

# Diode

---

Župa, Maks

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Science / Sveučilište u Splitu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:166:225372>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-28**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Science](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU  
PRIRODOSLOVNO MATEMATIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

**DIODE**

Maks Župa

Split, rujan 2023.

# Temeljna dokumentacijska kartica

Završni rad

Sveučilište u Splitu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Odjel za politehniku  
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Hrvatska

## DIODE

Maks Župa

## SAŽETAK

Cilj ovog završnog rada je analizirati ključne aspekte i mehanizme vezane uz diodu kao elektronički element. U radu je opisan povijesni razvoj diode, različite tehnološke izvedbe diode i podjela na najčešće korištene oblike diode.

**Ključne riječi:** dioda, PN spoj, poluvodič

Rad je pohranjen u knjižnici Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu

**Rad sadrži:** 33 stranice, 32 grafička prikaza, 0 tablica i 40 literaturnih navoda. Izvornik je na hrvatskom jeziku.

**Mentor:** **Dr. sc. Siniša Antonijević**, *izvanredni profesor Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu*

**Ocjenjivači:** **Dr. sc. Siniša Antonijević**, *izvanredni profesor Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu*

**Dr. sc. Vladimir Pleština**, *izvanredni profesor Prirodoslovno matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu*

**Hrvoje Turić**, *predavač Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu*

Rad prihvaćen: **rujan, 2023.**

# Basic documentation card

Undergraduate thesis

University of Split  
Faculty of Science  
Department of politechnics  
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Croatia

## DIODES

Maks Župa

## ABSTRACT

The aim of this final thesis is to analyze the key aspects and mechanisms related to the diode as an electronic component. The paper describes the historical development of the diode, various technological implementations of the diode, and the classification of the most commonly used types of diodes.

**Key words:** diode, PN junction, semiconductor

Thesis deposited in library of Faculty of science, University of Split

**Thesis consists of:** 33 pages, 32 figures, and 40 references

Original language: Croatian

**Mentor:** **Siniša Antonijević, Ph.D.** *Associate Professor of Faculty of Science, University of Split*

**Reviewers:** **Siniša Antonijević, Ph.D.** *Associate Professor of Faculty of Science, University of Split*

**Vladimir Pleština, Ph.D.** *Associate Professor of Faculty of Science, University of Split*

**Hrvoje Turić, Lecturer of Faculty of Science, University of Split**

Thesis accepted: **September, 2023**

# IZJAVA

kojom izjavljujem s punom materijalnom i moralnom odgovornošću da sam završni rad s naslovom DIODE izradio samostalno pod voditeljstvom izv. prof. dr. sc. Siniše Antonijevića. U radu sam primijenio metodologiju znanstvenoistraživačkog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezao s fusnotama s korištenim bibliografskim jedinicama. Rad je pisan u duhu hrvatskog jezika.

Student

Maks Župa



# Sadržaj

|   |    |
|---|----|
| 1. UVOD .....   | 1  |
| 1.1. Općenito o diodama .....   | 1  |
| 1.2. Glavne funkcije .....  | 2  |
| 1.3. Povijest razvoja dioda .....   | 3  |
| 2. VAKUUMSKA DIODA .....  | 6  |
| 2.1. Građa i princip rada .....   | 6  |
| 2.2. Prednosti i nedostaci vakuumskih u odnosu na poluvodičke diode ..... | 7  |
| 3. POLUVODIČKA DIODA .....  | 9  |
| 3.1. Poluvodiči .....   | 9  |
| 3.2. PN spoj .....  | 10 |
| 3.3. Poluvodička dioda .....  | 12 |
| 3.3.1. Poluvodička ili kristalna dioda .....                              | 12 |
| 3.3.2. Ispravljačka dioda i princip rada .....                            | 14 |
| 4. VRSTE POLUVODIČKIH DIODA .....   | 16 |
| 4.1. Zener dioda .....  | 16 |
| 4.1.1. Princip rada i primjena .....                                      | 16 |
| 4.2. Svjetleća dioda ili LED .....  | 18 |
| 4.2.1. Princip rada .....   | 19 |
| 4.2.2. Primjena .....   | 20 |
| 4.3. Schottky dioda .....   | 21 |
| 4.3.1. Princip rada i primjena .....                                      | 21 |
| 4.4. Esakijeva ili tunel dioda .....                                      | 22 |
| 4.4.1. Princip rada i primjena .....                                      | 23 |
| 4.5. Kapacitivna dioda ili varikap .....                                  | 23 |
| 4.5.1. Princip rada i primjena .....                                      | 24 |

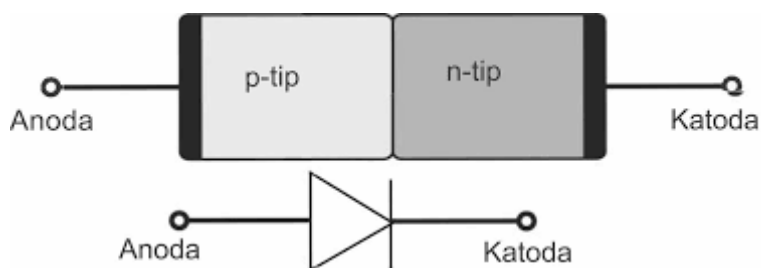
|        |                               |    |
|--------|-------------------------------|----|
| 4.6.   | Foto dioda.....               | 25 |
| 4.6.1. | Princip rada i primjena ..... | 25 |
| 4.7.   | Laserska dioda.....           | 26 |
| 4.7.1. | Princip rada i primjena ..... | 27 |
|        | Zaključak.....                | 29 |
|        | LITERATURA.....               | 30 |
|        | POPIS SLIKA .....             | 32 |



# 1. UVOD

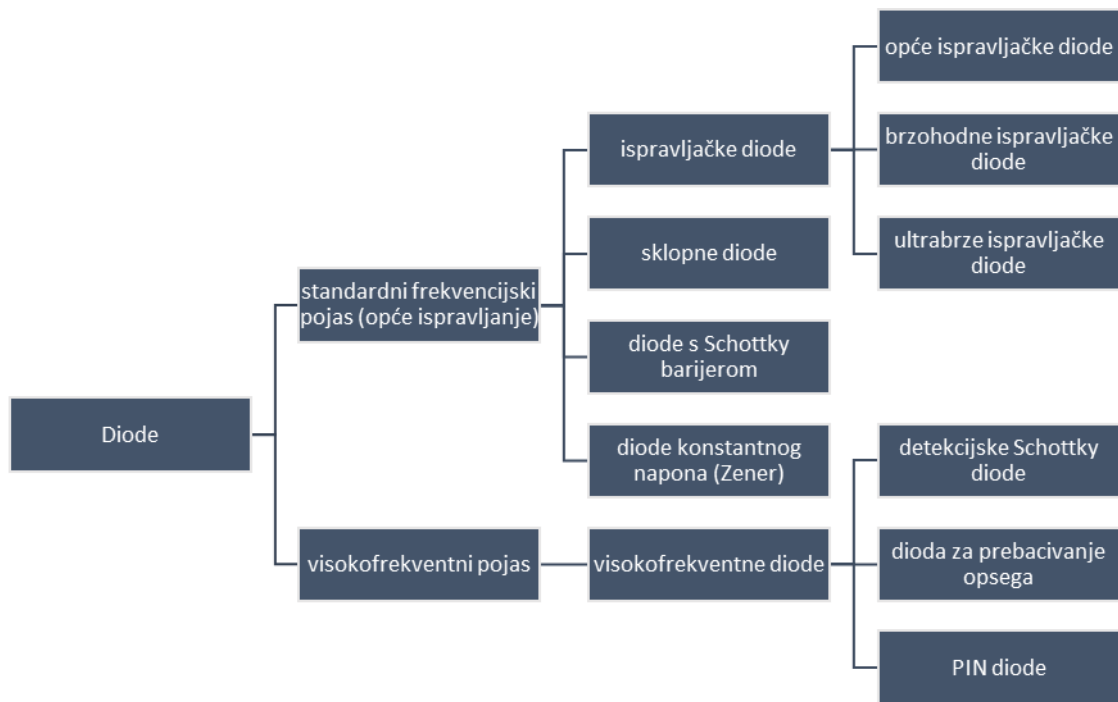
## 1.1. Općenito o diodama

Riječ dioda smislio je engleski fizičar William Henry Eccles 1919. godine kombinirajući grčki korijen „di“, što znači „dva“, i „ode“, što znači „put“, iako neki izvori kažu da je „ode“ posuđeno od "elektrode" koju je skovao Michael Faraday [2]. Dioda je elektronička komponenta s dva terminala kojoj je uglavnom uloga da provodi struju u jednom smjeru; ima nizak otpor (idealno nula) u jednom smjeru, a u drugom smjeru vrlo visok (idealno beskonačan). Poluvodičke se diode izvedu kao PN spoj ili kao spoj metal-poluvodič, kako pokazuje Slika 1.1.



Slika 1.1 Opća konstrukcija i simbol diode [40]

Diode se razvrstavaju u skupine na mnogo načina, npr. ovisno o tome od kojeg su materijala izrađene (silicij, germanij, galijev arsenid, silicijev karbid itd.), po funkciji (ispravljačke, svjetleće, foto diode, Zener diode, Schottky diode, tunel diode itd.), po frekvencijskom području itd. [1]. Na slici 1.2 prikazan je jedan primjer podjela dioda prema frekvenciji. P strana i N strana diode građene su od poluvodiča (najčešće silicija) koji su onečišćeni s drugim elementima kako bi dobili odgovarajuća svojstva. Na primjer, germanij N-tipa onečišćen je arsenom, a germanij P-tipa indijem. Da bi se dioda uključila u strujni krug na način da predstavlja mali otpor, odnosno dobro vodi struju, potrebno je P stranu spojiti na pozitivni (anoda) pol, a N stranu na negativni (katoda).



Slika 1.2 Podjela diode [3]

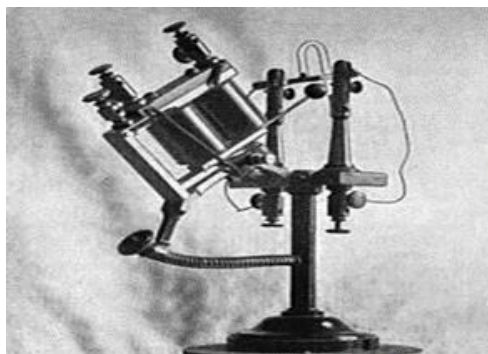
## 1.2. Glavne funkcije

Najčešća funkcija diode je da propušta struju u jednom smjeru (propusna polarizacija), dok u nepropusnoj polarizaciji (obrnuto spojena) ne propušta struju (postoji mala struja zasićenja, ali se ona često zanemaruje) - ovo se naziva ispravljački efekt [2]. Diodu možemo zamisliti kao elektroničku verziju povratnog ventila. Ovakve diode koriste se ponajviše za ispravljanje izmjenične struje, to jest pretvaraju val izmjenične struje u istosmjerni val, pa se zovu ispravljačke diode. Također, koriste se i u radio prijamnicima kao ispravljači za izdvajanje modulacije iz radio signala. Dioda pak mogu imati i kompliciranije ponašanje od običnog ispravljanja izmjeničnog signala. Na primjer, pad napona diode u propusnoj polarizaciji uglavnom ovisi o temperaturnim promjenama, a znatno manje od struje koja protječe, stoga ovaj efekt možemo iskoristiti kao temperaturni senzor ili kao izvor referentnog napona. Dioda spojena obrnuto (nepropusna polarizacija) dobro se opire prolasku struje dok ne dođe do točke proboja u kojoj naglo poraste struja. Zbog svoje nelinearne karakteristike dioda ima različite prednosti koje možemo iskoristiti za različite primjere. Na primjer, lavinske diode koriste se za zaštitu strujnih krugova od velikog napona, za regulaciju napona Zener diode koje koriste svojstvo proboja diode, za visokofrekvencijske oscilatore tunnel diode koje imaju negativni dinamički otpor na dijelu svoje strujno naponske karakteristike i tako dalje. Svojstva dioda mogu se prilagoditi

izborom različitih materijala od kojih su napravljene te odabirom različite koncentracije nečistoća P i N poluvodiča. Izaberemo li poluvodički materijal koji u propusnoj polarizaciji otpušta fotone dobit ćemo diodu koja emitira svjetlost (LED diodu).

### 1.3. Povijest razvoja dioda

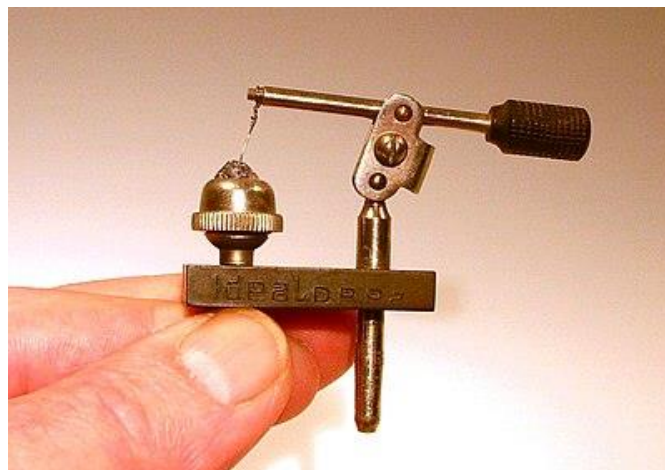
Godine 1873. engleski znanstvenik Frederick Guthrie primijetio je da bi postavljanje užarene metalne ploče spojene na uzemljenje blizu pozitivno nabijenog elektroskopa, ispraznilo instrument. To se nije dogodilo kada je elektroskop nosio negativan naboj. Godine 1880. William J. Hammer, pomoćnik Thomasa Edisona u njegovom laboratoriju u Menlo Parku, New Jersey, primijetio je plavi sjaj oko pozitivnog pola i zacrnjenu žicu na negativnom polu prve električne žarulje. Fenomen je izvorno nazvan „Hammerova fantomska sjena“, no Hammerov poslodavac ga je preimenovao u „Edisonov efekt“, kada je patentirao žarulju sa žarnom niti 1883. godine. Oba znanstvenika su zasebno otkrila protok naboja izazvan toplinom u jednom smjeru (termoelektronska emisija). Termoelektronska emisija je odašiljanje (emisija) elektrona iz metala, uz ionizaciju atoma, uzrokovana dotokom toplinske energije. Vanjski elektroni u metalima slabo su vezani, što je uzrok dobre električne vodljivosti metala. Dvadeset godina kasnije John Ambrose Fleming je iskoristio taj efekt kao detektor radijskih signala. On je patentirao termioničku diodu, prvi praktični elektronički uređaj s vakumskom cijevi. John Ambrose Fleming je radio kao konzultant tvrtke Edison Electric Light Company od 1881. do 1891., ali je radio za tvrtku Marconi Wireless Telegraph Company kad je patentirao termioničku diodu.



Slika 1.3 Koherer [5]

Ta je ista tvrtka 1901. godine demonstrirala prvi radio prijenos preko Atlantika – poslali su slovo „S“ u obliku Morsove abecede (tri točke). Rezultat je bio osporavan zbog previše

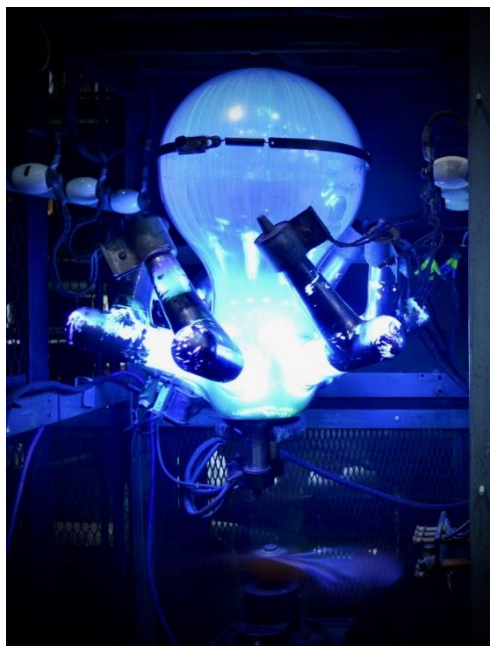
poteškoća u razlikovanju primljenog signala od pozadinske buke. Trebalo je pronaći detektor koji je osjetljiviji od tzv. koherera [5] (detektor radio valova) koji su se tada koristili. Fleming je 1904. godine isprobao žarulju s Edisonovim efektom. Radila je dobro, ispravljala je visokofrekventne oscilacije i prosljeđivala signale na galvanometar. Podnio je zahtjev za patent i tako je nastao Flemingov ventil, dvoelementna vakuumska cijev ili termionička dioda. Prvu poluvodičku diodu izmislio je njemački fizičar Ferdinand Braun i demonstrirao ju je 1886 g. u Leipzigu. Do otkrića je došao dok je proučavao karakteristike elektrolita i kristala koji provode elektricitet. Otkrio je da neke soli poput galenita [4] (olovni sulfid) provode struju i kad nisu otopljene. Zatim je otkrio da otpor galenita varira ovisno o iznosu i polaritetu napona, te da u slučaju kad je elektroda zašiljena žica, ove varijacije su izraženije. Ova opažanja su dovela do izuma galenitnog ispravljača s točkastim kontaktom.



Slika 1.4 Galenitni kristalni detektor [4]

Galenit je poluvodič pa je ovo bila poluvodička dioda. Galenitne kristalne detektore zamijenile su vakumske diode 1920-ih godina. Međutim, tijekom drugog svjetskog rata germanijski i silicijski poluvodički detektori s točkastim kontaktom su zaživjeli za mikrovalne radijske detektore jer detektori s vakumskim cijevima nisu mogli raditi na tim frekvencijama. Germanijske diode, koje nisu imale točkasti kontakt koji je trebalo podešavati, počele su se nakon drugog svjetskog rata proizvoditi u velikim količinama. Jedan ispravljač je bio poseban zbog svog izgleda i zvuka koji je proizvodio, to je bio Živin lučni ispravljač, prikazan na Slici 1.5. Izumio ga je Peter Cooper Hewitt, a razvijani su 1920-ih i 1930-ih. Koristili su se do 1970-ih kao ispravljači izmjeničnih struja i napona velikih iznosa (omogućavali su robusno ispravljanje pri radu sa velikim snagama). 1970-ih

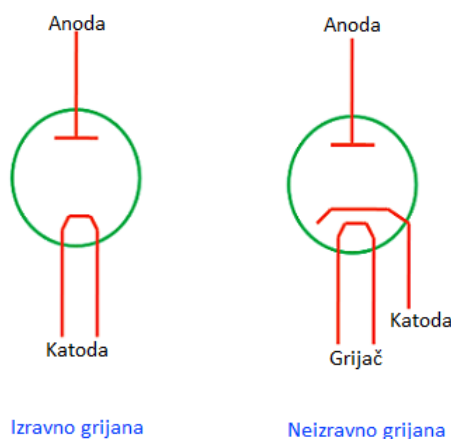
su ih zamijenili tiristori i triaci. Iako je prvi put konstruirana još 1886. godine, selenska dioda se počela upotrebljavati tek 1930-ih. Njihov izumitelj C. E. Fitts je kasnije otkrio da se mogu koristiti u televizorima, punjačima baterija visoke struje, radijima i fotokopirnim strojevima. Njih su 1960-ih zamijenili silicijski ispravljači koji imaju manji pad napona u propusnoj polarizaciji. Zbog njihove niske cijene IBM je pokušao razviti računalnu logiku koristeći selenske diode, no bile su nepouzdanе pa su zamijenjene silicijskim diodama. 4. travnja 2016. u časopisu Nature Chemistry objavljeno je da su istraživači sa Sveučilišta Georgia i Sveučilišta Ben-Gurion napravili diodu od DNK. Učinili su to umetanjem dviju malih molekula koralina na određena mjesta u posebno dizajniranom dupleksu DNK od 11 parova baza. Kada se napon od 1.1V primijeni preko strukture, u jednom smjeru protječe petnaest puta veća struja u odnosu na drugi, ovisno o polaritetu. To može utjecati na razvoj molekularnih elektroničkih uređaja, ali kao što je spomenuto u primjeru gore, u pravilu postoji odgoda prije praktične primjene.



Slika 1.5 Živin ispravljač [6]

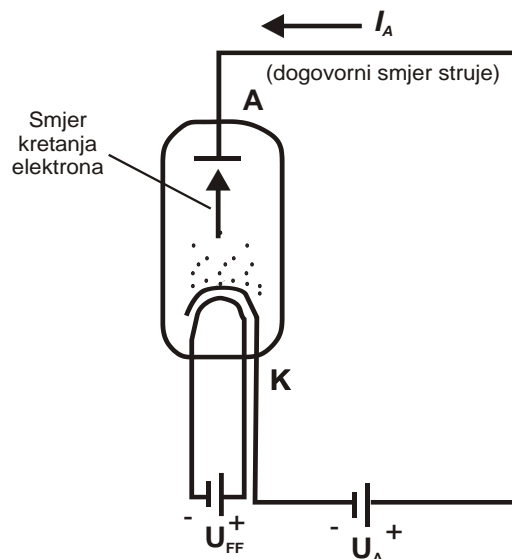
## 2. VAKUUMSKA DIODA

### 2.1. Građa i princip rada



Slika 2.1 Izravno i neizravno grijana vakuumska dioda [7]

Vakuumska dioda (John Ambrose Fleming, 1904. [7]), je elektronska cijev s dvjema elektrodama u vakuumu, od kojih je jedna užarena i emitira elektrone (termionska emisija). Kad se negativni pol (katoda) užari, emitira elektrone koje pozitivni pol (anoda) „skupi“, tada diodom teče struja. U slučaju da obrnemo polove, struja neće teći. Katoda je tanka zavojnica izrađena od legure volframa i torija ili barija, a spojena je s baterijom za žarenje niti preko miliampermetra i otpornika kojim se može regulirati jakost struje žarenja. Anoda je spojena s pozitivnim, a katoda s negativnim polom. Kod izvedbe s izravno grijanom katodom (lijevi dio Slike 2.1), toplinska energija se dovodi izravno na katodu. Mala količina toplinske energije dovoljna je za emitiranje slobodnih elektrona iz katode. Dovođenjem toplinske energije izravno na katodu, velik broj elektrona dobiva dovoljno energije da prekine vezu s katodom i postane slobodan elektron. Slobodni elektroni se tada nalaze u vakuumu i privlači ih pozitivno nabijena anoda [8]. Slična stvar se događa kod neizravno grijane katode (desni dio Slike 2.1). Toplinska energija se dovodi na grijač koji je predaje katodi. Kad se katoda dovoljno zagrije počne ispuštati slobodne elektrone u vakuum koje također privlači anoda, kako pokazuje Slika 2.2.



Slika 2.2 Shema rada vakuumske diode [8]

Zavisno od napona na koji su spojene anoda i katoda, gibanje elektrona u vakuumu se odvija različitim intenzitetom. Što je katoda negativnija, lakše odbija slobodne elektrone od sebe, a što je anoda pozitivnija, lakše privlači slobodne elektrone. Za veće napone, stoga više elektrona u istom vremenu dolazi do anode, što znači jaču struju. Kada bismo obrnuli polaritet, to jest anodu spojimo na negativni pol, a katodu na pozitivni pol struja ne bi tekla. U tom slučaju, katoda bi privlačila slobodne elektrone, to jest otežavala bi im put do anode koja bi ih pak odbijala jer je negativno nabijena. Bez prijelaza elektrona s katode na anodu nema ni protoka struje. Kod vakuumske diode, za razliku od PN spoja, nema nikakve struje u reverzno polariziranom spoju. Ako vakuumsku diodu ne spojimo na napon, stvara se prostorni naboj. Prostorni naboj je nakupina elektrona koja se stvara zbog toga što katoda emitira elektrone, a nikakve sile ne djeluju na elektrone u vakuumu.

## 2.2. Prednosti i nedostaci vakuumskih u odnosu na poluvodičke diode

Ovo su neke od prednosti vakuumskih dioda:

1. **Izdržljivost** – Mogućnost rada pri višoj snazi, naponu i temperaturi od poluvodičke elektronike. Također, može podnijeti i štete uzrokovane elektromagnetskim pulsom, koji se javlja tijekom nuklearne eksplozije.
2. **Preciznost** – Zbog toga što nema obrnutu struju zasićenja, točno prenosi signal.
3. **Šum** – Proizvode znatno manje električnog šuma od poluvodičkih dioda.

Nedostatci vakuumskih dioda su znatno izraženiji:

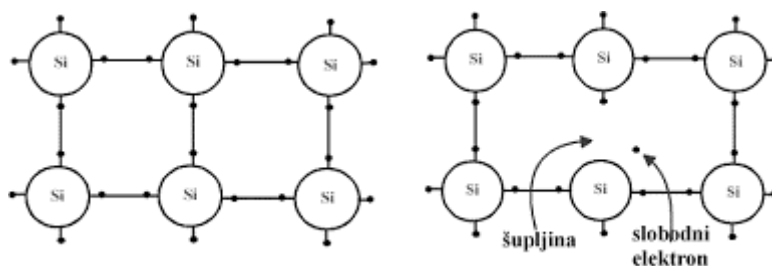
4. **Neučinkovitost** – Vakuumske diode zahtijevaju značajnu količinu energije za rad (zbog nužnosti grijanja katode), što ih čini manje učinkovitima od moderne poluvodičke elektronike.
5. **Veličina** – Vakuumske diode su relativno velike i glomazne u usporedbi sa poluvodičkim elementima, što ih čini znatno manje prikladnim za kompaktnu elektroniku.
6. **Lomljivost** – Vakuumske diode su osjetljive i lako se mogu oštetiti, zahtijevaju pažljivo rukovanje i skladištenje.
7. **Visoka cijena** – Vakuumske diode su tipično skuplje od poluvodičkih dioda.
8. **Zastarjela tehnologija** – Vakuumske diode uvelike su zamijenjene poluvodičkom elektronikom, zbog čega su slabije razvijane i manje dostupne onima koji ih žele koristiti ili popraviti.
9. **Minijaturizacija** – Za razliku od poluvodičkih elemenata koji se mogu smanjiti na veličine manje od 10 nm, s vakuumskim diodama granice minijaturizacije su mnogo redova veličine više.



## 3. POLUVODIČKA DIODA

### 3.1. Poluvodiči

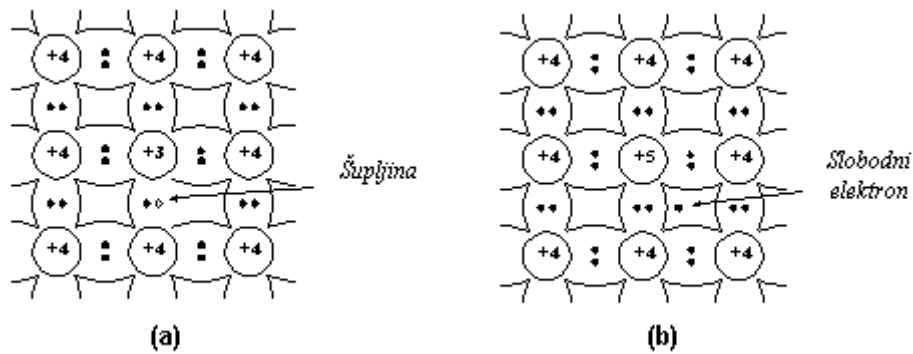
Poluvodički materijal je tvar koja ima električnu vodljivost između vodiča, kao što je bakar, i izolatora, kao što je staklo. Opor poluvodiča opada s povećanjem temperature, za razliku od metala koji pokazuju suprotno ponašanje. Promjene u vodljivim svojstvima poluvodiča mogu se postići dodavanjem nečistoća („dopiranje“) u kristalnu strukturu [11]. Dopiranje je pojam u proizvodnji poluvodiča kada se namjerno onečišćava intrinzični (čisti) poluvodič u svrhu mijenjanja njegovih električnih, optičkih i strukturnih svojstava. Dopirani materijal se naziva ekstrinzični (onečišćeni) poluvodič. Kada postoji prisutnost dvaju različito dopiranih područja unutar istog kristala, stvara se poluvodički spoj.



Slika 3.1 Pucanje kovalentne veze između atoma silicija [12]

Ponašanje nositelja naboja, koji uključuju slobodne elektrone i elektronske šupljine, u tim spojevima je osnova za diode, tranzistore i većinu suvremene elektronike. Elektronske šupljine su mjesta u kristalnoj rešetci kojima nedostaje negativnog naboja, pa se šupljine označavaju kao pozitivno nabijene (Slika 3.1). Primjeri poluvodičkih materijala uključuju silicij, germanij, galijev arsenid i elemente u blizini tzv. "metaloidnog stubišta" na periodnom sustavu elemenata. Silicij je ključni materijal za izradu većine elektroničkih sklopova. Vodljivost silicija povećava se dodavanjem male količine (reda 1 u  $10^8$ ) peterovalentnih (antimon, fosfor ili arsen) ili trovalentnih (bor, galij, indij) atoma. Osim dopiranjem, vodljivost poluvodiča može se poboljšati i povećanjem njegove temperature. Povećanjem temperature puca sve više kovalentnih veza, a njihovim pucanjem nastaje jedan elektron i jedna šupljina. Ovaj efekt se pojačava eksponencijalno s povećanjem

temperature, stoga se elektroničkim komponentama baziranim na poluvodičima mora osigurati adekvatno hlađenje. Uglavnom su granične vrijednosti ispod 100°C. Suvremeno proučavanje svojstava poluvodiča oslanja se na kvantnu fiziku da objasni kretanje nositelja naboja u kristalnoj rešetki.



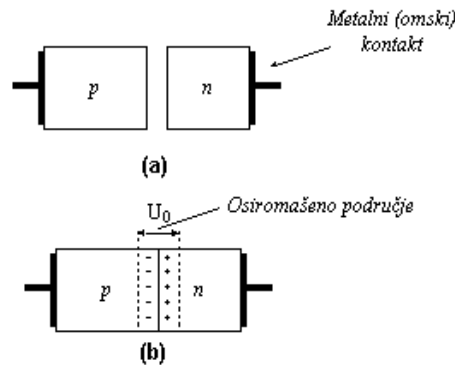
Slika 3.2 a) P-tip poluvodiča, b) N-tip poluvodiča [13]

Dopiranje uvelike povećava broj nositelja naboja unutar kristala. Kada dopiramo poluvodič s trovalentnim atomima u kristalu će prevladavati šupljine, stoga se naziva „P-tip“ (P kao pozitivni), a kada ga dopiramo s peterovalentnim atomima prevladavati će slobodni elektroni i naziva se „N-tip“ (N kao negativni), kako pokazuje Slika 3.2. Poluvodički materijali koji se koriste u elektroničkim uređajima su dopirani pod preciznim uvjetima za kontrolu koncentracije i područja dopanata P-tipa i N-tipa. Dopiranjem PN spoja povećavamo koncentraciju većinskih nositelja naboja dok manjinski ne ovise od dopanata. Manjinski nositelji nastaju pucanjem kovalentnih veza; njihov broj jako ovisi o temperaturi i na sobnim temperaturama je zanemarivo mali. Većinski nositelji nastaju najvećim dijelom ionizacijom dopanata na sobnim temperaturama, i njihova koncentracija je neovisna o temperaturi, osim za vrlo niske temperature.

### 3.2. PN spoj

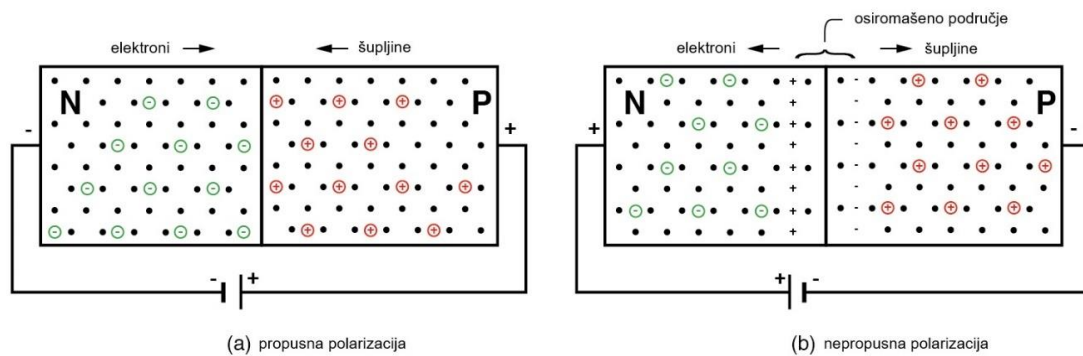
PN spoj, kako ime sugerira, nastaje spajanjem P-tipa poluvodiča i N-tipa poluvodiča. P-tip je preplavljen šupljinama, a N-tip elektronima, te kad se dodirnu nastaje, zbog velike razlike u koncentraciji većinski nositelja, velika struje difuzije [14]. Premještanjem većinskih nositelja s mjesta veće koncentracije ka manjoj (difuzija) poremetit će se i električna ravnoteža između pokretnih nositelja i primjesnih iona. Kao posljedica stvoriti

će se električno polje koje će se suprotstaviti difuznom kretanju nositelja naboja te će se stvoriti osiromašeno područje oko polja kontakta (Slika 3.3). Osiromašeno (intrinzično) područje, kako mu i sam naziv ukazuje, osiromašeno je od pokretnog naboja. U PN spoju, bez vanjskog primijenjenog napona, postiže se stanje ravnoteže u kojem se na spoju stvara razlika potencijala. Ova razlika potencijala naziva se ugrađeni potencijal.



Slika 3.3 a) Prije kontakta, b) Poslije kontakta [15]

Spojimo li P dio PN spoja na pozitivni (+), a N dio na negativni (-) pol baterije dobiti ćemo propusno polariziran PN spoj. Zamijenimo li polove na PN spoju dobiti ćemo nepropusno polariziran PN spoj. Kod nepropusne polarizacije kao na Slici 3.4 pod b) P i N elektrode će povećati polje kontakta što će još potpuno onemogućiti difuziju većinskih nositelja naboja i PN spoj će pružiti vrlo velik otpor prolasku struje. Ovakav PN spoj je nepropusno polariziran. U obrnutom slučaju, kao na Slici 3.4 pod a), vanjski napon će umanjiti djelovanje polja kontakta, što će naglo povećati difuziju većinskih nositelja, tj. omogućiti protok struje. U ovom slučaju, PN spoj predstavlja mali otpor u krugu.



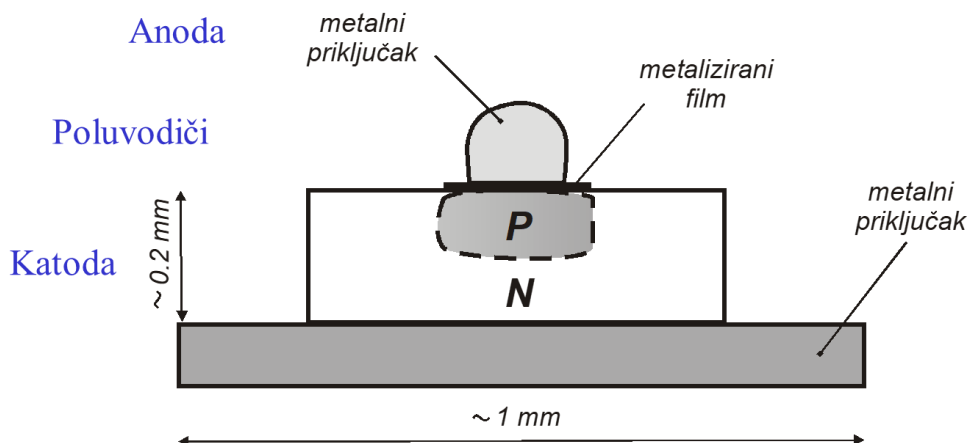
Slika 3.4 Propusna i nepropusna polarizacija [16]

U oba slučaja teče i struja zasićenja (manjinskih nositelja naboja) koja je uglavnom zanemariva jer je vrlo malog iznosa. Struja zasićenja nastaje zbog pucanja kovalentnih veza pri čemu nastaju parovi elektron-šupljina koji se razdvoje i rekombiniraju s drugim elektronima i šupljinama na kontaktu (P i N). Struja zasićenja jako ovisi o temperaturi. Porastom temperature broj manjinskih nositelja naboja se eksponencijalno povećava što rezultira eksponencijalnim povećavanjem i struje zasićenja. Pri temperaturama većim od 500K broj manjinskih nositelja postaje veći od većinskih nositelja i PN spoj postaje neupotrebljiv.

### 3.3. Poluvodička dioda

#### 3.3.1. Poluvodička ili kristalna dioda

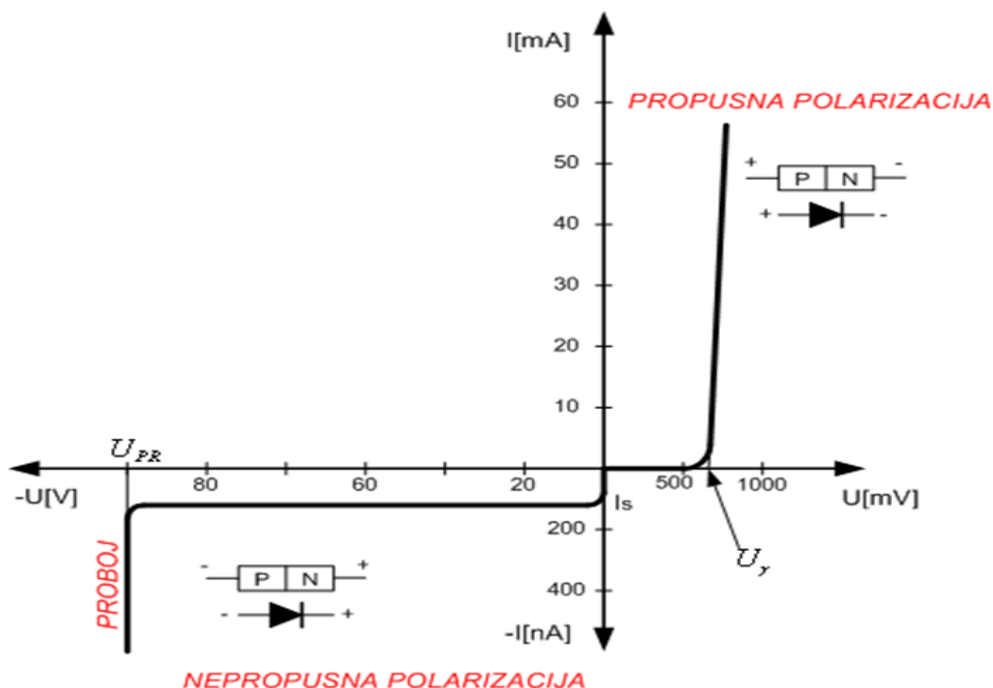
Poluvodička ili kristalna dioda sastoji se od dvaju slojeva poluvodičkoga kristala različitog tipa (PN prijelaz). Osim PN spoja na krajevima su pričvršćeni metalni izvodi kako bi se mogao primijeniti vanjski napon. Na Slici 3.5 je prikazan primjer sastavnih dijelova poluvodičke diode izrađene difuzijskim postupkom [17].



Slika 3.5 Građa poluvodičke diode [17]

Pri izradi dioda, uzima se blok kristala [17], u prikazanom primjeru (Slika 3.5) poluvodič N-tipa. Jedan dio se tehnološki obradi u P-tip poluvodiča (dovoljno visoka koncentracija akceptora, uz dovoljno visoku temperaturu difundira u N tip poluvodiča) i tako dobijemo PN spoj. Da bi se PN spoj mogao koristiti, potrebno ga je spojiti s ostalim elementima, za to služe metalni priključci na krajevima. Glavno svojstvo diode je da propušta struju samo u jednom smjeru (kad je propusno polarizirana). Dioda je nelinearni element što možemo

vidjeti iz strujno-naponske karakteristike PN diode sa Slike 3.6. Strujno-naponska karakteristika se sastoji od 3 dijela: propusna polarizacija, nepropusna polarizacija i proboj. Propusna polarizacija je stanje u kojem je dioda spojena na napon veći od 0V [8]. U tom području dioda se također ponaša nelinearno tako da do napona koljena  $U_\gamma$  gotovo da i ne provodi struju, a za napone veće od napona koljena, struja kroz diodu raste eksponencijalno i s malim porastom napona  $U$ . Napon koljena  $U_\gamma$ , tipično se uzima da je 0.7V za Si diode. Nepropusna polarizacija je stanje u kojem je dioda spojena na napon manji od 0V, a veći od napona proboja  $U_{pr}$ . U ovom slučaju, kroz diodu teče samo mala struja manjinskih nositelja (struja zasićenja  $I_s$ ) koja se ne mijenja s promjenom napona, već je ovisna samo o temperaturi. Napon proboja  $U_{pr}$  je napon pri kojem struja kroz diodu naglo raste sa i najmanjim daljnjim smanjenjem napona, i ukoliko se ne ograniči, rezultira uništenjem diode. Postoje dva uzroka zbog kojih nastaje proboj: tuneliranje (Zenerov proboj) i lavinski proboj. Kod tuneliranja valentni elektroni iz P poluvodiča prelaze u vodljivu vrpcu N poluvodiča. Ovo postaje moguće kada iznos napona nepropusne polarizacije postane dovoljno velik da u energetsom dijagramu PN spoja dođe do preklapanja valentne vrpce u P strani i vodljive vrpce u N strani.



Slika 3.6 Strujno-naponska karakteristika diode [18]

Dodatan uvjet je da barijera bude vrlo uska (red veličine 10 nm), što se postiže velikim koncentracijama onečišćenja. Za jako onečišćene poluvodiče, tuneliranje je moguće i za niske napone (tipično  $< 6V$ ). Lavinski proboj nastaje kod većih električnih polja i većih napona. Manjinski nositelji, koji slobodno prolaze kroz barijeru uslijed jakog električnog polja, ubrzaju se toliko da razbijaju kovalentne veze koje im se nađu na putu, što pak rezultira još većim brojem manjinskih nositelja koji se opet ubrzaju i tako se taj proces jako brzo povećava kao lavina, po čemu je i dobio naziv.

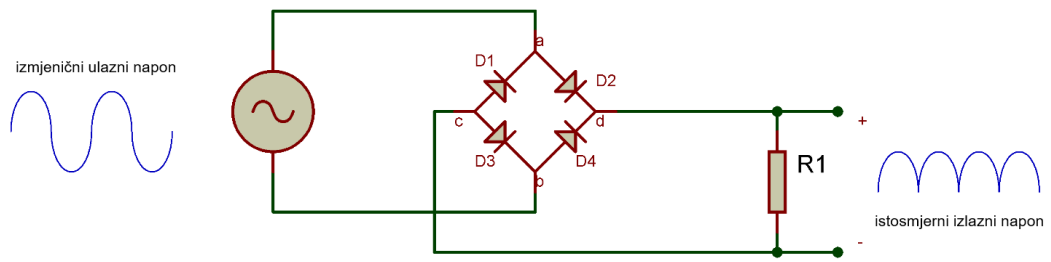
### 3.3.2. Ispravljačka dioda i princip rada

Ispravljačka dioda je dobila ime po tome što, kad je priključimo na izmjenični napon, negativni dio vala se ispravi, to jest pretvara izmjenični napon u istosmjerni. To se događa zbog toga što dioda propušta struju u jednom smjeru, dok je u drugom smjeru blokira. Gotovo svaka dioda se može koristiti kao ispravljačka jer svaka ima svojstvo propuštanja struje u jednom smjeru. Postoje i drugi parametri koji čine dobru ispravljačku diodu, kao naprimjer visok probojni napon i niske vrijednosti struje zasićenja. Dakle, ispravljačka dioda se može koristiti u primjenama ispravljača, na primjer, AC u DC napajanje [19].



Slika 3.7 Punovalna ispravljačka dioda [20]

Sama dioda radi poluvalno ispravljanje; pozitivni dio vala ostaje gotovo isti dok negativni nestaje, pa bi se moglo reći da gubimo pola vala (Slika 3.7). Punovalni mostni ispravljač (Gretzov spoj) pak ne poništava negativni dio ciklusa, već ga „obrne“ tako da postane pozitivni (slika 3.7), i tako dobijemo puni istosmjerni val. Zamijenimo li otpornik  $R1$  (Slika 3.8) sa „izgladujućim“ kondenzatorom dobiti ćemo signal još sličniji istosmjernom.

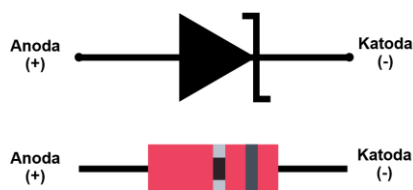


Slika 3.8 Punovalni mosni ispravljač [21]

## 4. VRSTE POLUVODIČKIH DIODA

### 4.1. Zener dioda

Zener dioda je posebna vrsta diode dizajnirana da radi u nepropusnom području, to jest da je negativno polarizirana. Zener dioda propušta struju samo kad napon negativne polarizacije prijeđe vrijednost probojnog (Zener) napona, pri čemu struja naglo raste, a napon ostaje približno isti (približno jednak Zener naponu). Ovaj tip diode se često koristi za stabilizaciju napona. Zener diode se proizvode s velikim izborom Zener napona. Simbol Zener diode je sličan simbolu obične diode, ali umjesto okomite crte nalazi se crta nalik slovu Z (Slika 4.1). Zener dioda je napravljena od jako onečišćenog PN spoja [22] .



Slika 4.1 Simbol i primjer fizičke izvedbe Zener diode [23]

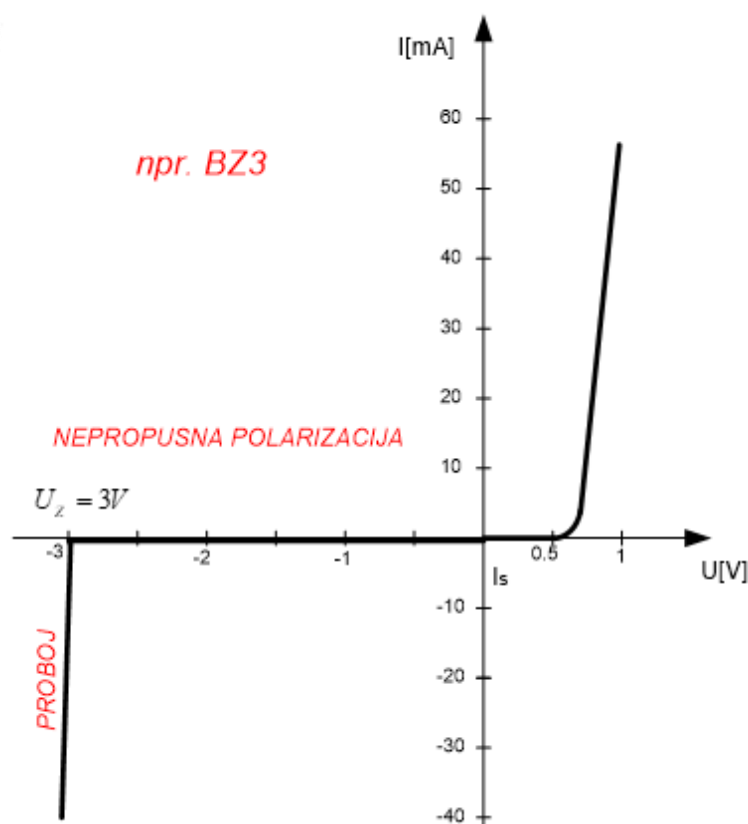
Američki fizičar, dr. Clarence Melvin Zener, po kome je kasnije i nazvana Zener dioda, prvi je opisao elektronička svojstva takve diode kada je istraživao mehanizme proboja poluvodičkih materijala. Kao teoretski fizičar u Bell Labs-u u New Jersey-u, napisao je istraživački rad kasnije objavljen 1934., identificirajući vrstu električnog proboja kasnije poznatog kao Zenerov efekt.

#### 4.1.1. Princip rada i primjena

Zener dioda se po temeljnoj konstrukciji i izgledu ne razlikuje od obične ispravljačke diode. Razlikuju se po visokoj koncentraciji primjesa u poluvodičima [8] ; kod Zener dioda mora se točno odrediti koncentracija primjesa u poluvodiču i ona je tipično znatno veća nego kod obične ispravljačke diode. Zener diode se uvijek koriste u nepropusnoj polarizaciji kako bi se iskoristilo svojstvo proboja (Zener proboja) da napon na diodi u proboju vrlo malo raste unatoč velikom porastu struje. Kod Zener dioda napon proboja je



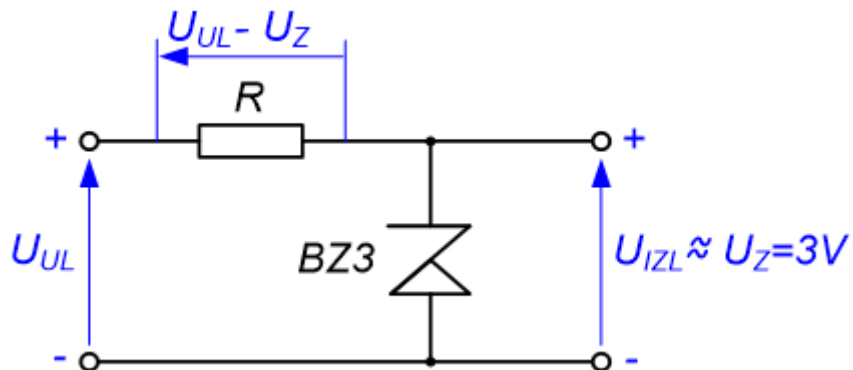
točno određen od strane proizvođača. Za napone od probojnog (Zener) napona (na Slici 4.2 to je 3V) do 0V dioda gotovo da i ne propušta struju (što je karakteristično za nepropusnu polarizaciju), a za vrijednosti ispod probojnog napona struja naglo raste sa i vrlo malim povećavanjem iznosa napona nepropusne polarizacije. Zener dioda se najčešće serijski spaja sa otpornikom tako da je struja ograničena na vrijednost koja neće oštetiti diodu. Ovakav sklop čini jednostavan stabilizator, koji će održavati napon na diodi približno konstantnim na vrijednost Zener napona dok god je po iznosu ukupni napon veći od Zener napona.



Slika 4.2 Strujno-naponska karakteristika Zener diode [8]

Za stabilizaciju napona najčešće se primjenjuju diode s probojnim naponima do 30V. Probojni („Zenerov“) napon je osnovni parametar Zener diode. Ulazni napon  $U_{ul}$  zaporno polarizira Zener diodu (BZ3), kojoj je u ovom primjeru Zener napon 3V. U ovom spoju Zener dioda „drži“ napon na približno 3V, a ostatak ulaznog napona je pad napona na otporniku  $R$ . Otpor na otporniku  $R$  je dovoljno velik da je struja dovoljno mala da se na diodi nikad ne stvara snaga veća od dopuštene. Ideja je da Zener dioda održava izlazni

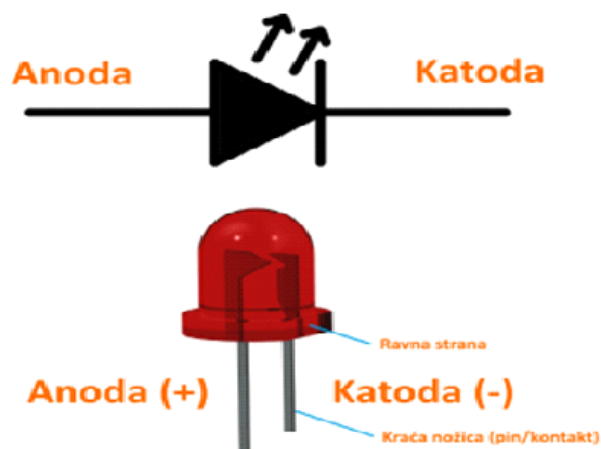
napon konstantnim, a da se ostatak promjenjivog napona s ulaza, prebaci na pad napona na otporniku [8] .



Slika 4.3 Jednostavni stabilizator napona sa Zener diodom [8]

## 4.2. Svjetleća dioda ili LED

LED (eng. *Light Emitting Diode*) dioda je dioda koja emitira svjetlost kad kroz nju prolazi struja. U diodi se prilikom rekombinacije šupljina i elektrona energija osim u toplinu (kao kod ostalih dioda) pretvara u vidljivu svjetlost. Svakom rekombinacijom kvant elektromagnetske energije se emitira u formi fotona, s frekvencijom (bojom) ovisnom o vrsti poluvodičkog materijala, točnije o energetske razmaku između vodljive i valentne vrpce PN spoja [8] . Simbol i izgled LED diode prikazan je na Slici 4.4.

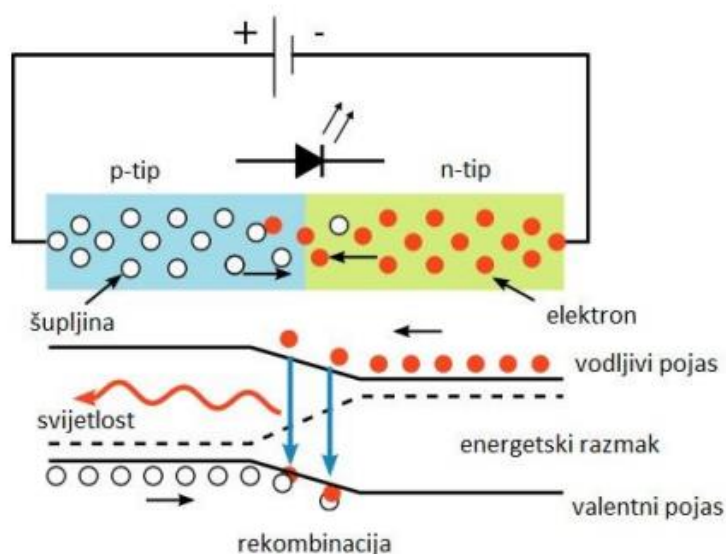


Slika 4.4 Simbol i izgled LED diode [24]

Danas postoji čitav niz materijala i boja koje se mogu dobiti. Npr. dioda od galij-fosfida (GaP) daje zelenu ili crvenu boju, a dioda od galij-arsenid-fosfora (GaAsP) daje crvenu ili žutu boju [8]. Kad se LED dioda propusno polarizira ona svijetli, a u nepropusnoj polarizaciji se ponaša kao obična dioda i propušta samo malu struju zasićenja. LED diode imaju znatno viši napon koljena od obične ispravljачke diode (cca. 1...4V).

#### 4.2.1. Princip rada

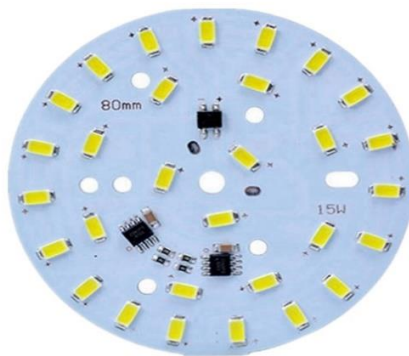
LED dioda je napravljena od posebnih materijala tako da se prilikom rekombinacije dio energije oslobađa u obliku fotona. Pri rekombinaciji sa šupljinom, elektroni iz vodljivog pojasa prelaze u valentni pojas koji je niže energetske razine. Ovo znači da pri svakoj rekombinaciji elektron gubi energiju, koja se u većini slučajeva pretvara u toplinsku, no kod LED dioda dio elektrona gubi energiju u obliku elektromagnetskog zračenja, tj. otpuštanja fotona (Slika 4.5). Razlika u energetske razine valentne i vodljive vrpce određuje valnu duljinu elektromagnetskog vala (fotona) koji se oslobađa, tj. boju emitirane svjetlosti. LED diode su vrlo učinkovit izvor svjetlosti zbog toga što se fotoni oslobađaju bez velikog utroška energije za razliku od žarulja na žarnu nit koje trebamo zagrijati do usijanja da bi se oslobodili fotoni. Dok žarulje sa žarnom niti imaju energetske učinkovitost (koliko se električne energije pretvori u svjetlost) do 10%, najefikasnije današnje LED žarulje imaju učinkovitosti od 40% do 50% [26].



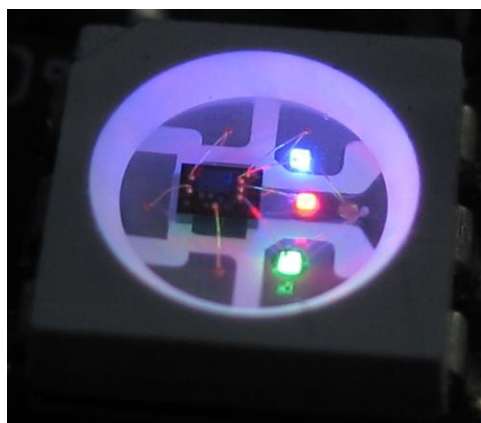
Slika 4.5 Generiranje svjetlosti kod LED dioda [25]

## 4.2.2. Primjena

LED diode se sve više koriste zbog svoje niske potrošnje, dobrih performansi, mogućnosti izrade u malim dimenzijama i jednostavnosti izrade. Najviše se koriste za vizualnu indikaciju stanja rada elektroničkih uređaja. Danas se sve češće koriste u domovima i industriji za osvjetljavanje (žarulja), u automobilima i motociklima, u televizorima i telefonima. Kao što je na Slici 4.6 vidljivo, možemo na jednoj pločici spojiti više dioda i tako dobiti jače osvjetljenje. Takve pločice se najviše koriste u žaruljama, ali mogu se izrađivati u bilo kojem obliku i konfiguraciji. Još jedan primjer je i RGB (eng. *red-green-blue*) LED dioda koja se sastoji od 3 obične diode crvene, zelene i plave boje (Slika 4.7). Odabirom intenziteta svijetljenja tih triju dioda dobije se čitav spektar drugih boja. Ovakav tip dioda je najviše popularan u kućanstvima.



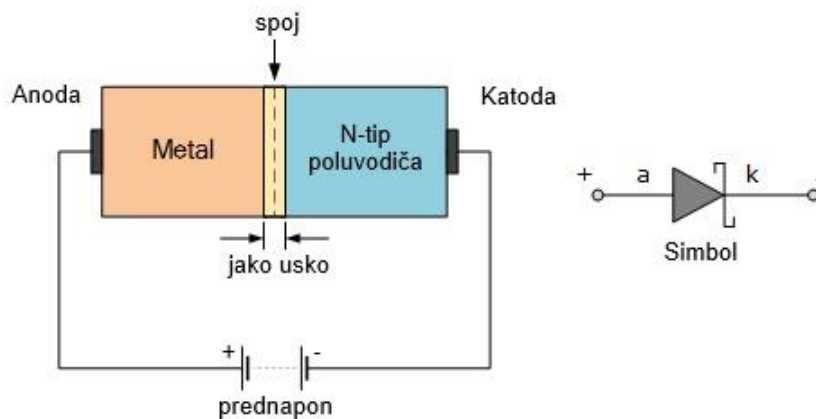
Slika 4.6 Pločica sa LED diodama [27]



Slika 4.7 RGB dioda [28]

### 4.3. Schottky dioda

Schottky dioda nazvana je po njemačkom fizičaru Walteru H. Schottkyju, a također je poznata kao dioda sa Schottky barijerom ili dioda s toplim nosačem. To je poluvodička dioda nastala spajanjem metala s poluvodičem. Kod običnog PN spoja, i P i N strana su poluvodiči. U slučaju Schottky diode P strana je metal, a N strana je lagano dopirani N-tip poluvodiča [29]. Tipični metali koji se koriste su molibden, platina, krom ili volfram i određeni silicidi (npr. paladij silicid i platina silicid), dok bi poluvodič tipično bio silicij N-tipa.



Slika 4.8 Shema Schottky diode i njen simbol [30]

Napon koljena (napon propusne polarizacije) Schottky diode je od 150mV do 450mV, što je manje od obične silicijske diode (600mV do 700mV). Uz niži napon koljena (što je povoljnije sa aspekta ispravljačkog djelovanja), ovaj tip diode karakterizira i brže prebacivanje iz stanja vođenja (propusna polarizacija) u zaporno stanje (nepropusna polarizacija). Simbol Schottky diode je poseban i lako prepoznatljiv (Slika 4.8) po katodi u obliku stiliziranog obrnutog slova "S".

#### 4.3.1. Princip rada i primjena

Kod Schottky diode jedna strana je metal, a druga poluvodič N-tipa. Na liniji dodira dviju strana stvara se takozvana Schottky barijera koja, za razliku od barijere kod običnog PN spoja, ima niži energetske prag, što znači lakši protok naboja. Ispravljački kontakt ovisi samo o većinskim nositeljima i mnogo je brži od PN spojeva, čija je brzina rada ograničena relativno sporom rekombinacijom manjinskih nositelja naboja (difuzijskim kapacitetom).

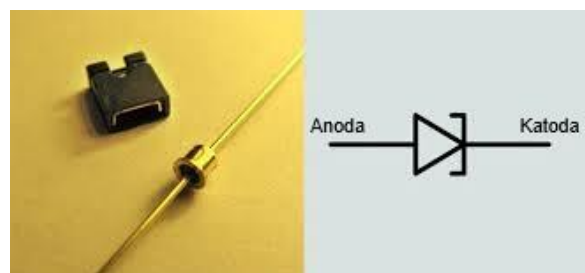


Slika 4.9 HP 5082-2800 dioda sa Schottky barijerom za opće namjene [29]

Sve ovo rezultira time da Schottky dioda ima nizak prednji napon, brzo vrijeme oporavka, a zbog niskog napona se manje energije gubi na toplinu od obične diode. U odnosu na običnu PN diodu, nedostatak je znatno veća struja zasićenja i niži probojni naponi. Zbog svojih prednosti koriste se za ograničavanje (manjih) napona, tipično na ulazima digitalnih integriranih krugova, za zaštitu od elektrostatskog pražnjenja, te kao ispravljači u prekidačkim izvorima napajanja (eng. *switching power supply*).

#### 4.4. Esakijeva ili tunel dioda

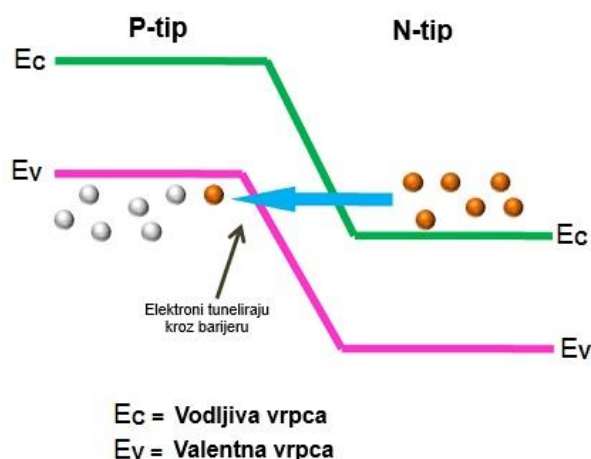
U kolovozu 1957. tunel diodu su izumili Leo Esaki, Yuriko Kurose i Takashi Suzuki. Tunel dioda je napravljena od PN spoja kod kojeg su poluvodiči jako onečišćeni (dopirani). Ova dioda je posebna po tome što ima negativni dinamički otpor. Koristi se isključivo u propusnoj polarizaciji [32]. Jako onečišćenje PN spoja rezultira vrlo malim osiromašenim područjem (red veličine nanometra), zbog toga se javlja tuneliranje. Tuneliranje označava izravan protok elektrona iz vodljivog pojasa na N-strani u valentni pojas na P-strani. Slika 4.10 prikazuje simbol i izgled tunel diode.



Slika 4.10 Izgled i simbol tunel diode [33]

#### 4.4.1. Princip rada i primjena

Kod običnih dioda, značajnija struja poteče tek za propusnu polarizaciju veću od napona koljena (tipično 0.7V za standardne ispravljačke Si diode). Međutim, u slučaju tunnel dioda, već za vrlo niske napone dolazi do brzog porasta struje propusne polarizacije.



Slika 4.11 Dijagram vodljive i valentne vrpce [32]

Tunnel diode omogućuju elektronima da prođu kroz energetska barijeru bez potrebe da imaju dovoljno veliku energiju da savladaju energetska barijeru. (Slika 4.11). Drugim riječima, elektroni mogu direktno 'tunelirati' iz vodljivog pojasa N strane u valentni pojas P strane, što rezultira protokom električne struje u tunnel diodi koja je najvećim djelom nastala zbog efekta tuneliranja, a tek manjim dijelom posljedica difuzije. Glavne prednosti tunnel dioda su: dug životni vijek, rad velikom brzinom, niska razina šuma te mala potrošnja energije. Zbog mogućnosti rada velikom brzinom koriste se kao ultra brzi prekidači. Tunnel diode koriste se najčešće u krugovima relaksacijskih oscilatora te u FM prijammnicima [32].

#### 4.5. Kapacitivna dioda ili varikap

Varikap (dioda promjenjivog kapaciteta) dioda je dioda bazirana na PN spoju čiji kapacitet ovisi o promjeni reverznog napona. Sve diode pokazuju ovaj promjenjivi kapacitet spoja, koji je kod običnih dioda štetan jer usporava rad diode. Varikap diode su namijenjene da se koriste kao promjenjivi kondenzatori, pa su namjerno izrađene da kapacitet spoja bude što veći. Varikap radi samo u zapornoj polarizaciji čiji iznos određuje kapacitet varikap diode i to na način da se sa povećanjem iznosa napona kapacitet smanjuje [34]. Simbol za varikap

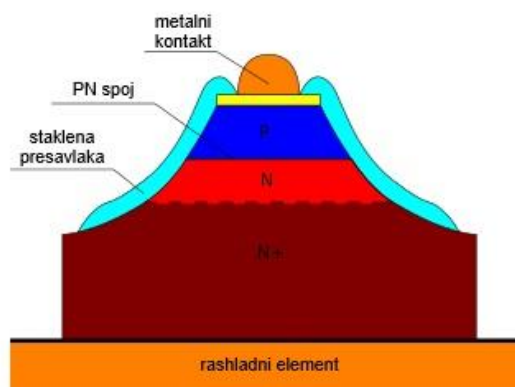
diodu je dobiven tako da su na obični simbol diode dodane dvije paralelne linije na strani katoda koje podsjećaju na kondenzator (Slika 4.12).



Slika 4.12 Simbol varikap diode [34]

#### 4.5.1. Princip rada i primjena

Varikap dioda bi uvijek trebala raditi zaporno polarizirana, zbog toga što u obrnutom smjeru električna struja ne teče. Tek nakon što primijenimo prednapon, počne teći struja. Količinom prednapona određujemo debljinu osiromašenog područja, o kojoj ovisi kapacitivnost spoja. Količina nečistoća u PN spoju također određuje kapacitet jer je obrnuto proporcionalna veličini osiromašenog područja. Kad primijenimo obrnuti prednapon (zaporna polarizacija), polje kontakta jača, više primjesnih iona ostaje „otkriveno“ i tako se širina osiromašenog područja povećava, a kapacitivnost smanjuje. Kapacitet se smanjuje jer se P i N strana osiromašenog područja mogu promatrati kao ploče pločastog kondenzatora, pa se širenjem osiromašenog područja ove „ploče“ udaljavaju (a, kako znamo, kapacitet dvije paralelne ploče je obrnuto proporcionalan njihovom razmaku). Varikap dioda se koristi u množiteljima frekvencija, parametarskim pojačalima i naponski upravljanim oscilatorima [34].

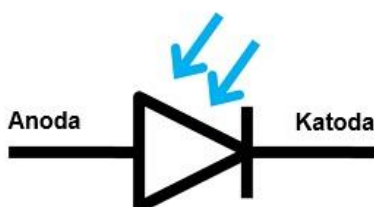


Slika 4.13 Unutarnja struktura varikapa [35]



## 4.6. Foto dioda

Foto dioda je dioda koja ima mogućnost pretvoriti svjetlosnu energiju u električnu. Još je poznata i kao foto-detektor, foto-senzor ili detektor svjetla. Dizajnirana je da radi u uvjetima zaporne polarizacije. Foto dioda je vrlo osjetljiva na svjetlost pa kada svjetlost ili fotoni padnu na foto diodu ona lako pretvara promjene svjetlosti u promjene struje i/ili napona. Solarna ćelija je također poznata kao foto dioda velike površine, ali solarna ćelija radi samo pri jakom svjetlu (ima znatno manju osjetljivost od obične foto diode). Simbol foto diode je sličan simbolu obične diode, ali ima dodane dvije strelice koje simboliziraju upadajuću svjetlost (Slika 4.14), slično kao što LED dioda ima strelice koje simboliziraju izlaznu svjetlost.

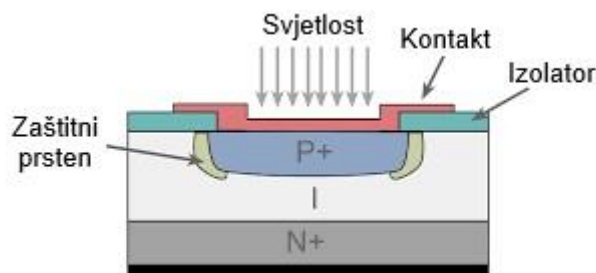


Slika 4.14 Simbol foto diode

### 4.6.1. Princip rada i primjena

U zapornoj polarizaciji teče struja manjinskih nositelja naboja. Ona je jako malog iznosa jer je koncentracija manjinskih nositelja pri normalnim uvjetima (sobna temperatura) vrlo mala, tipično znatno manja od koncentracije većinskih [36]. Foto diode su posebno dizajnirane da povećaju koncentraciju manjinskih nositelja u osiromašenom području kao posljedica djelovanja svjetla. Postoji više izvedbi foto dioda, ali najčešće su PN spojna i PIN foto dioda. Kada svjetlost padne na PN foto diodu kovalentne veze ne pucaju više samo zbog termalne energije, već i zbog energije upadnih fotona. Ovo uzrokuje znatno povećanje generacije parova elektron-šupljina, tj. znatno relativno povećanje driftne struje manjinskih nositelja. Električna struja koja nastaje u foto diodi uslijed primjene svjetlosti naziva se fotostruja. Kada se na zaporno polariziranu PN foto diodu ne dovodi svjetlost, kroz nju teče samo mala reverzna struja (struja zasićenja). Kod PIN dioda sve funkcionira na istom principu samo je razlika u konstrukciji. PIN diode se, kako im i ime sugerira,

sastoje od 3 dijela: P-tipa poluvodiča, N-tipa poluvodiča i intrinzičnog poluvodiča koji se nalazi između njih (Slika 4.15). Intrinzični poluvodič između P i N strane služi kao proširenje osiromašenog područja. Osiromašeno područje je, kako je već objašnjeno, osiromašeno od većinskih nositelja naboja, ista situacija je i kod intrinzičnog poluvodiča, ni on ih nema.

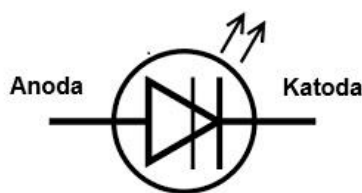


Slika 4.15 Struktura PIN diode [37]

Uvelike prošireno osiromašeno područje poboljšava rad foto diode jer samo elektroni i šupljine generirani u osiromašenom području proizvode fotostruju. Dodavanje intrinzičnog poluvodiča efektivno povećava površinu osiromašenog područja, što za rezultat ima povećanu osjetljivost kao i brži odziv na promjene svjetlosti. Različiti materijali koji se koriste za izradu foto dioda su silicij (Si), germanij (Ge), galijev fosfid (GaP), indij galijev arsenid (InGaAs), indijev arsenid antimonid (InAsSb), indij galijev arsenid proširenog dometa (InGaAs), živa kadmij Telurid (MCT, HgCdTe) [36]. Foto diode se koriste u detektorima dima, uređajima za reprodukciju kompaktnih diskova, u svemirske svrhe, za mjerenje vrlo niskih intenziteta svjetlosti, optičku komunikaciju i brojne druge primjene.

## 4.7. Laserska dioda

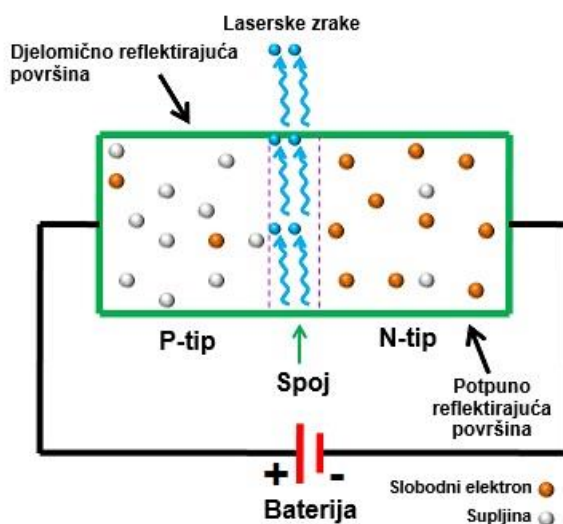
Laserska dioda je posebno dizajniran poluvodički spoj kod kojeg je glavna ideja da se prilikom rekombinacija elektrona i šupljina emitiraju fotoni, kao i kod LED dioda. To se postiglo izborom posebnih materijala za izradu P i N tipa poluvodiča. Odabirom različitih materijala za izradu poluvodiča dobijemo emitiranu svjetlost različitih valnih duljina, od infracrvenog do ultraljubičastog spektra [38].



Slika 4.16 Simbol laserske diode [39]

### 4.7.1. Princip rada i primjena

Za razliku od obične diode, cilj laserske diode je prilikom rekombinacije elektrona i šupljina proizvesti svjetlost [38]. Slična stvar se događa i kod LED dioda s razlikom da LED emitira nekoherentnu svjetlost, a laserska dioda emitira koherentnu (jednakih frekvencija) svjetlost. Laserska dioda je napravljena od dva sloja galij arsenida. Jedan sloj galij arsenida je dopiran da bude poluvodič N-tipa, a drugi da bude poluvodič P-tipa. U laserskim diodama selen, aluminij i silicij koriste se kao nečistoće. Postoje dvije vrste oslobađanja fotona: spontana i stimulirana emisija. Spontana emisija je kada se elektroni iz vodljivog pojasa ili slobodni elektroni rekombiniraju sa šupljinama iz valentnog pojasa, pri čemu su elektroni na višem energetske nivou i da bi se rekombinirali moraju otpustiti višak energije. Višak energije u ovom slučaju oslobađa se u obliku fotona.



Slika 4.17 Struktura laserske diode [38]

Stimulirana emisija je kada se uz pomoć pomoćnog izvora svjetlosti, tj. fotona ubačenih u PN spoj prisiljava slobodne elektrone da se rekombiniraju. Prisilnom rekombinacijom

generira se dodatni foton iste valne duljine, faze i polarizacije kao foton koji je rekombinaciju izazvao. Opetovanim refleksijama fotona unutar osiromašenog područja, količina fotona nastalih stimuliranom emisijom naglo raste. To će rezultirati uskim koherentnim snopom svjetla visokog intenziteta. Neke od prednosti laserskih dioda su: jednostavna konstrukcija, male dimenzije, niska cijena izrade, pouzdanost, efikasnost i ekonomičnost, dugotrajnost itd. Nedostatci su što laserske diode jako ovise o temperaturi i nisu prikladne za izradu u većim dimenzijama [38] . Primjenjuju se u laserskim pokazivačima, optičkim komunikacijama, čitačima barkodova, laserskom ispisu i skeniranju, daljinomjerima i sl.

## Zaključak

Krajem 19. stoljeća dva su znanstvenika, neovisno jedan o drugome, primijetili i otkrili protok naboja izazvan toplinom koji se sada naziva termionska emisija. To je tada bila samo zanimljiva pojava za koju nije bilo primjene. Dvadesetak godina nakon, John Ambrose Fleming iskoristio je taj efekt kao detektor radijskih signala. On je patentirao termioničku diodu, prvi praktični elektronički uređaj s vakumskom cijevi. Koristio se za prvi radio prijenos preko Atlantika. Prva poluvodička (galenitna) dioda nastala je 1886. godine od strane njemačkog fizičara Ferdinanda Brauna. Glavna prednost dioda baziranih na PN spoju je njihova pouzdanost i cijena. Dioda je zapravo PN spoj sa dva metalna izvoda. Poluvodičke diode su se u početku koristile samo kao ispravljači (kao zamjena za vakumske diode), ali daljnjim razvojem razvijeno je mnogo različitih dioda s različitim funkcijama. Primjerice, LED diode kod kojih se prilikom rekombinacije dio energije oslobađa u obliku fotona ili foto diode koje rade suprotno, svjetlosnu energiju pretvaraju u električnu. Schottky dioda je posebna po tome što je napravljena od metal-poluvodič spoja, a tunel dioda je jako dopiran PN spoj kod kojega se javlja negativni dinamički otpor. Postoje i neke specifične izvedbe dioda koje nisu navedene u radu. Na primjer, Gunnova dioda, koja se sastoji od dva tanka sloja N-tipa poluvodiča zbog kojih se u diodi razvija negativni diferencijalni otpor. Još su tu i lavinska dioda, Peltierova dioda, dioda super barijere i tako dalje. Vidimo kako se iz jednostavne ispravljačke diode razvio cijeli spektar dioda sa različitim primjenama i svojstvima. Dioda koja je danas u najširoj upotrebi je LED dioda koja je u području rasvjete sve zastupljenija. Jako bitna stvar je da je razvojem diode nastala i vakumska trioda (ima 3 izvoda), kasnije i bipolarni tranzistor kao PNP ili NPN spoj, a nakon ovoga i razni tipovi tranzistora s efektom polja, koji predstavljaju temelj elektronike.

# LITERATURA

- [1] Dioda, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Dioda>
- [2] Diode, <https://en.wikipedia.org/wiki/Diode>
- [3] Outline of a Diode < Classification >, <https://www.rohm.com/electronics-basics/diodes/outline-of-diodes>
- [4] HISTORY OF THE DIODE, <https://hackaday.com/2016/08/15/history-of-the-diode/>
- [5] Coherer, <https://en.wikipedia.org/wiki/Coherer>
- [6] Mercury Arc Rectifier, <https://kemptonsteam.org/collection/mercury-arc-rectifiers/>
- [7] What is vacuum tube, <https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/vacuum-tubes/whatisvacuumtube.html>
- [8] 09\_Snaga\_cijev\_tipovi.ppt, <https://mapmf.pmfst.unist.hr/~santon/29092022/oe1/>
- [9] Vacuum Tubes and Transistors Compared, <https://www.effectrode.com/knowledge-base/vacuum-tubes-and-transistors-compared/>
- [10] Advantages and Disadvantages of Vacuum Tubes, <https://aspiringyouths.com/advantages-disadvantages/vacuum-tubes/>
- [11] Semiconductor, <https://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor>
- [12] POLUVODIČI I NJIHOVA PRIMJENA, <https://zir.nsk.hr/islandora/object/vuka%3A1678/datastream/PDF/view>
- [13] 1.0.3 Dopirani poluvodiči, [https://www.fpz.unizg.hr/hgold/ES/AE/pog\\_1/pog103.htm](https://www.fpz.unizg.hr/hgold/ES/AE/pog_1/pog103.htm)
- [14] Osnove Elektronike 1, <https://mapmf.pmfst.unist.hr/~santon/29092022/oe1/>
- [15] 1.1 Poluvodička spojna dioda, [https://www.fpz.unizg.hr/hgold/ES/AE/pog\\_1/pog11.htm](https://www.fpz.unizg.hr/hgold/ES/AE/pog_1/pog11.htm)
- [16] The P-N Junction, <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/semiconductors/chpt-2/the-p-n-junction/>
- [17] 05\_PN\_spoj.ppt, <https://mapmf.pmfst.unist.hr/~santon/29092022/oe1/>
- [18] 06\_UI karakteristika\_DC-AC\_analiza\_Q.ppt, <https://mapmf.pmfst.unist.hr/~santon/29092022/oe1/>
- [19] diode-applications, <https://learn.sparkfun.com/tutorials/diodes/diode-applications>
- [20] half-wave-rectifiers, <https://riverglennapts.com/hr/rectifier/741-half-wave-rectifiers.html>
- [21] how-a-bridge-rectifier-works-step-by-step-tutorial, <https://www.derf.com/how-a-bridge-rectifier-works-step-by-step-tutorial/>
- [22] Zener\_diode, [https://en.wikipedia.org/wiki/Zener\\_diode](https://en.wikipedia.org/wiki/Zener_diode)
- [23] Zener Diode, <https://www.geeksforgeeks.org/zener-diode/>

- [24] LED (Svjetleća dioda), <https://www.stem.ba/arduino-elektronika/tutorijali/item/265-led-svjetleca-dioda>
- [25] UPORABA LED U KOMUNIKACIJSKIM SUSTAVIMA, [https://www.pfri.uniri.hr/web/hr/knjiznica/diplomske\\_radnje/NG-dipl.EITP/208-2014.pdf](https://www.pfri.uniri.hr/web/hr/knjiznica/diplomske_radnje/NG-dipl.EITP/208-2014.pdf)
- [26] Efficiency of LEDs: The highest luminous efficacy of a white LED, <https://www.dial.de/en-GB/projects/efficiency-of-leds-the-highest-luminous-efficacy-of-a-white-led>
- [27] What Is LED PCB?, [https://www.pcbgogo.com/Blog/What\\_Is\\_LED\\_PCB\\_.html](https://www.pcbgogo.com/Blog/What_Is_LED_PCB_.html)
- [28] First Adafruit NeoPixel Blinks with the FRDM Board, <https://mcuoneclipse.com/2014/07/13/first-adafruit-neopixel-blinks-with-the-frdm-board/>
- [29] Schottky diode, [https://en.wikipedia.org/wiki/Schottky\\_diode#](https://en.wikipedia.org/wiki/Schottky_diode#)
- [30] The Schottky Diode, <https://www.electronics-tutorials.ws/diode/schottky-diode.html>
- [31] Schottky diode, <https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/schottkydiode.html>
- [32] Tunnel diode, <https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/tunneldiode-howitworks.html>
- [33] Tunnel Diode-Type of Semiconductor Diode, <https://www.mepits.com/tutorial/243/active-component/tunnel-diode-type-of-semiconductor-diode>
- [34] Varactor diode, <https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/varactordiode-construction-definition-working.html>
- [35] Varicap, <https://en.wikipedia.org/wiki/Varicap>
- [36] Photodiode, <https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/photodiodesymboltypes.html>
- [37] Photodiode structures, [https://www.electronics-notes.com/articles/electronic\\_components/diode/photodiode-detector-structures-fabrication-materials.php](https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/diode/photodiode-detector-structures-fabrication-materials.php)
- [38] Laser diode, <https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/laserdiode.html>
- [39] The Best Tech Guide to Laser Diodes in 2021, <https://www.apogeeweb.net/electron/the-best-tech-guide-to-laser-diodes.html>
- [40] p – n junction, [https://en.wikipedia.org/wiki/P%E2%80%93n\\_junction](https://en.wikipedia.org/wiki/P%E2%80%93n_junction)

# POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| slika 1.1 Opća konstrukcija i simbol diode [40].....                | 1  |
| Slika 1.2 Podjela diode [3] .....                                   | 2  |
| Slika 1.3 Koherer [5] .....   | 3  |
| Slika 1.4 Galenitni kristalni detektor [4] .....                    | 4  |
| Slika 1.5 Živin ispravljač [6] .....                                | 5  |
| Slika 2.1 Izravno i neizravno grijana vakuumska dioda [7] .....     | 6  |
| Slika 2.2 Shema rada vakuumske diode [8] .....                      | 7  |
| Slika 3.1 Pucanje kovalentne veze između atoma silicija [12].....   | 9  |
| Slika 3.2 a) P-tip poluvodiča, b) N-tip poluvodiča [13] .....       | 10 |
| Slika 3.3 a) Prije kontakta, b) Poslije kontakta [15].....          | 11 |
| Slika 3.4 Propusna i nepropusna polarizacija [16] .....             | 11 |
| Slika 3.5 Građa poluvodičke diode [17].....                         | 12 |
| Slika 3.6 Strujno-naponska karakteristika diode [18] .....          | 13 |
| Slika 3.7 Punovalna ispravljačka dioda [20] .....                   | 14 |
| Slika 3.8 Punovalni mosni ispravljač [21].....                      | 15 |
| Slika 4.1 Simbol i primjer fizičke izvedbe Zener diode [23] .....   | 16 |
| Slika 4.2 Strujno-naponska karakteristika Zener diode [8] .....     | 17 |
| Slika 4.3 Jednostavni stabilizator napona sa Zener diodom [8] ..... | 18 |
| Slika 4.4 Simbol i izgled LED diode [24] .....                      | 18 |
| Slika 4.5 Generiranje svjetlosti kod LED dioda [25] .....           | 19 |
| Slika 4.6 Pločica sa LED diodama [27].....                          | 20 |
| Slika 4.7 RGB dioda [28] .....                                      | 20 |
| Slika 4.8 Shema Schottky diode i njen simbol [30] .....             | 21 |



|   |    |
|---|----|
| Slika 4.9 HP 5082-2800 dioda sa Schottky barijerom za opće namjene [29] ..... | 22 |
| Slika 4.10 Izgled i simbol tunel diode [33] .....                             | 22 |
| Slika 4.11 Dijagram vodljive i valentne vrpce [32].....                       | 23 |
| Slika 4.12 Simbol varikap diode [34].....                                     | 24 |
| Slika 4.13 Unutarnja struktura varikapa [35] .....                            | 24 |
| Slika 4.14 Simbol foto diode .....  | 25 |
| Slika 4.15 Struktura PIN diode [37] .....                                     | 26 |
| Slika 4.16 Simbol laserske diode [39] .....                                   | 27 |
| Slika 4.17 Struktura laserske diode [38].....                                 | 27 |