

# Valguse neeldumise uurimine

Hans Korge (märts 2002)

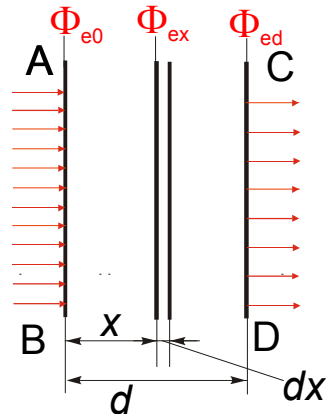
## 1. Teooriast

Üldjuhul valguse läbiminekul keskkonnast tema kiirgusvoog  $\Phi_e$  väheneb. Klassikaline füüsika järgi toimub valguse levik keskkonnas järgmiselt. Valguslaine sattumisel keskkonda paneb valguse elektrivälja  $E(t) = E_0 \cos \omega t$  võnkuma keskkonna aatomite ja molekulide elektronid ja siis aatomid ning molekulid kujutavad endast ajas muutuva dipoolmomendiga dipoolid. Sellised dipoolid kiirgavad sekundaarlaineid ning valguse levik keskkonnas seletub sekundaarlainete interferentsiga. Kuna elektronide võnkumisega kaasneb "hõõrdumine", siis hõõrdumise ületamiseks kulutatakse osa valguslaine energiast ja see põhjustabki kiirgusvoo vähenemise valguse levimisel ehk valguse neeldumise aines. Neeldunud osa energiast kulub põhiliselt keskkonna soojendamisele, aga ka muudele võimalikele protsessidele, näiteks fotokeemilistele reaktsioonidele. Peale neeldumise võib põhjustada kiirgusvoo vähenemist ka valguse hajumine keskkonnas, kuid hajutavaid keskkondi me käesolevas töös ei uuri.

Vaatleme elektroni liikumist aatomis valguse elektrivälja mõjul. Kui valgus levib  $x$ -telje sihis, siis elektron saab võnkuda risti  $x$ -teljega, näiteks  $y$ -telje sihis. Elektroni võnkumist sel juhul kirjeldab võrrand:

$$m\ddot{y} + g\dot{y} + ky = eE_0 \cos \omega t, \quad (1)$$

kus  $m$  on elektroni mass,  $e$  – elektroni laeng,  $y$  – elektroni hälve tasakaaluasendist, suhe  $k/m$  määrab elektroni omavõnkesageduse  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ , milles  $k$  on kvaasielastsustegur ja  $g\dot{y}$  on hõõrdejõudu väljendav liige. Liikme  $g\dot{y}$  olemasolu võrrandis (1) seletabki ainet läbiva valguse kiirgusvoo kahanemise, s.o neeldumise.



Joonis 1.

Leiame, millise seaduse järgi toimub monokromaatilise valguse kiirgusvoo vähenemine aines neeldumise tõttu. Olgu paralleelsete tasapindadega kiht valgust neelavat keskkonda paksusega  $d$  (joonis 1). Langegu neelava keskkonna esipinnale AB **normaalselt** paralleelne monokromaatiline kiirtekimp ja vahetult neelava keskkonna esipinnalt lähtugu kiirgusvoog  $\Phi_{e0}$ . Pinnast AB kaugusel  $x$  eraldame AB-ga paralleelse kihi paksusega  $dx$ . Vähenegu selle kihi läbimisel valguse kiirgusvoog  $d\Phi_{ex}$  võrra. Kiirgusvoo vähenemine on võrdeline kihile  $dx$  langeva valguse kiirgusvooga  $\Phi_{ex}$  ja kihi paksusega:

$$d\Phi_{ex} = -k \Phi_{ex} dx, \quad (2)$$

kus  $k$  on võrdetegur, mida nimetatakse **valguse neeldumiskoeffitsiendiks** või **aine neelamiskoeffitsiendiks**. Seosest (2) leiame

$$k = -\frac{d\Phi_{ex}}{\Phi_{ex}} \cdot \frac{1}{dx}, \quad (3)$$

millest järeldub, et **neeldumiskoeffitsient näitab suhtelist valguse kiirgusvoo vähenemist kihi ühikulise paksuse korral**. SI-s on  $k$  mõõtühikuks  $m^{-1}$ .

Eraldame seoses (3) muutujad ja pärast integreerimist saame:

$$\Phi_{ed} = \Phi_{e0} e^{-kd}, \quad (4)$$

kus  $\Phi_{ed}$  on neelava kihi paksusega  $d$  pinnale CD jõudnud valguse kiirgusvoog. Valemit (4) nimetatakse **Bougueri-Lamberti** valemiks.

Üldreeglina koeffitsient  $k$  ei sõltu keskkonnale langeva valguse kiirgusvoost, see aga ei kehti mittelineaarses optikas kasutatavate suurte kiiritustiheduste korral.

Samas aga antud aine korral sõltub neeldumiskoeffitsient  $k$  valguse lainepikkusest  $\lambda$ .

**Neeldumiskoeffitsiendi sõltuvust lainepikkusest nimetatakse aine neeldumisspektriiks.**

Neeldumisspektreid jaotatakse joon-, riba- ja pidevspektriteks, sõltuvana sellest, kui suures lainepikkuste vahemikus uuritav aine valgust neelab. Joon-spektri tuntumaks näiteks on Päikese spekter, kus pidevas kiirgusspektris esinevad neeldumisjooned. Alates suurematest lainepikkustest lühemate poole tähistatakse neid neeldumisjooni suurte ja väikeste ladina tähtedega A, B, C, D, b, c jne. Nende neeldumisjoonte lainepikkused  $\lambda_A, \lambda_B, \dots$  on täpselt mõõdetud ja neid nimetatakse **Fraunhoferi neeldumisjoonteks** ning nad on esitatud vastavates tabelites.

Ribaspekter tekib, kui neelav keskkond sisaldab molekule, mis neelavad valgust kitsamates või laiemates spektrivahemikes, mida ei saa enam joonteks pidada. Sobivateks näideteks on paljude orgaaniliste ainete lahused. Mitmesuguse laiusega pidevaid neeldumisspektreid võime aga saada värviliste klaaside abil, mida nimetatakse **valgusfiltriteks**. Näiteks punased klaasid lasevad pidevast kiirgusspektrist läbi vaid punast ja vähesel määral ka violetset valgust ja neelavad valguse spektri keskosas (kollase, roheline, sinise).

Värvilised optilised klaasid ja lahused leiavad laialdast kasutamist spektraalmõõtmiste juures, kuna nad võimaldavad kõrvaldada meile mittevajaliku kiirguse ja lasevad läbi vajaliku.

Bougueri-Lamberti seaduse (4) võime esitada ka kümne astet kasutades:

$$\Phi_{ed} = \Phi_{e0} e^{-kd} = \Phi_{e0} 10^{-\alpha d}. \quad (5)$$

Neeldumiskoeffitsientide  $k$  ja  $\alpha$  vahelise seose leiame valemist (5) pärast lihtsaid teisendusi:

$$k = \alpha \cdot \ln 10 \quad \text{ja} \quad \alpha = k \cdot \log e. \quad (6)$$

Mõnel juhul on raske mõõta kihi paksust, mida valgus läbib, siis ja võib-olla ka muudel põhjustel on otstarbekas kasutada optilist tihedust. Neelava kihi **optiliseks tiheduseks**  $D$  nimetatakse neeldumiskoeffitsiendi  $\alpha$  ja kihi paksuse  $d$  korrutist:

$$D = \alpha \cdot d. \quad (7)$$

Valguse normaalse langemise korral võime kihi **läbilaskvuse**  $T$  leida kihti läbinud ja kihile langenud valguse kiirgusvoogude suhtest:

$$T = \frac{\Phi_{ed}}{\Phi_{e0}} = e^{-kd} = 10^{-\alpha d} = 10^{-D}, \quad (8)$$

kust saame, et optiline tihedus

$$D = \log \frac{1}{T}. \quad (9)$$

Katsed näitavad, et **lahjade lahuste korral on neeldumiskoeffitsient  $\alpha$  võrdeline lahustunud aine kontsentratsiooniga  $c$** . See on **Beeri** seadus, mille võime esitada valemiga

$$\alpha = \kappa \cdot c, \quad (10)$$

kus  $\kappa$  on lahuse kontsentratsioonist sõltumatu võrdetegur. Kasutades Beeri seadust on valem (5) kirjutatav kujul

$$\Phi_{ed} = \Phi_{e0} \cdot 10^{-\kappa cd}. \quad (11)$$

Valemit (11) nimetakse **Bougeri-Lamberti-Beeri** seaduseks. Mõõtes antud aine tuntud kontsentratsioonidega lahuste neeldumiskoeffitsiendid, võime sõltuvuse (10) esitada regressioonisirgena või graafikuna ning kasutada neid sama aine lahuse tundmatu kontsentratsiooni määramiseks. Meeles aga tuleb pidada, et erinevate ainete lahustel on erinev  $\kappa$ .

Lõpuks märgime veel, et kui lisaks neeldumisele arvestada ka valguse hajumist keskkonnas, siis võime Bougueri-Lamberti seaduse kirjutada kujul:

$$\Phi_{ed} = \Phi_{e0} \cdot e^{-k'd}, \quad (12)$$

kus suurust  $k'$  nimetatakse **ekstinktsioonikoeffitsiendiks**.

## 2. PRAKTILINE TÖÖ: Valgusfiltri neeldumisspektri mõõtmine.

### 2.1. Tööülesanne

Absorptsioonfotomeetria alustega tutvumine ja valgusfiltri neeldumisspektri mõõtmine.

### 2.2. Töövahendid

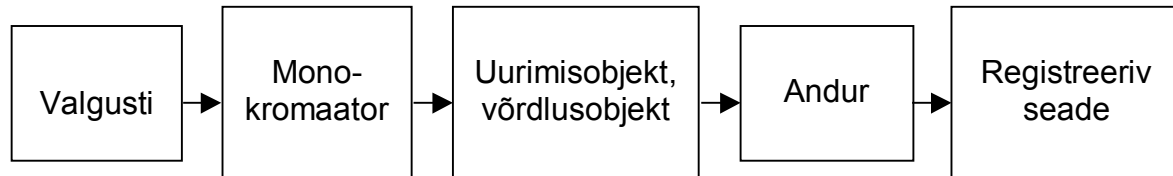
Spektrofotomeeter Heath EU-701; uuritav objekt: klaasfilter ПС-8, paksus (5,07±0,03) mm; võrdlusobjekt: klaasfilter БС-3, paksus (3,09±0,03) mm; mikroampermeeter Ф195.

### 2.3. Vajalikud eelteadmised

Bougueri-Lamberti seadus, monokromaatori ja fotoelektronkordisti tööpõhimõte, spektrofotomeetri ehitus. Fotoelektronkordisti tööpõhimõte on kirjeldatud käesoleva töö lisa 2.8.

### 2.4. Spektrofotomeeter

Spektrofotomeeter on seade, mis on ettenähtud vajalikus spektri osas valguse neeldumise mõõtmiseks ainetest läbiminekul.



Joonis 2. Spektrofotomeetri plokkskeem.

Spektrofotomeetri plokkskeem on toodud joonisel 2. Spektrofotomeetri põhiosadeks on valgusallikas, monokromaator, uurimis- ja võrdlusobjektide kamber või hoidja, valguse andur ja registreeriv seade. Sõltuvalt fotomeetri täiuslikkuse tasemest võib lisanduda veel rida plokkke hõlbustamiseks fotomeetri tööutamist ja mõõtmistulemuste registreerimist ning töötlemist, kuni arvutiga juhitavate täisautomaatsete kompleksideni välja.

Uuritavat või võrdlusobjekti läbinud valguse kiirgusvoogu võib mõõta erinevate andurite ja registreerivate seadmete abil. Antud töös on anduriks fotoelektronkordisti (FEK), mis muundab temale langeva valguse elektrivooluks ja võimendab seda. Võimendatud FEK voolu mõõdetakse ampermeetriga, mis antud töös ongi registreerivaks seadmeks.

FEK väljundvool sõltub nii FEK-le rakendatud pingest kui ka talle langeva valguse kiirgusvoost. Kui hoida pinge FEK-l konstantsena, siis väikese kiirgusvoo ja kitsa lainepikkuste vahemiku korral on FEK väljundvoolu tugevus  $i(\lambda)$  võrdeline talle langeva valguse kiirgusvooga  $\Phi_e(\lambda)$  antud lainepikkusel  $\lambda$ :

$$i(\lambda) = a(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda), \quad (13)$$

kus  $a(\lambda)$  on FEK **spektraalne tundlikkus**.

Antud juhul on FEK-le langeva valguse kiirgusvoog  $\Phi_e(\lambda)$  seotud monokromaatorist väljuva valguse kiirgusvooga  $\Phi_{e0}(\lambda)$  järgmiselt:

$$\Phi_e(\lambda) = (1 - R)^2 \cdot T(\lambda) \cdot \Phi_{e0}(\lambda), \quad (14)$$

kus  $R$  on objekti pinna peegeldustegur,  $T(\lambda)$  on objekti läbilaskvus lainepikkusel  $\lambda$ .

Asetades  $\Phi_e(\lambda)$  valemist (14) valemisse (13), saame

$$i(\lambda) = a(\lambda) \cdot (1 - R)^2 \cdot T(\lambda) \cdot \Phi_{e0}(\lambda). \quad (15)$$

Uuritava objekti läbilaskvuse  $T(\lambda)$  saamiseks tuleb seose (15) paremal poolel olevad suurused peale  $T(\lambda)$  elimineerida. Selleks kasutatakse **võrdlusmeetodit**, mille olemus seisneb järgnevas. Valguse teele asetatakse võrdlusobjekt, mille läbilaskvus on võrdne ühega ja peegeldustegur on võrdne uuritava objekti peegeldusteguriga. Seega võrdlusobjekti läbinud valguse poolt tekitatud fotovoolu tugevus  $i_1(\lambda)$  avaldub järgmiselt:

$$i_1(\lambda) = a(\lambda) \cdot (1 - R)^2 \cdot \Phi_{e0}(\lambda). \quad (16)$$

Jagades valemite (15) ja (16) vastavad pooled omavahel, saame

$$T(\lambda) = \frac{i(\lambda)}{i_1(\lambda)}. \quad (17)$$

Teiselt poolt valemi (8) teisest ja kolmandast liikmest saame, et

$$T(\lambda) = \frac{\Phi_e(\lambda)}{\Phi_{e0}(\lambda)} = e^{-k(\lambda) \cdot d}. \quad (18)$$

Kombineerides (17) ja (18), saame uuritava objekti neeldumiskoeffitsiendi lainepikkusel  $\lambda$ :

$$k(\lambda) = -\frac{\ln \frac{i(\lambda)}{i_1(\lambda)}}{d}, \quad (19)$$

kus  $d$  on uuritava objekti paksus.

Mõõtes  $k(\lambda)$  väärtused mingis spektrivahemikus, olemegi nimetatud vahemiku jaoks saanud valguse neeldumisspektri aines.

## 2.5. Töötamine spektrofotomeetriga Heath EU-701.

### 2.5.1. Valgusallikas

Valgusallikas sisaldab kahte lampi. Deuteeriumlamp kiirgab lainepikkuste vahemikus 175 nm ÷ 450 nm, hõõg- e volframlamp vahemikus 350 nm ÷ 3µm. Antud töös kasutame hõõglampi, seepärast kontrollige, et valgusallika kasti vasakul küljel olev kang oleks asendis “TUNGSTEN”. Seejärel lülitatakse sisse allika ülemisel kaanel olev pealüliti “MASTER”, mille peale hakkab tööle kastis olev ventilaator, ning siis saab ka sisse lülitada hõõglambi “TUNGSTEN”.

### 2.5.2. Monokromaator

Valgusallikale järgneb monokromaator. Monokromaatori üldandmed on järgmised: peegelvõre 1200 joont/mm, lainepikkuste töövahemik 1900 Å ÷ 10000 Å, täpsus ±1 Å, korduvus ±0,1 Å.

Monokromaatori ülemisel kaanel on lainepikkuse ja pilu laiuse indikaatorid (vastavalt “WAVELENGTH” ja “SLIT WIDTH”) ning pilu laiuse reguleerimise nupp.

Sisend- ja väljundpilu laiust reguleeritakse korruga. Pilude laiust mikromeetrites (varasem ühik 1 mikron = 1  $\mu\text{m}$ ) näitab 4-kohaline loendur ja õige laius saadakse nupu keeramisel positiivses suunas, s.t pilu laiuse suurendamisel.

Lainepikkust ongströmites (1 Å = 0,1 nm) näitab 5-kohaline loendur, arvud näitavad täisongströme, kümnendike saab lugeda viimase koha ringskaalalt. Vajaliku lainepikkuse seadmiseks on eraldi juhtplokk monokromaatori peal.

Vajaliku lainepikkuse lähedale kiireks jõudmiseks kasutatakse juhtplokis kahte "SLEW" e kerimise kangi: parempoolset "INCREASE", kui on vaja kerida lainepikkuste kasvamise suunas ja keskmist "DECREASE" – kerimiseks kahanemise suunas. Aeglasemaks kerimiseks või vajalikus lainepikkuste vahemikus skaneerimiseks kasutatakse kangi "SCAN", kerimise kiirus valitakse nimetatud kangist vasakul asuva ümberlülitiga "SCAN RATE". Kõik kolm kangi on keskmises asendis "OFF" väljalülitatud seisus, ülemises asendis "CONTINUOUS" – püsivalt sees, ning alumises asendis "MOMENTARY" – sees ainult kangi allhoidmise ajal. Režiimis "SCAN" toimub kerimine ainult lainepikkuste kasvamise suunas.

### 2.5.3. Objektimoodul

Selles kastis on objektihooldaja, mida saab nihutada monokromaatori väljundkiirega ristisuunas. Nihutamiseks on kasti ülakaanel nupp nelja asendiga 1-2-3-4 ja nupu pööramisel nihkuvad valguse teele vastavalt asendi numbrile järgmised objektid:

Asend	1	2	3	4
Objekt	Tühi	Võrdlusfilter BC-3	Uuritav filter ПС-8	Tühi

### 2.5.4. Andur

Andurina kasutatava FEK tüüp on R372, tööpiirkonnaks on orienteeruvalt lainepikkuste vahemik 1800 Å ÷ 7000 Å. Lisaks FEK-le on samas kastis ka tema toitepingeallikas. Kasti ülemisel kaanel on lüliti "POWER" toitepinge sisselülitamiseks ning nupud pinge astmeliseks ja sujuvaks "FINE" reguleerimiseks ning voltmeeter pinge mõõtmiseks.

Samal kaanel on ka katik "SHUTTER", mis asub valguse teel FEK ees. Üldreeglina tuleb FEK kaitseks hoida katik suletud asendis "CLOSED" ja avada ainult mõõtmiste ajaks.

### 2.5.5. Registreeriv seade

Registreerivaks seadmeks on mikroampermeeter  $\Phi 195$  mõõtepiirkondadega alates 50 nA kuni 100  $\mu\text{A}$ .

## 2.6. Neeldumisspektri määramine

Tutvuge kõigepealt spektrofotomeetri ehitusega, lülitite, reguleerimisnuppude ja -kangide tähendusega. **Kontrollige, et FEK katik "SHUTTER" oleks suletud asendis!** Seadke mikroampermeetri mõõtepiirkondade ümberlülitite asendisse 100  $\mu\text{A}$  ja kontrollige, et mõõteriista osuti mehhaaniline null oleks paigas. Vajaduse korral tehke korrigeerimine.

FEK toitepingeallika ja mikroampermeetri võimendi stabiilse töörežiimi saavutamiseks kulub vähemalt 10 minutit. Lülitage FEK toitepinge ja mikroampermeeter sisse, seadke toitepinge väärtuseks reguleerimisnupuga "FINE" 900 V. Vahepeal lülitage sisse volframlamp nagu oli seletatud punktis 2.5.1 ning seadke monokromaatori pilu laiuseks 100 mikromeetrit. Seejärel kerige ette lainepikkus 380 nm. Kui riistade soojenemisaeg on läbi, siis kontrollige FEK toitepinget ja mikroampermeetri elektrilist nulli kõikidel mõõtmispiirkondadel, see ei tohiks erineda mehaanilisest nullist rohkem, kui ühe väikese jaotise võrra. Elektrilise nulli korrigeerimiseks on mikroampermeetri esipaneelil potentsiomeetri nupp "↔", mida saab keerata kruvikeeraja abil.

Kui kõik ettevalmistused on tehtud, siis keerake mikroampermeeter 100  $\mu\text{A}$  mõõtepiirkonnale, nihutage valguse teele võrdlusobjekt, avage katik ja mõõtke fotovool optimaalses mõõtepiirkonnas. Seejärel nihutage valguse teele uuritav objekt ja registreerige vastav fotovool.

Mõõtmistulemused ja arvutused on sobiv koondada järgmiseks tabeliks:

Lainepikkus, nm	Fotovool $i(\lambda)$ , nA või $\mu\text{A}$		Neeldumiskoeffi- tsient $k$ , $\text{cm}^{-1}$	Neeldumiskoeffi- tsiendi määra- matus $u(k)$ , $\text{cm}^{-1}$
	Võrdlusobjekt	Uuritav objekt		
380,0				
400,0				
...				

Mõõtmised on soovitatav teha järgmistel lainepikkustel: 380, 400, 420, 440, 460, 480, 490, 500, 520, 540, 550, 560, 570, 580, 590, 600, 610, 620, 640, 660, 680, 700, 720, 730, 740, 750, 760, 770 ja 780 nm.

Pärast mõõtmiste sooritamist sulgege FEK katik ja lülitage välja järjekorras FEK toitepinge, mikroampermeeter, valgusallikas ning kõige viimasena volukilp.

Mõõtmistulemuste töötlemiseks sobib kasutada MathCAD-i. Tulemused esitada samuti graafikuna  $k = k(\lambda)$  koos  $k$  määramatustega.

**Lõppjärelus:** kas filtri ПС-8 mõõdetud neeldumisspekter on joon-, riba- või pidev spekter?

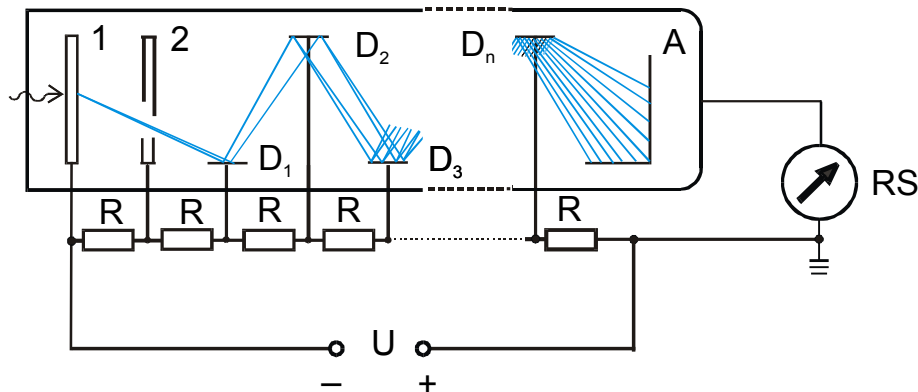
## 2.7. Küsimusi

1. Millistes ühikutes mõõdetakse kiirusvoogu, kiiritustihedust, valgusvoogu ja valgustatust? Kuidas on seotud kiirusvoog ja valgusvoog?
2. Monokromaatiline kiirusvoog 5 W lainepikkusega 555 nm langeb normaalselt 2  $\text{m}^2$  suurusele pinnale. Kui suur on selle pinna valgustatus? Kui suur on pinna valgustatus juhul, kui langemisnurk on  $60^\circ$ ?

- Kui suur on aine neeldumiskoeffitsient  $k$ , kui 5 mm paksuse plaadi läbilaskvus on 0,01 %, 0,1 %, 1 %, 10 %, 50 %, 90 %, 95 % ja 100 %? Kui suur on plaadi optiline tihedus  $D$  nende läbilaskvuste korral?
- Kuidas avaldub peegeldumiskoeffitsient  $R$ ? Kuidas elimineeritakse peegelduse segav mõju neeldumiskoeffitsiendi mõõtmisel?
- Millistel tingimustel ja kuidas tekib kiirgusspekter joonspektrina?
- Millal saadakse neeldumisspekter joonspektrina? Kuidas tekivad Fraunhoferi neeldumisjooned Päikese spektris?
- Millistel tingimustel on kiirgusspekter pidev? Tooge näiteid.
- Millist nähtust nimetatakse elektronide termoemissiooniks, fotoemissiooniks (fotoefektiks), sekundaarseks emissiooniks? Millest on tingitud fotoemissiooni nn “punane piir”?
- Kas oskate nimetada peale fotoelektronkordisti veel teisi seadmeid, mille töö põhineb fotoemissioonil?

## 2.8. Lisa: fotoelektronkordisti tööpõhimõte

Fotoelektronkordistiks nimetatakse elektronseadist, milles fotokatoodist valguse mõjul emiteeruvate elektronide voogu võimendatakse sekundaaremmissiooni rakendades.



Joonis 3. Fotoelektronkordisti ehitus: 1 – fotokatood, 2 – fokusseeriv elektrood,  $D_1, \dots, D_n$  – dünoodid, A – anood, RS – registreeriv seade, U – toitepinge.

FEK vakumeeritud klaaskestas (joonis 3) on fotokatood, elektronoptiline süsteem katoodist väljuva elektronide voo koondamiseks seda võimendavatele dünoodidele ja anood (kollektor). Mitmekordse võimendamise tulemusena ületab anoodile jõudvate elektronide arv tunduvalt katoodist väljuvate elektronide arvu. Nii muundatakse valgussignaali registreerimiseks sobivaks elektriliseks signaaliks.

Fotokatoodiks nimetatakse katoodi, mis elektromagnetkiirguse (nähtava valguse, UV, IP, röntgenkiirguse) toimel emiteerib elektrone, s.t tema töö aluseks on fotoemissioon e väline fotoefekt. Fotokatoodi ees olevat kesta osa nimetatakse aknaks ja aken peab garanteerima registreeritava kiirguse maksimaalse jõudmise katoodini ja tema valmistamiseks kasutatakse



erilisi klaasisorte või muid materjale. Näiteks UV-kiirguse registreerimiseks mõeldud FEK-ide aknad valmistatakse kas kvartsist või uvioolklaasist. Ka fotokatoodi materjali tuleb valida, sest fotoefekti “punane piir” seab piiri puhaste ainete kasutamisele. Ka kõige väiksema väljumistööga metalli, tseesiumi (väljumistöö 1,81 eV) punane piir on 686 nm, s.t tseesiumkatoodi abil me ei saaks registreerida IP-kiirgust. Sellepärast katoode valmistatakse põhiliselt leelismetalle sisaldavatest keemilistest ühenditest, näiteks Cs<sub>3</sub>Sb, (K<sub>2</sub>Cs)Sb, (Rb<sub>2</sub>Cs)Sb jne, ning lisaks veel sensibiliseeritakse, s.t suurendatakse tundlikkust kas pinnakihi kerge oksideerimise või muu töötlusega.

Dünood on sekundaarelektrood, mida kasutatakse FEK-tes ja mõnda tüüpi elektronlampides ja mis sekundaaremissiooniga kordistab talle langevat elektronide voogu. Naaberdünoodide vahele rakendatakse elektrone kiirendav pinge, mille mõjul elektronid peavad saama energia, millest piisaks rohkem, kui ühe elektroni väljalöömiseks järgmisel dünoodil. Väljalöödavate elektronide arvu iseloomustatakse sekundaaremissiooniteguriga. Tänapäeva FEK-des on 10 – 12 dünoodi e võimenduskaskaadi ja kui iga dünoodi sekundaaremissioonitegur on  $\approx 4$ , siis FEK koguvõimendustegur küünib  $10^6 - 10^7$ , s.t et niipalju elektrone jõuab anoodile iga fotokatoodilt emiteerunud elektroni kohta.

FEK toidetakse üldreeglina ühest alalispingeallikast, mis peab välja andma küllalt kõrget pinget. Et saada eelmainitud sekundaaremissioonitegurit, peab dünoodidevaheline pinge olema 100 V ringis pluss veel pinged fotokatoodi, elektronoptilise süsteemi ja esimese dünoodi vahel ning viimase dünoodi ja anoodi vahel, toitepinge kokku umbes 1000 kuni 1500 V. Et FEK väljundsignaal saadakse anoodilt ja antakse edasi registreerivale seadmele, siis peab anood olema nullilähedase potentsiaali all. Sellepärast ühendataksegi toitepingeallikas ja FEK nagu näidatud joonisel 3: fotokatoodile antakse kõrge negatiivne potentsiaal ja dünoode toidetakse läbi pingejagaja. Enamikul juhtudel jagatakse pinge võrdselt kõikide kaskaadide vahel, s.t kõik pingejagaja takistid on ühesuguse väärtusega, kuid kasutatakse ka komplitseeritumaid toiteskeeme.

## 2.9. Kirjandus

1. Saveljev I. Füüsika üldkursus, kd 3. Tallinn, 1979, lk 182–183.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. Москва, 1976, с. 563–571.
3. Hecht E. Optics. Addison-Wesley PublishingCo. Ch.3.