Termionski efekt i njegove primjene

Poljak, Eva

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:209584

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Eva Poljak

TERMIONSKI EFEKT

I NJEGOVE PRIMJENE

Diplomski rad

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

FIZIČKI ODSJEK

STUDIJ: Sveučilišni integrirani preddiplomski i diplomski sveučilišni studij Fizika; smjer: nastavnički

Eva Poljak

Diplomski rad

Termionski efekt i njegove primjene

Voditelj diplomskog rada: prof. dr. sc. Damir Veža

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2017.

Ovaj diplomski ne bi nastao bez svih ljudi koji su vjerovali u mene i bili mi spremni pomoći na svakom koraku mog putovanja, koliko god malen ili velik on bio. Svima sam neizmjerno i od srca zahvalna. Neću nikog poimence navodit jer sam sigurna da svi oni već znaju tko su i koliko su nezamjenjivi bili. Neću vam se nikada uspjeti odužiti i neću to nikada zaboraviti.

Allahu Akbar.

Sažetak

Termionski efekt je pojava emisije elektrona iz metala uzrokovana dovođenjem toplinske energije metalu. Broj elektrona koji napuštaju metal jako ovisi o temperaturi kao i o vrsti metala i dobro je opisan Dushman-Richardsonovom jednadžbom. Do njegovog otkrića je došlo kroz niz istraživanja pojava koje su sve zajedno dale sliku modela koji imamo. Zato je njegova povijest usko povezana sa povijesti fotoelektričnog efekta. Suštinski se promatrao isti fenomen samo izazvan na drugačiji način. Sintezom svih otkrića, uključujući značajne istupe Einsteina, sa fizikalnom interpretacijom fotoelektričnog efekta, i Sommerfeldove primjene Fermi-Diracove funkcije raspodjele na elektrone, oformljen je model kojim je objašnjena termionska emisija. Ona danas ima širok spektar primjena. Princip je rada za posebne detektore visoke osjetljivosti korištene u atomskoj laserskoj spektroskopiji i također za termionske konvertere energije koji obećavaju vrijednu primjenu na svemirskim letjelicama. Možemo je smatrati početkom tehnološke revolucije jer je upravo razvoj elektronskih cijevi korištenih u radio-tehnici neposredno doveo do potrebe za razvojem tranzistora, a time i tehnologiji bez koje danas ne možemo zamisliti funkcioniranje modernog svijeta.

Thermionic Effect and It's Applications

Abstract

Thermionic emission is the thermally induced flow of charge carriers from a surface or over a potential-energy barrier. This occurs because the thermal energy given to the carrier overcomes the work function of the material. The number of freely moving charge carriers in the metal, also known as electrons, that have sufficient energy to leave its surface is well described by the Dushman-Richardson equation. The history and the discoveries made by scientist investigating the photoelectric effect are closely related to the history of thermionic emission. The only discrepancy is the method via which the sufficient additional energy is provided. The key contributions were made by Einstein and his interpretation of the photoelectric phenomenon and Sommerfeld and his application of Fermi-Dirac statistics to the problem of moving electrons inside the metal. The ways in which we benefit from the discovery of the thermionic effect are many. Today they are used in special high-precision detectors for atomic laser spectroscopy. They also hold much promise as the future power suppliers of additional energy in spacecrafts through the technology of thermionic energy converters being developed today. Lastly, we have the discovery of the effect to thank for the electronic revolution and the world as we now know it. Had it not been for the discovery of electronic tubes used in pioneering radio broadcasting, the need for developing transistors, pillars of our technology today, may have never been realized.

Sadržaj

1. Povijesni pregled 1

2. Termionska emisija 11

2.1. Plin slobodnih elektrona 11

2.2. Osnovne veličine Fermijevog plina 16

2.3. Fenomen termionske emisije 18

3. Primjena termionskog efekta 27

3.1. Rani razvoj 27

3.1.1. Dioda 28

3.1.2. Trioda 31

3.2. Moderna upotreba 35

3.2.1. Laserska spektroskopija 37

3.2.2. Konverter energije 38

4. Metodički dio 40

4.1. Obrazovni ishodi i nastavne metode 41

4.2. Tijek nastavnog sata 41

4.2.1. Uvodni dio 42

4.2.2. Središnji dio 45

4.2.3 Završni dio 49

5. Zaključak 51

Literatura 52

1. Povijesni pregled

Priroda je puna neistraženih fenomena i nedostaje nam mnogo koraka i teorija kako bismo opisali svijet oko nas, ili možda točnije, svijet izvan našeg iskustvenog svjetonazora, onog kojeg možemo vidjeti i opisati samo kroz našu imaginaciju, shvatiti samo kroz puno promišljanja utemeljenih ne nužno na onome što je pred nama, nego efektima koje vidimo tek kao posljedice i iz kojih nastojimo zaključiti i logički povezati što je upravo predmet našeg promatranja. Međutim, svijet nije oduvijek bio toliko kompliciran i moje istraživanje dovodi nas u jedno takvo vrijeme kada je vladalo mišljenje kako su svi fundamentalni problemi već riješeni i kako nije više preostalo ništa revolucionarno za otkriti. Postojeće teorije i fizikalni zakoni dobro su opisivali svijet oko nas i činilo se kako dobro zaokružuju cjelokupnu zbilju. Nitko nije mogao pripremiti tadašnje fizičare s kraja 19. stoljeća na rezultate i pojave koje su se odvijale pred njihovim očima, a za koje nisu pronalazili nikakva rješenja u svoj znanstvenoj građi skupljenoj do tada. Jedan od takvih fenomena bio je i termionski efekt. Put od njegova otkrića do objašnjenja nije bio ni lagan ni brz te su, kao što je to često i slučaj, do njega došli preko drugih fenomena, prije nego što su uspjeli točno različiti pojedine pojave i mehanizme kojima do njih dolazi. Moramo imati na umu kako stvari u znanosti nisu toliko crno-bijele, koliko nam se možda čini kada pred osobom imamo gotove i dobro utemeljene i ispitane teorije koje nam se tada čine toliko jednostavne i logične da ih drugačije ne možemo zamisliti. Svijet istraživača pun je pokušaja i pogrešaka, a jedini zahtjev koji je pred njega postavljen je da opiše viđeno čim objektivnije, makar to značilo da iza sebe mora ostaviti svoje dotadašnje pretpostavke i uvjerenja. Put do otkrića često je zavojit i nepredvidiv te nas vodi na mjesta koja nismo ni zamišljali. Takav put bio je i put do termionskog efekta. U nastavku slijedi povijesni pregled događaja koji su vodili do njegovog otkrića.

U drugoj polovici 19. stoljeća Maxwell[1] objavljuje teoriju elektromagnetizma koju u publikaciji izdanoj 1865. naziva *Dinamična teorija elektromagnetskog polja*. Ona je bila velika kruna dotadašnjih otkrića na tom području te je slovila kao druga najveća unificirajuća teorija, uz bok Newtonove mehanike. Maxwell je svojom teorijom postulirao četiri osnovne jednadžbe elektromagnetizma te predvidio postojanje elektromagnetskih valova koji se kreću brzinom svjetla, odnosno zaključio kako je svjetlost sama takav elektromagnetski val. U svojim

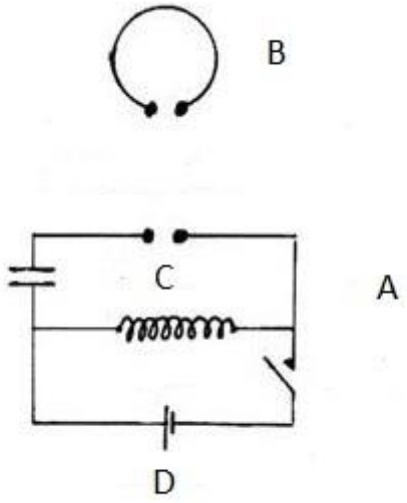
[1] James Clerk Maxwell (1831. – 1879.), škotski znanstvenik iz područja matematičke fizike, formulirao je klasičnu teoriju elektromagnetskog zračenja

nastojanjima da pomogne daljnji nastavak istraživanja, na tom tako i ostalim područjima, 1874. utemeljuje Cavendiški laboratorij na Cambridgeu kao mjesto na kojem se rade daljnja istraživanja u eksperimentalnoj fizici i postavljaju temelji za električne standarde u industriji. Maxwellova predviđanja se svakako moralo nastaviti istraživati, pošto je okosnica njegova rada bilo stavljanje mjerljivih veličina u matematičke odnose, ali nigdje nije ulazio u problematiku objašnjavanja same prirode tih fenomena. Dakle, svjetlost je valne prirode, a kao izazov eksperimentalnoj fizici ostalo je dokazati tu teoriju, odnosno detektirati elektromagnetske valove.

Prvi uspješni pokušaj napravio je Heinrich Hertz[2] 1886. godine. Hertz je početkom 80-ih bio imenovan profesorom na njemačkom Sveučilištu Karlsruhe te mu je mentor bio slavni fizičar Hermann von Helmholtz[3] koji je za svojeg studenta imao jako visoka očekivanja. U to vrijeme Berlinska akademija znanosti bila je raspisala nagradu za eksperimentalnu verifikaciju Maxwellove teorije i Helmholtz je želio da je upravo Hertz dobije. Zanimljivo je kako Hertz nije mnogo mario za nagrade, ali ga je oduvijek fasciniralo proizlazi li iz Maxwellovih jednadžbi da elektromagnetski valovi zbilja putuju kroz zrakoprazan prostor. Aparatura koju je napravio sastojala se od indukcijske zavojnice visokog napona i dva tanka prstena od bakra koji nisu bili zatvoreni do kraja. Ideja je bila da zavojnica inducira iskru u prvom prstenu, odnosno praznom prostoru između dva kraja bakra. To je bio prvi prsten, emiter. Pomoću drugog prstena, prijemnika, elektromagnetski valovi koje je odaslao prvi prsten trebali su biti detektirani. Na slici 1 nalazi se shematski prikaz njegovog eksperimenta. Hertz je zbilja uspio u svom eksperimentalnom postavu, i emitirani valovi sa prvog prstena jasno su se širili do drugog prstena u kojem se također stvarala iskra u prostoru između krajeva bakrene žice. Najizazovniji zadatak u cijelom eksperimentu bio je vidjeti tu nastalu iskru u prijemniku i to je upravo dio u kojem se cijela priča zakomplicirala. Naime, kako bi Hertz bolje vidio drugu iskru, činilo mu se logično staviti kutiju oko drugog prstena kako bi ga zamračio. Tada se pojavio jedan čudan fenomen koji Hertz nije mogao shvatiti – duljina iskre u prijemniku postala je manja samo zbog činjenice što se prsten nalazi u kutiji. Prostor između krajeva žica i tako je bio malen, radilo se o stotom dijelu milimetra, a sada je Hertz, preciznim mehanizmom zavrtanja kugle i šiljka na krajevima žice, morao taj put još dodatno smanjiti kako bi ga iskra uspjela preći. Problemu je

[2] Heinrich Rudolf Hertz (1857. – 1894.), njemački fizičar, eksperimentalno potvrdio Maxwellovu teoriju elektromagnetizma

[3] Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821. – 1894.), njemački liječnik i fizičar, najpoznatiji po radu u elektrodinamici, teoriji očuvanja energije i utemeljivanju termodinamike



SLIKA 1 Shematski prikaz Hertzovog eksperimenta. A - emiter, B - prijemnik, C – pukotina na koju preskače iskra, D - baterija [7]

pristupio metodički, i naizmjeničnim uklanjanjem dijelova kutije shvatio da jedino pregrada koja se nalazi između prvog i drugog prstena stvara taj efekt. Bilo mu je jasno da, iako to nije bio njegov prvotni cilj istraživanja, je tu pojavu potrebno bolje proučiti, te je počeo eksperimentirati sa raznim pregradama od stakla do kvarca, ali nije nikako mogao proniknuti u mehanizam koji se krije iza toga. Jedino je, koristeći prizmu od kvarca, vidio da se iskra vraća u prvotnu duljinu kada je obasjana ultraljubičastom svjetlošću. Iduće 1887. godine Hertz objavljuje samo svoja zapažanja bez teorijskog objašnjenja.

Tijekom svog rada, Hertzu su često asistirali njegovi studenti. Jedan od njih se posebno istaknuo idejom kako da Hertzove zapanjujuće rezultate pretvori u sistematičan eksperiment. Wilhelm Hallwachs[4] je uvidio kako su uvjeti u kojima je Hertz provodio eksperimente prekomplicirani da bi se dobili jasni podaci i njegova je želja bila ponoviti isti fenomen, ali u jednostavnijim uvjetima, kako bi i objašnjenje bilo jednostavnije. Hallwachsov vrlo jednostavan eksperiment sastojao se od pločice cinka postavljene na izolirni držač i povezane žicom sa elektroskopom. Elektroskop bi negativno nabio i čekao da vidi što će se događati. Elektroskop nije pokazivao skoro nikakve promijene, odnosno gubio je naboj jako sporo, osim kada bi pločicu obasjao UV svjetlom. Tada bi se naboj jako brzo maknuo sa njega, odnosno elektroskop bi se izbio gotovo trenutačno. Isti eksperiment je napravio sa pozitivno nabijenim elektroskopom i vidio kako ga se tada ne može brzo izbiti kojim god svjetlom se obasjavalo

[4] Wilhelm Ludwig Franz Hallwachs (1859. –1922.), njemački fizičar, poznat po radu na fotoelektričnom efektu

pločicu. Iako je taj eksperiment pojasnio situaciju, niti Hallwachs nije mogao ponuditi objašnjenje toga što se događa.

Idući fizičar koji je napravio velike korake svojim istraživanjima bio je Philipp von Lenard[5]. Kao mladi student već je pokazivao zanimanje za proučavanje električnih izboja u plinu, ali kao tadašnje polje koje je bilo tek u razvoju nije bilo smatrano prikladnim za početnike. Ono što ga je potaknulo da se uopće bavi tim problemom bili su slavni Crooksovi eksperimenti s katodnom cijevi kojima se konačno dobio prilike baviti kada je dobio poziciju asistenta u Heidelbergu. Glavni cilj njegova rada bio je dovesti katodne zrake izvan katodne cijevi. Za to mu je naravno bio potreban zrakonepropusan prozor u stjenci cijevi koji bi propuštao katodne zrake. Imao je neuspješan niz eksperimenata sve do 1892. kada je kod Hertza, čiji je asistent u to vrijeme bio, vidio pokus u kojem je tanki metalni list propuštao zrake. U stijenku katodne cijevi je ugradio tanki metalni list, kao prozor za katodne zrake, i napravio prve pokuse u kojima je vidio i dokazao katodne zrake koje su se širile i van cijevi. Iduće što ga je zanimalo bilo je fizičko objašnjenje toga što taj fenomen jest, odnosno što su katodne zrake. Već je otprije bilo poznato da se zrake otklanjaju u magnetskom i električnom polju što je davalo naslutiti da bi se katodne zrake mogle sastojati od negativno nabijenih čestica. Štoviše, mjerenjima veličine otklona, mogla se izračunati brzina pretpostavljenih čestica kao i omjer naboja i mase. Hertz i Schuster su već prije radili ta mjerenja, no njihovi rezultati proturječili su jedan drugome. Hertzovi rezultati nisu se slagali sa teorijom izbačenih negativno nabijenih molekula plina, dok su je Schusterovi potvrđivali. Lenard nije bio iznenađen takvim njihovim oprečno dobivenim rezultatima pošto su oni eksperimente i mjerenja obavljali unutar katodne cijevi u kojima je bilo previše promjenjivih varijabli. Spremao se razriješiti tu dilemu sa svojim čistim i elegantnim pokusima izvan katodne cijevi. Međutim, dok je još uvijek radio pripreme za svoj eksperiment, i drugi su se bavili istim problemom, te ga je Joseph John Thomson pretekao publikacijom na tu temu.

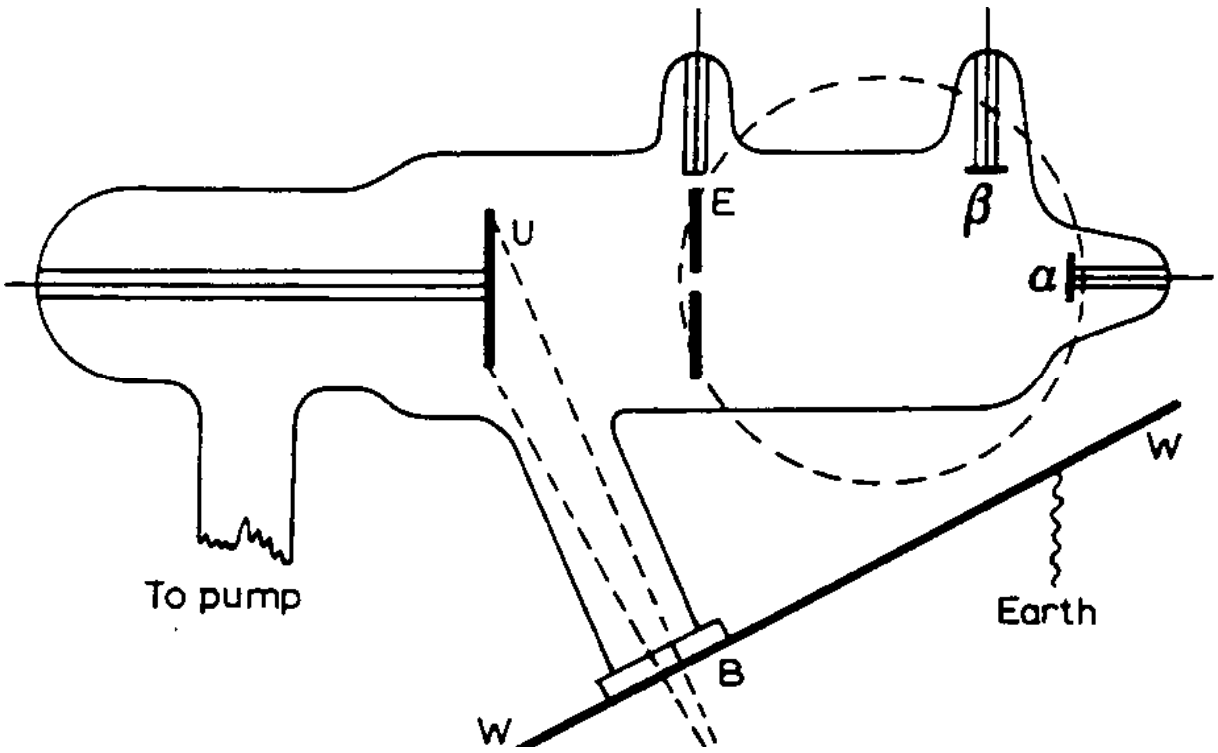
J. J. Thomson[6] svoj je profesionalni život proveo na fakultetu u Cambridgeu. Prvo kao nagrađivani student, a zatim kao glavni profesor već spominjanog Cavandiškog laboratorija. Mjesto je preuzeo od svojih prethodnika Maxwella i Lorda Rayleigha[7]. Jedno od područja njegova proučavanja bile su katodne zrake. Thomson se htio uključiti u vrlo vatrenu diskusiju

[5] Philipp Eduard Anton von Lenard (1862. –1947.), njemački fizičar, dobitnik Nobelove nagrade 1905. za istraživanja provedena na katodnim zrakama
[6] Sir Joseph John Thomson (1856. –1940.), engleski fizičar i dobitnik Nobelove nagrade za otkriće elektrona
[7] John William Strutt, Baron Rayleigh (1842. – 1919.), engleski fizičar, poznat po otkriću argona i nizu fenomena valne prirode, uključujući Rayleighevo raspršenje

toga vremena i otkriti jesu li katodne zrake nizovi nabijenih čestica ili se pak radi o poremećajima u tzv. električnome „eteru“. Pokuse je izvodio tako da je usmjeravao snop katodnih zraka kroz usku pukotinu, u električno polje između dviju nabijenih ploča. Eksperimenti nisu samo pokazali da su katodne zrake nabijene čestice, već je i odredio omjer naboja koje su čestice nosile i njihove mase. Ispalo je da je taj omjer puno veći nego što se očekivalo, i što je bilo još veće iznenađenje, da je neovisan o vrsti plina u katodnoj cijevi. Na temelju toga je zaključio da te čestice imaju vrlo malu masu i, pošto su iste u svim plinovima, da moraju same biti dio atomske strukture. Thomson je time identificirao jednu od osnovnih građevnih jedinica tvari, a za svoje otkriće je 1906. bio nagrađen Nobelovom nagradom. Zanimljivo je i kako je Thomson u svojim radovima novopronađenu česticu prozvao „korpuskulom“, dok je prije njega Helmholtz u svojim istraživanjima teoretizirao o postojanju „električnog elementarnog kvanta“. Lord Kelvin je česticu nazivao „elektrionom“, dok su Lorentz i Zeeman preferirali naziv „elektron“ koji je postao uvriježeni termin.

Dakle, dok su Lenarda razne okolnosti spriječile da nastavi raditi na svojoj tezi, među kojima je nažalost bila prijevremena Hertzova smrt, završavanje njegovih neobjavljenih radova te na kraju i premještanja na druge radne pozicije, Thomson je već otkrio elektron. Međutim, zbog činjenice da je Thomson sva mjerenja radio unutar katodne cijevi, Lenard je odlučio ponoviti mjerenja i napraviti svoj neovisan eksperiment, odnosno provjeriti valjanost prethodnih rezultata. Nije htio da fenomen postane dio strukture znanosti prije nego što ga se testira najdirektnije i rigoroznije koliko je moguće sa trenutnim dometima znanosti i sredstvima na raspolaganju. Mjerenja su bila obavljena izvan katodne cijevi, ali rezultati koje je dobio odgovarali su Thomsonovima. Brzina pretpostavljenih masa bila je otprilike trećina brzine svjetlosti, a omjer njihovog naboja i mase oko 1000 puta manji od iona vodika. Ono što se razlikovalo bilo je Lenardovo objašnjenje rezultata kojim smo dobili možda još jedan djelić slagalice za razumijevanje fenomena. Zbog njihove izvanredno male mase, Lenardova interpretacija bila je da su zrake zapravo „strujanje struje“, odnosno da je na neki način dobio pogled na samu struju. Dalje ga je zanimalo zauzima li struja prostor kontinuirano ili ne i to je testirao pomoću dvije katodne zrake koje je pustio u istoj komori jednu prema drugoj, iz suprotnog smjera. Zrake ni na koji način nisu interferirale jedna s drugom te je zaključio da se zrake sastoje od diskretnih i sitnih čestica koje se nalaze u velikom volumenu slobodnog prostora. Još jedan aspekt katodnih zraka koji ga je zanimao, odnosno čestica koje ih sačinjavaju, bio je njihova brzina. Vratio se Hertzovom i Hallwachsovom pokusu s kojima je,

uostalom, bio jako dobro upoznat. Oni su pokazali da obasjavanje metala ultraljubičastim svjetlom uzrokuje izbačaj elektrona i Lenard je htio bolje proučiti koji parametri imaju utjecaj na njihovu brzinu. Aparatura koju je koristio prikazana je na slici 2. Metalnu ploču U zatvorio je u potpuni vakuum te je kroz prozor B načinjen od kvarca obasjavao metal ultraljubičastim svjetlom. Na put zrake elektrona koji izlijeću iz metala postavio je sekundarnu ploču E sa malom rupom kroz koju je prolazio samo tanki snop. Taj snop zatim pada na malu ploču α koja je spojena sa ampermetrom pomoću kojeg mjeri struju i dokazuje da su iz metala elektroni stvarno izbačeni. Kada se cijevi prinesu magnet ili zavojnica prikazani isprekidanom linijom, naboj odlazi na ploču β umjesto α, što se također mjeri ampermetrom koji pokazuje kako struja sada teče tim krugom pošto je magnet otklonio zraku. Otkrio je da je početna brzina kojom elektroni napuštaju metal jako mala. Negativan naboj od nekoliko volta na sekundarnoj ploči bio je dovoljan da zaustavi elektrone da dođu do nje. Ako je pak sekundarnu ploču nabio pozitivno, brzina elektrona bila je veća. Mijenjanjem napona sekundarne ploče mogao je dakle slobodno mijenjati brzinu elektrona. Još značajnije otkriće napravio je kada je izmjerio ovisnost brzine elektrona o intenzitetu ultraljubičastog svjetla kojim je obasjavao metal. Naime podaci su mu pokazali kako brzina uopće ne ovisi o intenzitetu svjetla. Objašnjenje koje mu se činilo kao najlogičnije bilo je da energija potrebna za izlaz uopće ne dolazi od svjetla već iz unutrašnjosti atoma. Iako je njegova interpretacija bila pogrešna, svejedno smo dobili podatke



SLIKA 2 Lenardov postav fotoelektričnog efekta. U – katoda, E – ploča koja propušta tanak snop, α - pločica na koju pada neotklonjeni snop, β - pločica na koju pada otklonjeni snop, B – kvarcni prozor [4]

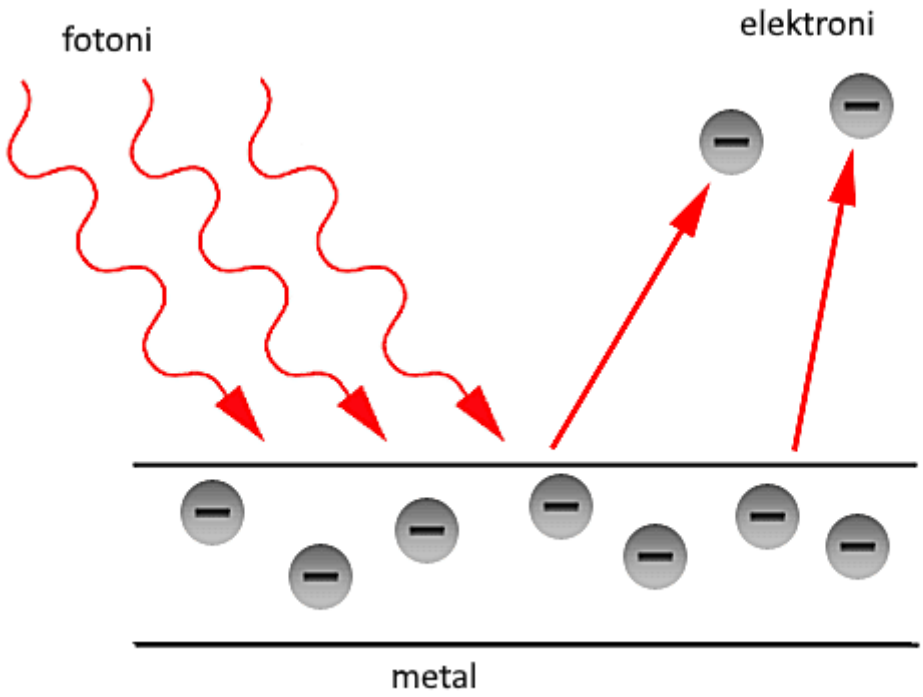
koji su pomogli znanstvenicima da razvijaju daljnje hipoteze. Lenardovi doprinosi znanosti bili su nepobitno mnogobrojni, a 1905. nagrađen je Nobelom za svoj rad na katodnim cijevima.

Ista 1905. godina postala je kolokvijalno znana kao „čudesna godina“ za jednog od najpoznatijih fizičara današnjice Alberta Einsteina[8] koji je tada objavio niz radova i iznio neke od svojih najvećih ideja. Ali dok se nalazio usred vrućih zbivanja otkrivanja i pokušaja tumačenja fotoelektričnog efekta u kojem elektroni izlaze iz metala pod utjecajem svjetlosti, njega je više zaokupljao jedan drugi problem, odnosno gledao je cijelu stvar iz jedne potpuno drugačije perspektive. Einstein je pokušavao shvatiti kako je moguće da svjetlost, koja je smatrana valom, može interagirati sa atomom koji se nalazi u točno određenoj točki. Shvaćao je koliko su njegova viđenja drugačija od tadašnjih trendova te je i sam svoj pogled na prirodu svjetlosti u naslovu rada provokativno nazvao heretičnom. Putovanje kojim je krenuo u svojim teorijskim promišljanjima dovelo ga je do jako elegantnog zaključka. Tvrdio je da energija zrake svjetla, koja se širi iz točkastog izvora, nije kontinuirano distribuirana, već se sastoji od konačnog broja kvanata energije koji mogu biti proizvedeni ili apsorbirani samo kao cijeli paketi. Ti kvanti energije vremenom su postali poznati kao fotoni. Ideja koju je iznio bila je revolucionarna za povijest fizike. Einstein je predvidio da kvanti svjetla imaju energiju koja je višekratnik frekvencije, a konstanta proporcionalnosti je odgovarala Planckovoj iz njegove teorije o zračenju crnog tijela. U radu je Einstein predložio jedan od načina kako testirati njegovu hipotezu pomoću fotoelektričnog efekta. Tvrdio je da pri obasjavanju metalne površine svjetlom točno jedan elektron apsorbira jedan kvant svjetlosti, pri čemu foton elektronu predaje svu svoju energiju. Elektron će tada dio energije potrošiti kako bi se oslobodio električnih sila na površini, a preostala energija biti će njegova kinetička energija. Ako se elektron ne nalazi na površini, jedan dio će biti prvo potrošen da dođe do nje, i zato u slučaju kada se elektron već tamo nalazi govorimo o maksimalnoj energiji izlaznih elektrona koja je umanjena samo za iznos izlaznog rada ϕ koji je funkcija metala. Jednadžba fotoelektričnog efekta koju Einstein postulira glasi:

$$E = h\nu - \phi \tag{1}$$

[8] Albert Einstein (1879. –1955.), njemački teorijski fizičar, tvorac teorije relativnosti

gdje je E maksimalna kinetička energija izlaznog elektrona, h Planckova konstanta, ν frekvencija fotona, a ϕ izlazni rad. Možda nam se danas može činiti čudno da je Einsteinova interpretacija fotoelektričnog efekta bila prvotno odbačena, te da idućih dvadeset godina nije



SLIKA 3 Shematski prikaz fotoelektričnog efekta [11]

bila prihvaćena u znanstvenim krugovima. Kada je Max Planck 1913. nominirao Einsteina za člana Pruske akademije znanosti u Berlinu, imao je osjećaj kako ga treba braniti te je pozivao da se Einsteinu ne uzima previše za zlo spekulacije u kojima ponekad pretjera, poput hipoteze o kvantu svjetla. Činilo se kao da zbilja nitko ne vjeruje u njegovu teoriju, ali to ga svejedno nije pokolebalo da sam nastavi vjerovat u nju. Dokaz je i pismo iz korespondencije sa prijateljem Michelleom Bessom gdje mu govori kako je postojanje kvanta svjetlosti praktički sigurno. Nobelova nagrada iz fizike dodijeljena mu je 1921. ali stavila je Kraljevsku švedsku akademiju znanosti u priličnu dilemu. Prvotno je nagrada trebala biti dodijeljena za specijalnu teoriju relativnosti, međutim u nju nisu vjerovali. Zato su odlučili uključiti i fotoelektrični efekt, iako zapravo nisu vjerovali ni u njegovu točnost. Trebalo je proći još dosta godina da se shvati puni značaj i vrijednost Einsteinovih razmišljanja.

Najbolji dokaz tome kako Einsteinova teorija nije bila prihvaćana je i činjenica da su je u nadolazećim godinama fizičari aktivno pokušavali pobiti. Jedan od njih bio je i Robert

Millikan[9]. Pošto u fizici teorija i eksperiment idu zajedno ruku pod ruku, odnosno jedno ne može napredovati bez drugoga, nego se nalaze u stalnoj komunikaciji u kojoj jedno nadopunjava drugo, u ovom vremenu kada je teorija napravila veliki iskorak, bio je potreban eksperimentalac koji će potvrditi ili opovrgnuti dotadašnje koncepte. 1923. dobio je Nobelovu nagradu za istaknuti rad u dva područja. Prvi Millikanov doprinos bilo je osmišljavanje još direktnijeg i jednostavnijeg pokusa za opažanje elektrona, tzv. pokus kapljice ulja. Koncept na kojem je radio bio je uzeti malo homogeno sferno tijelo, staviti na njega naboj, staviti u konstantno električno polje da slobodno pada te mu mjeriti brzinu. Izračune nije mogao napraviti bez da je oblik savršeno sferičan i gustoća apsolutno konstanta te je izabrao kapljicu ulja, a konstantno električno polje stvarale su dvije metalne ploče, jedna pozitivno druga negativno nabijena. Eksperiment je tekao tako da je Millikan stavio nabijenu kapljicu ulja na gornju ploču i pustio je da padne kroz sićušnu rupu u njenom centru prema drugoj ploči. Naglasio je kako je za pokus bilo ključno ostaviti dovoljan put kapljici da pada kako bi se njena brzina mogla točno izmjeriti i u njegovim pokusima ploče su bile razmaknute za 16 mm. Osim sa jednim nabojem, pokus je ponavljao varirajući naboj koristeći mnoge tehnike. Ionizirao je zrak ispod kapljice alfa, beta ili gama zračenjem radija i pustio da polje odnese ione na kapljicu; osvjetljavao je površinu kapljice ultraljubičastim zračenjem; ispaljivao je x-zrake u kapljicu i njezinu blizinu. Rezultati koje je dobio pokazivali su da nabijena kapljica postiže uvijek točno istu minimalnu brzinu koja je osjetno različita od brzine nenabijene kapljice u slobodnom padu. Također, variranjem količine naboja, kapljica je imala veću brzinu, ali uvijek točno za cijeli broj najmanje brzine, a nikad broj između. Millikan je tim eksperimentom na neki način promatraču omogućio da po prvi put *vidi* elektron.

Druga eksperimentalna provjera koju je osmislio bila je temeljena na Lenardovom otkriću da ultraljubičasta svjetlost izbacuje elektrone iz metalnih površina sa energijom koja je neovisna o intenzitetu svjetla izvora. Millikan je znao za Einsteinovo objašnjenje fotoelektričnog efekta i njegova glavna motivacija bila je dokazati kako je ono netočno. Međutim, nakon deset godina rada i pokušaja mjerenja brzina izlaznih elektrona, Millikan je, suprotno vlastitim očekivanjima, dobio prvi direktni dokaz ispravnosti Einsteinove jednadžbe i također prvi izmjerio Planckovu konstantu *h* u fotoelektričnom postavu. Time je po prvi put Planckova konstanta bila direktno fizikalno povezana sa fotoelektričnim efektom. Millikan je energiju izlaznih elektrona mjerio kao funkciju napona koji je stavio između katode i anode

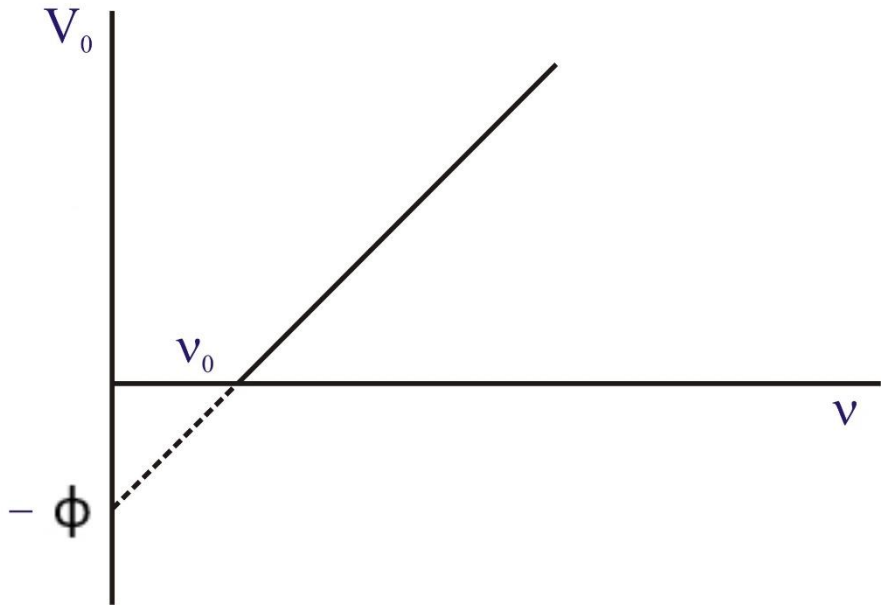
[9] Robert Andrews Millikan (1868. –1953.), američki eksperimentalni fizičar, izmjerio iznos električnog naboja elektrona

$$E = eV\ . \tag{2}$$

Varirajući napon među njima, primijetio je da postoji zaustavni potencijal V_0 ispod kojeg niti jedan elektron neće imati dovoljnu energiju da dođe do anode. S obzirom da se pri tom potencijalu elektroni zaustave, Einsteinovu formulu fotoelektričnog efekta (1) možemo zapisati kao

$$eV_0 = h\nu - \phi\ . \tag{3}$$

Prema Einsteinovoj formulaciji fotoefekta, zaustavni potencijal V_0 kao funkcija frekvencije mora u kartezijevom koordinatnom sustavu biti ravna linija čiji je nagib jednak omjeru *h/e* i neovisan je o materijalu iz kojeg su elektroni emitirani i intenzitetu svjetlosti korištene za njegovo obasjavanje. Grafički podaci koje je Millikan dobio u potpunosti su potvrdili Einsteinovu pretpostavku. Jedan primjer Millikanovih mjerenja nalazi se na slici 4. Osim što se iz nagiba pravca direktno može izračunati Planckova konstanta *h*, sa grafa se također može očitati najmanja frekvencija svjetlosti pri kojoj dolazi do fotoelektričnog efekta kao točka gdje pravac sječe x-os. U literaturi se često označava kao granična frekvencija ν_0. Time je Millikan pronašao opipljivo objašnjenje fenomena koji je prvi zapazio Hertz u eksperimentu sa emiterom i prijemnikom. Do fotoelektričnog efekta ne može doći ako svjetlost kojim izbijamo elektrone nema dovoljnu frekvenciju. Isto tako odsječak na ordinati možemo povezati sa fizikalnom veličinom izlaznog rada ϕ i direktno ga očitati sa grafa. Unatoč tome, Millikan je i dalje ostao



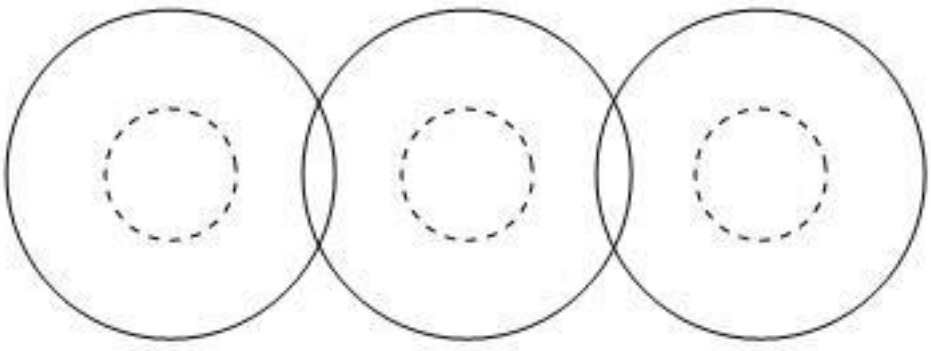
SLIKA 4 Millikanov graf zaustavnog potencijala ν_0 u ovisnosti o frekvenciji ν za fotolelektrični efekt. ν_0 je minimalna frekvencija potrebna za izazivanje fotoefekta

skeptičan. Priznao je točnost Einsteinove jednadžbe, ali nikako nije mogao prihvatit njegovo objašnjenje i postojanje lokaliziranih kvanata svjetlosti. Glavni argument bio mu je kako Einsteinova teorija ne može objasniti fenomene poput interferencije, mogli bismo smatrati i potpuno valjani, s obzirom na tada utabanu tradiciju u znanosti, te koncepte i činjenice koje su smatrali nepobitnima.

2. Termionska emisija

2.1. Plin slobodnih elektrona

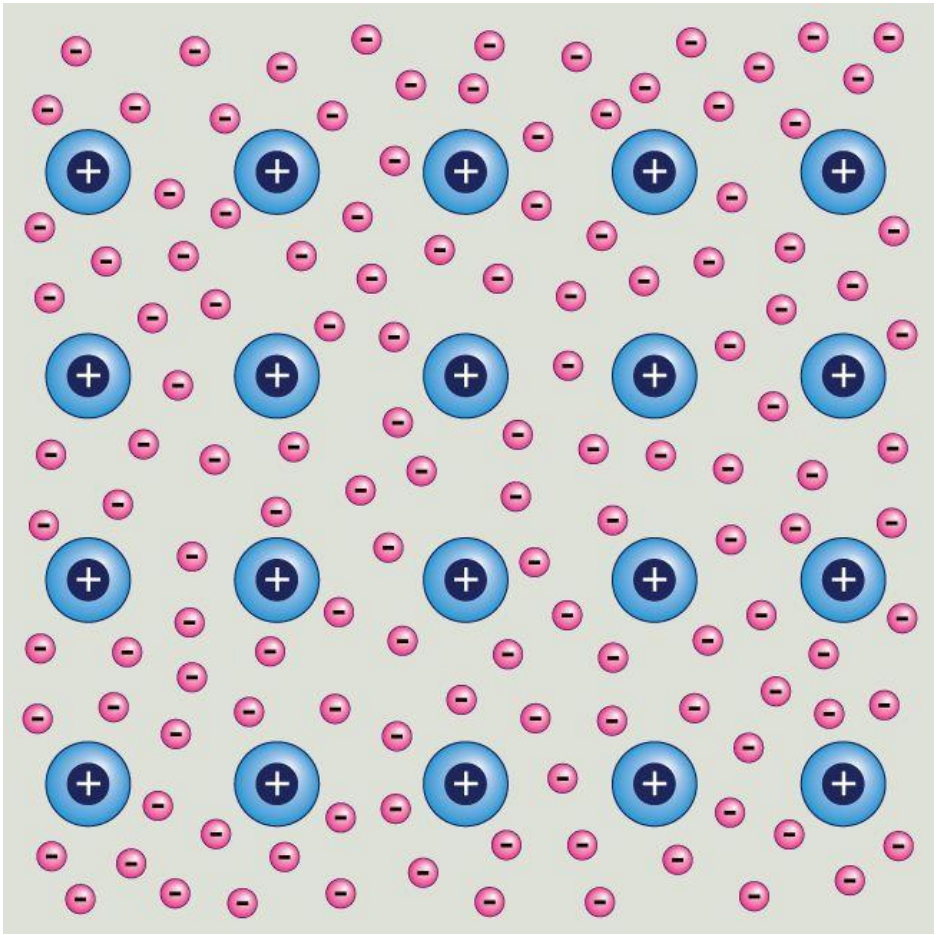
Kako su konstituenti materije bivali otkrivani, paralelno su se razvijale teorije kojima se nastojalo objasniti kako izgleda i što se događa u njezinoj unutrašnjosti. Tako je ubrzo nakon otkrića elektrona Drude 1900. godine razvio teoriju o plinu slobodnih elektrona kojom je pokušao opisati osnovne osobine metala. Zamislimo mnoštvo atoma nekog elementa koji tvore metal. Atomi se međusobno nalaze na nekoj prosječnoj udaljenosti jedan od drugog. Međutim, valentni elektroni atoma su na tolikoj udaljenosti od jezgre da prosječna udaljenost valentnog elektrona postaje usporediva s međuatomskom udaljenošću i njihove valne funkcije se preklapaju (sl. 5). U metalu, valentni elektroni prelaze od jednog atoma do drugog, odnosno valentni elektroni se kolektiviziraju. Nasuprot njima, unutrašnji elektroni ostaju uglavnom vezani za svoj atom. Stoga je Drude zamislio da je metal sačinjen od pozitivnih iona i valentnih elektrona. Pozitivni ioni su dobro lokalizirani jer je svaki vezan na područje oko ravnotežnog položaja, a za elektrone je pretpostavio da se svi kreću istom termičkom brzinom. Sile između elektrona i iona se zanemaruju te smatramo da se elektroni mogu slobodno kretati kroz unutrašnjost uzorka. Elektroni su u ovom modelu zamišljeni poput molekula idealnog plina pa



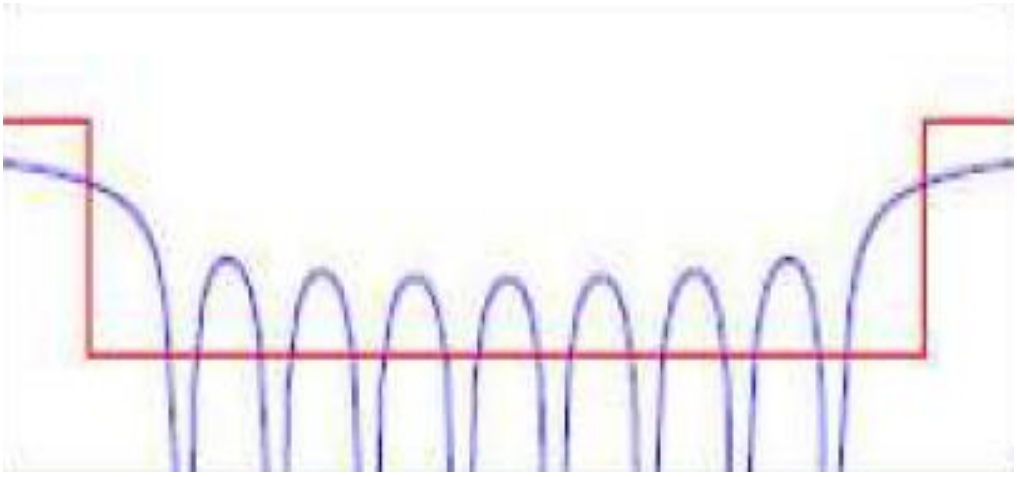
SLIKA 5 Shematski prikaz prekrivanja oblaka valentnih elektrona u metalu

ih možemo nazvati plinom slobodnih elektrona. Drude je ovom teorijom izveo Ohmov zakon te vezu između električne i toplinske vodljivosti, ali nije uspio objasniti toplinski kapacitet metala, paramagnetsku susceptibilnost elektrona, njegov srednji slobodni put i ovisnost električnog otpora metala o temperaturi. To su bila ograničenja koja su proizlazila iz klasične teorije.

Razvoj kvantne fizike omogućio je Sommerfeldu da 1928. unaprijedi Drudeov model. Bitna razlika u Sommerfeldovom opisu metala bila je u što je problem velikog broja čestica, koji ne možemo egzaktno riješiti, odlučio razmrsiti upotrebom statističke fizike. Ponašanje elektrona u metalu opisao je Fermi-Diracovom statistikom. Osim toga, Sommerfeldov model se nije bitno razlikovao od Drudeovog. Pozitivni ioni tvore kristalnu rešetku u kojoj se valentni elektroni slobodno kreću (slika 6). Pretpostavka Sommerfeldovog modela je da se periodički potencijal iona može sasvim zanemariti. Elektroni se unutar metala mogu kretati kao slobodne čestice zatvorene u kutiju koju ograničava površina metala. Slika 7 prikazuje potencijalne energije elektrona zatvorene u potencijalnoj kutiji metala. Sommerfeldov model metala

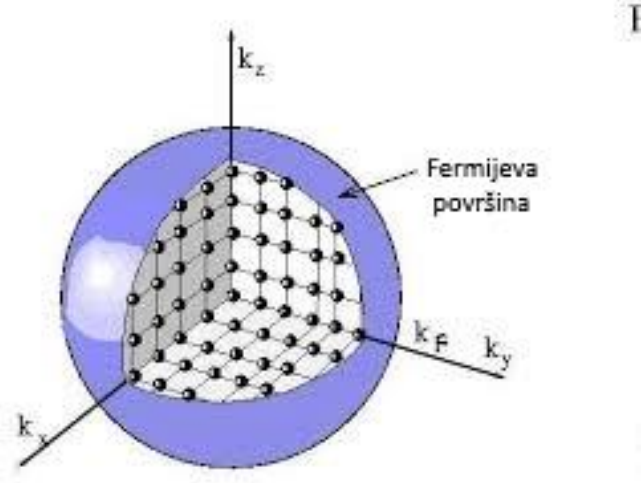


SLIKA 6 Sommerfeldov model metala. Pravilno raspoređeni i fiksirani pozitivni ioni tvore kristalnu rešetku unutar koje se slobodno kreću valentni elektroni [12]



SLIKA 7 Model lonca. Crvena linija predstavlja potencijalnu energiju ionske mreže , dok je plava linija potencijalna energija elektrona [13]

slikovito nazivamo i „modelom lonca“ u kojem je zatvoreno more elektrona. Razmotrimo što se događa u metalu pri temperaturi apsolutne nule. Elektroni su fermioni i kao takvi se pokoravaju Paulijevom principu isključivosti koji kaže da dva elektrona ne mogu imati identične sve kvantne brojeve. Pri temperaturi apsolutne nule elektroni će zaposjedati redom kvantna stanja, počevši od stanja najniže energije. Ta stanja su obilježena spinom s i valnim vektorom $\vec{k}$, a na svaki kvantni nivo n mogu biti smještena dva elektrona, jedan sa spinom prema dolje, a drugi sa spinom prema gore. Elektroni počinju popunjavati nivoe od dna (n = 1) dok se ne smjesti svih N elektrona. Grafički to možemo predočiti u inverznom prostoru kao Fermijevu kuglu koja se tvori tako da redom elektronima popunjavamo energetska stanja, počevši od njezina središta, dok ne potrošimo sve elektrone (sl. 8). Fermijeva sfera predstavlja



SLIKA 8 Fermijeva sfera u inverznom prostoru. Crni kružići predstavljaju elektrone koji redom popunjavaju nivoe počevši od najnižeg, odnosno od centra sfere [14]

granicu između zaposjednutih i nezaposjednutih stanja na apsolutnoj nuli za slobodni elektronski plin. Energiju najvišeg zauzetog stanja pri temperaturi apsolutne nule nazivamo Fermijevom energijom

$$E_F = \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m} \tag{4}$$

i ona je proporcionalna s kvadratom Fermijevog valnog vektora $\vec{k}_F$. Sommerfeld je htio povezati taj Fermijev vektor i koncentraciju kolektiviziranih elektrona koju možemo gledati kao broj elektrona *N* po jediničnom volumenu *V*. Na tom mjestu je napravio korak u koji ulazi statistička fizika postavivši uvjet da je ukupna koncentracija elektrona jednaka zbroju zauzetih kvantnih stanja:

$$\frac{N}{V} = \sum_{s\vec{k}} f(\vec{k}) \tag{5}$$

gdje $f(\vec{k})$ označava Fermi-Diracovu funkciju raspodjele. Razmotrit ćemo zašto upravo Fermi-Diracova funkcija raspodjele najbolje opisuje raspodjelu elektrona. Pošto elektroni zadovoljavaju Paulijev princip isključivosti, u svako kvantno stanje može se smjestiti najviše jedna čestica. Pri temperaturi apsolutne nule elektroni će redom popunjavati najniža dozvoljena kvantna stanja. Ako minimalnu energiju čestice definiramo nulom, a sa E_F označimo energiju najvišeg popunjenog kvantnog stanja, vidjet ćemo da funkcija raspodjele mora biti stepeničasta funkcija koja zadovoljava uvjet

$$f(E) = \begin{cases} 1 & E \leq E_F \\ 0 & E \geq E_F \end{cases} \tag{6}$$

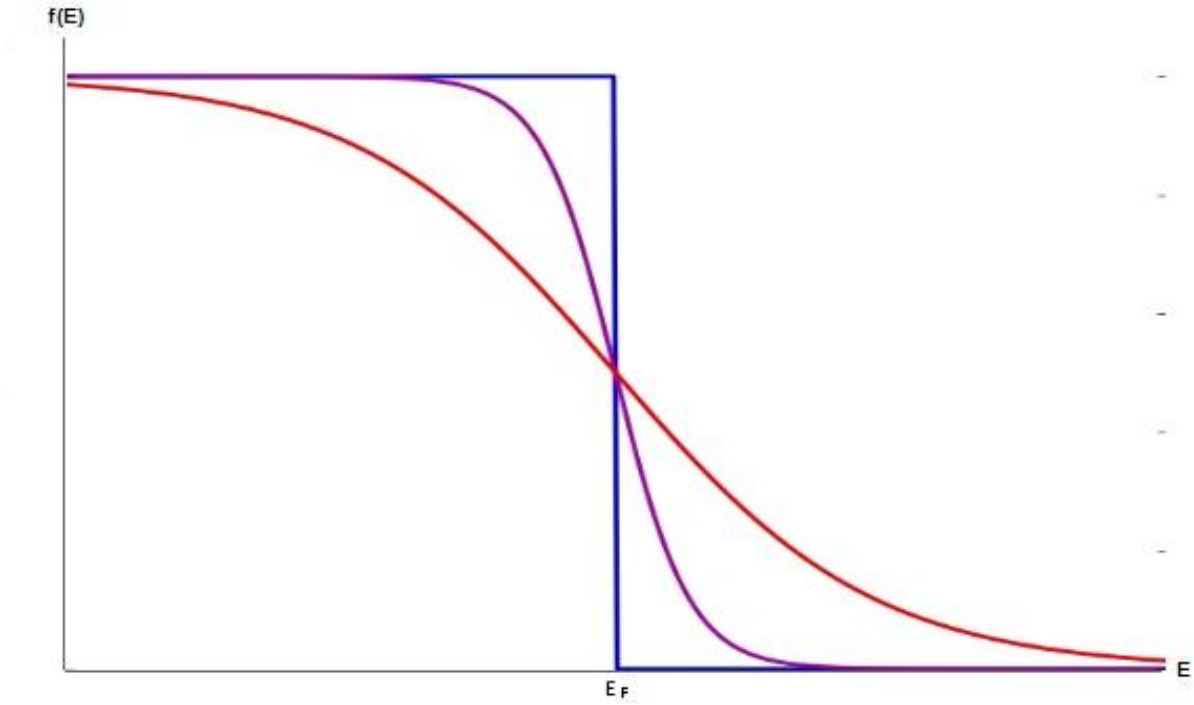
odnosno naglo iščezava pri energiji E_F. Povećanjem temperature pri visokim energijama, kvantna funkcija raspodjele može se aproksimirati funkcijom Boltzmannove raspodjele

$$f(E) = Ce^{-\frac{E}{k_B T}}. \tag{7}$$

Pošto je prema statističkoj zakonitosti vjerojatnost da se u stanje visoke energije smjeste dvije čestice izuzetno malena, time je Paulijev princip automatski zadovoljen pri visokoenergijskim stanjima. Ta oba uvjeta zadovoljena su Fermi-Diracovom funkcijom raspodjele

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_B T}} + 1}. \tag{8}$$

Slika 9 prikazuje Fermi-Diracovu raspodjelu za nekoliko temperatura. Vidimo kako pri temperaturi apsolutne nule ona ima oblik stepenice. Povišenjem temperature kinetička energija plina slobodnih elektrona se povećava. Pojedini elektroni sa vrha Fermijeve raspodjele dobit će dovoljno energije da pređu u viša energetska stanja. Neki energijski nivoi koji su bili prazni na apsolutnoj nuli sada su popunjeni, a neki nivoi koji su na apsolutnoj nuli bili popunjeni sada su prazni. Zato se funkcija raspodjele razmazuje u intervalu uvijek oko Fermijeve energije. Statistički gledano, Fermi-Diracova funkcija raspodjele nam daje vjerojatnost da je stanje energije *E* zauzeto, u idealnom plinu slobodnih elektrona u metalu u toplinskoj ravnoteži.



SLIKA 9 Fermi-Diracova funkcija raspodjele. Opisuje vjerojatnost zauzetosti stanja u ovisnosti o energiji. Plava linija – $T_0 = 0$ K, ljubičasta linija – $T_1 > T_0$, crvena linija – $T_2 > T_1 > T_0$

Sada kada smo pokazali kako je koncentracija elektrona točno opisana pretpostavljenom statističkom formulom, možemo je iskoristiti da pronađemo vezu sa Fermijevim valnim vektorom. Jednadžbu (5) prvo ćemo transformirati sa sume po spinu i valnom vektoru na integral po svim kvantnim stanjima

$$\sum_{s\vec{k}} f(\vec{k}) = \frac{2}{(2\pi)^3} \int f(\vec{k}) d^3k\,, \tag{9}$$

gdje je 2 spinski faktor koji proizlazi iz toga da svaku energiju mogu zauzeti dva elektrona suprotnih spinova. S obzirom da je pri temperaturi apsolutne nule na funkciju raspodjele postavljen uvjet

$$f(\vec{k}) = \begin{cases} 1 & k \leq k_F \\ 0 & k \geq k_F \end{cases} \tag{10}$$

on nam daje granične uvjete integrala (9) u polarnom koordinatnom sustavu

$$\sum_{s\vec{k}} f(\vec{k}) = \frac{2}{(2\pi)^3} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} \sin\vartheta \, d\vartheta \int_0^{k_F} k^2 dk \, . \tag{11}$$

Njegovim rješavanjem dolazimo do izraza za koncentraciju kolektiviziranih elektrona u metalu, odnosno njezinu vezu sa Fermijevim valnim vektorom

$$\frac{N}{V} = \frac{k_F^3}{3\pi^2} \, . \tag{12}$$

2.2. Osnovne veličine Fermijevog plina

Sada kada smo dobili kako je, ne samo kvalitativno, već i kvantitativno, valni vektor povezan sa koncentracijom, to nam otvara prostor za razne izračune i procjene veličina povezanih sa tim energetskim stanjima. Tipične koncentracije elektrona u metalu iznose $N/V \approx 10^{29}$ m^{-3}, pa iz toga direktno iz formule (12) slijedi da će tipične vrijednosti Fermijevog valnog broja biti $k_F \approx 10^{10}$ m^{-1}. Budući da je Fermijeva energija proporcionalna s kvadratom Fermijevog valnog vektora, iz izraza (4) i (12) možemo Fermijevu energiju zapisati kao

$$E_F = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 \frac{N}{V})^{2/3} \, . \tag{13}$$

Dobivamo da su tipične Fermijeve energije elektrona u metalima nekoliko elektronvolta. To je izuzetno bitna veličina s obzirom da se svi procesi emisije u metalima događaju oko nje i na neki način je sadrže. Kako Fermi-Diracova funkcija raspodjele ovisi o temperaturi na kojoj se metal nalazi, jedna od prvih veličina s kojom bi nas zanimalo da usporedimo Fermijevu energiju jest termička energija. Za procjenu ćemo uzeti neku tipičnu vrijednost Fermijeve energije, npr.

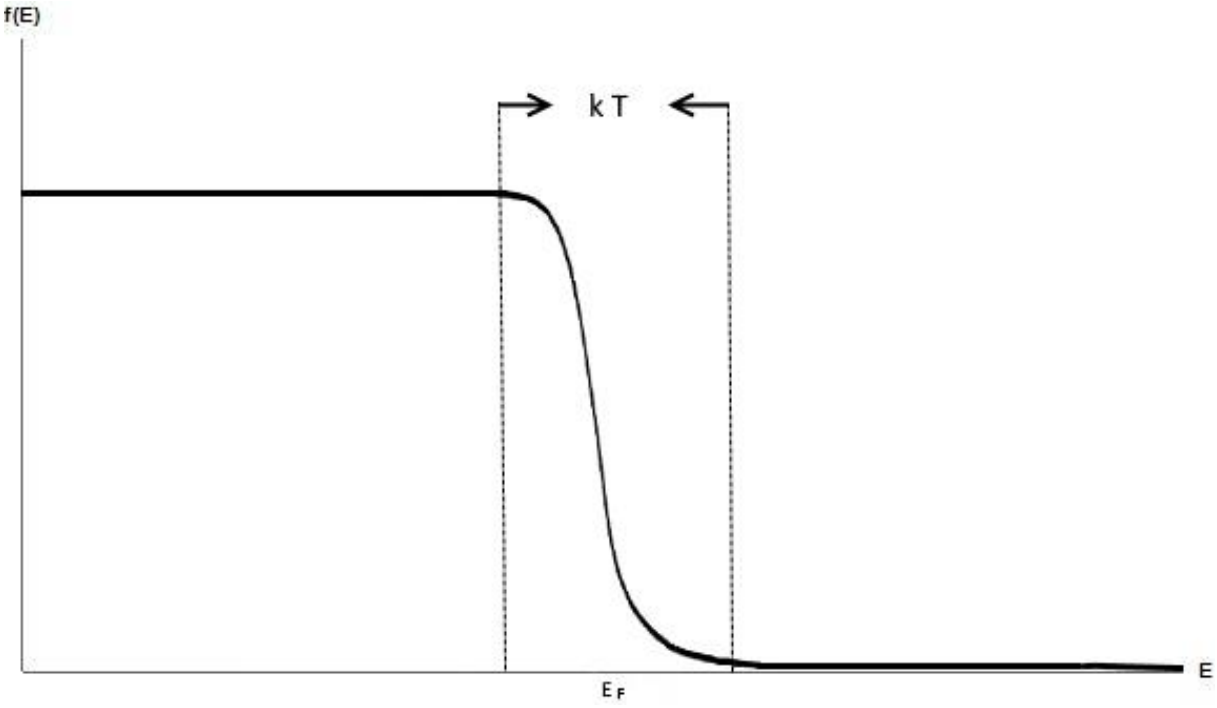
1 eV, i izjednačiti je sa termičkom energijom $k_B T$. Iz toga ćemo dobiti kolika temperatura je ekvivalentna tipičnoj Fermijevoj energiji:

$$T = \frac{1\ eV}{k_B} = 11\ 600\ K\ . \tag{14}$$

S obzirom na koliko visokoj temperaturi bi se trebao nalaziti uzorak materijala da bi mu termička energija postala sumjerljiva Fermijevoj, vidimo da su Fermijeve energije elektrona u metalima mnogo veće od njihovih termičkih energija. Štoviše, tipične vrijednosti temperatura taljenja metala su reda veličine 10^3 K te se metal puno brže rastali nego što se dođe do termičkih energija ekvivalentnih Fermijevoj. Pri svim temperaturama ispod tališta metala, Fermijeve energije elektrona u metalima biti će mnogo veće od termičke energije

$$E_F \gg k_B T\ . \tag{15}$$

Plin elektrona koji zadovoljava taj uvjet nazivamo jako degeneriranim Fermijevim plinom. Zagrijavanjem metala od apsolutne nule do temperature taljenja, energija elektronskog plina mijenja se vrlo malo. Iz toga slijedi bitan zaključak da energiju elektronskog plina u metalima možemo pri svim temperaturama približno izračunati primjenom aproksimacije temperature apsolutne nule. U jako degeneriranom Fermijevom plinu, sve promjene Fermi-Diracove



SLIKA 10 Fermi-Diracova funkcija raspodjele za jako degenerirani Fermijev plin

funkcije raspodjele biti će ograničene na interval reda veličine k_BT oko Fermijeve energije. Funkcija raspodjele za jako degenerirani Fermijev plin nalazi se na slici 10.

Jedna od osnovnih pretpostavki Sommerfeldovog modela jest da kolektivizirani elektroni ne ulaze u nikakve interakcije pa je njihova ukupna energija jednaka kinetičkoj energiji. Iz te činjenice možemo odrediti njihove brzine. Fermijevoj energiji pridružena je Fermijeva brzina

$$E_F = \frac{m v_F^2}{2}. \tag{16}$$

Uvrštavanjem Fermijeve energije iz relacije (13) gdje je Fermijev valni vektor izražen preko koncentracije, dobivamo izraz

$$v_F = \frac{\hbar}{m} \sqrt[3]{3\pi^2 \frac{N}{V}}. \tag{17}$$

Tipične vrijednosti Fermijevih brzina u metalima, odnosno brzine elektrona sa vrha Fermijeve raspodjele, iznose približno $v_F \approx 10^6$ m/s. Njihove brzine mnogo su manje od brzine svjetlosti i zato dinamiku elektrona u metalima možemo proučavati u nerelativističkoj aproksimaciji.

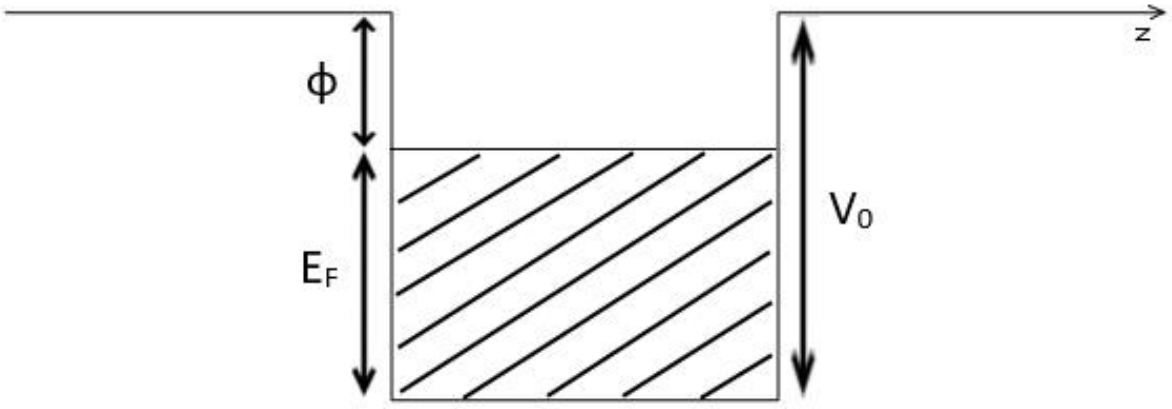
2.3. Fenomen termionske emisije

Sva dotadašnja otkrića bila su poput djelića slagalice koja su sva zajedno tvorila jednu sliku. Svi otkriveni fenomeni bili su trijumfalni podvizi sami za sebe, ali samo svi zajedno mogli su opisati fotoelektrični efekt. Međutim, oni su također vodili i tumačenju termionskog efekta koji je suštinski vrlo srodan fotoelektričnome. Oba efekta odvijaju se po istom principu, odnosno fenomenološki se događa ista stvar, emitiranje elektrona, uz jedinu razliku u vidu načina kojim dovodimo energiju potrebnu za njihov izlazak. Termionska emisija označava pojavu emitiranja elektrona iz metala uslijed zagrijavanja uzorka. Puno prije nego što je bila opisana teorija mehanizma kojim se to događa, fenomen je opažen eksperimentalno. Također je eksperimentalno bilo utvrđeno da su brzine elektrona emitiranih sa usijane metalne površine podvrgnute Maxwell-Boltzmannovoj (klasičnoj) raspodjeli. Promotrimo što se događa sa funkcijom raspodjele elektrona i kako se ona mijenja kada elektron iz slobodnog elektronskog plina napusti metal. S obzirom da su elektroni vezani na metal, uzmimo da se oni gibaju u

pravokutnoj potencijalnoj jami dubine V_0 (sl. 11). Da bi elektron s vrha Fermijeve raspodjele svladao potencijalnu barijeru i napustio metal, njegova energija mora se povećati za razliku:

$$\phi = V_0 - E_F \tag{18}$$

gdje energiju ϕ definiramo kao izlazni rad elektrona. To je ista funkcija materijala koju je otkrio Einstein kada je proučavao fotoelektrični efekt i kao takva zavisi s kojim metalom radimo.



SLIKA 11 Pravokutna potencijalna jama dubine V_0

Eksperimentalno dobivene vrijednosti izlaznog rada za neke elemente nalaze se u tablici 1. Zagrijavanjem metala unutrašnja energija elektronskog plina se povećava. Elektroni prelaze na viša energijska stanja jer se povećava njihova ukupna, odnosno kinetička energija. Dubina potencijalne jame daje uvjet na to kolika njegova energija mora biti. Da bi elektron mogao napustiti metal, energija mu mora biti barem jednaka dubini potencijalne jame

$$E \geq V_0 \, . \tag{19}$$

Pomoću tog uvjeta možemo vidjeti što se događa sa raspodjelom elektrona koji napuštaju metal. Elektronski plin u metalu opisan je Fermi-Diracovom funkcijom raspodjele zapisane jednadžbom (8). Ako energije koje se nalaze u eksponentu prvog člana nazivnika izrazimo preko jednadžbe za izlazni rad (18) te uvrstimo uvjet na dubinu jame (19), dobit ćemo kako razlika energije elektrona E i Fermijeve energije E_F mora biti barem jednaka izlaznome radu ϕ da bi elektron napustio metal:

$$E - E_F \geq \phi \, . \tag{20}$$

TABLICA 1 IZLAZNI RAD METALA I NEKIH METALNIH OKSIDA

Metal	Izlazni rad / eV
Li	2.9
Na	2.4
K	2.3
Cs	1.9
Ba	2.5
Ca	2.9
Nb	2.3
Zr	4.05
Mg	3.66
Al	4.2
Cu	4.6
Ag	4.64
Zn	3.6
Sc	3.5
BaO	1.0 – 1.7
SrO	1.2 – 2.6
Gd_2O_3	2.1 – 3.1
ThO_2	1.6 – 3.7
Dy_2O_3	2.1 – 3.2

Iz tablice 1 možemo vidjeti da su tipične vrijednosti izlaznog rada elektrona u metalima reda veličine elektronvolta. Često je pogodnije koristiti okside raznih metala (vidi donji dio tablice), nego čiste metale, zbog njihove niže vrijednosti izlaznoga rada. Isto zaključivanje kojim smo došli do rezultata u jednadžbi (14) možemo primijeniti još jednom kako bismo izlazni rad usporedili s termičkom energijom. S obzirom da je izlazni rad istog reda veličine kao i Fermijeva energija, i ovdje dobivamo rezultat da je izlazni rad mnogo veći od termičke energije

$$\phi \gg k_B T \,, \tag{21}$$

uz uvjet da imamo jako degenerirani Fermionski plin, odnosno pri svim temperaturama nižima od tališta metala. Iz toga slijedi da je prvi član nazivnika iz Fermi-Diracove funkcije raspodjele dominantan

$$e^{\frac{E-E_F}{k_BT}} \gg 1\,. \tag{22}$$

To znači da za jako degenerirani Fermijev plin Fermi-Diracova raspodjela približno postaje

$$f(E) = e^{\frac{E_F-E}{k_BT}}\,, \tag{23}$$

odnosno nakon što su elektroni emitirani iz metala, oni se ponašaju prema režimu određenim Maxwell-Boltzmannovom raspodjelom. Zanimljivo je primijetiti kako iz samog mjerenja emitiranih elektrona ne postoji mogućnost da zaključimo da se elektroni u metalu pokoravaju Fermi-Diracovoj raspodjeli. Za taj iskorak bilo je potrebno mnogo teorijskog razmatranja, poglavito računajući Sommerfeldov doprinos kada je prvi upotrijebio Fermi-Diracovu statistiku za opis elektrona u metalu. Rezultat da elektroni emitirani iz metala zadovoljavaju klasičnu Maxwell-Boltzmannovu raspodjelu eksperimentalno je dokazao Richardson. Iz izraza (22) i (23) također možemo proučiti značajnu implikaciju koja iz njih slijedi, da je funkcija raspodjele veoma mala

$$f(E) \ll 1 \tag{24}$$

za elektrone emitirane iz metala. Zagrijavanjem metala unutrašnja energija kolektiviziranog elektronskog plina mijenja se vrlo polagano (posljedica velikih Fermijevih energija u odnosu na termičke). Međutim, energija pojedinih elektrona će se pritom bitno povećati. Ako pogledamo sliku 10, to će biti elektroni iz visokoenergetskog repa Fermi-Diracove raspodjele. Oni imaju energiju veću od Fermijeve energije za iznos barem jednak izlaznome radu, odnosno pri visokim temperaturama imaju dovoljno energije da mogu napustiti metal. Jednadžba (24) koja slijedi direktno iz razmatranja Fermi-Diracove funkcije raspodjele za jako degenerirani Fermionski plin, pokazuje nam kako je postotak elektrona koji će imati dovoljnu termičku energiju potrebnu za napuštanje metala vrlo malen.

Glavna veličina termionskog efekta koju se eksperimentalno mjerilo bila je gustoća struje. Ona će zavisiti o broju elektrona koji su emitirani sa površine metala. Broj elektrona koji će biti emitirani zavisi o temperaturi na koju smo metal zagrijali, pa će prema tome gustoća struje biti funkcija temperature. Prvi koji je detaljno počeo proučavati temperaturnu ovisnost gustoće struje te je kvantitativno opisao bio je Owen Richardson. Svoja otkrića je prvi put objavio u znanstvenom radu 1901. godine, a 1928. bila mu je dodijeljena i Nobelova nagrada. Zakonitost prema kojoj se ponaša gustoća struje emitiranih elektrona glasi

$$j = AT^2 e^{-\frac{\phi}{k_B T}} \tag{25}$$

i njezinu ispravnost potvrdio je eksperimentalnim podacima. Vrijednosti parametra *A* odredio je za različite metale navedene u tablici 2. Niz znanstvenika dalo je važan doprinos razumijevanju i tumačenju jednadžbe, uključujući Lauea, Tolmana, Dushmana, Roya, Sommerfelda i R. H. Fowlera. Jednadžba (25) često se naziva Dushman-Richardsonovom

TABLICA 2 PARAMETAR A ZA NEKE METALE

Metal	**Ba**	**Ca**	**Cr**	**Cs**	**Mo**	**Ni**	**Pt**	**Ta**	**W**
$A \,/\, \frac{A}{cm^2 K^2}$	60	60	48	160	55	27	32	55	75

formulom. Sada ćemo izvesti tu relaciju. Koordinatni sustav ćemo definirati tako da je izlazna ploha metala okomita na *z* os. Samo elektroni sa dovoljno velikom unutarnjom, odnosno kinetičkom, energijom da svladaju potencijalnu barijeru tvorit će struju emitiranih elektrona. Kada se elektron u unutrašnjosti metala počne približavati njegovoj površini, na njega djeluje sila usmjerena natrag u površinu uslijed sila privlačenja iona na i u blizini površine metala. S obzirom da je normala na površinu metala u smjeru *z* osi, bitan je jedino iznos z-komponente brzine elektrona. Sila koja želi zadržati elektron u metalu je usmjerena duž *z* osi pa ne može djelovati na x-komponentu ili y-komponentu brzine. Elektron iz repa Fermi-Diracove raspodjele, koji je dovođenjem topline dovoljno povećao svoju termičku energiju, ima dovoljnu kinetičku energiju da napusti metal. Približavanjem površini metala, sila u z-smjeru smanjuje njegovu z-komponentu brzine. Zato će elektron, nakon što je napustio metal, imati manju kinetičku, ali veću potencijalnu energiju nego prije emisije. Smanjenje kinetičke energije u cijelosti je uzrokovano smanjenjem z-komponente brzine v_z. Kod elektrona koji nemaju dovoljno kinetičke energije, sila privlačenja također smanjuje njihovu z-komponentu brzine, ali pošto je ona manja od kritične vrijednosti definirane izrazom (19), elektron će biti „reflektiran“ natrag u metal. Elektroni koji su napustili metal tvorit će struju emitiranih elektrona. Iznos gustoće struje dobit ćemo kao sumu preko spina i valnog vektora za sve raspodjele z-komponente brzina

$$j = \sum_{s\vec{k}} e v_z f(v) \tag{26}$$

gdje je *e* iznos elektronskog naboja. Pošto je u plinu slobodnih elektrona njihova unutarnja energija u cijelosti definirana kao kinetička, možemo je uvrstiti u Fermi-Diracovu funkciju raspodjele (8) koju tada gledamo u ovisnosti o brzini elektrona

$$f(v) = \frac{1}{e^{(\frac{mv^2}{2} - E_F)/k_B T} + 1}. \tag{27}$$

Relacija (27) vrijedi za elektronski plin u unutrašnjosti metala. Struju tvore samo visokoenergetski elektroni, pa raspodjela elektrona izvan metala prema jednadžbi (23) postaje

$$f(v) = e^{\frac{E_F}{k_B T} - \frac{mv^2}{2k_B T}}. \tag{28}$$

Gustoću struje (26) ćemo sa sume preko spina i valnog vektora transformirati na integral

$$j = \frac{2}{(2\pi)^3} \int e v_z e^{\frac{E_F}{k_B T} - \frac{mv^2}{2k_B T}} d^3k\,, \tag{29}$$

gdje smo uvrstili funkciju raspodjele (28). Koristeći definiciju valnog vektora

$$\vec{k} = \frac{m\vec{v}}{\hbar} \tag{30}$$

napravit ćemo supstituciju u jednadžbi (29) kako bismo za varijablu integracije dobili elektronsku brzinu

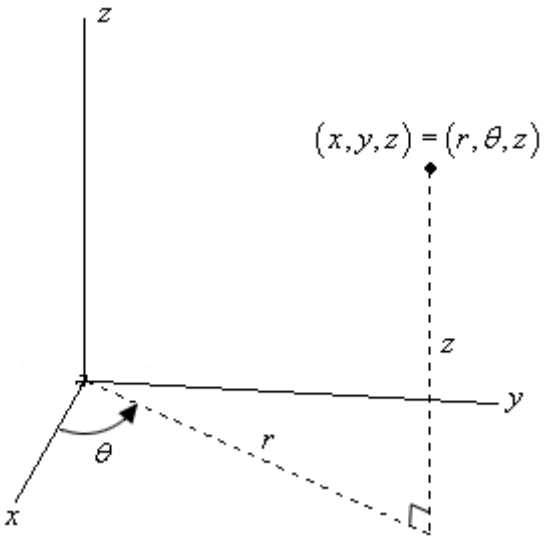
$$j = 2e\left(\frac{m}{h}\right)^3 e^{\frac{E_F}{k_B T}} \int v_z e^{-\frac{mv^2}{2k_B T}} d^3v\,. \tag{31}$$

Jednadžbu je najpraktičnije riješiti u cilindričnom koordinatnom sustavu (slika 12) pa ćemo u tom slučaju brzinu rastavit na komponente

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \tag{32}$$

gdje ćemo koristiti pokratu

$$u^2 = v_x^2 + v_y^2 \tag{33}$$



SLIKA 12 Cilindrični koordinatni sustav [15]

a integral raspisati kao

$$\int d^3v = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\infty} u\,du \int_{v_o}^{\infty} dv_z\,. \tag{34}$$

Granica integracije v_0 u (34) je definirana kao kritična brzina elektrona. To je najmanja brzina koju elektron mora imati u smjeru z-osi da bi napustio metal. Njegova kinetička energija je u tom slučaju točno jednaka dubini potencijalne jame i određena je relacijom

$$\frac{mv_0^2}{2} = V_0\,. \tag{35}$$

Kinetička energija elektrona brzine v_0 po izlasku iz metala u potpunosti prelazi u potencijalnu energija odnosno njegova brzina će biti 0. Kada uvjete (32), (33) i (34) uvrstimo natrag u jednadžbu (31), za gustoću struje dobivamo

$$j = 2e\left(\frac{m}{h}\right)^3 e^{\frac{E_F}{k_BT}} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\infty} e^{-\frac{mu^2}{2k_BT}} u\,du \int_{v_o}^{\infty} e^{-\frac{mv_z^2}{2k_BT}} v_z\,dv_z\,. \tag{36}$$

Integrale ćemo riješiti koristeći supstituciju tipa

$$\frac{mq^2}{2k_BT} = p\,; \qquad \frac{mq}{k_BT}dq = dp \tag{37}$$

nakon čega ih možemo riješiti kao tablične integrale, te za gustoću struje dobivamo

$$j = 4\pi e \left(\frac{m}{h}\right)^3 e^{\frac{E_F}{k_B T}} \left(\frac{k_B T}{m}\right)^2 e^{-\frac{m v_0^2}{2 k_B T}} . \tag{38}$$

U zadnjem članu jednadžbe možemo u eksponentu prepoznati izraz za kinetičku energiju elektrona pri kritičnoj brzini opisan izrazom (35). Također možemo primijetiti da je razlika Fermijeve energije i dubine potencijalne jame prema (18) jednaka negativnom iznosu izlaznog rada. Uvažavajući te dvije relacije i kraćenjem masa *m*, izraz za gustoću struje pojednostavljuje se na

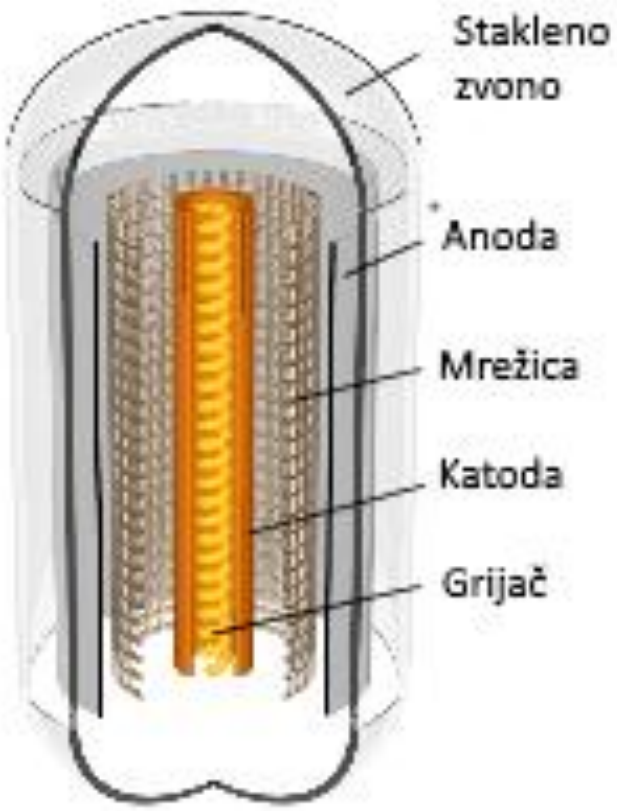
$$j = \frac{4\pi e m (k_B T)^2}{h^3} e^{-\frac{\phi}{k_B T}} . \tag{39}$$

Izvođenjem izraza za gustoću struje počevši od pretpostavke da se elektron u metalu giba u pravokutnoj potencijalnoj barijeri, dobili smo izraz koji se slaže se Dushman-Richardsonovom formulom (25). Iz jednadžbe (39) se može iščitati vrijednost parametara *A*

$$A = \frac{4\pi e m {k_B}^2}{h^3} = 120\ A\ cm^{-2}\ K^{-2} . \tag{40}$$

Termionskom emisijom iz metala, elektroni iz Fermi-Diracovog statističkog režima prelaze u klasični. Struja koju tvore zavisit će o temperaturi zagrijanog tijela. Temperaturna ovisnost je istovremeno kvadratnog i eksponencijalnog oblika, s time da je eksponencijalan član dominantan, što je Richardson odmah primijetio u svojim eksperimentima. Zato se porastom temperature i gustoća struje naglo penje. Ostatak gustoće struje ovisit će o univerzalnoj konstanti *A* i vrijednosti izlaznog rada ϕ koja će se razlikovati ovisno o pojedinoj vrsti metala. Jedino neslaganje koje možemo primijetiti jest između teorijskog faktora *A* i eksperimentalnih mjerenja koja su proveli Richardson i drugi, a nalaze se u tablici 2. Kao prvo, ona se razlikuje za razne metale, a kao drugo, eksperimentalna mjerenja daju manju konstantu *A* za faktor reda veličine dva. Ovo odstupanje tumači se sa nekoliko objašnjenja. Jedno od njih fokusira se na valno-čestičnu prirodu elektrona, odnosno argumente donosi iz kvantne fizike. Budući da se elektroni propagiraju poput valova, na površini metala se događa djelomična refleksija elektronskih valnih funkcija, čak i za one elektrone koji imaju z-komponentu brzinu dovoljnu za izlazak iz metala. Zbog toga za jedan takav elektron postoji konačna vjerojatnost da neće izaći kada stigne na površinu metala, pa samim time neće ni tvoriti struju emitiranih elektrona. Međutim, možemo pogledati i sami izgled materije kako bismo vidjeli zašto dolazi do

eksperimentalnih i teorijskog neslaganja. Pri izvodu izraza za iznos gustoće struje, koristili smo niz pretpostavki i pojednostavljenja o strukturi metala. Tako smo između ostalog uzeli da je površina metala potpuno ravna i uniformna. Mikroskopskim proučavanjem brzo se uoči da je površina metala ustvari sastavljena od različitih kristalnih ravnina, tako da su im i radne funkcije različite. S obzirom da je emisija elektrona u jakoj zavisnosti o radnoj funkciji, najveći dio elektrona biti će emitiran sa kristalnih ravnina sa najnižom radnom funkcijom. Iako smo pretpostavili da se emitiraju sa cijele površine metala, elektroni će izlazit samo sa ravnina najniže radne funkcije, dok je ostatak površine relativno neefektivan za emisiju.



SLIKA 13 Elektroni se emitiraju sa indirektno grijane katode nakon čega se njihovo ubrzanje kontrolira anodom. Cijela aparatura je zatvorena u stakleno zvono [16]

Osim u ovisnosti o temperaturi, postoji još jedna veličina zavisno o kojoj se može promatrati gustoća struje izlaznih elektrona. Ako nasuprot katode stavimo anodu koja je u odnosu na nju na nekom negativnom ili pozitivnom potencijalu (slika 13), emitirani elektroni će zavisno o tome biti usporeni ili ubrzani. Struja takvih elektrona će se ponašati prema Child-Langmuirovom zakonu

$$j = \frac{K\,V^{3/2}}{d^2} \tag{41}$$

gdje je V razlika potencijala između katode i anode, d njihova međusobna udaljenost, a K je konstanta dana kao

$$K = \frac{4}{9}\varepsilon_0\sqrt{\frac{2e}{m_e}}. \tag{42}$$

Zakon je prvi predložio Clement D. Child 1911. kao ovisnost gustoće struje planparalelnih dioda u vakuumu proporcionalne sa tri polovine napona između elektroda i obrnuto proporcionalne sa kvadratom njihove udaljenosti. Irving Langmuir je 1913. zakon proširio na slučaj cilindričnih katoda i anoda. Child-Langmuirovim zakonom možemo proučavati struju emitiranih elektrona u ovisnosti o vanjskom električnom polju.

3. Primjena termionskog efekta

Termionski efekt svakako ima bogatu povijest i zanimljive puteve kojima se došlo do njega te ga se kvalitativno i kvantitativno opisalo. Ali u cijeloj toj priči ne smijemo zaboraviti da je fizika jedna primijenjena znanost u kojoj sva otkrića do kojih dođemo želimo nekako iskoristiti kako bismo poboljšali kvalitetu života. Naravno ako slučaj nije obrnut, da tek pokušavamo objasniti, odnosno shvatiti, što neka stvar koju smo već proizveli ili dobili znači. Upravo tako je izgledala priča o termionskom efektu. Paralelno sa znanstvenicima pionirima koji su polako odgonetali efekt, jedan fenomen po jedan, razmrsujući kompliciranu mrežu informacija sve dok nisu vidjeli odgovore koje su tražili, djelovala je jedna druga skupina, manje ili više povezanih pojedinaca, koje je više zanimalo doći do izuma koji vrlo praktično pomažu u svakodnevnom životu. Ustvari, priča sa izumiteljima počela je nešto prije, odnosno prethodila je početku hvatanja u koštac s istim problemom u ozbiljnim akademskim krugovima.

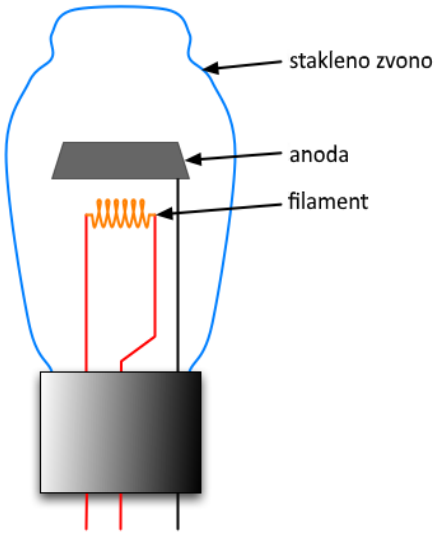
3.1. Rani razvoj

Kada govorimo o počecima opažanja termionskog efekta, neizbježno moramo krenuti od Thomasa Edisona. Davne 1883. Edison je vršio eksperimente nad svojom žaruljom s užarenom niti. Cilj mu je bio pronaći način da zaustavi nakupljanje čađe na njenoj unutrašnjoj

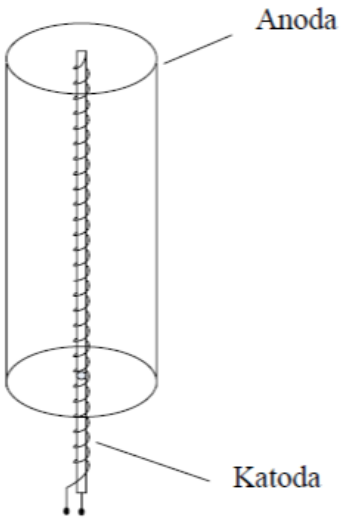
stjenci, odnosno spriječiti njeno zamagljivanje. Dobio je ideju kako bi mogao pokušati umetnuti metalnu pločicu na nekoj udaljenosti od žarne niti i vidjeti hoće li to imati kakvog učinka. Nit i pločicu je zatim serijski spojio u strujni krug sa baterijom pri čemu je pozitivan pol baterije bio priključen na pločicu. Na Edisonovo veliko iznenađenje, ampermetar koji se nalazio u strujnome krugu se otklonio ukazujući na to da krugom teče struja iako je između žarne niti i pločice prazan prostor. Edison je patentirao svoj pronalazak, iako zasigurno nije razumio fizikalnu pozadinu onoga što se odvija, niti njegovu potencijalnu vrijednost. Upravo po njemu se termionski efekt u začecima nazivao Edisonovim efektom, a i danas se može čuti da ga ljudi oslovljavaju tim nazivom. Edisonov patent, žarulja s užarenom niti sa umetnutom pločicom, u principu je predstavljala izum diode. Sada ćemo detaljnije razmotriti njezine dijelove i rad.

3.1.1. Dioda

Dioda je dobila svoje ime po tome što sadrži dva aktivna elementa, odnosno dvije elektrode unutar cijevi. Postoji više načina na koje se može sastaviti dioda, a na slici 14 i 15 nalaze se njezine klasične izvedbe. Slika 14 odgovarala bi diodi onako kako ju je osmislio Edison dok je na slici 15 model koji je kasnije osmišljen i njegova je anoda cilindričnog oblika.



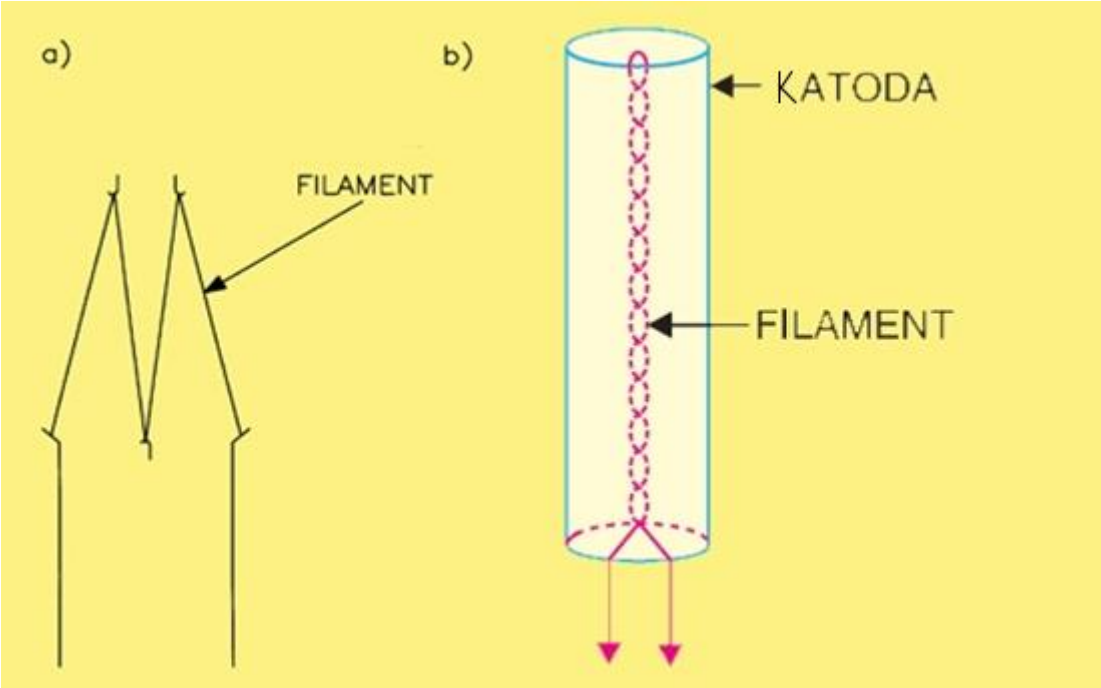
SLIKA 14 Edisonova dioda [22]



SLIKA 15 Cilindrična dioda [23]

Katode unutar svih cijevi, ne samo dioda, dijele se na direktno grijane i indirektno grijane katode, prikazane na slici 16. Direktno grijana katoda sastoji se od tanke metalne niti spojene na izvor struje. Ta metalna nit naziva se filamentom. Materijal od kojeg se najčešće radi je volfram ili torirani volfram. Prolaskom struje, filament se zagrijava te se elektroni emitiraju

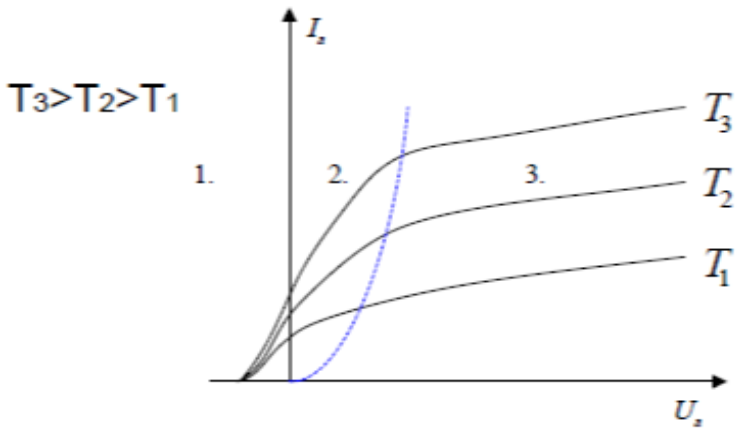
direktno sa njega. Zbog toga što brzo dostiže temperaturu pri kojoj se odvija termionska emisija, koristi se u uređajima u kojima je bitna efikasnost i brzina kojom se uređaj može početi koristiti.



SLIKA 16 a) direktno grijana katoda, b) indirektno grijana katoda [27], [28]

Nedostatak joj je što je vrlo osjetljiva na bilo kakve promjene napona u strujnom krugu što će utjecati na temperaturu filamenta i odraziti se na emisiju elektrona zbog čega će nastati šum u strujnome krugu. Druga vrsta katoda, koja je danas gotovo isključivo u primjeni, je indirektno grijana katoda i njezina izvedba je nešto kompliciranija. Katoda se sastoji od tankog metalnog cilindra gotovo u pravilu presvučenom oksidnim slojem radi veće efikasnosti emisije, kao što se može vidjeti i iz tablice 1. Filament se stavlja unutar cilindra po njegovoj dužini i u ovom slučaju koristi isključivo kao grijač, a ne za emisiju elektrona direktno s njega. Između metalnog cilindra i filamenta nalazi se izolacijski sloj te među njima nema električne veze. Kroz filament se pušta električna struja koja ga zagrijava. Toplina prelazi sa filamenta na metalni cilindar te ga na taj način posredno zagrijava, otkud je katoda dobila ime. Sa cilindra se zatim, prema zadovoljenim uvjetima termionskog efekta, emitiraju elektroni. Indirektno grijana katoda ima mnoge prednosti. Pošto je katoda u potpunosti izolirana od strujnog kruga grijača, može se stavljati na bilo koji potencijal, nezavisno od potencijala na kojem se nalazi grijač. Potrebno je napomenuti kako su tada funkcija zagrijavanja i funkcija emisije iz katode razdvojene. Također, zbog relativno velike mase cilindrične katode, potrebno je neko vrijeme kako bi se ona zagrijala ili ohladila i kao takva ne proizvodi šum u strujnome krugu zbog varirajućeg napona. Za razliku od direktno grijane katode kod koje se koristi istosmjerna struja, kod indirektno grijane katode

se može koristiti izmjenična struja za zagrijavanje. Kao negativnu stranu može se navesti to što postoje veliki gubitci snage. Najveći dio se izgubi na termalno zračenje pri prijenosu topline sa grijača na katodu i na odvođenje topline preko držača na koje se cijeli postav mora staviti. Zato samo manji dio snage grijanja odlazi na emitiranje elektrona. Katode su osjetljive na temperaturu i o katodi će zavisiti vijek trajanja elektronke. Ako je katoda previše zagrijana ili pak nedovoljno zagrijana, njezin vijek se skraćuje. „Oksidne“ elektronke također su osjetljive i na velike napone. Zato se ne koriste u velikim pojačalima snage, a i vijek trajanja im je nešto kraći zbog manje čistoće oksida. Iduće ćemo promotriti kako napon na koji postavimo anodu (u odnosu na katodu) utječe na tok struje. Tu govorimo o prijenosnim karakteristikama diode prikazanim na slici 17 za tri različite temperature. Ovisnost struje elektrona o naponu na anodi možemo podijeliti na tri područja. Prvo područje je zaporno područje, kada je anodni napon negativan. Elektroni koji izlete iz katode odbijani su anodom koja je na negativnom naponu i čim je negativnija manje elektrona može doći do nje i struja brzo padne na nulu. Drugo područje je područje prostornog naboja. To je najvažnije radno područje elektronke i režim u kojem se koristi za većinu namjena. Naboj se akumulira između anode i katode. Katoda je zagrijana na temperaturu na kojoj elektroni imaju dovoljnu energiju da izlete van, ali nemaju svi dovoljnu da dođu do anode. Povećavanjem pozitivnog napona na anodi, sve više elektrona koji su izletili iz katode dolazi do anode i njihov je odnos linearan. U treće područje, područje zasićenja, dioda dolazi kada je anodni napon dovoljno visok da privlači sve elektrone koji su napustili katodu i struja više ne raste iako možemo nastaviti pojačavati napon na anodi. To je jedan od ograničavajućih faktora dioda.

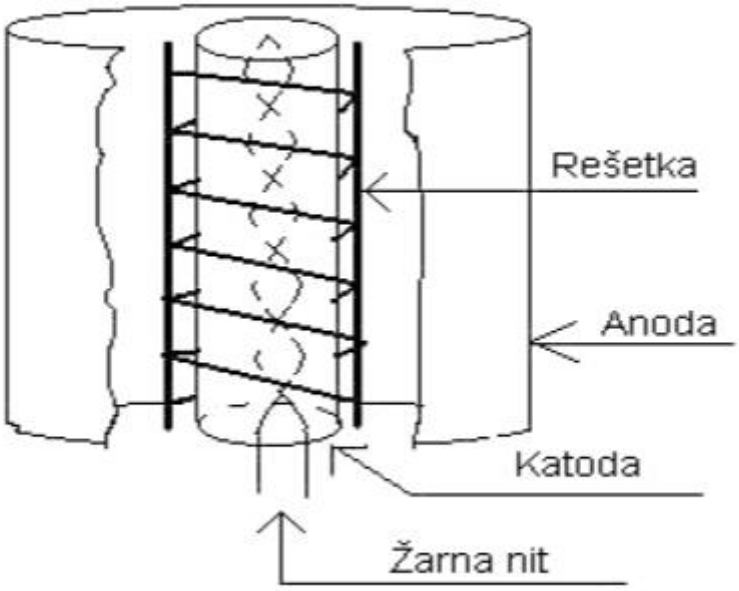


SLIKA 17 Prijenosne karakteristike diode za tri različite temperature [23]

Engleski znanstvenik John Ambrose Fleming zainteresirao se za Edisonov efekt i počeo ga proučavati. Brzo je primijetio ispravljačka svojstva diode koje ona ima za nisko frekventne signale što je objavio u radu 1890. U isto vrijeme je Guglielmo Marconi, talijanski izumitelj i električni inženjer, radio na bežičnim prijenosima radio-valova, izum koji je vodio do današnjeg radija. 1897. proširio je svoj rad i na područje Engleske gdje je osnovao tvrtku *The Wireless Telegraph & Signal Company*. Fleming je bio jedan od znanstvenika koji su pokušavali unaprijediti Marconijev relativno primitivan prijemnik. Tokom radova na njemu, shvatio je da se ispravljačka svojstva diode mogu upotrijebiti i za detekciju visoko frekventnih radio valova za što je 1904. dobio patent. Jedini problem je bio što su detektirani signali i dalje bili dosta slabi. Naime električni signali su postajali sve slabiji i slabiji kako se udaljenost od izvora signala povećavala. Komunikaciju na velike udaljenosti je omogućio tek izum triode 1907. za čiji izum je zaslužan Lee De Forest. On je pokazao dao se umetanjem dodatne mrežice između katode i anode može postići bolja kontrola toka struje. Svoju napravu De Forest je nazvao *Audion* i to je bilo prvo elektroničko pojačalo koje se naravno koristilo i kao detektor visoko frekventnih signala. Taj izum je doveo do velikog napretka u telefoniji, poput prve telefonske linije od Istočne do Zapadne obale, i revolucionirao tehnologiju koja se koristila u radio emiterima i prijemnicima. Možemo reći da je elektronička revolucija 20. stoljeća započela upravo izumom triode.

3.1.2. Trioda

Trioda svoj naziv duguje činjenici da se u njoj nalaze tri aktivna elementa, odnosno tri elektrode. Osim katode i anode, koje su i dijelovi diode, unutar triode postavlja se treća elektroda između njih dvije. Ta treća elektroda naziva se mrežica, zato jer upravo to i jest. U prvim pokušajima, Lee De Forest je kao treću elektrodu pokušao umetnuti jednostavno metalnu pločicu. Međutim, u tim uvjetima struja u strujnome krugu bi prestala teći jer je umetnuta pločica u potpunosti zaklanjala anodu i njezino polje. Zato je De Forest u idućim pokusima umjesto pločice upotrijebio mrežicu koja je bila potpuni uspjeh. Elektroni koji su izašli iz katode su osjećali polje stavljeno na mrežicu, ali mogli su dalje nesmetano prolaziti prema anodi. Na slici 18 nalazi se shematski prikaz triode. Razmotrimo sada rad triode i zašto je ona tako dobro pojačalo. Zamislimo da imamo triodu kojoj nismo stavili nikakav napon na mrežicu, dakle funkcionira poput diode. Ako bismo htjeli znatno povećati struju, morali bismo znatno povećati već i tako visoki napon na anodi, pošto je u radnom području njih dvoje u linearnom odnosu (slika 17). Međutim, isti tok struje možemo postići ako, umjesto na anodu, stavimo

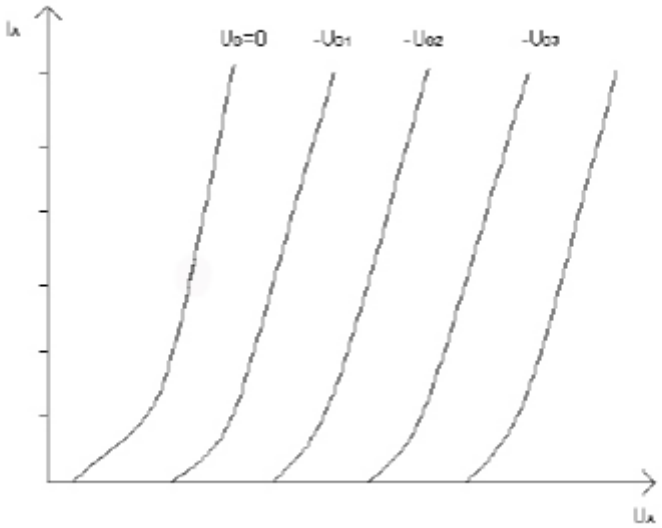


SLIKA 18 Shematski prikaz triode [23]

samo djelić tog napona na mrežicu. Dakle u ovom slučaju je napon na mrežici nekoliko redova veličine manji nego napon na anodi. Na prvi tren se može činiti čudno da mrežica na tako slabom naponu može imati tako veliki efekt pored anode na jako visokom naponu. Trik je u tome da elektrostatska sila opada sa udaljenosti. Mrežica je stoga postavljena puno bliže katodi nego što je anoda te zato ima tako veliki potencijal privlačenja elektrona. Po istom principu funkcionira i ako na mrežicu stavimo jako slabi negativan napon, što će uzrokovati da se struja elektrona znatno smanji. Stavljanje negativnog napona na mrežicu ima svoju jako korisnu primjenu u elektronici što se može vidjeti iz prijenosnih karakteristika triode prikazanih na slici 19. Za razliku od diode, postavljanjem mrežice sa negativnim naponom, rad triode ne dolazi u područje zasićenja pošto mrežica kontrolira područje prostornog naboja kako ne bi došlo do toga da svi elektroni koji su izašli iz katode mogu doći do anode. Triodom stoga možemo kontrolirati relativno velike promjene u struji sa vrlo malim naponom.

U godinama koje su slijedile nakon izuma elektronske cijevi, postojale su kontroverze oko principa na koji ona funkcionira. Također, tehnike stvaranja vakuuma su bile loše u to doba. Neki znanstvenici su vjerovali da termionska emisija ovisi o kemijskoj reakciji ioniziranog plina i oksidne katode, dok su drugi smatrali da je termionska emisija fundamentalno svojstvo metala. Dilemu su razriješili Richardson sa svojim teorijskim objašnjenjem termionske emisije

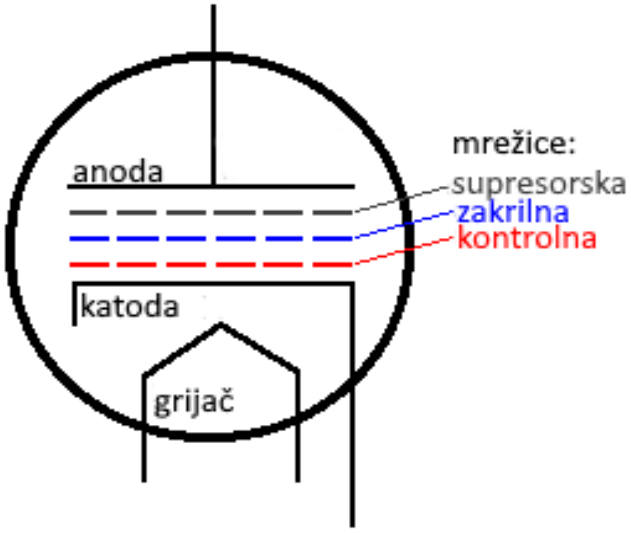
i Langmuir koji je uspio postići prilično dobar vakuum i odrediti ovisnost anodne struje i napona. To je otvorilo vrata za masovnu produkciju elektronskih cijevi za vojne svrhe u Prvom



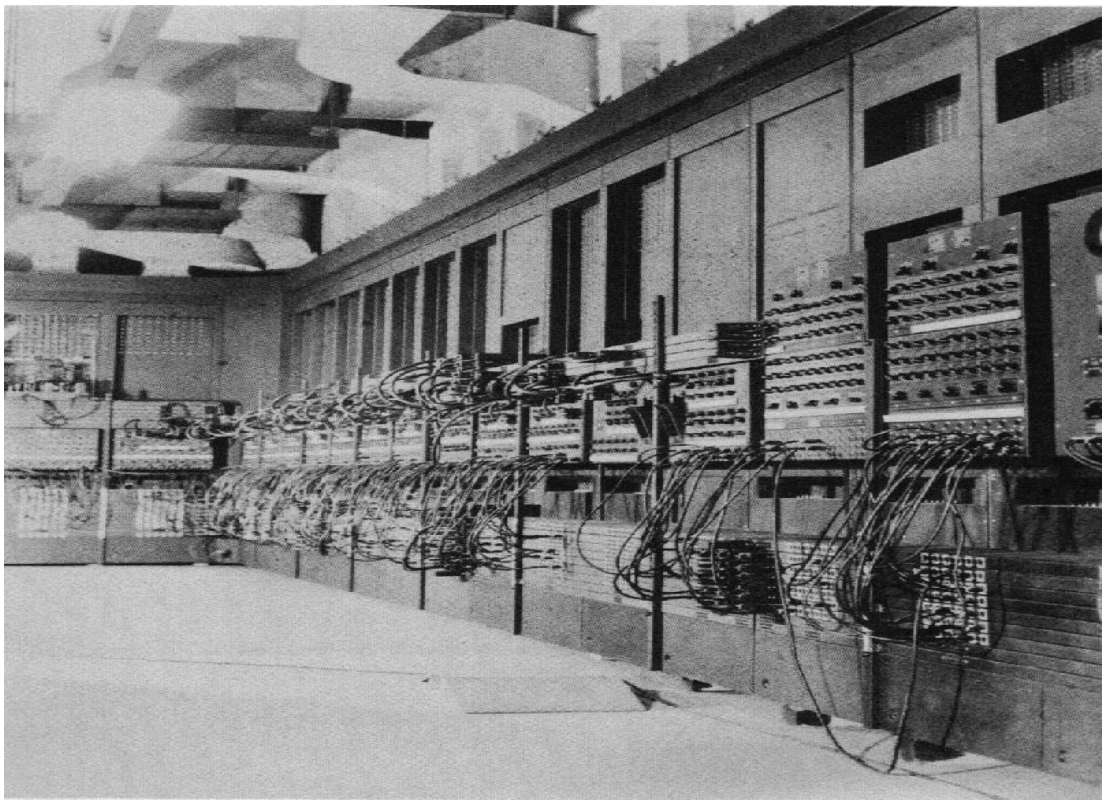
SLIKA 19 Prijenosne karakteristike triode [23]

svjetskom ratu. Langmuir i Harold Arnold su također prvi, nezavisno jedan od drugoga, prepoznali potencijal koji ima stavljanje oksidnog premaza na katodu što je uvelike povećalo emisiju elektrona, a time i efikasnost elektronske cijevi. Do kraja Prvog svjetskog rata princip rada elektronki je bio detaljno opisan, a njihova godišnja proizvodnja je do 1918. porasla na 300 000 komada u Francuskoj, Britaniji i Njemačkoj. Osim za vojne potrebe, triode su uvelike bile korištene u telekomunikacijskom sektoru te za emitiranje, dvije grane koje su novim izumom učinile velike korake naprijed. Elektronske cijevi su bile tehnologija na kojoj se i dalje nastavilo raditi kako bi je se poboljšalo i unaprijedilo. Tako se u cijev dodala još jedna elektroda čime je izumljena tetroda. Četvrta elektroda bila je zakrilna mrežica koju se serijski spojilo nakon prethodne mrežice, a svrha joj je bila da smanji ukupni kapacitet u strujnome krugu. Međutim uskoro se uočilo kako i tetroda ima svojih nedostataka. Problem koji je uzrokovala zakrilna mrežica bila je sekundarna emisija. Kako se zakrilna mrežica nalazila na pozitivnom potencijalu, elektroni su bili toliko ubrzani da su, kada bi došli do anode, iz nje mogli izbacivati elektrone. Neki od tih elektrona bili su ispaljeni natrag u cijev. Pri tome bi se elektroni počeli gomilati između zakrilne mrežice i anode što bi u konačnici rezultiralo manjom strujom. Dodavanjem još jedne mrežice, supresorske mrežice, taj efekt je poništen. Takva elektronska cijev naziva se pentodom i shematski je prikazana na slici 20. Supresorska mrežica djeluje tako

da bilo koje elektrone emitirane sekundarnom emisijom sa anode odbija natrag prema njoj jer je postavljena na isti potencijal kao i katoda. Izumom pentode elektronska cijev je dobila svoj konačni oblik. U elektronsku cijev se može dodavati još mrežica, ali s njima nije uveden nikakav novi fizikalni princip, već bi se radilo o tome da se naprosto kombinira funkcije više različitih elektronki u istoj cijevi.



SLIKA 20 Shematski prikaz pentode [22]



SLIKA 21 Kompjutor ENIAC, napravljen od skoro 20 000 elektronskih cijevi [22]

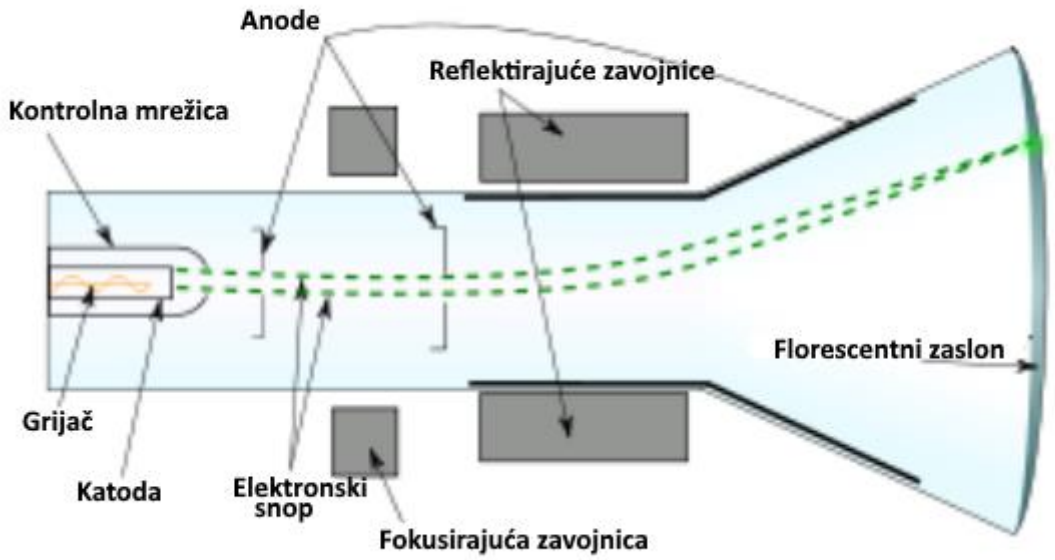
Jedna od svakako interesantnijih upotreba elektronskih cijevi dogodila se 1946. izgradnjom jednog od prvih računala, ENIAC-a (*Electrical Numerical Integrator And Calculator*), prikazanog na slici 21. Iako se današnja računala ne zasnivaju na toj tehnologiji, njegov značaj nalazi se u ideji od koje je sve krenulo. Vjerojatno ne iznenađuje da je i njegovu izgradnju financirala američka vojska. Prvotna namjena bila mu je računati složene artiljerijske tablice, kako bi unaprijedili preciznost oružja. Ali ENIAC je imao mnogo nedostataka. S obzirom da je bio izgrađen od skoro 20 000 elektronskih cijevi, trošio je nevjerojatnu količinu snage za svoj rad, uz to što je bio fizički velik i težio 30 tona. Također je zahtijevao stalno održavanje i popravke uz tako velik broj elektronki. To sve vodilo je do toga da se počelo istraživati alternativne tehnologije koje bi obavljale isti posao efikasnije, što je dovelo do izuma tranzistora 1947. Makar su tranzistori istisnuli upotrebu cijevi u računalima u svega nekoliko godina, njihova važnost i dalje ostaje u viziji koju su donijeli, a koja je vodila do današnjih osobnih računala bez kojih zasigurno ne bismo mogli više zamisliti svakodnevni život.

3.2. Moderna upotreba

Iako ih možda ne primjećujemo, elektronske cijevi su i dalje ostale u upotrebi u raznim područjima sve do danas. Koriste se kao odašiljači radio i tv signala. Vojska ih koristi u radarima. I dalje se koriste u jednoj od svojih prvotnih svrha, kao pojačala. Nažalost, oni su nešto skuplja tehnologija od tranzistora, pa ne postoje u niskom i srednjem cjenovnom rasponu. Međutim pravi glazbeni entuzijasti ih i dalje preferiraju nad njihovom pristupačnijom poluvodičkom tehnologijom. Elektronska cijev se nalazi i u jednom od najraširenijih kućanskih pomagala, mikrovalnoj pećnici. Točnije, koristi se jedna posebna izvedba, tzv. magnetron. On je suštinski elektronska cijev postavljena u centar elektromagneta koji proizvodi magnetsko polje. Oscilirajuće elektromagnetsko polje u mikrovalnoj uzrokuje da dipolne molekule u hrani promijene orijentaciju milijardu puta u sekundi. Pri tome gibanju sudaraju se jedne s drugima i brzo proizvode toplinu.

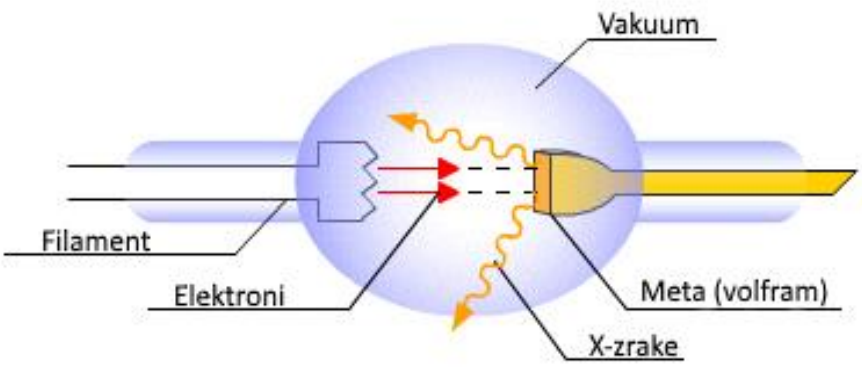
Iduća naprava od velike važnosti jest CRT (*Cathode Ray Tube*), odnosno katodna cijev. Shematski je prikazana na slici 22, a sada ćemo objasniti njezine dijelove i funkcioniranje. Sastoji se od elektronskog topa (zagrijana katoda iz koje izlaze elektroni), mrežica i anode, ali u katodnoj cijevi su također postavljene i otklanjajuće zavojnice i fluorescentni zastor. Ti dodatni dijelovi omogućuju nastanak slike. Magnetsko polje zavojnica okomito je na električno tako da mijenjajući jačinu magnetskog polja možemo mijenjati otklon, odnosno put elektrona.

Elektroni nakon toga udaraju u fluorescentni zaslon pri čemu nastaje slika. Ova tehnologija bila je široko primijenjena na naprave sa zaslonima, poput televizora i računalnih monitora. U novije vrijeme ih je istisnula upotreba LCD i plazma ekrana, ali još uvijek se koriste za nastanak slike u osciloskopima.



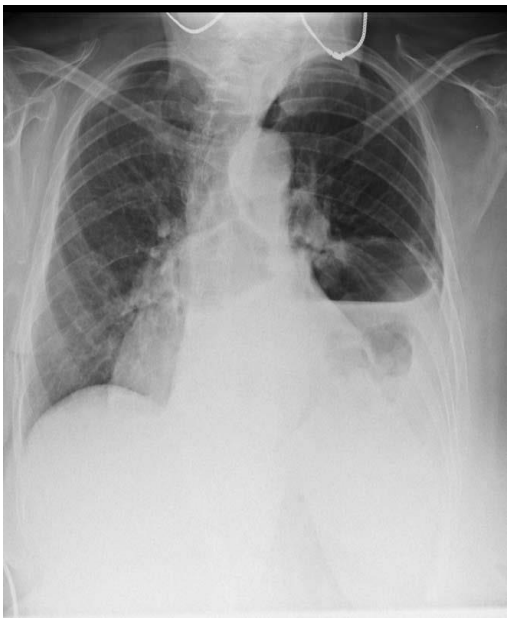
SLIKA 22 Shematski prikaz katodne cijevi [22]

Veliku važnosti ima upotreba elektronskih cijevi u medicini, npr. u rendgenima. Princip rada i dijelove rendgenske cijevi prikazuje slika 23. Kao anoda, postavlja se meta od volframa. Elektroni će prolaskom kroz metu deakcelerirati jer će se sudarati sa atomskim česticama mete, čime će anoda emitirati x-zrake. Različite tjelesne strukture imaju različitu sposobnost blokiranja nadolazećeg x-zračenja i tako dobivamo karakterističnu rendgensku sliku. Slični



SLIKA 23 Shematski prikaz rendgenske cijevi [22]

skeneri upotrebljavaju se u zrakoplovnim lukama i ostalim mjestima gdje je potreban visok stupanj sigurnosti. Pomoću njega se provjerava sadržaj prtljage kako bi se spriječilo unošenje opasnih predmeta. Skener funkcionira na istom principu kao i medicinski. Na slikama 24 i 25 nalaze se primjeri rendgenske slike pluća i rendgenska slika skenirane putne torbe.



SLIKA 24 Rendgenska slika pluća [24]



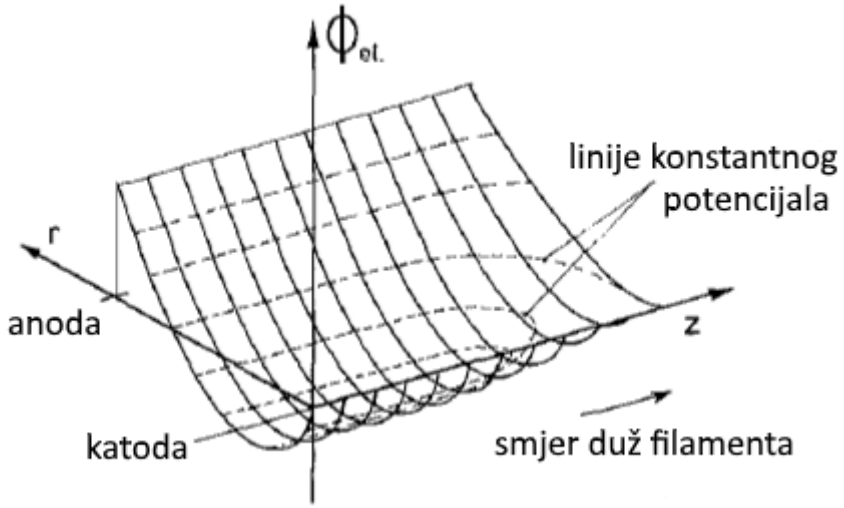
SLIKA 25 Rendgenska slika putne torbe [22]

Elektronske cijevi imaju svoju upotrebu i za znanstvene svrhe. Jedno od trenutno najvećih polja istraživanja koristi ih u svojim napravama. Naime nalaze se u akceleratorima čestica koji imaju vitalnu ulogu u nastojanju pronalaska odgovora na neka od najvažnijih pitanja fizike zbog sposobnosti rastavljanja čestica na njihove fundamentalne komponente.

3.2.1. Laserska spektroskopija

Dioda može biti vrlo osjetljiv detektor iona. Primjena termionske diode u spektroskopiji se temelji na procesu sudarnih ionizacija pobuđenih atoma. Sada ćemo objasniti kako taj proces funkcionira. U cijevi se nalazi element koji želimo istražiti. Atome u cijevi pobuđujemo fotonima čija frekvencija odgovara atomskoj rezonantnoj frekvenciji kako bi se pobudili na visoko-ležeće stanje. Dok su u tom stanju, postoji određena vjerojatnost da se sudare sa atomom plina nekog drugog elementa dodanog u cijev, ili sa istovrsnim atomom u nepobuđenom stanju. U oba slučaja se atomi sudarom ioniziraju.

Produkcija iona se može lako detektirati jer, kao posljedica, teče znatno veća struja u strujnome krugu. Podrijetlo tog fenomena možemo odgonetnuti ako se prisjetimo da u svakoj diodi postoji prostorni naboj koji se tamo gomila jer elektroni izlijeću iz katode, a ne može ih sve privući anoda. Na slici 26 prikazan je potencijal unutar diode kao funkcija radijalne udaljenosti od katode *r* i smjera duž filamenta katode *z*. U točkama najnižeg potencijala nalazi se najviše elektrona odnosno prostorni naboj je najgušći. Pozitivni ioni atoma koji istražujemo skupljat će se na dnu potencijalne jame gdje su zarobljeni značajno dugo vrijeme. Samim time



SLIKA 26 Potencijal unutar diode kao funkcija radijalne udaljenosti od katode *r* i smjera duž filamenta katode *z* [29]

područje prostornog naboja će postati manje negativno te će krugom poteći jača struja. Tada se spektar atoma može lako dobiti podešavajući frekvenciju svjetlosti na područje prijelaza i zabilježivši signal diode.

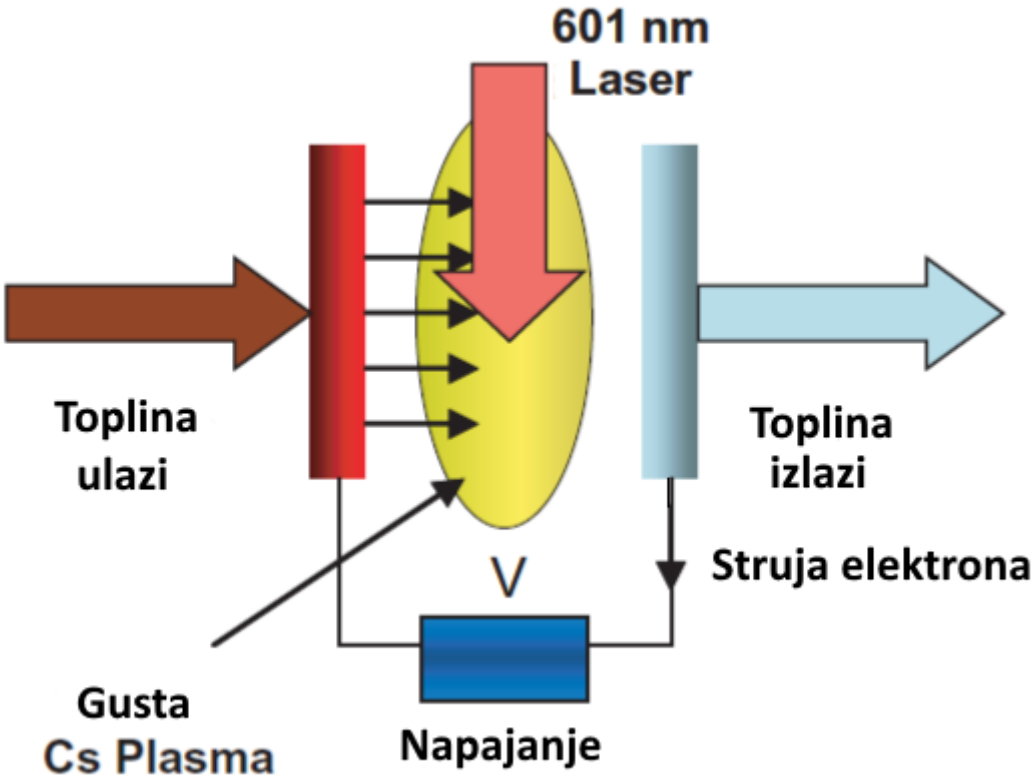
Iako se dioda može uspješno primijeniti na molekularnu spektroskopiju, uglavnom se koristi na području atomske spektroskopije. Za sada su ovom metodom najviše istraženi alkalijski i zemno-alkalijski elementi jer ih je lako dovesti u plinovito stanje u cijevi, a također usput snižavaju radnu funkciju katode. Ali u principu ne postoji ograničenje na izbor elemenata koji bi se ovim putem mogli istraživati. Također, dioda je vrlo pogodna i za detekciju elemenata u tragovima.

3.2.2. Konverter energije

Termionski konverter energije jako je korisna naprava koja pretvara toplinu direktno u struju, povećavajući tako efikasnost strojeva. Ideja iza ovog izuma vrlo je interesantna. Uzelo

se jedan od većih nedostataka termionskih cijevi za većinu primjena, njihovu ogromnu potrebu zagrijavanja na visoke temperature, i pretvorilo je se u prednost. Naime, dodavanjem elektronskih cijevi u cikluse strojeva koji već i tako proizvode nepotrebnu toplinu i rasipaju energiju, možemo povećati njihovu efikasnost za do 25%.

Glavni limitirajući faktor koji sprečava još efikasnije funkcioniranje samog konvertera jest prostorni naboj koji se nakuplja u elektronskoj cijevi. Fizikalno to je nemoguće izbjeći, osim dodavanjem mrežice na negativnom potencijalu, ali tada bismo negativnom amplifikacijom upravo gubili struju koju pokušavamo proizvesti. Stoga je iskorišten jedan drugi princip, posuđen iz laserske spektroskopije. Naime ionizacijom se može neutralizirati prostorni naboj i smanjiti područje negativnog potencijala koji on stvara. Tehnologija koja se danas koristi jest dodavanje cezija. Dodaje se kao plin u elektronsku cijev gdje se pri sudarima sa elektronima ionizira, čime nastaje gusta plazma. To se događa u režimu visokog tlaka. Pri niskome tlaku, cezij se ionizira na površini katode. Obje izvedbe imaju svoje nedostatke. Sudarima nastaje značajan otpor toku struje što dovodi do gubitka energije. Ioni na površini katode pak povisuju njezinu radnu funkciju. Znači da se emitira manje elektrona što opet uzrokuje manju struju.



SLIKA 27 Shematski prikaz rada termionskog konvertera energije [30]

Tehnologija na kojoj se danas radi, a koja bi trebala smanjiti potrebu ioniziranja cijevi cezijem, jest laserski poboljšani konverter. Kontinuirani laser postavljen na 601 nm izvrstan je izvor ionizacije. Postavlja ga se da djeluje na područje između dviju elektroda kao što je shematski prikazano na slici 27. Slični rezultati dobivenu su i sa pulsirajućim laserom postavljenim na valnu duljinu od 852 nm. U tijeku su eksperimentalne verifikacije dosadašnjih rezultata i teorijskih pretpostavki, sa namjenom primjene u budućim tehnologijama.

Termionski konverter energije ima obećavajuću primjenu u svemirskim letjelicama. Visoka temperatura kojoj je letjelica izložena sa strane koju zagrijava sunčevo zračenje, čini je savršenim kandidatom za upotrebu energijskih konvertera. Izvor topline je već prisutan, samo treba implementirati tehnologiju na pravi način kako bi je se iskoristilo. Dosadašnja istraživanja pokazuju kako bi upravo oni mogli biti od pomoći kao dodatni izvor toliko potrebne energije na svemirskim letovima.

4. Metodički dio

Fotoelektrični učinak obrađuje se na početku četvrtog razreda srednje škole, u sklopu nastavne cjeline Valno-čestična svojstva elektromagnetskog zračenja i tvari, nakon uspješno usvojenih osnovnijih koncepata tokom prethodnog školovanja. Niz tih koncepata bit će upotrijebljen i pomoći će u razumijevanju i objašnjenju fotoelektričnog učinka. Ovdje ću prikazati vođenje jednog interaktivnog i istraživački usmjerenog sata, gdje je cilj intelektualno angažirati učenike. Tradicionalni predavački način poučavanja pokazao je puno slabije rezultate pri testiranju učeničkog znanja i razumijevanja fizikalnih problema od nastave koja uključuje interaktivne nastavne metode. Uloga nastavnika se zato uvelike promijenila. Više se ne smatra poželjnim predavati *ex cathedra* nakon čega se od učenika očekuje da samo reproduciraju dobivene informacije. Kroz istraživački vođeni i koncipirani sat, učenici sami rješavaju probleme i dolaze do njihovih rješenja, razvijajući sposobnosti logičkog razmišljanja i znanstvenog zaključivanja. Učenici kroz sat fizike razvijaju svoje kognitivne sposobnosti, konceptualno razumijevanje i sposobnost pristupanja novim problemskim situacijama. Ovaj oblik nastave također odražava istraživački karakter fizike kao znanstvene discipline. Sat je potrebno koncipirati kako bi se učenici zainteresirali za problem pred njima, aktivno angažirali na satu, sudjelovali u diskusijama, analizirali probleme, uspoređivali ih sa već poznatim situacijama te tako sami znanstvenim zaključivanjem došli do odgovora.

4.1. Obrazovni ishodi i nastavne metode

Jedan od najvažnijih stupova organizacije dobrog nastavnog sata jesu njegovi obrazovni ishodi. Pod tim se podrazumijeva sve što će učenik znati i biti u stanju napraviti poslije sata, kao i sposobnosti koje će učenici razvijati na satu. Očekivani obrazovni ishodi sata fizike na kojem se obrađuje fotoelektrični učinak su sljedeći:

- opisati pojavu fotoelektričnog učinka i pripadne eksperimente
- matematički opisati fotoelektrični učinak
- protumačiti značenje granične frekvencije
- definirati izlazni rad
- nacrtati graf ovisnosti energije elektrona o frekvenciji svjetlosti
- usporediti izlazne radove metala na temelju grafa te iz toga odrediti koji metali imaju veći, a koji manji izlazni rad
- opisati Einsteinovo tumačenje fotoelektričnog učinka i protumačiti pomoću njega kako fotoelektrični učinak ovisi o frekvenciji, a kako o intenzitetu svjetlosti
- navesti oznaku i mjernu jedinicu za Planckovu konstantu te je prepoznati kao nagib grafa energije u ovisnosti o frekvenciji
- objasniti pojam fotona i matematički iskazati njegovu energiju
- objasniti značenje zaustavnog napona
- razvijati sposobnosti promatranja i opažanja
- razvijati sposobnosti logičkog razmišljanja i znanstvenog zaključivanja
- razvijati sposobnosti usmenog i pismenog izražavanja

Ništa manje važni nisu niti odgojni ishodi koje učenici usvajaju. Vrijednosti koje će usvajati tijekom sata su marljivost, izražavanje vlastitog mišljenja, ali isto tako uvažavanje tuđeg mišljenja i načina zaključivanja. Također će razvijati sistematičnost pri vođenju bilješki, aktivno sudjelovanje u raspravi i sposobnost apstraktnog razmišljanja.

Predviđam kako su za obradu fotoelektričnog efekta potrebna dva nastavna sata zbog opširnosti gradiva, kako bi se kvalitetno moglo upoznati sa samim fenomenom i zatim kako bi se model primijenio i provjerilo njegovo usvajanje.

4.2. Tijek nastavnog sata

Nastavni sat podijeljen je u tri glavne cjeline. U prvom se dijelu učenici upoznaju s novom pojavom. Pred njih se stavlja otvoreno pitanje ili pokazuje pokus, kojima je cilj zainteresirati učenike za novu nastavnu jedinicu, potaknuti ih da krenu razmišljati o problemu pred njima i ponude svoja kreativna rješenja. Prikupljaju se učeničke ideje koje se koriste kako bi se na njima zajedno gradilo prema fizikalnom modelu koji želimo opisati. Drugi dio je središnji ili glavni dio kada postavljamo jedno ili više istraživačkih pitanja. Nakon što smo upoznali novu pojavu, želimo je istražiti, vidjeti o čemu ovisi i matematički opisati. Zajedno s učenicima konstruiramo fizikalni model pojave i njegov matematički opis. U završnom dijelu želimo razvijeni model primijeniti i testirati. Sada učenici imaju priliku upotrijebiti novo znanje i neposrednije ga doživjeti, te ga tako još bolje uklopiti u svoj mentalni model. Sada ću prikazati primjer tako vođenog sata, gdje kroz niz pitanja pokušavam potaknuti učenike da što samostalnije dođu do konkretnih zaključaka i konstruiraju model pojave. Svako pitanje ima svoju namjenu i cilj mu je usmjeriti učenike u kojem pravcu da razmišljaju, odnosno što je ono bitno na što trebaju obratiti pažnju, a u kojem smjeru možda sami ne bi dobili ideju razmišljati. Zato ću nakon svakog pitanja napisati kratko objašnjenje smjera u kojem je ono zamišljeno voditi učenike u razmišljanju i istraživanju.

4.2.1. Uvodni dio

Možemo li pomoću svjetlosti izbiti elektroskop?

Prikupljam učeničke ideje dok se oni prisjećaju raznih izvora svjetlosti od npr. Sunčeve svjetlosti, žarulje, svijeća… Ako se nitko sam ne dosjeti, postavljam potpitanje zna li netko kakve se lampe koriste u solariju. Učenici se prisjećaju da su tamo postavljene UV lampe.

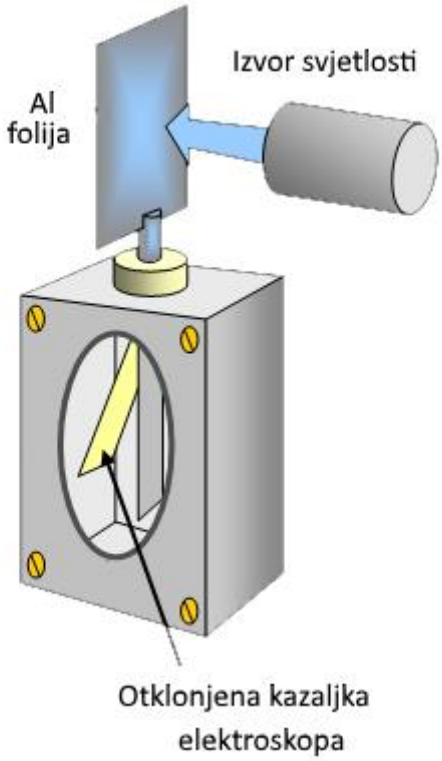
Pokus 1: Obasjavanje negativno nabijenog elektroskopa svjetlom obične žarulje jakog intenziteta.

Na elektroskopu se nalazi Al folija koja je negativno nabijena.

Kako je sada nabijen elektroskop?

Elektroskop je negativno nabijen.

Što mislite što će se dogoditi ako tako nabijeni elektroskop obasjamo običnom svjetlošću? Koje su vaše pretpostavke?



SLIKA 28 Eksperimentalni postav za obasjavanje elektroskopa običnom žaruljom [31]

Upućujem učenike da svoja predviđanja individualno zapišu u svoje bilježnice. Prozivam ih nekoliko da pročitaju predviđanja.

Sada frontalno izvodim pokus pred cijelim razredom, pazeći da ga svi vide. Pokus je bitno nekoliko puta ponoviti kako bi svi učenici imali vremena vidjeti što se dogodilo i uspjeli usmjeriti pažnju na pokus pred njima.

Opišite što ste vidjeli u pokusu.

Obasjavanjem elektroskopa običnom svjetlošću nije došlo do nikakve promijene, otklonjena kazaljka je ostala u istoj poziciji.

Pozivam učenike da skiciraju pokus u bilježnice.

Zašto se elektroskop nije izbio? Možemo li nešto napraviti da se elektroskop izbije pomoću svjetla obične žarulje?

Učenici sugeriraju da možda nije dovoljno jaka, da je potrebna svjetlost jačeg intenziteta.

Pojačavam intenzitet žarulje i izvodim pokus pred razredom.

Što ste tijekom pokusa primijetili? Zapišite svoja opažanja.

Elektroskop se nije izbio svjetlošću obične žarulje niti kada smo joj povećali intenzitet.

Pokus 2: Obasjavanje Al folije na elektroskopu živinom svjetiljkom.

Što mislite što će se dogoditi ako negativno nabijeni elektroskop obasjamo živinom svjetiljkom? Koje su vaše pretpostavke?

Učenici zapisuju u bilježnice svoje pretpostavke i nekoliko ih iznosi pred razredom.

Opišite što ste vidjeli u pokusu. Zapišite u bilježnice.

Negativno nabijeni elektroskop se pri obasjavanju živinom svjetiljkom izbio.

Promotrite što se dogodi kada između živine svjetiljke i pločice stavimo staklo.



SLIKA 29 Obasjavanje elektroskopa UV lampom

Ponavljamo pokus, ali sada se elektroskop ponovo više ne izbija. Učenici mogu zaključiti da je upravo UV svjetlost koju staklo ne propušta odgovorna za izbijanje elektroskopa.

Kako biste mogli objasniti činjenicu da se elektroskop izbija kada ga obasjamo UV svjetlom?

Učenici zaključuju da elektrona, koje smo doveli štapom, više nema na elektroskopu, da su nekako napustili elektroskop, maknuli se s njega.

Zašto su mogli napustiti elektroskop? Što smo im morali dovesti kako bi ga mogli napustiti?

Elektroni su mogli napustiti elektroskop jer su imali dovoljno energije.

Otkud im energija za napuštanje elektroskopa? Otkud su je mogli dobiti?

Učenici uviđaju vezu između svjetla kojim smo obasjavali elektroskop i izbacivanja elektrona te zaključuju da im je svjetlo nekako predalo energiju. Uvodimo naziv fotoelektrični učinak i zaključujemo da je to pojava izbacivanja elektrona iz metala pomoću elektromagnetskog zračenja.

Na ploču i u bilježnice stavljamo naslov nastavnog sata.

4.2.2. Središnji dio

Istraživačko pitanje: O čemu ovisi fotoelektrični učinak i kako ga matematički opisati?

Ovo je glavno pitanje na koje daljnjim vođenim istraživanjem učenici pokušavaju odgovoriti.

Zašto elektroni sami spontano ne napuštaju metal? Drži li ih nešto unutra? Kako fizikalno možete objasniti činjenicu da elektroni ne mogu izaći iz metala?

Učenici zaključuju da unutar metala moraju postojati sile koje drže elektrone u njemu.

Ako elektronu predamo točno iznos energije koji mu je potreban da izađe iz metala, kolika će biti njegova kinetička energija nakon što iz metala izađe?

Pošto je energija koju je elektron dobio jednaka energiji koja mu je potrebna da iz njega izađe, njegova kinetička energija poslije izlaska iznosila bi 0 J.

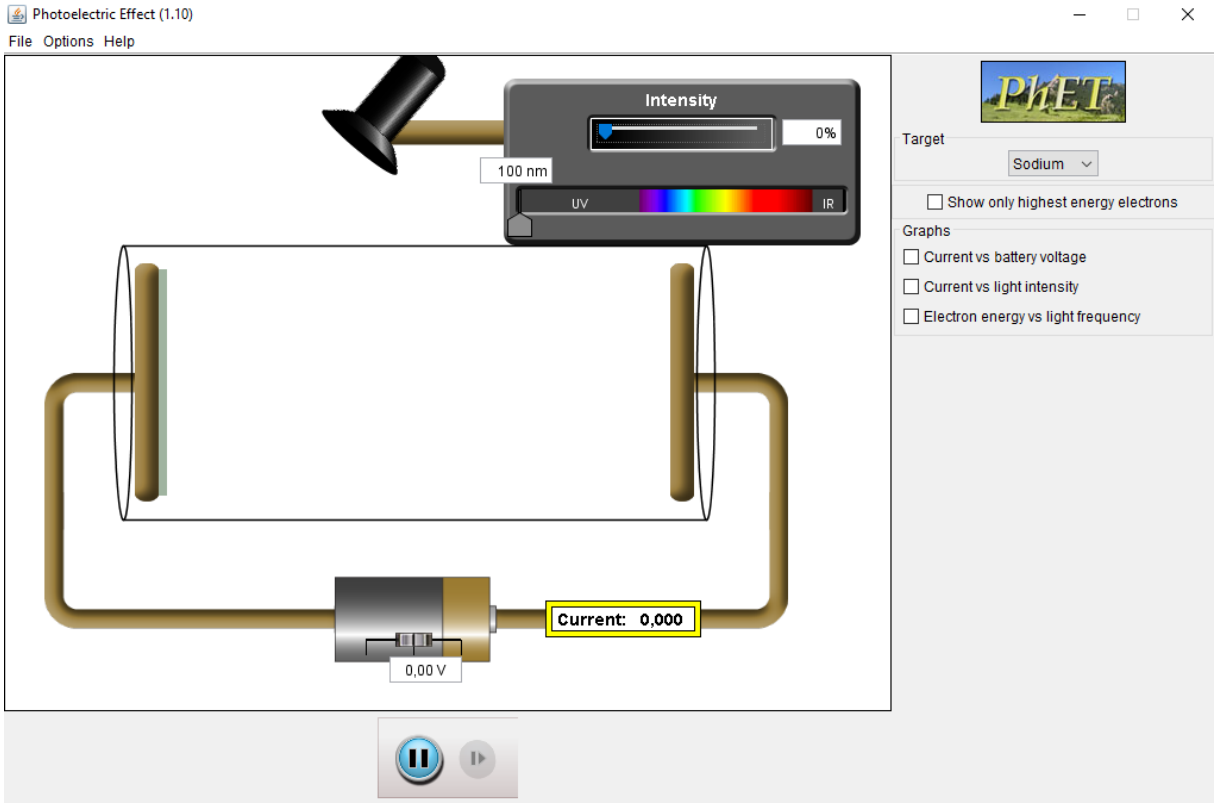
Najmanju energiju koju je potrebno dovesti elektronu da izađe iz metala nazivamo izlaznim radom.

Kolika treba biti frekvencija elektromagnetskog zračenja da bi došlo do fotoelektričnog učinka? Mora li svjetlost biti baš ultraljubičasta? Kako biste to provjerili? Istražite pomoću simulacije kako frekvencija upadne svjetlosti utječe na pojavu fotoelektričnog učinka.

Frekvencija zračenja treba biti dovoljno velika, a to možemo provjeriti ako kontinuirano mijenjamo frekvenciju izvora kojima obasjavamo metal.

Pokus 3: PhET simulacija fotoelektričnog učinka.

Za ovaj pokus potrebno je da svaki učenik ima pristup osobnom računalu na kojem se nalazi simulacija. Učenici mogu individualno kontrolirati postavke i gledati rezultate pokusa koji izvode. Slika 30 prikazuje snimku zaslona simulacije na osnovnim postavkama.



SLIKA 30 PhET simulacija za fotoelektrični učinak [32]

Eksperimentalni postav se sastoji od katode i anode serijski spojene na bateriju kojoj možemo varirati napon i polaritet. Za sada držite napon baterije na nuli. Elektrode su zatvorene u vakuumskoj cijevi. Svjetiljci kojom obasjavamo katodu možemo namještati intenzitet i frekvenciju zračenja. Možemo izabrati nekoliko materijala od kojih je načinjena katoda. Promatranje ćemo započeti od natrija i frekvenciju postavit na najnižu.

Koje parametre morate držati stalnima kako biste provjerili kako fotoelektrični učinak ovisi o frekvenciji?

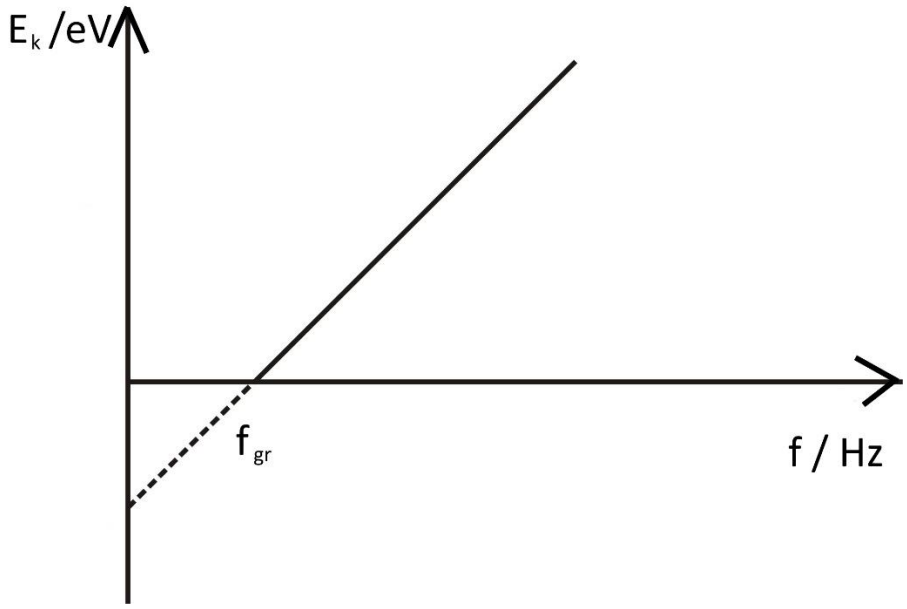
Ako želimo provjeriti kako frekvencija utječe na pojavu fotoelektričnog efekta, moramo držati stalnim intenzitet svjetla i vrstu materijala od kojega je načinjena katoda.

Pogledajte što se događa i zapišite što opažate.

Kako smanjujemo frekvenciju zračenja, elektroni koji izlaze su sve sporiji i sporiji, dok ne dođemo do frekvencije ispod koje više niti jedan elektron ne izlazi.

Na simulaciji pogledajte kako izgleda graf ovisnosti kinetičke energije elektrona o frekvenciji svjetlosti. Skicirajte ga kvalitativno u bilježnicu.

Obilazim razred da vidim kako napreduju i prozivam nekog da nacrta graf na ploči.



SLIKA 31 Graf ovisnosti kinetičke energije elektrona o frekvenciji svjetlosti

Koje je značenje vrijednosti frekvencije u kojoj pravac siječe apscisu?

Frekvencija u kojoj pravac siječe apscisu je minimalna frekvencija na kojoj dolazi do fotoelektričnog efekta.

Napominjem da to definiramo kao graničnu frekvenciju.

Kako biste istražili je li granična frekvencija ista za sve metale?

Učenici predlažu da bi mogli obasjavati neki drugi metal svjetlom.

Ako promijenimo metal od kojeg je načinjena katoda, kako će to utjecati na graničnu frekvenciju? Koje su vaše pretpostavke?

Prozivam nekoliko učenika da izraze svoje mišljenje pa ih upućujem da to isprobaju pokusom.

Što ste vidjeli da se dogodilo u pokusu?

Granična frekvencija je različita za različite materijale.

Što pretpostavljate, ovisi li granična frekvencija o intenzitetu svjetlosti?

Prikupljam učeničke ideje dok se javljaju i obrazlažu svoje mišljenje.

Kako na fotoelektrični učinak utječe ako mijenjamo intenzitet svjetla? Kako utječe ako mijenjamo intenzitet svjetla za koje smo vidjeli da ne izaziva fotoučinak, a kako za svjetlo za koje smo vidjeli da ga izaziva?

Promjena intenziteta upadnog zračenja ispod granične frekvencije nema nikakav učinak na fotoučinak, i dalje ga ne može izazvati. Ako povećamo intenzitet svjetlosti koja već izaziva učinak, poveća se broj izbačenih elektrona, ali ne i njihova brzina.

Možete li rezultate pokusa objasniti pomoću valnog modela svjetlosti? Zašto?

Rezultate pokusa ne možemo objasniti pomoću valnog modela svjetlosti jer bi se prema njemu povećanjem intenziteta svjetlosti morala povećati i kinetička energija elektrona jer je energija vala proporcionalna s intenzitetom. Dakle s većim intenzitetom trebala bi biti veća i energija svjetlosti.

Einstein je pretpostavio da se svjetlost sastoji od paketića (kvanata) energije koje je nazvao fotonima. Energija svakog fotona je $E = hf$, gdje je h Planckova konstanta koja iznosi $6.626 \cdot 10^{-34}$ Js. Može li se pomoću njegove pretpostavke objasniti fotoelektrični učinak? Kako elektron dobiva energiju koja mi je potrebna za izlazak iz metala?

Elektronu energiju predaje foton.

Ako je energija ulaznog fotona veća od izlaznog rada, kolika će biti kinetička energija elektrona u tom slučaju? Napišite izraz za kinetičku energiju elektrona. Interpretirajte ga.

$$E_k = hf - W_i$$

Kinetička energija izlaznog elektrona jednaka je energiji fotona umanjenoj za izlazni rad.

Usporedite taj izraz s grafom ovisnosti kinetičke energije elektrona o frekvenciji upadne svjetlosti. Što možete odrediti iz nagiba pravca u grafu, a što iz odsječka na ordinati?

Izraz kojim smo opisali fotoelektrični efekt i graf su u dobrom slaganju. Iz nagiba pravca možemo odrediti Planckovu konstantu *h*, a iz odsječka na ordinati možemo odrediti izlazni rad.

Pomoću Einsteinove hipoteze objasnite fotoelektrični efekt. Kako energija elektrona ovisi o frekvenciji, a kako o intenzitetu zračenja?

Kada foton pogodi elektron, ako je energija fotona veća od izlaznog rada metala, elektron će izaći iz metala. Kada povećamo intenzitet svjetlosti, više elektrona izlazi iz metala, jer metal

gađamo s više fotona. Ali, ako ti fotoni nemaju energiju koja je veća od izlaznog rada metala, možemo povećavati intenzitet , ali do fotoučinka ne može doći.

4.2.3 Završni dio

1. Kvalitativno skicirajte $E_k - f$ graf za neki metal kojemu je izlazni rad W_x. Na istom grafu nacrtajte pravac za drugi metal, kojemu je izlazni rad W_y veći od izlaznog rada prvog metala.

2. Katodu obasjavate ultraljubičastom svjetlosti i iz nje izlijeću elektroni nekom kinetičkom energijom različitom od nule. Kako biste mogli ubrzati elektrone nakon što su već napustili metal? Nacrtajte stupčasti dijagram energije za sustav kojeg čini elektron i napišite jednadžbu energija.

3. Katodu obasjavamo ultraljubičastom i iz nje izlijeću elektroni. Anodu stavljamo na negativan napon. Zaustavni napon je definiran kao najmanji napon pri kojem elektroni ne uspiju doći s katode na anodu. Koje dvije energije su jednake kada uspijemo zaustaviti izbačene elektrone? Skicirajte stupčasti dijagram energije za sustav kojeg čini jedan elektron i napišite jednadžbu energija.

4. Katoda obasjana ultraljubičastom svjetlošću emitira elektrone. Smanjimo li intenzitet svjetlosti tada se:

a) broj emitiranih elektrona i njihova kinetička energija povećava.

b) broj emitiranih elektrona i njihova kinetička energija smanjuje.

c) broj emitiranih elektrona smanjuje, ali im kinetička energija ostaje jednaka.

d) broj emitiranih elektrona povećava, ali im kinetička energija ostaje jednaka.

e) ni broj elektrona ni njihova kinetička energija ne mijenja.

5. Kada je energija fotona koji upadaju na metal upravo jednaka izlaznome radu?

a) Kada je energija električnog polja jednaka kinetičkoj energiji elektrona.

b) Kada je kinetička energija fotoelektrona jednaka izlaznome radu.

c) Kada je kinetička energija fotoelektrona jednaka nuli.

d) Kada je frekvencija zračenja jednaka graničnoj frekvenciji.

6. Pod djelovanjem ultraljubičaste svjetlosti frekvencije $1{,}5 \cdot 10^{15}$ Hz iz metala izlaze elektroni brzinom 800 km/s. Izračunajte izlazni rad za taj metal i izrazite ga u elektronvoltima.

7. Ako je granična valna duljina metala 496 nm, koliko iznosi izlazni rad koji elektroni moraju svladati da bi iz njega izašli?

8. Izračunajte frekvenciju svjetlosti koja izbacuje elektrone s površine metala za koje je zaustavni napon 3 V. Granična frekvencija metala je $6 \cdot 10^{14}$ Hz.

5. Zaključak

Termionski efekt uvelike je utjecao na današnji način života, više nego je i jedan od znanstvenika zaslužnih za niz otkrića koji su vodila do njega vjerojatno mogao pretpostaviti. Sami efekt je izrazito elegantan po svojoj prirodi. Dovođenjem topline, neki elektroni u metalu dobit će dovoljno energije da iz njega izađu. Iz današnje perspektive lako nam je zaboraviti koliko informacija i činjenica je bilo potrebno povezati da bi se do interpretacije termionskog efekta došlo. Prvi znanstvenici su efekt samo promatrali i opisivali, bez ikakve ideje toga što bi moglo stajati u pozadini onoga što neupitno vide da se događa pred njihovim očima. Einstein se prvi usudio dati pravi teorijski prijedlog objašnjenja fenomena, u to vrijeme vrlo revolucionaran. Međutim, trebao je proći veliki niz godina da ostatak akademske zajednice sustigne njegova razmišljanja i da se njegovo tumačenje na kraju i prihvati. Tada se počelo i sa konkretnijim opisima modela i svojstava metala i razvojem fizike čvrstog stanja. Ključan korak napravio je Sommerfeld uključujući statističku fiziku za opis plina slobodnih elektrona u metalu. Konačno se moglo računati njihove brzine i energije i uspoređivati sa temperaturama uzorka. Vidjelo se da se raspodjela elektrona može aproksimirati onom jako degeneriranog Fermijevog plina pri svim temperaturama nižim od tališta metala. Gustoća struje elektrona koji imaju dovoljno visoku energiju da savladaju privlačne sile u metalu i iz njega izađu opisana je Dushman-Richardsonovom formulom. Ako nasuprot katode stavimo neko vanjsko električno polje, struja elektrona će se ponašati prema Child-Langmuirovom zakonu. Zahvaljujući termionskom efektu danas imamo niz tehnologija koje se oslanjaju na njegov princip. Elektronske cijevi su primijenjene u svemu od kućanskih aparata do upotrebe u medicinske i sigurnosne svrhe te napredne znanstvene tehnologije. Razvoj računala započeo je upravo sa elektronskim cijevima, a obećavaju i ostati vrijedna tehnologija, kao konverteri energije na svemirskim letjelicama budućnosti.

Literatura

[1] Martyn Shuttleworth (22.09.2008), Cathode Ray Experiment, https://explorable.com/cathode-ray-experiment, 20.09.2017.

[2] Klassen, Stephen (2008), The Photoelectric Effect: Rehabilitating the Story for the Physics Classroom, https://www.researchgate.net/publication/241381155_The_Photoelectric_Effect_Rehabilitating_the_Story_for_the_Physics_Classroom, 20.09.2017.

[3] Michael Fowler, University of Virginia, http://galileo.phys.virginia.edu/classes/252/photoelectric_effect.html, 20.09.2017.

[4] "Philipp Lenard - Nobel Lecture: On Cathode Rays", *Nobelprize.org*, Nobel Media AB 2014. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1905/lenard-lecture.html, 20.09.2017.

[5] "Robert A. Millikan - Nobel Lecture: The Electron and the Light-Quant from the Experimental Point of View", *Nobelprize.org*, Nobel Media AB 2014. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1923/millikan-lecture.html, 20.09.2017.

[6] "J. J. Thomson, the Discovery of the Electron, and the Study of Atomic Structure." *Science and Its Times*, edited by Neil Schlager and Josh Lauer, vol. 5, Gale, 2001. *Science in Context*, link.galegroup.com/apps/doc/CV2643450508/SCIC?u=j061911001&xid=ef6c2df0, 20.09.2017.

[7] Julian Rubin (2013), http://www.juliantrubin.com/bigten/hertzexperiment.html, 20.09.2017.

[8] "Owen Willans Richardson - Biographical", *Nobelprize.org*, Nobel Media AB 2014. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1928/richardson-bio.html, 20.09.2017.

[9] Department of Physics & Astronomy at the University of Utah (2017), http://www.physics.utah.edu/~jshi/Chapter%203part1.pdf, 20.09.2017.

[10] Goldbeck-Löwe, Harald, (2012), The Hallwachs-Effect - The Photoelectric effect - Gate to Quantum Physics - Poster DIN A0. . 10.13140/2.1.3148.7040., https://www.researchgate.net/publication/269631693_The_Hallwachs-Effect_-_The_Photoelectric_effect_-_Gate_to_Quantum_Physics_-_Poster_DIN_A0, 20.09.2017.

[11] Andrew Zimmerman Jones, (2016), https://www.thoughtco.com/the-photoelectric-effect-2699352, 20.09.2017.

[12] Physics Lessons (2012), http://physiclessons.blogspot.hr/2012/01/blog-post_863.html#.WcyCuGi0O03, 20.09.2017.

[13] Prirodoslovno-matematički fakultet Sarajevo (2008), http://www.pmf.unsa.ba/fizika/images/nastavni_materijali/FCSI20132014/Sommerfeldov_model_metala.pdf, 20.09.2017.

[14] Piers Coleman, Rutgers University, (2016), http://www.physics.rutgers.edu/grad/620/, 20.09.2017.

[15] Paul Dawkins, (2017), http://tutorial.math.lamar.edu/Classes/CalcIII/CylindricalCoords.aspx, 20.09.2017.

[16] Svjo, (01.07.2013.), https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Triod-english-text.png, 20.09.2017.

[17] Kittel, C. Uvod u fiziku čvrstog stanja, Savremena administracija, Beograd, 1970.

[18] Šips, V. Uvod u fiziku čvrstog stanja, 2. izdanje, Školska knjiga, Zagreb, 2003.

[19] Hemenway, C. L.; Henry, R. W.; Caulton, M. Fizička elektronika, Građevinska knjiga, Beograd, 1974.

[20] Scientific Instrument Services, Inc. (2017), http://simion.com/definition/childs_law.html, 20.09.2017.

[21] "Child-Langmuir law." McGraw-Hill Concise Encyclopedia of Physics, (2002), http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Child-Langmuir+law, 20.09.2017.

[22] Imperial College London (2017), http://www2.ee.ic.ac.uk/ngai-han.liu08/yr2proj/group_40.pdf, 20.09.2017.

[23] Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva (2017), http://www.ieee.hr/_download/repository/elektronske_cijevi.pdf, 20.09.2017.

[24] Radiopaedia.org (2017), https://radiopaedia.org/cases/hiatal-hernia-2, 20.09.2017.

[25] Continuing Education & Development, Inc. (2017), https://www.cedengineering.com/courses/introduction-to-electron-tubes, 20.09.2017.

[26] Phil. Storr, (2017), http://www.philipstorr.id.au/radio/technical/History%20of%20the%20Thermionic%20Valve%20or%20Vacuum%20Tube.pdf, 20.09.2017.

[27] Graham Dixey C.Eng. (1993), http://www.r-type.org/articles/art-010a.htm, 20.09.2017.

[28] RF Test Station, (2016), http://rfteststation.com/cathode-construction-thermionic-cathodes-types/, 20.09.2017.

[29] Niemax, K. Spectroscopy Using Thermionic Diode Detectors, Appied. Physics B 38, (1985), str. 147-157

[30] Mowers, M. R.; Sullivan, P. T.; Ito, T.; Cappelli, M. A. Laser Enhanced Thermionic Energy Converter: I, GCEP Research Symposium, Stanford, 2006.

[31] Institute of Physics (2017), http://tap.iop.org/atoms/quantum/502/page_47014.html, 20.09.2017.

[32] University of Colorado (2017), https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/photoelectric, 20.09.2017.