

Poskus iz moderne fizike za izvedbo z dijaki – merjenje Planckove konstante

Jure Ausec

Biotehniški center Naklo – Srednja šola

Izvleček

Na področju moderne fizike je v klasični literaturi, ki obravnava to tematiko, zaslediti le redke zamisli za izvedbo eksperimentalnih vaj z dijaki pri pouku fizike. V članku predstavim možnost izvedbe take eksperimentalne vaje, ki je cenovno dostopna in vsebuje znanja z različnih področij fizike, kar jo naredi še nekoliko zanimivejšo. Zaradi nekoliko večje zapletenosti je vaja primernejša za dijake, ki se pripravljajo na maturo iz fizike, saj imajo širši nabor znanj. Na predlagani način izmerjena vrednost Planckove konstante od prave vrednosti odstopa le za nekaj odstotkov.

Ključne besede: LED, dioda, polprevodnik, Planckova konstanta, laboratorijske vaje, merjenje

Implementing a Modern Physics Experiment with Students – Measuring Planck's Constant

Abstract

Traditional literary sources on modern physics offer relatively few ideas about carrying out experimental exercises with students in Physics class. The article presents an option of implementing an experimental exercise that is affordable and includes knowledge from various areas in the field of physics, which makes it even more interesting. Due to its slightly greater complexity, this exercise is more suitable for students preparing for the Physics Matura Exam, who have broader knowledge. The value of Planck's constant measured with this exercise deviates by only a small percentage from its true value.

Keywords: LED, diode, semiconductor, Planck's constant, laboratory exercises, measurement

Predznanje

Za merjenje bomo uporabili LED – sveteče diode, ki so dijakom dobro poznane iz vsakdanjega življenja. Za razumevanje njihovega delovanja pa morajo dijaki poznati tudi karakteristiko diode, ki jo spoznajo pri poglavju o elektriki. Za boljše razumevanje priporočam, da pred izvedbo opisane vaje z dijaki izvedete tudi vajo merjenja karakteristike diode, da bodo razumeli predvsem dve pomembni dejstvi:

- dioda prevaja le v prevodni smeri, v zaporni pa ne (seveda v območju nizkih napetosti, s katerimi imamo opravka v šolskem laboratoriju),
- karakteristika diode je eksponentna.

Izvedba take vaje je v literaturi pogosto opisana (npr. [1]) in enostavna. Za izvedbo odsvetujem LED, ker pregorijo že pri nizki napetosti – za nekaj evrov se dobijo diode, ki

zdržijo napetosti do 400 V in tokove do več 10 A, kar je precej nad zmožnostmi šolskega malonapetostnega izvira (ŠMI). Diodo priključimo na ŠMI in hkrati merimo napetost na diodi in tok skozi njo. Dijaki nato narišejo še graf toka skozi diodo v odvisnosti od napetosti na njej, kjer je eksponentna odvisnost zelo očitna.

Dijake pred vajo seznanimo z delovanjem polprevodnikov – to je izbirno poglavje, zato imamo pri širini obravnave precej proste roke. Zagotovo na vsebino vplivajo tudi preference učitelja, vendar lahko glede na izkušnje v približno pol ure zadostno opišemo delovanje polprevodnikov s primesmi, da dijaki razumejo zgradbo in pomen plasti p, plasti n in stika p-n [2]. Iz obravnave zgradbe atoma in fotoefekta razumejo, kaj so energijska stanja in kako so prehodi med stanji povezani z energijo fotonov.



Slika 1: Za nekaj evrov dobimo diode, ki zdržijo visoke tokove in napetosti.

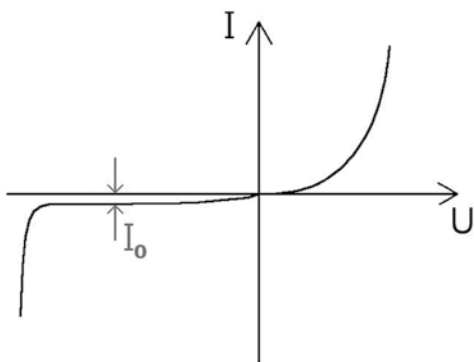
Teoretično ozadje

Tudi tu je širina izpeljave odvisna od interesa dijakov in učitelja, je pa podrobna izpeljava namenjena bolj učiteljem kot dijakom.

Tok skozi diodo opiše Shockleyjeva enačba [3]:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{e_0 U}{\eta k_B T}} - 1 \right).$$

Tu je I_0 saturacijski tok (tok v zaporni smeri pri nizkih napetostih), e_0 osnovni naboj, U napetost na diodi, k_B Boltzmannova konstanta, T temperatura in η koeficient idealnosti diode (med 1 in 2, odvisno od mesta rekombinacije – različen za vsako diodo). Saturacijski tok je odvisen le od lastnosti diode (poleg η še od velikosti energijske reže U_g).



Slika 2: Karakteristika diode z označenim majhnim saturacijskim tokom, ki je običajno nemerljiv v šolskem laboratoriju.

Pri tokovih, ki jih lahko merimo z običajnimi šolskimi ampermetri (od μA), je enka v Shockleyjevi enačbi zanemarljiva, ker je saturacijski tok zelo majhen. Pri večjih tokovih moramo upoštevati še notranji upor diode, saj je izmerjena napetost na voltmetru (U_v) večja od napetosti na stiku p-n:

$$U_v = U + IR.$$

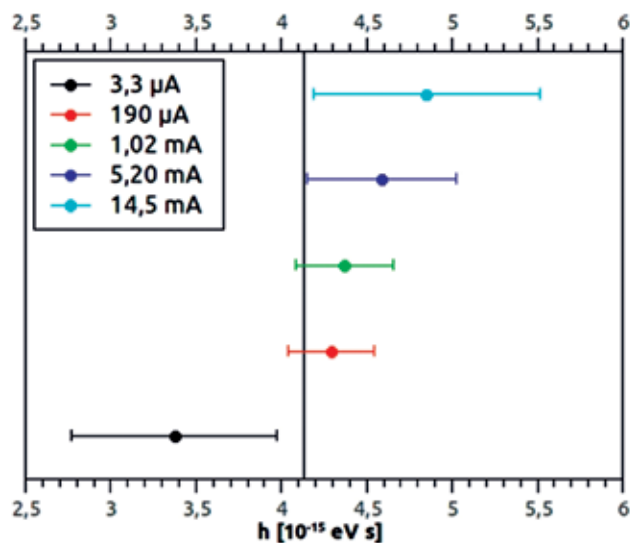
Zato moramo poskus izvesti pri majhnih tokovih, kjer je prispevek zaradi notranjega upora zanemarljiv. Glede na oba pogoja se izkaže, da najboljše vrednosti dobimo pri tokovih okrog 1 mA. Če upoštevamo izraz za I_0 , lahko tako tok skozi LED zapišemo kot:

$$I = K e^{\frac{e_0(U_v - U_g)}{\eta k_B T}}.$$

Tu je s K označena neka nedoločena konstanta. Če izraz logaritmiramo in izrazimo napetost, ugotovimo, da velja zveza:

$$U_v = U_g + k_{\text{const}}.$$

Velja torej, da je napetost, ki jo izmerimo na voltmetru, samo za neko aditivno konstanto povečana vrednost napetosti na stiku p-n, kar pa ne vpliva na naklon premice na grafu $eU(v)$. Res je, da so v tej konstanti zajete lastnosti LED in se torej konstanta za nekaj odstotkov razlikuje med LED posameznih barv, vendar so odstopanja majhna in za šolske potrebe zanemarljiva.



Slika 3: Izračunane vrednosti Planckove konstante pri različnih tokovih skozi izbrano LED in ocenjenih napakah – s črno navpično črto je označena prava vrednost. Graf potrjuje, da najboljše vrednosti Planckove konstante dobimo pri tokovih okrog 1 mA.

Zgornja izpeljava nas pripelje do zveze, da je energija izsevanega fotona kar enaka produktu naboja in izmerjene napetosti na voltmetru, kar je osnovna zveza za izračun Planckove konstante:

$$eU_v = hv.$$

To je torej zveza, ki jo lahko enostavno (brez zgornje izpeljave) predstavimo dijakom – ko nosilci naboja pod vplivom zunanje napetosti preidejo stik p-n (v jeziku energijskih pasov preskočijo energijsko vrzel $e_0 U$), svojo

energijo oddajo v obliki fotona (ki ima energijo $h\nu$). Pri tej poenostavljeni razlagi velja omeniti, da gre za približek (vso energijo odnese foton), kar je dijakom treba predstaviti, seveda pa jim prihranimo celotno teoretično izpeljavo, ki je na tem mestu zapisana le za boljše razumevanje učitelja.

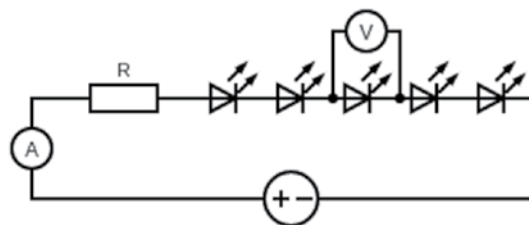
Postavitev eksperimenta

Za izvedbo vaje potrebujemo ŠMI, več barvnih LED, upor za omejitev toka skozi diode, ampermeter in voltmeter ter priključne (povezovalne) žice. Priporočam tudi uporabo t. i. »protoboarda«, ki omogoča enostavno povezovanje LED.

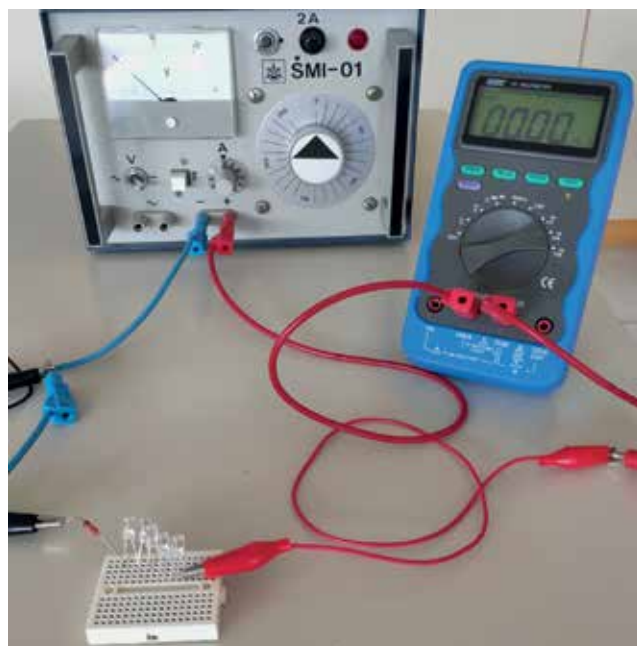


Slika 4: Različne LED – leva je primerna za izvedbo eksperimenta, desna pa izkorišča fosforescenco in izhodna svetloba ni neposredno povezana z velikostjo energijske reže.

LED različnih barv vežemo zaporedno – izbira barv je poljubna, paziti pa moramo, da ne izberemo takih, ki UV-svetlobo pretvarjajo v vidno svetlobo s pomočjo fosforescence, saj izsevana svetloba ni neposredno povezana z energijsko režo diode. Take LED prepoznamo po »belem polnilu«, če pogledamo LED z vrha. Za izvedbo poskusa so tako primerne le tiste LED, kjer lahko vidimo njihovo zgradbo (odbojnik, žice). Zaporedno vezanim LED dodamo upornik, ki omejuje tok in preprečuje, da bi pregorele, ampermeter, s katerim spremljamo, da je tok okrog 1 mA, ter ŠMI. Posamezna LED potrebuje 2–3 V, da sveti, običajno pa zdržijo tok do 20 mA. Z uporabo ampermetra in s počasnim večanjem izhodne napetosti na ŠMI lahko meritve izvedemo brez povzročene škode, za vsak primer pa je dobro zaporedno vezati še upornik z uporom nekaj k Ω (odvisno od največje napetosti na ŠMI in števila diod).

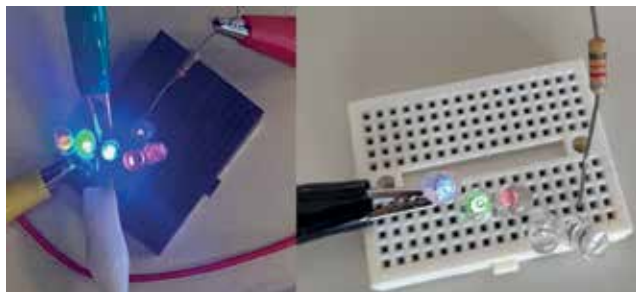


Slika 5: Shema postavitve eksperimenta.



Slika 6: Postavitev eksperimenta.

Ni treba, da vse LED svetijo enako močno – zaporedna vezava zagotavlja, da skozi vse teče enak tok. Če sveti vsaj ena, potem skozi vse teče tok, je pa lahko pri nekaterih intenziteta oddane svetlobe precej majhna.



Slika 7: Primer uporabe »protoboarda« in različnih intenzitet različnih LED. Na levi sliki so tudi priključki za merjenje napetosti.

Zdaj je treba le še izmeriti napetost na posamezni LED, da lahko izračunamo Planckovo konstanto po enačbi $e_0 U = h\nu$ (smiselno je tudi narisati graf odvisnosti $e_0 U$ od

ν , kjer je naklon premice Planckova konstanta). Za izračun potrebujemo še frekvenco svetlobe posamezne LED, kar je povezano z valovno dolžino ($\nu = \frac{c}{\lambda}$). Valovna dolžina je načeloma za posamezne LED znana, lahko pa jo tudi izmerimo s spektrometrom. Med opremljanjem šol z opremo Vernier leta 2011 se je 58 slovenskih srednjih šol oz. šolskih centrov odločilo za nabavo spektrometra Vernier SpectroVis® kot učila za pouk kemije, nekaj pa jih je bilo nabavljenih tudi naknadno. Spektrometer imate tako morda na šoli.

Rezultati in zaključek

Pri pazljivem merjenju je napaka velika zgolj nekaj odstotkov: pri mojih meritvah je bilo odstopanje od prave

vrednosti Planckove konstante okrog 5 %, dijaki pa tipično dobijo odstopanje med 5 in 10 %. Zdi se mi, da je metoda zato kljub približkom dokaj uspešna.

Vaja se dotakne mnogih vidikov fizike – od področja elektrike (vezave, merjenje toka in napetosti, energija), moderne fizike (energija fotonov, spekter svetlobe, energijski nivoji), merjenj (izračun napake in razmislek o uporabljenih približkih in merilnih metodah) do osnovnih definicij fizikalnih količin. Od maja 2019 je z redefinicijo osnovnih enot Planckova konstanta tudi temeljna konstanta za določitev enote kilogram, kar zagotovo odpira možnosti razprave o prednostih take definicije pred definicijo s prakilogramom.

Viri

- [1] Tomić, I. (2018). *Zbirka laboratorijskih vaj iz fizike* (str. 93). Novo mesto: Šolski center.
- [2] Mohorič, A. (2020). *Fizika 3: učbenik za fiziko v 3. letniku gimnazij in štiriletnih strokovnih šol* (str. 148 in fizika-poglavje7.html na zgoščenki). Ljubljana: Mladinska knjiga Založba.
- [3] Shockley, W. (1949). »The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors« (enačba 3.13 na strani 454). New York: *The Bell System Technical Journal*. Dostopno na: <https://ia802707.us.archive.org/15/items/bellssystemtechni28amerrich/bellssystemtechni28amerrich.pdf>

IZ ZALOŽBE ZAVODA RS ZA ŠOLSTVO



Alenka Kompare, Tanja Rupnik Vec

KAKO SPODBUJATI RAZVOJ MIŠLJENJA

Od temeljnih miselnih procesov do argumentiranja

2016, ISBN 978-961-03-0339-8, 328 str.
Cena: 31,90 €

- Namenjeno osnovnošolskim in srednješolskim učiteljem različnih predmetov ter bodočim pedagoškim delavcem.
- Učitelju omogoča spodbujanje in razvoj kritičnega mišljenja, ponuja eksplicitne poučevalne pristope, miselne izzive in naloge za razvoj kritičnega mišljenja na različnih stopnjah izobraževanja od osnovne do srednje šole.
- Podaja različna deklarativna in proceduralna znanja s področja kritičnega mišljenja.
- Namenjeno tudi vsem, ki jih zanima področje kritičnega mišljenja in spodbujanje razvoja kritičnega misleca.