

# VALOSÄHKÖINEN ILMIÖ

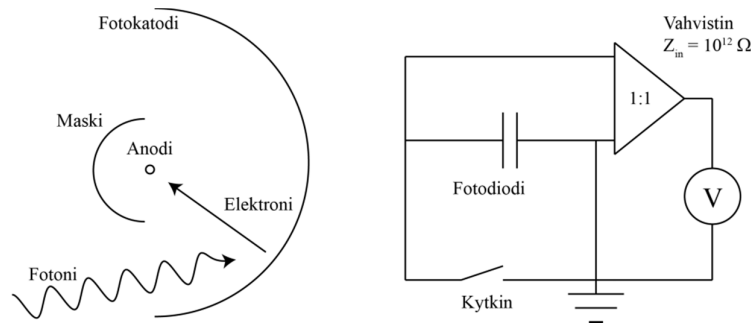
## 1 Johdanto

Valosähköisessä ilmiössä valo, jonka taajuus on  $f$ , irrottaa metallilta elektroneja. Koska valo koostuu kvanteista (fotoneista), joiden energia on  $hf$  (missä  $h$  on Planckin vakio), metallin valenssielektroni absorboi tämän suuruisen energiamäärän. Osa kvantin energiasta kuluu elektronin irrottamiseen metallista. Tätä joka metallille ominaista energiamäärää kutsutaan metallin työfunktiksi  $\varphi$ , eikä se riipu kvantin energiasta. Loppuenergia muuttuu elektronin kineettiseksi energiaksi  $K$ . Valosähköistä ilmiötä kuvaa yhtälö

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = hf - \varphi, \quad (1)$$

missä  $m$  on elektronin massa ja  $v$  sen nopeus.

Valon intensiteetti ei siis vaikuta emittoituvien elektronien liike-energiaan. Sen sijaan intensiteetin kasvaessa valonlähteen lähettämien kvanttien määrä kasvaa, ja nämä voivat irrottaa enemmän elektroneja aineesta.



**Kuva 1.** Fotodiodi (vasemmalla) ja tässä työssä käytetty mittauskytkentä (oikealla).

Kuvassa 1 on esitetty periaatepiirros fotodiodista ja työssä käytetystä mittauskytkennästä. Mittauksen aluksi fotodiodissa oleva varaus puretaan sulkemalla kuvan kytkin. Kun kytkin sitten avataan, fotodiodiin tuleva valo alkaa irrottaa katodilta elektroneja. Maadoituksen vuoksi katodin potentiaali pysyy vakiona. Osa irronneista elektroneista törmää anodiin, joka varautuu negatiivisesti. Varautuminen jatkuu, kunnes anodin ja katodin välinen sähkökenttä kasvaa niin suureksi, että kentän elektroniin tekemä työ estää elektronin pääsyn anodille. Tällöin katodilta irtoavien elektronien kineettinen energia  $K_{max}$  on

$$K_{max} = \frac{1}{2}mv_{max}^2 = -eV_0, \quad (2)$$

missä  $V_0$  on anodin ja katodin välinen pysäytysjännite (huomaa, että kuvan 1 kytkennässä  $V_0$  on negatiivinen) ja  $e$  elektronin varaus. Koska fotodiodiin kertyvä varaus on hyvin pieni, pysäytysjännitettä mitattaessa on pidettävä huoli, että jännitemittarin läpi kulkeva vuotovirta minimoidaan. Käytännössä tämä on toteutettu kytkemällä jännitemittarin eteen operaatiovahvistin, jonka vahvistuskerroin on 1 mutta jonka sisääntuloimpedanssi on suurempi kuin tavallisella yleismittarilla.

Planckin vakion määrittämiseksi mitataan pysäytysjännite taajuuden funktiona. Valonlähteenä käytetään elohopeahöyrylampua, jonka valo hajotetaan spektriviivoiksi hilalla. Mittaus voidaan tällöin suorittaa viidellä erilaisella valon taajuudella. Yhtälöistä (1) ja (2) saadaan

$$V_0 = -\frac{h}{e}f + \frac{\varphi}{e}. \quad (3)$$

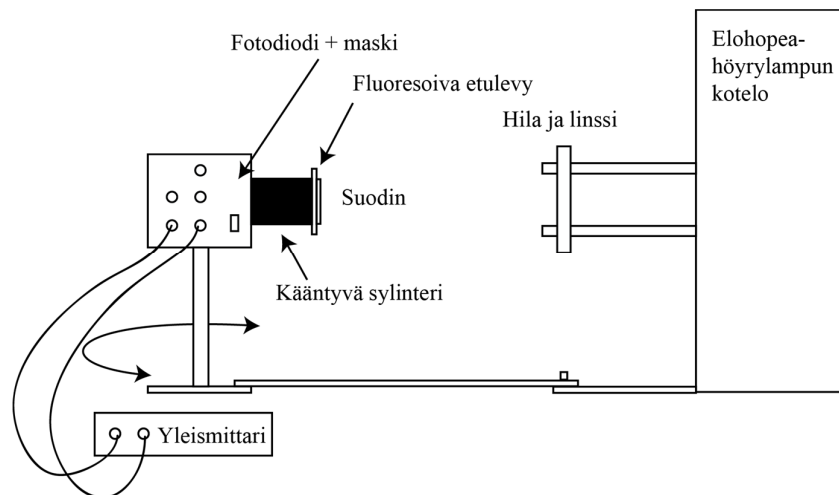
Tämän yhtälön kuvaaja on suora, jonka kulmakertoimesta  $h$  voidaan laskea. Erityisen huomionarvoista yhtälössä (3) on, että vakiotermi antaisi periaatteessa elektronin irrotustyön katodilta, mutta *mittausmenetelmästä johtuen* vakiotermistä saadaankin *anodin* työfunktio.

## 2 Tavoitteet

Työn tehtyään opiskelija

- osaa selittää kuinka valon aallonpituus ja intensiteetti vaikuttavat metallista irtoavien elektronien liike-energiaan
- on harjoitellut mittaustulosten esittämistä kuvaajan avulla ja suoran sovittamista pisteistöön
- on kokeellisesti määrittänyt arvon Planckin vakiolle

## 3 Laitteisto



**Kuva 2.** Mittauslaitteisto.

Työssä käytettävä laitteisto on esitetty kuvassa 2. Valonlähteenä on elohopeahöyrylamppu, jonka valo hajotetaan eri aallonpituuksiin hilalla. Spektreistä näkyy kolme kertalukua molemmilla puolen alkuperäisen hilaan kohdistetun valonsäteen muodostamaa akselia. Spektriviivat ohjataan detektoriin, jossa ne osuvat tyhjäfotodiodin katodille. Detektorista saadaan mitattua se elektrodien välinen jännite, joka pysäyttää katodilta anodille kulkevat elektronit. Tämä pysäytysjännite on sitä suurempi, mitä enemmän katodilta irtoavilla elektroneilla on kineettistä energiaa.

Fotodiodi on esitetty kuvassa 1, ja samassa kuvassa on kaavio, joka selvittää detektorin toimintaa. Fotodiodiputkella (ja muulla elektroniikalla) on pieni kapasitanssi, ja tämä “kondensaattori” varautuu elektronien kulkiessa putkessa, sillä mittauksen aikana piiri on avoin. Kondensaattorin varaus satureituu, koska elektrodien välille muodostuu jännite-ero, jota elektronit eivät pysty ylittämään. Jännite kondensaattorin yli mitataan vahvistimella, jonka tuloimpedanssi on suuri ( $> 10^{12}\Omega$ ), eli vahvistimen kautta kulkeva virta on hyvin pieni. Vahvistimen vahvistuskerroin on 1, ja pysäytysjännite voidaan mitata yleismittarilla. Mittauksien välillä kondensaattorin varaus puretaan.

Elohopeahöyrylampusta tulevan valon spektrissä on kirkkaita viivoja, joista neljä on näkyvän valon alueella ja viides saadaan selvästi näkymään ainakin detektorin etureunan fluoresoivalla maskilla (myös tavallisella paperilla, joka fluoresoi hieman). Osa viivoista muodostuu useammista lähekkäisistä aallonpituuksista. Viivat ja laskennassa käytettävät aallonpituudet on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1.** Elohopeahöyrylampun spektriviivojen aallonpituudet.

Väri	Aallonpituus
Ultravioletti	365 nm
Violetti	405 nm
Sininen	436 nm
Vihreä	546 nm
Keltainen	578 nm

Lisäksi tarvitaan keltainen ja vihreä suodin sekä transmissiosuodin. Huom. Jätä elohopeahöyrylamppu palamaan, kun olet lopettanut mittaukset! Mittaukset kannattaa tehdä pimeässä huoneessa, sillä diffraktiospektrit näkyvät silloin huomattavasti paremmin kuin valaistussa huoneessa. Huoneen valo ei vaikuta suoraan tuloksiin, mutta spektriviivojen detektoriin kohdistaminen on tarkempaa pimeässä. Muista kuitenkin sulkea kääntyvä sylinteri aina ennen mittausta spektriviivan kohdistamisen jälkeen!

## 4 Esitehtävät

Tutustu työhön liittyvään teoriaan haluamastasi fysiikan oppikirjasta esim. [1–3], lue työohje läpi ja vastaa alla oleviin kysymyksiin vastauslomakkeeseen.

1. Mikä on materiaalin työfunktio?
2. Mitä tarkoitetaan valosähköisen ilmiön kynnystaajuudella?
3. Kuinka valon intensiteetti vaikuttaa valosähköiseen ilmiöön?
4. Työssä mitataan ja piirretään pysäytysjännitettä  $V_0$  taajuuden  $f$  funktiona sekä sovitetaan tähän suora ( $y = kx + b$ ). Mikä on yhtälön (3) mukaan tämän suoran kulmakerroin  $k$ ? Anna yhtälö  $k$ :lle ja ratkaise siitä Planckin vakio  $h$ .
5. Määritä kokonaisdifferentiaalilla virhearvio Planckin vakiolle  $h$  edellisessä kohdassa saamastasi yhtälöstä. Ota muuttujista huomioon kulmakerroin  $k$ .

## 5 Mittaukset

Kaikki mittaustulokset ja kysymysten vastaukset kirjataan vastauslomakkeelle, joita saa assistentilta. On suositeltavaa käyttää lyijykynää. Vastauslomake palautetaan lopuksi assistentille.

1. Laita elohopeahöyrylamppu päälle (jos se ei jo ole) ja anna lampun lämmetä 10 min ennen mittausten alkamista. Tarkista, että telineeseen kiinnitetty hilan ja linssin yhdistelmä on niin päin, että linssi on lamppukoteloon päin. Huomaa, että ensimmäisen ja toisen kertaluvun kirkkaimmat spektrit, joita mittauksissa käytetään, ovat eri puolilla nollatta kertalukua, joten joudut kääntämään välillä detektorin 0. kertaluvun spektrin toiselle puolelle.

- Käännä detektori sellaiseen kulmaan, että jokin spektriviiva osuu sekä etulevyn aukkoon että detektorin sisällä olevaa fotodiodia suojaavan maskin koloihin (kierrä tarvittaessa detektoria myös varren ympäri, niin että spektriviiva osuu detektorin etulevyyn kohtisuoraan). Maskin saat näkyviin kääntämällä etulevyn takana olevan suojaavan sylinterin syrjään. Liikuta hila-linssi - kappaletta niin, että etureunan aukosta syntyvä kuva on terävä maskin tasossa. Kiinnitä hila-linssi-yhdistelmä paikalleen.
- Pysäytysjännite mitataan digitaalisella jännitemittarilla detektorin OUTPUT-liittimistä. Ennen jokaista mittausta puretaan fotodiodiin kertynyt varaus painamalla "push to zero" -painikkeesta.
- Tee hypoteesi:** Kummalla aallonpituudella saadaan suurempi pysäytysjännite: 365 nm (ultravioletti) vai 578 nm (keltainen)? Perustele vastauksesi fysiikan avulla.
- Testaa tekemääsi hypoteesia** ja kirjoita havaintosi vastauslomakkeeseen. Jos havaintosi eivät vastanneet hypoteesia, pohdi miksi.
- Mittaa pysäytysjännite viidellä mainitulla aallonpituudella ensimmäisen kertaluvun spektreistä ja ainakin kaksi pysäytysjännitettä toisen kertaluvun spektreistä. Vihreää ja keltaista valoa tutkiessasi käytä vihreää ja keltaista suodinta, jotta lyhyemmät aallonpituudet (huoneen valaistuksesta tai korkeamman kertaluvun spektreistä) eivät pääse sotkemaan mittauksia. Kirjaa tulokset lomakkeen taulukkoon.

*Vinkki: Muista kohdistaa spektriviiva hyvin detektorin maskin aukkoon joka mittauksessa ja sulkea sitten suojaava sylinteri!*

*Odota tarpeeksi kauan yleismittarin lukeman tasoittumista! Jännitteen arvo nousee ensin nopeasti ja nousu hidastuu sitten huomattavasti.*

- Tutki valon intensiteetin vaikutusta pysäytysjännitteeseen laittamalla detektorin eteen suodin, jonka transmissio (läpäisy) vaihtelee. Mittaa jokaisella transmissiolla (100, 80, 60, 40 ja 20 %) jonkin 1. kertaluvun spektriviivan pysäytysjännite. Kirjaa tulokset vastauslomakkeeseen.
- Laita yleismittarista ja detektorista virta pois ja irrota johdot pistorasiasta. Älä sammuta lamppeja!

## 6 Tulosten käsittely ja raportointi

- Laske lomakkeeseen spektriviivoja vastaavat taajuudet.
- Piirrä pysäytysjännite taajuuden funktiona 1. kertaluvun spektristä mitatuista pysäytysjännitteistä. Yhtälön (3) mukaan pisteiden tulisi osua suoralle. Sovita pisteistöön suora ja määritä sen kulmakerroin virherajoineen.
- Määritä kulmakertoimen ja sen virheen avulla arvo Planckin vakiolle virhearvioineen.
- Tulosta piirtämäsi kuvaaja vastauslomakkeen liitteeksi.

## 7 Pohdittavaa

2. kertaluvun spektriviivojen intensiteetti on matalampi kuin 1. kertalukuja vastaavien spektrien intensiteetti. Myös transmissiosuodin vaikuttaa detektorille tulevan valon intensiteettiin. Kerro tulostesi perusteella miten intensiteetti vaikuttaa pysäytysjännitteeseen?
- Pohdi mittaustulostesi valossa (intensiteetin ja aallonpituuden vaikutus pysäytysjännitteeseen), onko sähkömagneettisen säteilyn energia kvantittunut.
- Vertaa mittaamaasi Planckin vakion arvoa kirjallisuusarvoon.

## Lähteet

- [1] D.C. Giancoli, Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics 4<sup>th</sup> edition, International edition, Pearson Education, Inc, 2009.
- [2] Hugh Young, Roger Freedman, A. Lewis Ford: University Physics with Modern Physics. International Edition. 13. painos. Pearson Education, 2011.
- [3] Halliday, Resnick, Walker, Fundamentals of Physics Extended, Extended 9<sup>th</sup> edition, International Student Version, Wiley & Sons, Inc., 2011.