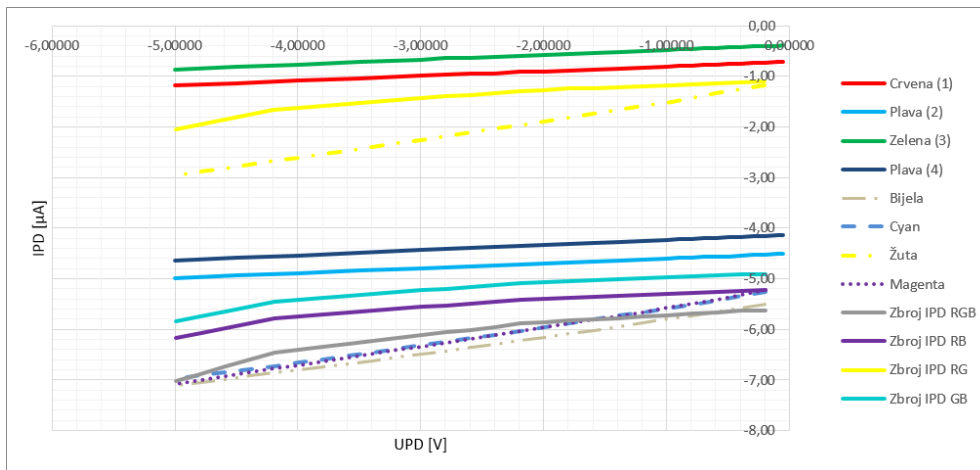
Zbrojimo li fotostruje fotodiode kod osvjetljenja s osnovnim monokromatskim bojama svjetlosti i usporedimo li s mjerenom I-U karakteristikom kod ekvivalentnog osvjetljenja dobiva se minimalna razlika, što se može pripisati šumu i okolnom osvjetljenju, slika 5.11.



Slika 5.11. Usporedba mjerene I-U karakteristike s izračunatom za bijelu boju

Slika 5.12. Mjerena strujno-naponska karakteristika fotodiode za plavu, zelenu i crvenu svjetlost i njihovu kombinaciju u usporedbi s izračunatom strujno-naponskom karakteristikom prema jed. (4.6.) [2].

Uočena odstupanja između mjenjenih fotostruja kod osvjetljenja s kromatskom svjetlošću i zbroja fotostruja kod osvjetljenja s monokromatskim komponentama proizlaze iz različite osvjetljene površine fotodiode zbog prostorne raspodjele monokromatskih LED slika 5.6., te struje mraka i šuma.



Slika 5.12. Usporedba mjerene I-U karakteristike s izračunatom

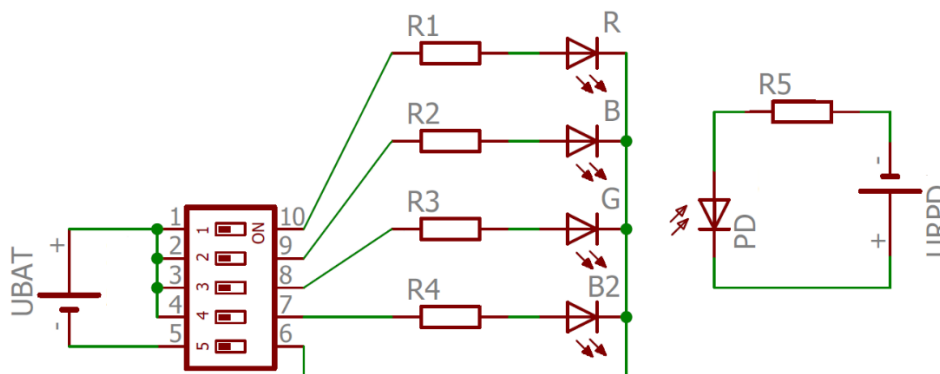


Slika 5.13. Prikaz mjernog sklopa.

5.2. Pulsiranje svjetlosti

Instrumenti koji su korišteni za mjerenja:

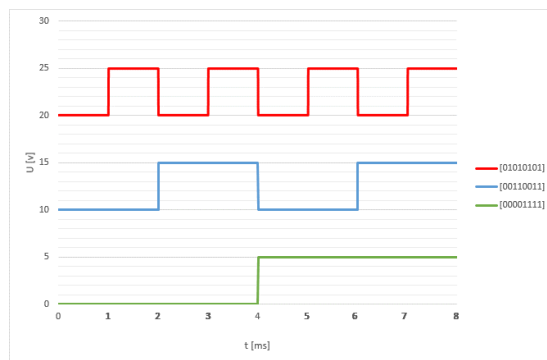
- Agilent E3631 (naponski izvor, 0-6V, 5A/0-±25V, 1A)
- Agilent E3630A (naponski izvor, 0-6V, 2.5A/0-±20V, 0.5A)
- Protek 9302 (funkcijski generator, 31MHz, 2CH)
- Gwinstek GDS-2204 (digitalni osciloskop, 200MHz, 1G Sa/s)
- Agilent 334450A (digitalni multimetar, 5½ znamenki)
- Keysight U1232A (digitalni multimetar)



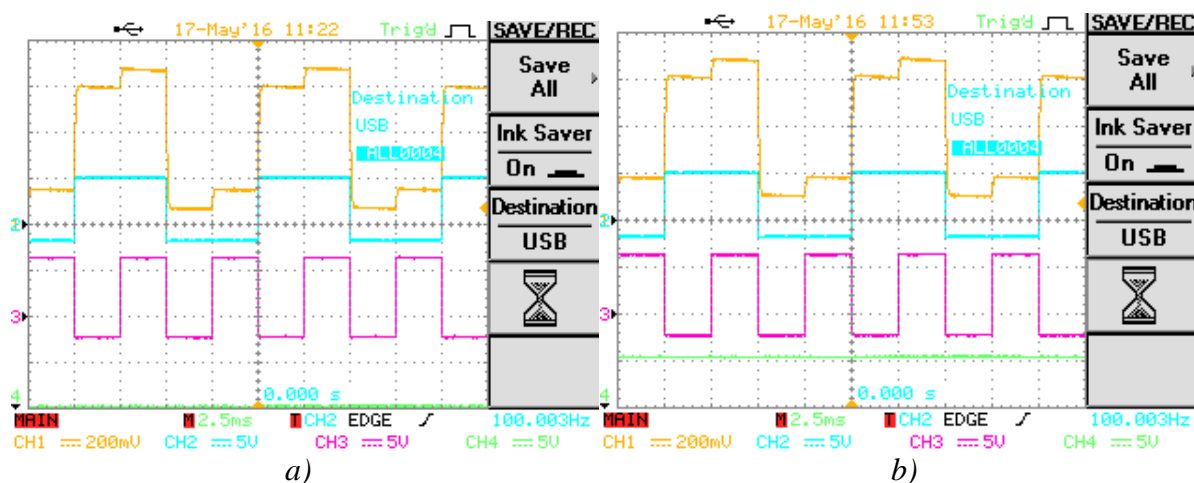
Slika 5.14. Shematski prikaz mjernog sklopa.

Odabrana amplituda izvora niza impulsa napona na funkcijskom generatoru odgovara vrijednosti istosmjernog napona na LED pri kojem je struja LED 20 mA. Mjerenja su izvršena za frekvencije izvora za plavu LED (10 Hz, 100 Hz, 333Hz i 1kHz), odnosno crvenu LED (20 Hz, 200 Hz, 666 Hz i 2 kHz), dok je na zelenoj LED konstantan istosmjerni napon. U sekundarnom krugu sa fotodiodom, vrijednost otpornika je promijenjena na 100 kΩ zbog pojave šuma. Digitalnim osciloskopom se mjeri odziv fotodiode na niz pravokutnih impulsa svjetlosti pri različitim narinutim reverznim naponima fotodiode $0 \div (-2 \text{ V})$, s korakom $\Delta U_R = 0,5 \text{ V}$.

Mjeren je odziv fotodiode kad funkcijski generator napaja plavu i crvenu LED pravokutnim signalom konstantne amplitude i frekvencije. Pri tom je $f_{crvena} = 2f_{plava}$. Zbog ograničenja funkcijskog generatora koji raspolaže s dva kanala, na LED zelene boje je narinut konstantan istosmjerni napon, ili 0 V. Na taj način su postignute sve moguće kombinacije svjetlosti monokromatskog i kromatskog svjetla.



Slika 5.15. Prikaz valnog oblika LED

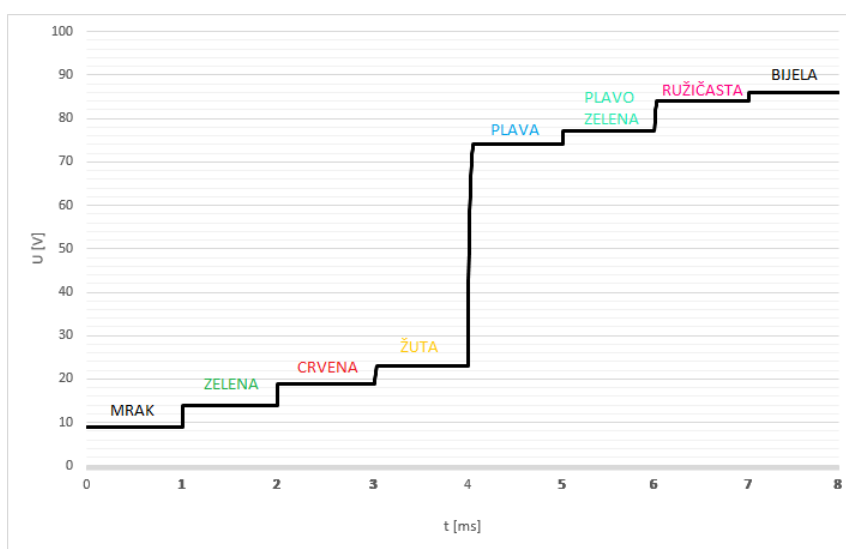


Slika 5.16. Prikaz valnih oblika odziva fotodiode na sve kombinacije svjetlosne pobude: a) crvena i plava LED, zelena isključena; b) crvena, plava i zelena LED.

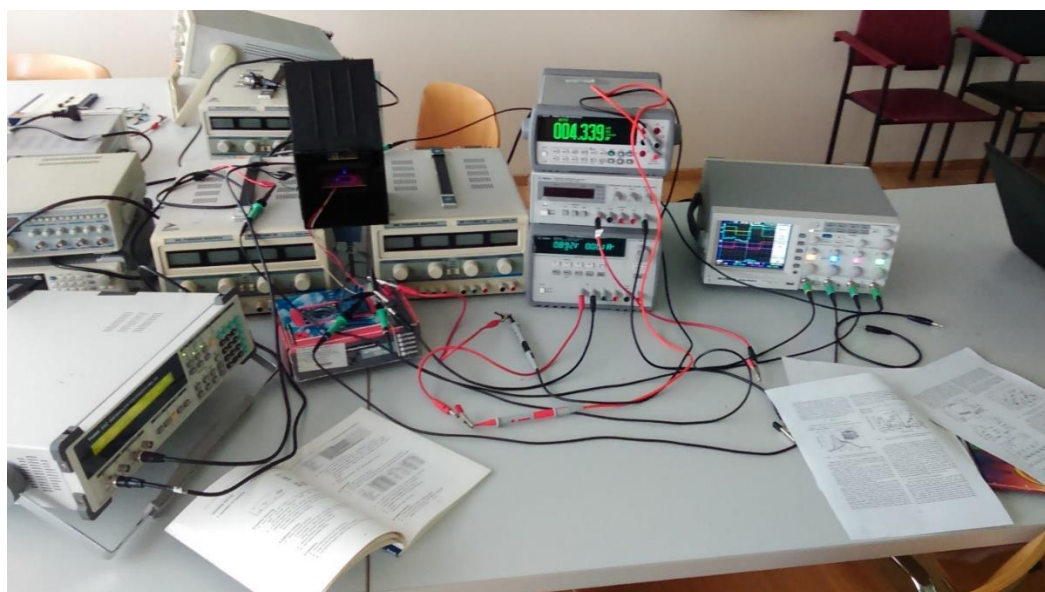
Na slici 5.15. prikazan je valni oblik LED svih osnovnih monokromatskih boja. Četverokanalnim osciloskopom mjeri se valne oblike izvora svjetlosti R,G,B LED i odziv fotodiode na kombinacije istih, mjerenjem pada napona na otporu u seriji s fotodiodom. Tablica 5.2. prikazuje tablicu istine za koje logičke jedinice (napone na LED) LED određene boje svijetli. Valni oblici mjenjenih odziva fotodiode digitalnim osciloskopom prikazani su na slici 5.16. Odziv fotodiode na svjetlost pojedine boja ima različitu amplitudu zbog različite apsorpcije svjetlosti različitih valnih duljina. To znači da se svakoj boji može pripisati jedna logička vrijednost. Mogućih logičkih kombinacija za iste intenzitete svjetlosti je 3^2-1 . Na slici 5.16. prikazani su odzivi na sve moguće kombinacije, a na slici 5.17. prikazani su odzivi po amplitudi.

Tablica 5.2. Tablica boja.

Zelena	Plava	Crvena	Funkcija kao boja
0	0	0	Mrak
0	0	1	Crvena boja
0	1	0	Plava boja
0	1	1	Ružičasta boja
1	0	0	Zelena boja
1	0	1	Žuta boja
1	1	0	Plavo zelena boja
1	1	1	Bijela svjetlost



Slika 5.17. Ukupni valni oblik za narinuti napon na fotodiodu $U_R = 2V$ i $f = 100$ Hz.



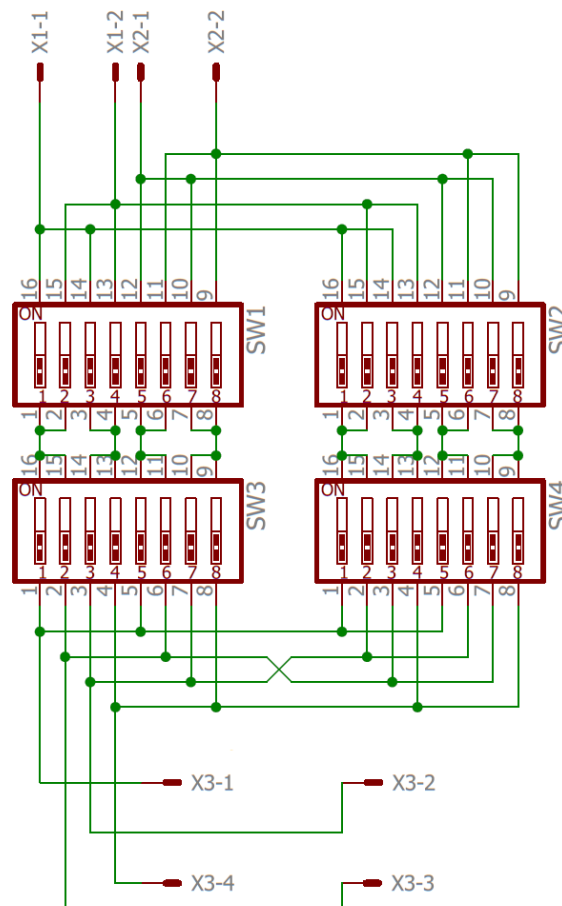
Slika 5.18. Prikaz mjernog sklopa.

5.3. Van der Pauw metoda

Navedena metoda koristi se za precizno mjerenje otpornosti i Hallovog koeficijenta uzorka tankih filmova bilo kojeg oblika. Postoje nekoliko uvjeta koji moraju biti ispunjeni da bi ova metoda bila što uspješnija: uzorak mora biti jednolike debljine, ne smije sadržavati bilo kakve izolirane rupe (*engl.* Isolated hole), mora biti homogen i izotropan, sva četiri kontakta moraju biti smještena na samim rubovima uzorka.

Mjerenjem Van der Pauw metodom te proračunom mogu se odrediti sljedeća svojstva materijala:

- Otpornost materijala
- Dopiranost materijala (p-tip ili n- tip)
- Većinske nositelje (iz toga je moguće doći do gustoće naboja i razine dopiranja materijala)
- Pokretljivost većinskih nositelja naboja.



Slika 5.19. Prototip sklopke za mjerenje Van der Pauw metodom.

Otpornost materijala

$$R_{AB,CD} = \frac{U_{CD}}{I_{AB}} \quad (5.1.)$$

mjeri se omjerom napona između dvije točke C, D i struje između preostale dvije točke A, B od četiri odabrane točke.

Želimo li mjeriti struju ampermetrom u grani konstantnog izvora napona i pad napona u drugoj grani voltmetrom na čvorovima grane, potrebno je izraditi sklop sa sklopkama za odabir dviju grana.

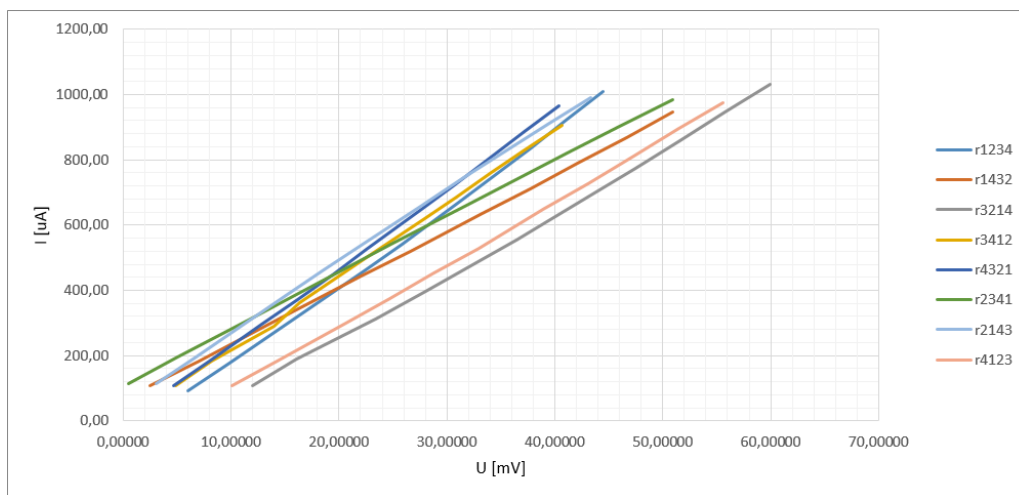
Slika 5.19. prikazuje prototip s DIP sklopkama. Svakoj kombinaciji položaja prekidača odgovara pripadajući otpor iz Tablice 5.3. Na stezaljke X1-1 i X1-2 spojen je istosmjerni izvor

napajanja, a voltmeter na stezaljke X2-1 i X2-2. Stezaljke X3-1, X3-2, X3-3 i X3-4 su kontakti sonda koje dodiruju površinu uzorka. DIP prekidači SW2 i SW4 služe za unakrsno mjerenje, dakle između kontakata X3-1 i X3-3, odnosno X3-2 i X3-4.

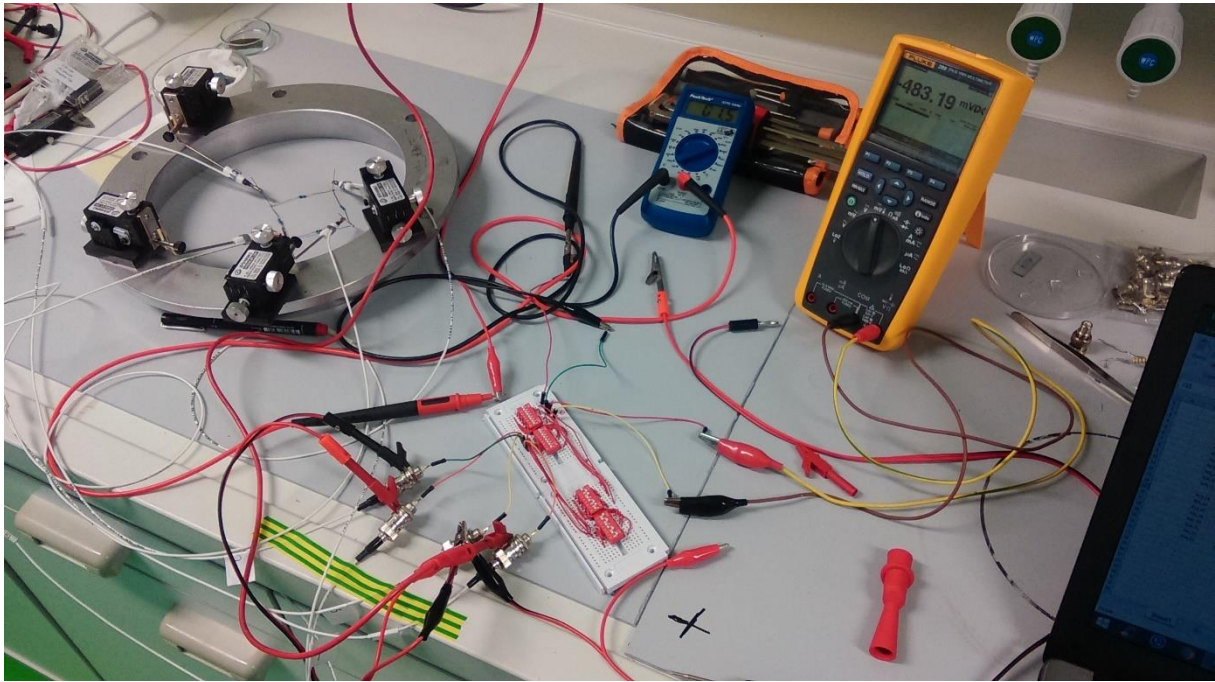
Ovakvom konfiguracijom prekidača omogućuje se mjerenje svih mogućih kombinacija otpora ne mijenjajući položaj sonde. Položaj sonde je stalan, odnosno nema potrebe za premještanje što može unijeti grešku u mjerenjima.

Tablica 5.3. Kombinacije DIP prekidača.

	SW1	SW3		SW2	SW4
R12,34	1458	1368	R13,24	1458	1368
R14,32	1458	1467	R13,42	1467	1368
R32,14	1458	2358	R31,42	2367	1368
R34,12	1458	2457	R31,24	2358	1368
R43,21	2367	2457	R42,13	2358	2457
R23,41	2367	2358	R42,31	2367	2457
R21,43	2367	1368	R24,31	1467	2457
R41,23	2367	1467	R24,13	1458	2457



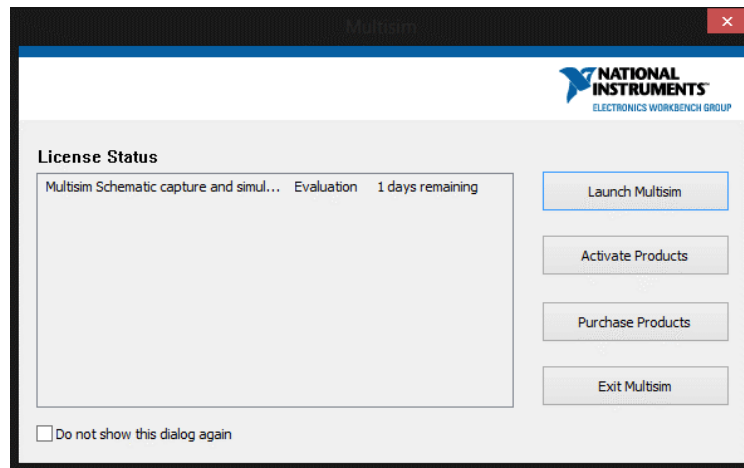
Slika 5.20. Strujno-naponska karakteristika mjerenja između čvorova.



Slika 5.21. Prikaz mjernog sklopa.

6. SIMULACIJA U RAČUNALNOM PROGRAMU

Simulacije su izvršene u programu Electronics Workbench-u i NI Multisim Student Edition 13. Privremena dozvola za NI Multisim traje sedam dana što je prikazano na slika 6.1. (preostao još jedan dan). NI Multisim Student Edition 13 je korišten za simulaciju komparatora, jer u Electronics Workbench-u nije moguće uključiti model fotodiode u simulaciju. Stoga, simulacija s Electronics Workbench-om obuhvaća samo ulazni signal iz LED RGB.

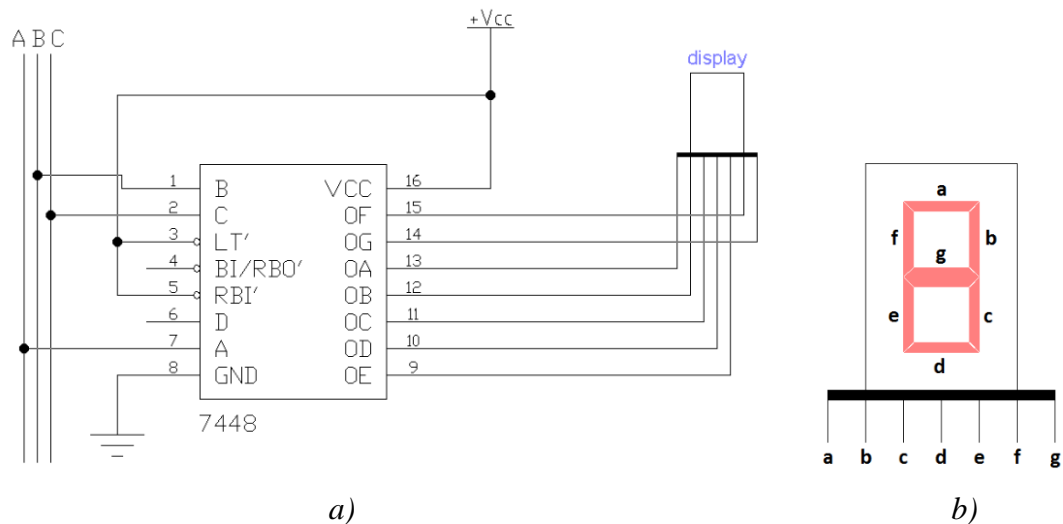


Slika 6.1. Privremena dozvola za NI Multisim Student Edition 13.

6.1. Princip rada komponenata

6.1.1. 7448 upravljački sklop za 7 segment display

Slika 6.2. prikazuje upravljački sklop ili dekodler koji ovisno o ulaznoj kombinaciji na određenim izlazima daje logičku jedinicu. Tablica 6.1. prikazuje za koju ulaznu kombinaciju, dekodler daje određene izlaze ovisno o tome koji dekadski broj će se prikazati na display-u. Display se sastoji od sedam LED dioda koje su označene slovima od a do f slika 6.2. Ako na ulaze A, B i C upravljačkog sklopa 7448 dođe niska razina, na izlazima a, b, c, d, e i f je visoka razina i prikaz na display-u odgovara dekadskom broju „0“.



Slika 6.2. a) Upravljački sklop za 7 segment display, b) oznaka LED dioda na 7 segment display.

Tablica 6.1. Tablica stanja za 7448 dekodera.

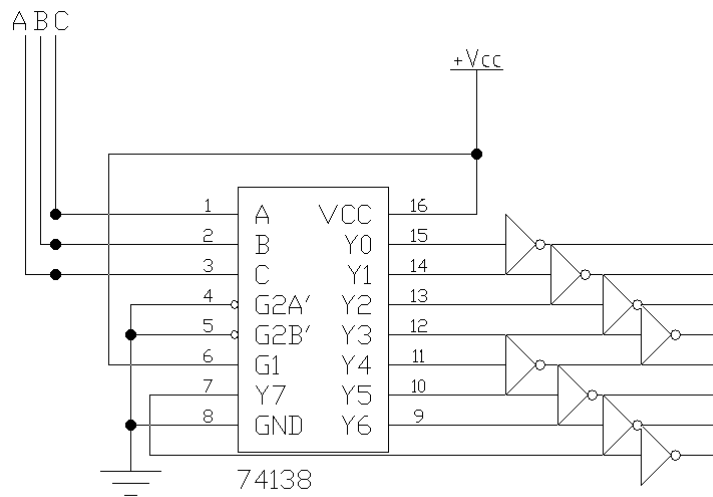
	Ulazi			Izlazi						
	C	B	A	a	b	c	d	e	f	g
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
2	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1
3	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
4	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
5	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
6	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0

6.1.2. 74138 3/8 dekodera

3/8 dekodera koji ovisno o ulaznoj kombinaciji na određenom izlazu daje logičku jedinicu. Za svaki izlaz postoji jedna kodna riječ za koju je određeni izlaz jednak logičkoj jedinici, a za sve druge kodne riječi izlaz je jednak logičkoj nuli. Ako dekodera ima n ulaza onda ima 2^n izlaza.

U radu je korišten 74138 3/8 dekodera koji na svojim izlazima ima suprotne razine od idealnog dekodera, te su zato na svakom izlazu NOT vrata koji negiraju izlaz (0 -> 1, odnosno 1 -> 0) slika 6.3. tablica 6.2. prikazuje tablicu stanja za 3/8 dekodera.

$G2A$, $G2A$ i $G1$ su enable ulazi.



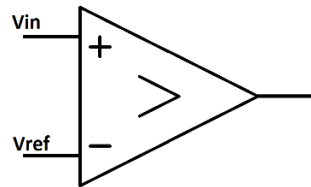
Slika 6.3. 3/8 dekodler.

Tablica 6.2. Tablica stanja za 74138 dekodler.

	Ulazi			Izlazi							
	C	B	A	Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1
2	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
3	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
4	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1
5	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1
6	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

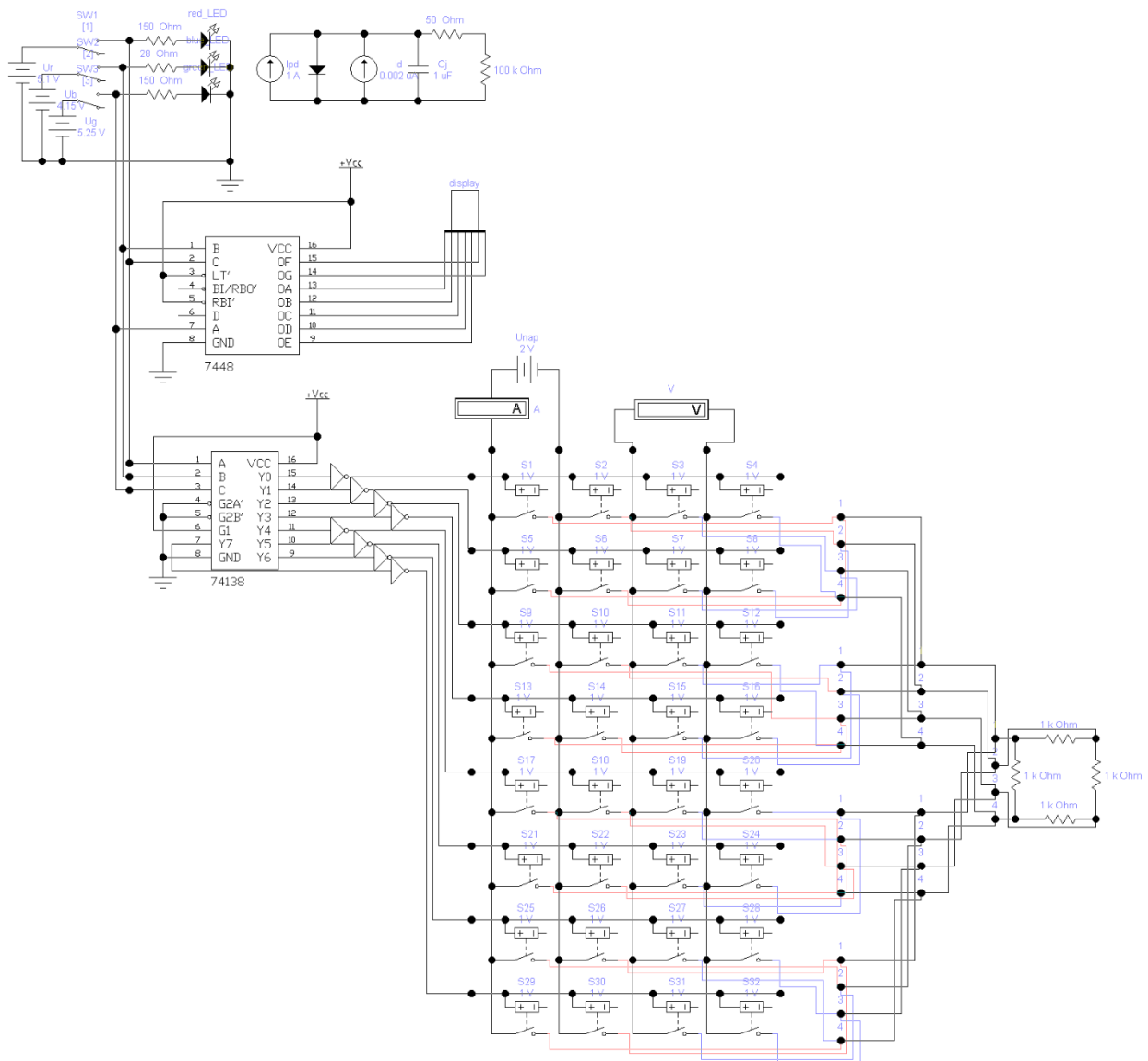
6.1.3. Komparator

Komparator je sklop koji uspoređuje dva analogna signala na ulazu i ovisno o ishodu na izlazu daje signal visoke ili niske razine. U radu je korišten idealni komparator koji na izlazu daje visoku razinu ako su V_{in} i V_{ref} ulazi jednaki.



Slika 6.4. Simbol komparatora.

6.2. Simulacija u Electronics Workbench-u



Slika 6.5. Prototip mjernog sklopa.

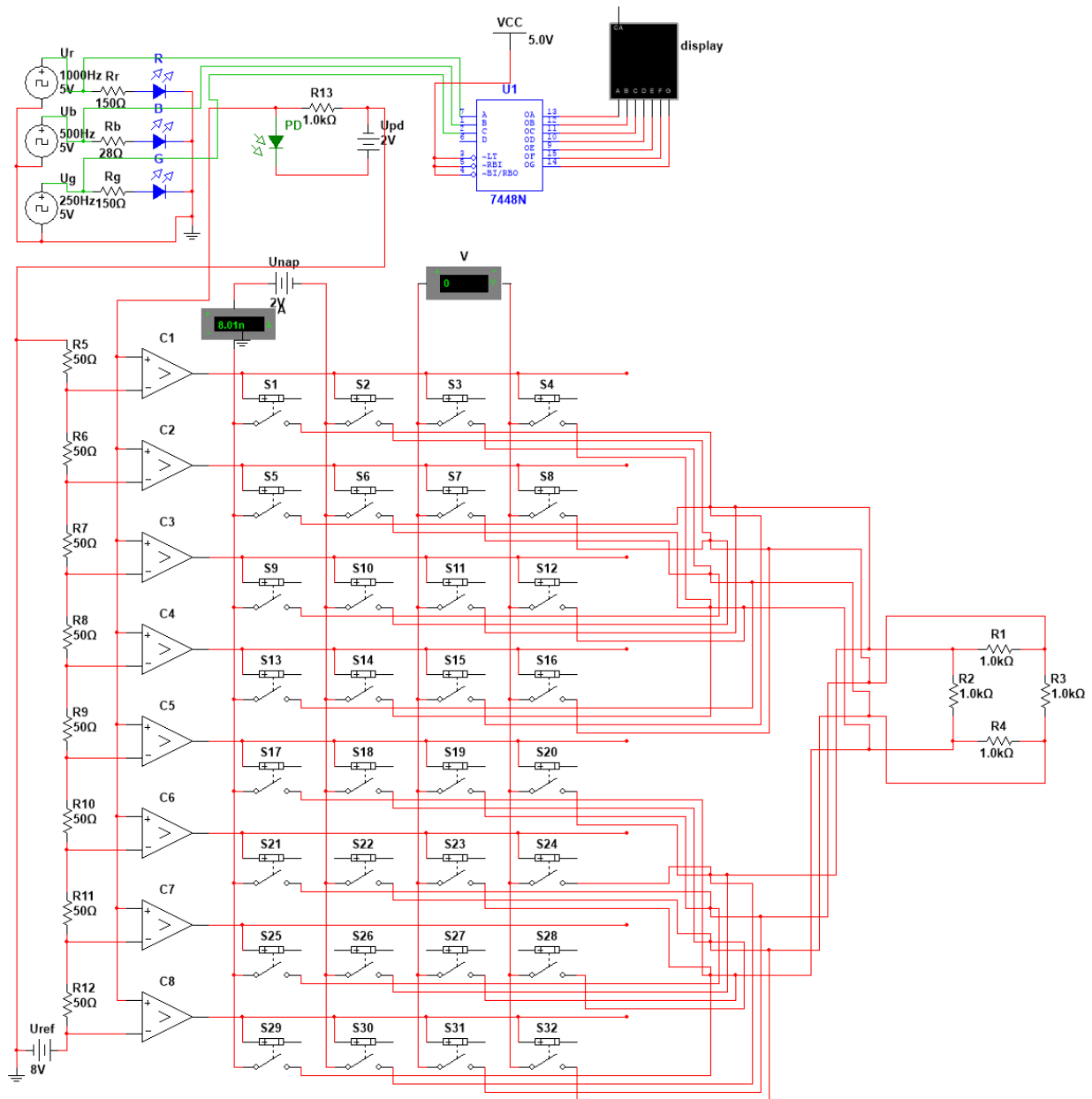
Na slici 6.5. prikazana je simulacija sklopa za mjerenje otpornosti Van der Pauw metodom. Svaka LED osnovne monokromatske boje: crvene, R; zelene, G i plave, B, te upravljački sklop za display i 3/8 dekodeer priključeni su na konstantan istosmjerni napon. Uključivanje-isključivanje LED RGB osnovnih monokromatskih boja odnosno upravljanje varijablama A, B i C ostvareno je pomoću sklopki S1, S2 i S3. Na taj način da crvena LED je A varijabla, plava LED je B varijabla i zelena LED je C varijabla.

Tablica 6.3. Tablica stanja za mjerni sklop.

	Ulazi			Boja	Izlazi na 7448							Broj	Izlazi na 74138							
	C	B	A		0A	0B	0C	0D	0E	0F	0G		Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
0	0	0	0	Mrak	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	Crvena	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	Plava	1	1	0	1	1	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0
3	0	1	1	Ružičasta	1	1	1	1	0	0	1	3	0	0	0	1	0	0	0	0
4	1	0	0	Zelena	0	1	1	0	0	1	1	4	0	0	0	0	1	0	0	0
5	1	0	1	Žuta	1	0	1	1	0	1	1	5	0	0	0	0	0	1	0	0
6	1	1	0	Plavo-zelena	0	0	1	1	1	1	1	6	0	0	0	0	0	0	1	0
7	1	1	1	Bijela	1	1	1	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	1

Tablica 6.3. prikazuje sva moguća stanja. Na svakom izlazu iz 3/8 dekodera spojene su po četiri sklopke koje se aktiviraju naponom. Kada je pojedini izlaz iz dekodera na visokoj razini, uključuju se četiri sklopke koje su zadužene za mjerenje Van der Pauw metodom. Prve dvije su zadužene za protok i mjerenje struje, a druge dvije za mjerenje napona voltmetrom.

6.3. Simulacija u NI Multisim-u



Slika 6.6. Prototip mjernog sklopa.

Na slici 6.6. prikazana je simulacija sklopa za mjerenje otpornosti Van der Pauw metodom, gdje je pomoću svjetlosti generirana kodna riječ za odabir kombinacije grana i čvorova za određivanje otpornosti. Kodna riječ detektira se usporedbom napona na otporu u seriji s fotodiodom. Svaka LED boja ima svoj funkcijski generator kao izvor pravokutnog signala konstantne amplitude i frekvencije. Komparatori C1-C8 spojeni su kao što je prikazano na slici. Komparator C8 je spojen na referentni napon od 8 V, svaki sljedeći ulaz u komparator manji je za pad napona na otporu, dakle komparator C7 će imati referentni napon od 7 V, C6 od 6 V,

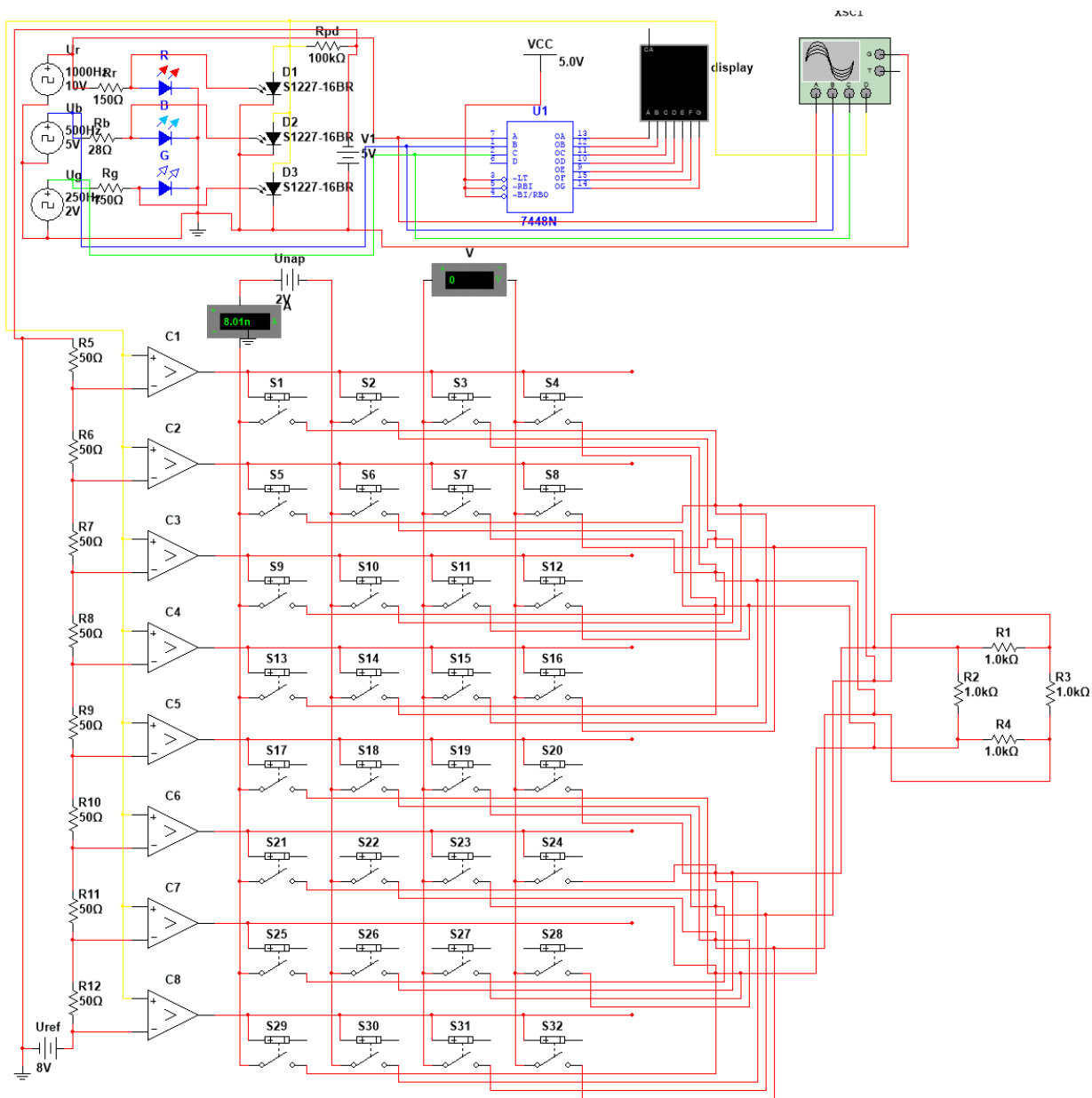
itd. Komparator uspoređuje referentni napon i pad napona na otporniku koji je u seriji s fotodiodom. Za potrebe simulacije postavljeni su takvi naponi da: 1 V odgovara mraku, 2 V crvenoj, 3 V plavoj, 4 V ružičastoj, 5 V zelenoj, 6 V žutoj, 7 V plavo-zelenoj i 8 V bijeloj LED boji.

Rezultati simulacije s NI Multisim

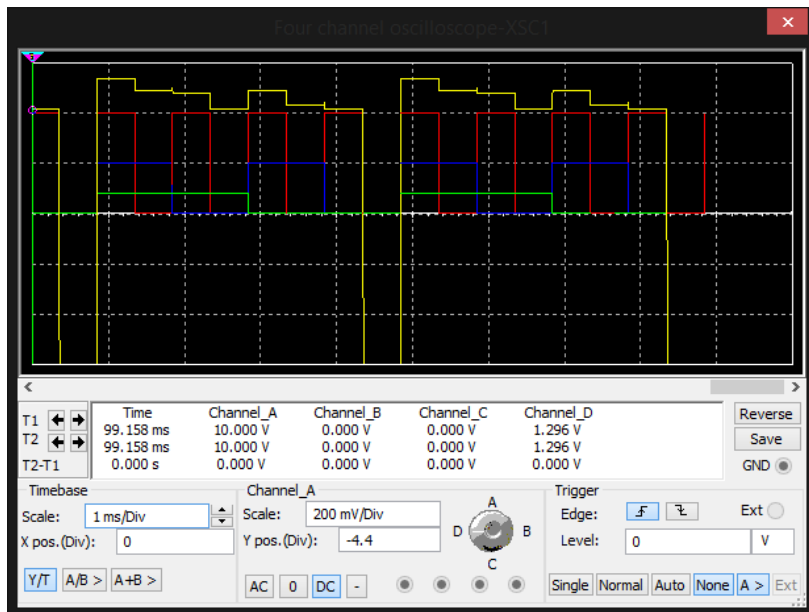
U NI Multisim LED RGB simulirana je s tri LED osnovnih monokromatskih boja. Na temelju našeg opita zaključujemo BPW Si fotodioda ima najveću fotostruju za plavu boju, potom za zelenu i na kraju za crvenu boju apsorbirane svjetlosti pri struji od 20 mA kroz LED. U NI Multisim može se mijenjati jedino struja kroz LED. Stoga je u simulaciji slika 6.7., za pojedinu osnovnu monokromatsku boju svjetlosti LED, odabrana odgovarajuća vrijednost struje kroz pojedinu LED.

Kod osvjetljenja fotodiode s proizvoljnom kombinacijom osnovnih monokromatskih boja LED istog intenziteta svjetlosti, fotostruja fotodiode je jednaka zbroju fotostruja nastalih zbog osvjetljenja s osnovnim monokromatskim komponentama svjetlosti jednačba (4.6.) [2]. U sklopu su stoga fotodiode vezane paralelno s otporom tereta.

Sve kombinacije iz tablice istine za funkcije s tri varijable (R, G, B) u simulaciji postignute su s narinutim funkcijskim generatorom pravokutnih impulsa odgovarajuće amplitude napona za svaku monokromatsku boju izvora svjetlosti LED.



Slika 6.7. Prikazan je sklop za simulaciju odziva fotodiode na sve kombinacije RGB pobuda.



Slika 6.8. Prikazan je odziv fotodiode na pobude.

7. ZAKLJUČAK

U suvremenim telekomunikacijama i računarstvu sve se više koriste optoelektronički elementi. Za prijenos i obradu podataka koriste se svjetlosni signali. Tehnologija uključuje emisiju svjetlosti, prijenos i detekciju s elektro-optičkim elementima. Multipleksiranje/demultipleksiranje obavlja se s fotodiodom.

U radu je prikazan prototip senzora za detekciju osnovnih boja vidnog djela spektra. U prvom dijelu dana je karakterizacija RGB LED i Si fotodiode. Izmjerene su strujno-naponske karakteristike za sve monokromatske i kromatske boje dobivene kombinacijama osnovnih monokromatskih boja kako bi se odredila radna točka fotodiode. Radna točka LED odabrana je prema specifikaciji proizvođača za intenzitet svjetlosti pri struji od 20 mA. Potom su izmjereni odzivi fotodiode na impulse svjetlosti spomenutih boja. Ispitani su odzivi Si fotodiode na impulse svjetlosti LED diode osnovnih monokromatskih boja: crvene, zelene, plave, kao i na impulse kromatskih boja nastalih miješanjem osnovnih boja što predstavlja multipleksirani signal. Fotodioda je reverzno polarizirana za sve slučajeve mjerenja. Frekvencija modulacije optičkih signala svake boje je mnogokratnik prve odabrane boje, kako bi se osigurala sinkroni odnos stanja uključen-isključen u tijeku svakog ciklusa. Optička snaga ugađana je sa strujom kroz LED od 20 mA za svaku LED za koju su fotostruje fotodiode dobivenog signala različitih amplituda pri narinutom nepropusnom naponu na fotodiodu od 2 V. Tako dobiveni signal koristi za demultipleksiranje tj. kao ulazni signal u digitalni sklop koji može biti mikrokontroler. Opisano je testirano na primjeru Van der Pauw metode, gdje je potrebno razlučiti osam mogućih kombinacija ulaznih signala.

Za Van der Pauw metodu potrebno je adresirati osam različitih kombinacija odabranih grana i čvorova. Van der Pauw metoda koristi se za mjerenje otpornosti i Hallvog koeficijenta uzorka. S obzirom da s tri osnovne boje možemo dobiti osam različitih vrijednosti fotostruje fotodiode razrađen je logički sklop iz LED kao izvora i fotodiode kao detektora za adresiranje sljedećeg stupnja sklopa kojeg čine komparatori. Komparatori upravljaju sklopkama za odabir grane i čvorova. Prikazani su rezultati mjerenja i simulacije sklopa pomoću Electronics Workbench i NI multisim.

Prednosti ovog senzora su brzina rada i veći broj različitih diskretnih stanja čime se smanjuje broj logičkih elemenata. U sljedećem koraku razvoja senzora za detekciju osnovnih boja, umjesto komparatorom i sklopkama, dobiveni signal iz fotodiode bi trebao upravljati mikrokontrolerom.

8. LITERATURA

- [1] Arpad A. B.; Dean P. J.: „Light-Emitting Diodes“, proceedings of the IEEE, vol. 60, No. 2, pp. 156-224, February 1972.
- [2] Gradišnik V.; Pavlović M.; Pivac B.; Zulim I.: „Study of the Color Detection of A-Si:H by Transient Response in the Visible Range“, IEEE transactions on electron devices, vol. 49, No. 4, pp. 550-556, April 2002.
- [3] Vieira M.; Louro P.; Fantoni A.; Fernandes M.: Vieira M. A., Barata M., „New stacked photodevices for signal multiplexing and demultiplexing applications in the visible spectrum“, 2009 6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices.

9. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Analizirana je Si fotodioda kao senzor svjetlosti i multipleksor/demultipleksor pobuđena sa svjetlom RGB LED. Na temelju izmjerenih strujno-naponskih karakteristika LED i fotodiode odabrana je radna točka za svaku boju emitirane svjetlosti. Izmjeren je odziv fotodiode na pulsirajuću svjetlost osnovnih monokromatskih boja i njihovih kombinacija sa svrhom multipleksiranja signala. Dobiveni signal je demultipleksiran pomoću komparatora i upotrijebljen za upravljanje daljnjim sklopom. Rad prototipa senzora ispitan je na modelu i računalnom simulacijom rada sklopa. Prototip senzora je ispitan i na primjeru mjerenja otpornosti poluvodiča s Van der Pauw-ove metodom.

Ključne riječi : LED, fotodioda, demultipleksor, multipleksor

Si photodiode as a light sensor and multiplexor/demultiplexor activated with a light emitting diode RGB LED is analyzed. Based on the LED and photodiode measured current-voltage characteristics the operating point for each emitted light color is choose. The photodiode transient response on the basic monochromatic light pulses are measured and their combination with aim of signal multiplexing. Obtained signal is demultiplexed with comparators and used to control the next step devices. The prototype is tested on the model and computer simulation. The sensor prototype is implemented on the Van der Pauw method measurement of semiconductor resistivity.

Keywords: LED, photodiode, demultiplexor, multiplexor