

2.4 Određivanje Plankove konstante pomoću fotoelektričnog efekta

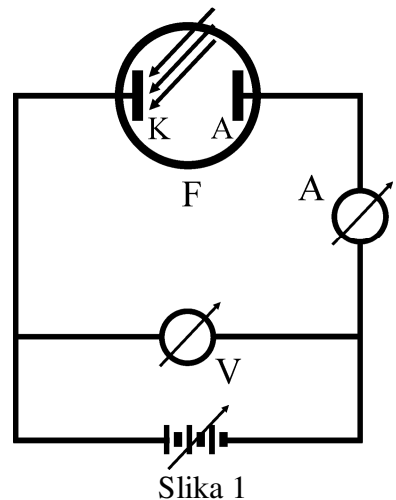
Uvod

U okviru prve dve vežbe ovog poglavlja naučili smo kako se mogu odrediti dve osnovne osobine elektrona - naelektrisanje i masa. Dalje, u prethodnoj vežbi je bilo reči o interakciji elektrona i atoma, dok će u ovoj biti razmotrene interakcije elektrona i fotona.

Fotoelektrični efekat (fotoefekat) je pojava emitovanja elektrona sa površine materijala (obično metala) kada na njega pada svetlost, najčešće vidljiva ili ultraljubičasta. Teorijsko objašnjenje fotoefekta je dao Ajnštajn³⁹ čuvene 1905. godine, dok je eksperimentalnu proveru izvršio Miliken određivši tako i vrednost Plankove⁴⁰ konstante.

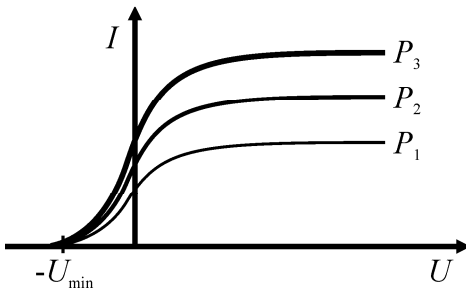
Aparatura

Na slici 1 je prikazana šema uređaja pomoću koga se može ispitivati fotoelektrični efekat. Fotoćelija, F, je evakuisan stakleni balon u kome se nalaze metalna katoda K i anoda A koje su priključene na izvor promenljivog jednosmernog napona. Elektroni, izbačeni sa katode pod dejstvom monohromatske svetlosti, dolaze do anode i zatvaraju strujno kolo, što se meri ampermetrom A. Veličina i polaritet napona se mogu menjati, kao i talasna dužina i intenzitet upotrebljene svetlosti. Na slici 2 vidimo zavisnost jačine struje od primenjenog napona u slučaju različitih intenziteta monohromatske svetlosti, $P_1 < P_2 < P_3$, a na slici 3 u slučaju različitih frekvencija (talasnih dužina) i istih intenziteta korišćene svetlosti, $\nu_1 < \nu_2 < \nu_3$. Prokomentarišimo zavisnost jačine struje od primenjenog napona za neki određeni intenzitet upadne

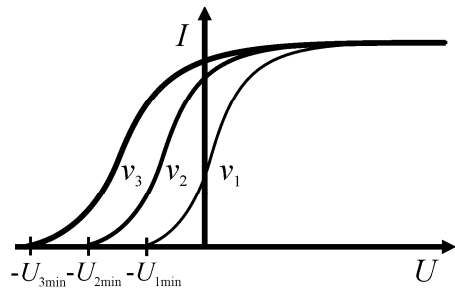


³⁹ Albert Einstein (1879-1955) - dobio Nobelovu nagradu za fiziku 1921. godine za otkriće zakona fotoelektričnog efekta i za svoje zasluge u teorijskoj fizici.

⁴⁰ Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947) - dobio Nobelovu nagradu za fiziku 1918. godine za otkriće kvanata energije.



Slika 2



Slika 3

monohromatske svetlosti, npr. P_2 slika 2. Zapažamo da elektroni stižu do anode čak i kada je napon jednak nuli, što je i očekivano imajući u vidu da oni odlaze sa katode određenom brzinom. Dalje, ako se napon između katode i anode povećava (tako da anoda bude pozitivna, a katoda negativna), struja raste i dolazi do saturacije (svi izbijeni elektroni stižu na anodu). S druge strane, ako se na anodu dovodi negativan potencijal, na elektrone deluje usporavajuće polje, pa oni u sve manjem broju dolaze do anode, da bi, za određenu vrednost usporavajućeg (zakočnog) napona (koji ne mogu da savladaju ni elektroni sa najvećom kinetičkom energijom), struja pala na nulu. Dalje povećanje zakočnog napona, jasno, ne dovodi ni do kakve nove promene u jačini struje. Minimalni zakočni napon koji je potrebno primeniti da bi jačina struje bila nula je merilo maksimalne kinetičke energije elektrona⁴¹,

$$|qU_{\min}| = T_{\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (1)$$

Takođe, zapaženo je da je maksimalna kinetička energija elektrona (odnosno minimalni zakočni napon) linearna funkcija frekvencije upotrebljene svetlosti (slika 3). Eksperimenti ovog tipa⁴² su prvi put izvedeni krajem XIX i na samom početku XX veka i nisu mogli biti objašnjeni primenom klasične

⁴¹ Elektroni napuštaju metal različitim brzinama usled različitih „energija veze”, odnosno oni se u metalu nalaze na različitim energijskim nivoima. Podsetimo se, elektroni su u slobodnom atomu raspoređeni po energijskim nivoima, a energija jonizacije je najmanja energija koju je potrebno saopštiti elektronu na najvišem nivou u atomu da se on od njega beskonačno udalji. Analogno, elektroni su u metalnoj kristalnoj rešetki raspoređeni po dozvoljenim energijskim zonama, a najmanja energija koju je potrebno saopštiti elektronu koji se nalazi na najvišem energijskom nivou da bi u potpunosti napustio kristal naziva se izlazni rad.

⁴² 1887. godine Hajnrih Herc je primetio da metalna površina osvetljena ultraljubičastom svetlošću emituje naelektrisanje čestice (preskakanje varnice između dve cinkane kuglice od kojih je jedna osvetljena ultraljubičastom svetlošću). Ubrzo je pokazano da su ta naelektrisanja negativna, da bi 1899. godine Tomson dokazao (mereći njihovo specifično naelektrisanje) da je reč o elektronima. 1902. godine Lenard je merenjem dobio zavisnosti kao na slikama 2 i 3.

elektrodinamike. Naime, klasična elektrodinamika kaže da:

- 1) kinetička energija elektrona ne treba da zavisi od frekvencije upotrebene svetlosti, kao i da će dovoljno dugo osvetljavanje proizvoljno malom frekvencijom izazvati fotoefekat;
- 2) kinetička energija elektrona treba da zavisi od intenziteta upotrebene svetlosti;
- 3) treba da prođe određeno vreme između početka osvetljavanja i izbacivanja elektrona iz metala (registrovanja struje u kolu).

Kao što smo videli, u eksperimentu je utvrđeno da:

- 1) kinetička energija elektrona linearno zavisi od frekvencije upotrebene svetlosti, kao i da za svaki materijal postoji minimalna frekvencija koja izaziva fotoefekat;
- 2) kinetička energija elektrona ne zavisi od intenziteta upotrebene svetlosti;
- 3) je za neke konkretne eksperimentalne uslove mereno vreme bilo manje od jedne nanosekunde dok je teorijski proračun pokazivao da treba da prođe više od četiri meseca.

Objašnjenje fotoelektričnog efekta je, rekli smo, dao Ajnštajn polazeći od pretpostavke da izvor svetlosti može emitovati energiju samo u određenim porcijama-kvantima. Drugim rečima, polazeći od Plankove kvantne hipoteze, pretpostavio je da energija elektromagnetnog zračenja nije ravnomerno raspoređena po talasnom frontu nego da se nalazi u razdvojenim paketima od kojih svaki nosi energiju:

$$E = h\nu \quad (2)$$

gde je h - Plankova konstanta, a ν -frekvencija svetlosti. Fotoefekat se objašnjava uzajamnim dejstvom dve čestice, jednog kvanta energije (kasnije nazvanog foton) i jednog elektrona. U tom slučaju zakon održanja energije glasi:

$$h\nu = A_i + \frac{mv_{\max}^2}{2} \quad (3)$$

gde je A_i - izlazni rad elektrona u metalu, odnosno energija veze najslabije

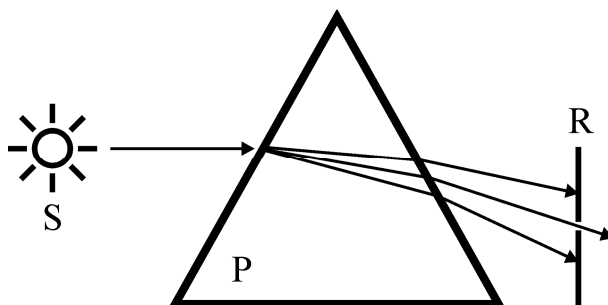
vezanog elektrona. Dakle, foton u potpunosti predaje svoju energiju elektronu i ona se delom troši na njegovo oslobađanje iz metala, a ostatak se pretvara u kinetičku energiju elektrona.

Sada nije teško objasniti eksperimentalno zapažene činjenice. Prvo, iz jednačine (3) je očigledno da je maksimalna kinetička energija elektrona linearna funkcija frekvencije, kao i da ne zavisi od intenziteta korišćene svetlosti. Drugo, minimalna frekvencija svetlosti koja još može da izazove fotoefekat je ona čija je energija tačno jednaka izlaznom radu datog materijala, $h\nu_{\min} = A_i$. Treće, kako jedan foton praktično trenutno interaguje sa jednim elektronom, nema potrebe za „akumulacijom” energije u očekivanju izlaska elektrona iz metala, pa je i strujni odziv momentalan. Drugim rečima, ako je energija fotona veća od izlaznog rada, strujno kolo se odmah zatvara, a ako nije nema fotoefekta. Ako jednačinu (3) transformišemo (smatramo da je minimalan zakočni napon pozitivna veličina):

$$h\nu = A_i + eU_{\min} \rightarrow eU_{\min} = -A_i + h\nu,$$

vidimo da ćemo crtanjem grafika $eU_{\min} = f(\nu)$ dobiti pravu čiji je nagib jednak Plankovoj konstanti, a odsečak izlaznom radu materijala (sa znakom minus) od koga je napravljena katoda.

Aparatura za određivanje Plankove konstante se sastoji iz dva dela, monohromatora kojim se obezbeđuje elektromagnetno zračenje određene talasne dužine i fotoćelije na koju se može dovesti i meriti odgovarajući zakočni napon. Šema

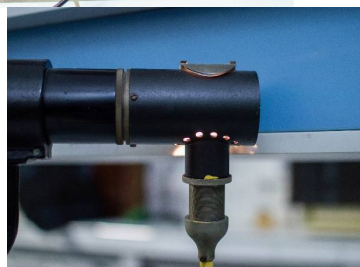
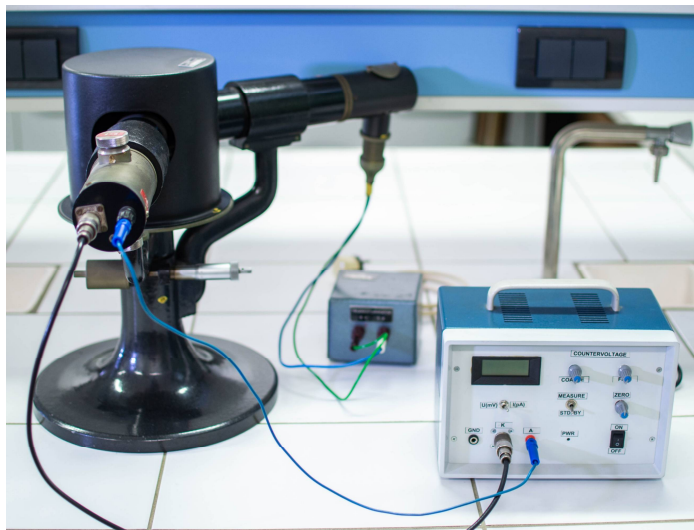


Slika 4

monohromatora je prikazana na slici 4. On se sastoji od izvora bele svetlosti S (izvor koji daje svetlost u određenom opsegu talasnih dužina; naravno, ne nužno bele boje), prizme P koja tu svetlost razlaže na monohromatske komponente (podsetimo se da indeks prelamanja zavisi od talasne dužine) i razreza R, pomoću koga biramo svetlost određene talasne dužine. Biranje možemo izvršiti pomeranjem razreza gore-dole ili rotacijom prizme oko ose normalne na bazu prizme (ravan papira) kako se i radi u eksperimentu, pomoću posebnog mikrometarskog zavrtnja (nije prikazan na slici). Izabrani zrak se potom usmerava na katodu (slika 1). Dobijena struja u kolu se, zbog lakšeg merenja, pojačava pomoću posebnog uređaja, a zaustavlja podešavanjem zakočnog napona.

Uputstvo za rad

1. Povezati aparaturu prema odgovarajućoj šemi.



Slika 5. Aparatura za određivanje Plankove konstante

2. Uključiti pojačavač i ostaviti ga 15-30 minuta da se temperaturno stabilizira. Nakon toga, pri isključenoj sijalici, podesiti nulu pojačavača.

Okretanjem točkića jačinu struje dovodimo na 0.



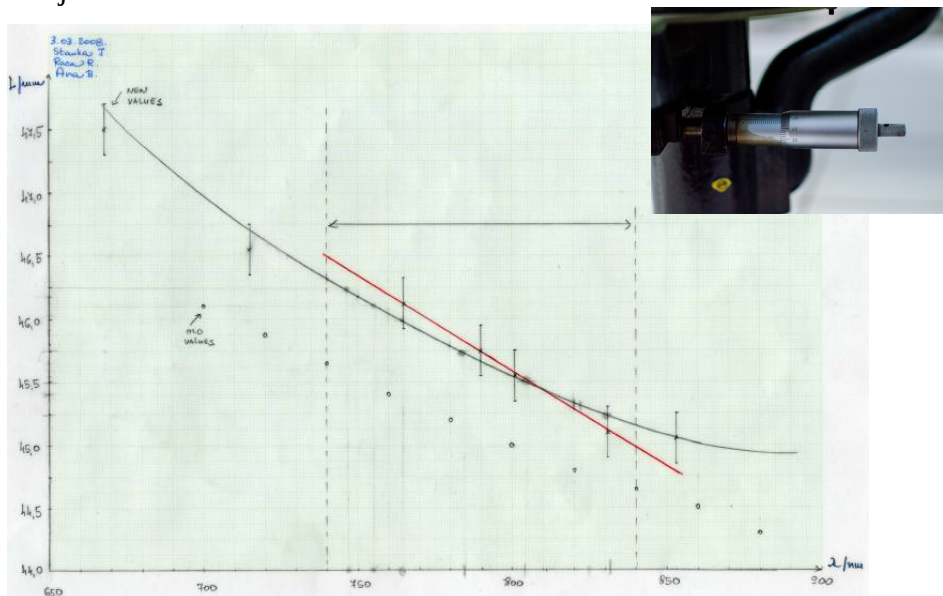
Promenom moda [od I(pA) na U (mV)] očitavamo nulti napon.



Slika 6. Podešavanje nule pojačavača

2.4 - Određivanje Plankove konstante pomoću fotoelektričnog efekta

3. Birati jednu po jednu talasnu dužinu iz određenog opsega (npr. 740-870 nm) pomeranjem izbaždarenog valjka (koristiti kalibracioni dijagram), polazeći od najveće.



Slika 7. Kalibracioni dijagram – zavisnost pomeraja izbaždarenog valjka od talasne dužine svetlosti. U gorenjem desnu uglu – izbaždareni valjak.

4. Za svaku talasnu dužinu izmeriti minimalni zakočni napon, $U_{\min}$, pomoću voltmetra.

Za talasne dužine za koje dolazi do fotoelektričnog efekta, elektroni koji su napustili katodu dolaze do anode. To očitavamo kao struju različitu od nule (na slici desno to je 512 pA). Pomeranjem točkića COARSE (za grubo podešavanje) i FINE (za precizno podešavanje) dovodimo struju na nulu. Zatim promenom moda [od I(pA) na U (mV)] očitavamo napon. Od ovog napona, treba oduzeti nulti napon izmeren pod tačkom 2, da bi se dobilo minimalni zakočni napon, $U_{\min}$.



Slika 8. Merenje zakočnog napona

2.4 - Određivanje Plankove konstante pomoću fotoelektričnog efekta

5. Popuniti tabelu (N-redni broj merenja, L - položaj izbaždarenog valjka):

N	L / mm	λ / nm	ν / Hz	$U_{\min}$ / V
1)				
...				

6. Nacrtati grafik $eU_{\min} = f(\nu)$ i odrediti Plankovu konstantu i izlazni rad.