



Projekts	<i>Fizikas bakalaura studiju attīstība Latvijas Universitātē</i>
Projekta līguma Nr.	2005/0110/VPD1/ESF/PIAA/04/APK/3.2.3.2/0029/0063
LU reģistrācijas Nr.	ESS 2005/6

Latvijas Universitāte  
Fizikas un matemātikas fakultāte  
SPEKTROSKOPIJAS LABORATORIJA  
V.Rēvalds

Laboratorijas darbs

# FOTOKATODA SPEKTRĀLĀS JUTĪBAS NOTEIKŠANA

## **FOTOKATODA SPEKTRĀLĀS JUTĪBAS NOTEIKŠANA**

### **1. Darba mērķi**

Cilvēka acs uztver elektromagnētisko starojumu ļoti šaurā spektra rajonā: no 400 – 750 nm. Optiskā starojuma rajons ir daudz plašāks: 1 nm – 1000 μm. Spektroskopijā svarīgi un visbiežāk izmantoti šādi spektra rajoni: tuvais UV, redzamais un tuvais IS rajons (robežās no 185 nm līdz 2,5 μm). Tas lielā mērā saistīts ar gaismu caurlaidīgu materiālu un starojuma reģistrētāju pieejamību optisko sistēmu izveidei. Optiskā starojuma reģistrēšanai var izmantot fotogrāfiskās un fotoelektriskās metodes. Diemžēl šo uztvērēju reakcija ir atšķirīga dažādu viļņu garuma starojumam, tie ir selektīvi un praktiskā izmantošanā nepieciešams zināt to spektrālo jutību.

### **2. Pārskata daļa**

#### **2.1. Ievads**

Parasti, reģistrējot ļoti vājus gaismas signālus, pat visjutīgāko fotokatodu fotostrāvas ir par mazām, lai iedarbinātu reģistrējošo iekārtu. Šādos gadījumos fotoelementa anoda ķēdē jāieslēdz speciāli elektroniski pastiprinātāji. Izdevīgāk ir to vietā izmantot fotoelektronu pavairotājus (FEP).

Fotoelektronu pavairotāju (FEP) izmanto vāju optisko signālu pārveidošanai elektriskajos. Darbības pamatā ir fotoefekts un elektronu sekundārā emisija. Sekundārā elektronu emisija rodas, ja kāda ķermeņa virsmu apšauda ar elektroniem. FEPa Galvenās sastāvdaļas ir fotokatods, dinodes ar augstu sekundāro elektronu emisiju un kolektors. Dinožu skaits var būt visai ievērojams (15-20). Signāla pastiprināšana atkarīga no dinodēm uzliktā sprieguma un dinožu skaita. Pastiprināšanas koeficients var sasniegt  $10^9$ - $10^{11}$ .

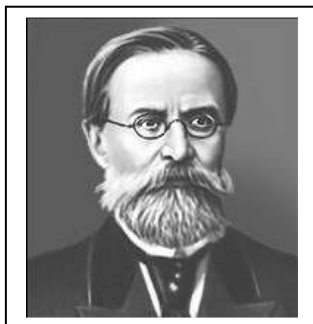
FEPus izmanto atomāro procesu pētījumiem, luminiscences, emisijas un absorbcijas spektru pētījumiem u. c. gadījumos, kur nepieciešama liela jutība.

#### **2.2. Fotoefekts**

Fotoefekts - elektronu emisija elektromagnētiskā starojuma ietekmē. Fotoefektu 1887. gadā atklāja vācu fiziķis Heinrihs Herts (1857 - 1894). Pirmais fotoefekta kvantitatīvos pētījumus veica krievu fiziķis Aleksandrs Stoļetovs (1839-1896) 1888. gadā un vācu fiziķis Filips Lenards (1862-1947) 1899. gadā. Fotoefekta teoretisko skaidrojumu 1905. gadā izstrādāja Alberts Einšteins (1879-1955).



Heinrihs Herts (1857 – 1894)



Aleksandrs Stoļetovs (1839-1896)



Alberts Einšteins (1879-1955).

Fotoefekts ir kvantu fizikas parādība. Tā atklāšana un izpēte bija nozīmīga kvantu fizikas pamatošanā. Tikai ar kvantu fizikas palīdzību izdevās izskaidrot fotoefekta likumības.

Brīvs elektrons nespēj izstarot fotonu, jo nevar vienlaicīgi apmierināt enerģijas un impulsa saglabāšanos. Fotoefekts no atomiem, molekulām vai kondensētās vides ir iespējams tāpēc, ka elektrons mijiedarbojas ar apkārtējo vidi. Atomā un molekulā to raksturo jonizācijas enerģija, kondensētā vidē – izejas darbs.

Enerģija saglabāšanās likumu fotoefektā izsaka Einšteina vienādojums

$$h\nu = \phi + mv^2/2,$$

kur  $h\nu$  - fotona enerģija,  $\phi$  – izejas darbs,  $mv^2/2$  - atbrīvotā elektrona kinētiskā enerģija.

Šī sakarība precīzi izpildās ideālā gadījumā, kad absolūtā temperatūra  $T = 0$  un ne sevišķi lielām gaismas intensitātēm, kad nenotiek daudzfotonu efekti. Kondensētās vidēs fotona absorbcija atkarīga no tā enerģijas. Ja  $h\nu > \phi$ , tad starojumu absorbē vadāmības elektroni (metālos) vai arī valences elektroni (pusvadītājos). Absorbcijas sekas ir ārējais fotoefekts. Ārējā fotoefekta garo viļņu robežu nosaka sakarība

$$h\nu = hc/\lambda = \phi; \lambda = hc/\phi.$$

Ja fotona enerģija nav mazāka par aizliegtās zonas platumu, tad var realizēties iekšējais fotoefekts, t.i. parādīties fotovadamība. Ja fotona enerģija ievērojami pārsniedz izejas darba vērtību, tad foto elektroni var tikt izrauti no dziļām atoma čaulām.

Ārējo fotoefektu novēro, ja elektromagnētiskais starojums iedarbojas uz cieta vai šķidra ķermeņa virsmu, kas robežojās ar vakuumu. Fotoelektrisku ierīču izgatavošanā praktiska nozīme ir cietām vielām: metāliem un pusvadītājiem. Ārējais fotoefekts pakļaujas vairākām likumībām:

- emitēto elektronu skaits ir proporcionāls starojuma plūsmai,
- katrai vielai pie tās virsmas noteikta stāvokļa un pie 0 K ir fotoefekta robeža – minimālā frekvence vai maksimālais viļņu garums, pie kura fotoefekts vairs nav iespējams,
- fotoelektronu maksimālā kinētiskā enerģija pieaug lineāri atkarībā no starojuma frekvences un nav atkarīga no starojuma plūsmas intensitātes,
- No starojuma intensitātes ir atkarīgs emitēto elektronu skaits.

Zinātnieki ilgu laiku nevarēja izskaidrot, kāpēc fotoelektronu enerģija nesamazinās, ja gaismas avotu attālina no metāla plāksnītes, kuru izmanto fotoelektronu iegūšanai. Pēc gaismas viļņu teorijas principiem, attālinot gaismas avotu, samazinās krītošās enerģijas blīvums. Tātad jā sagaida arī emitēto elektronu enerģijas samazināšanās. No viļņu teorijas viedokļa, fotoefektu varētu skaidrot šādi. Gaisma izraisa elektrona uzspiestās svārstības. Ja iestājas rezonanse starp elektronu pašsvārstību periodu un gaismas viļņa periodu, elektrons var tik stipri iesvārstīties, ka tiek atrauts un emitēts no metāla virsmas. No šā redzes viedokļa, enerģija elektronam, kurš atstāj metālu, ir proporcionāla gaismas intensitātei. Bet Aleksandrs Stoļetovs eksperimentāli konstatēja, ka fotoelektronu enerģija nav atkarīga no gaismas intensitātes. Tā ir lineāri atkarīga tikai no starojuma svārstību frekvences. No intensitātes ir atkarīgs tikai atbrīvoto elektronu skaits.

Alberts Einšteins 1905. gadā, izmantojot kvantu hipotēzi, veiksmīgi spēja izskaidrot fotoefektu. Attīstot tālāk Planka ideju, Einšteins pieņēma, ka emitētie kvanti, kuru enerģija ir  $h\nu$ , arī pēc emisijas izturas kā patstāvīgi fizikāli objekti. Protams, ka tādā gadījumā šo kvantu enerģija nav atkarīga no attāluma līdz gaismas avotam. Katrs kvants, ko absorbē metāls, atdod savu enerģiju elektronam. Ja kvanta enerģija ir pietiekami liela, tad elektrons var atstāt metālu. Ja saņemtā enerģija ir lielāka par metāla izejas darbu, tad elektrons iegūst vēl arī kinētisko enerģiju, kuras lielums ir lineāri atkarīgs no gaismas frekvences. Šo sakarību var izteikt ar fotoefekta vienādojumu:

$$h\nu = \phi + m_e v^2/2, \quad /1/$$

kur  $\phi$  – izejas darbs,  $m$  – elektrona masa,  $v$  – elektrona ātrums. Ja frekvence ir mazāka par robežvērtību  $\nu_{\text{rob}} = \phi/h$ , tad fotoefekts nenotiek. Elektromagnētiskā starojuma kvantam

izmanto arī citu nosaukumu – fotons. Tas atvasināts no grieķu vārda "*photos*", kas nozīmē gaismu. Terminu "fotons" 1929. gadā ieviesa amerikāņu fizikokīmiķis Hilberts Lūiss.

Fotoelektronu emisija realizējās trīs secīgos procesos:

- fotona absorbcija un tāda elektrona rašanās, kura enerģija pārsniedz vidējo vērtību,
- atbrīvotā elektrona virzīšanās vielas virsmas virzienā, kur daļa enerģijas var zust,
- elektrona atbrīvošanās – izejas darba pārvarēšana.

Kvantitatīvs fotoefekta raksturlielums ir kvantu iznākums  $\eta$ , tas ir elektronu skaits, ko atbrīvo viens kvants. Kvantu iznākums ir atkarīgs no vielas dabas, virsmas stāvokļa un fotona enerģijas. Vairumam tīru metālu virsmas izejas darbs  $\phi > 3\text{eV}$  un fotoefektu var novērot tikai spektra ultravioletai daļai. Izņēmumi ir sārnu metāli un bārijs, kuriem fotoefekts ir iespējams arī redzamajā gaismā.

Foto efekta robežas tuvumā vairumam metālu kvantu iznākums  $\eta \approx 10^{-4}$  elektronu uz vienu fotonu. Tik mazu kvanta iznākumu var skaidrot šādi: gaisma iespiežas metālā ap  $10^{-5}$  cm un pārsvarā tur arī absorbējās. Fotoelektrons savā kustībā virsmas virzienā mijiedarbojās ar vadāmības elektroniem, kas metālā ir ļoti daudz, un strauji zaudē no fotona iegūto enerģiju. Pārvarēt virsmas potenciālu var tikai tie elektroni, kas no cietās vielas atbrīvojušies tikai virsmas tuvumā, nepārsniedzot  $10^{-7}$  cm. No tīru metālu virsmas kvantu iznākuma mazo vērtību iespaido arī stiprā gaismas atstarošana.

Tīriem metālu slānīšiem kvantu iznākums ultravioletā gaismā strauji pieaug, ja  $h\nu = 12\text{ eV}$ , tas var sasniegt ievērojamas vērtības ( $\text{Bi} \approx 0,04$ ,  $\text{Al} \approx 0,015$ ) un  $0,1 - 0,2$  virknei metālu ( $\text{Pt}$ ,  $\text{W}$ ,  $\text{Sn}$ ,  $\text{Ta}$ ,  $\text{In}$ ,  $\text{Be}$ ,  $\text{Bi}$  u.c.), ja  $h\nu = 15\text{ eV}$ . Gadījuma piemaisījumi var izejas darbu ievērojami samazināt.

Fotokatodus visbiežāk veido no pusvadītājiem. Tie darbojās gaismu atstarojošā vai caurejošā režīmā. Pirmajā gadījumā emitējošo materiālu uzklāj metāla pamatnei, otrā gadījumā emitējošo materiālu plāna slānīša veidā uzklāj stikla, kvarca vai kāda cita caurspīdīga materiāla pamatnei. Šajā gadījumā katodu apgaismo no pamatnes puses.

Fotokatoda svarīgākie parametri ir;

- integrālā jutība, ko mēri ar fotostrāvas attiecību pret krītošās gaismas jaudu ( $\gamma$ ,  $\mu\text{A/W}$ ),
- spektrālā jutība uz viļņu garuma intervāla vienību ( $\gamma_{(\lambda)}$ ,  $\mu\text{A/W}$ ),
- kvantu iznākums  $\eta$ ,
- tumsas strāva, ko izraisa termoelektronu emisija, autoelektronu emisija un vēl citi efekti aptumšotam katodam.

Izmanto šādus fotokatodus:  $\text{Cs}_2\text{Te}$ ,  $\text{RbTe}$  (tuvā ultravioletā daļā),  $\text{Cs}_2\text{Sb}$ ,  $\text{Na}_2\text{KSb}$  (redzamā spektra īso viļņu daļā - līdz  $600 - 650\text{ nm}$ ),  $\text{Na}_2\text{KSb} - \text{Cs}$  (redzamajā un tuvajā IS spektra daļā – līdz  $940\text{ nm}$ ),  $\text{Ag-O-Cs}$  (līdz  $1,2 - 1,5\text{ }\mu\text{m}$ ) u.c. pusvadītāju materiālus.

### 2. 3. Fotokatodu materiālu klasifikācija un īpašības

Pusvadītāji ir plaša materiālu grupa, kuru elektrovadāmība ir mazāka nekā metāliem ( $10^6 - 10^4\text{ 1/}\Omega\cdot\text{cm}$ ) un lielāka par labu dielektriķu elektrovadāmību ( $10^{-10} - 10^{-12}\text{ 1/}\Omega\cdot\text{cm}$ ). Atšķirībā no metāliem pusvadītāju elektrovadāmība pieaug ar temperatūru un tā ir eksponenciāla:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E/kT),$$

kur  $E$  – vadāmības aktivācijas enerģija, tā ir elektrona saites enerģija ar atomiem. Palielinot temperatūru, siltumkustība sāk noārdīt saiti un daļa elektronu kļūst par brīviem elektriskā lādiņa nesējiem. Elektronu saiti ar atomiem var saraut arī starojums, ātru daļiņu plūsma (sekundārā elektronu emisija) un stiprs elektriskais lauks. Pusvadītāju materiāliem ir raksturīga augsta jutība pret ārēju iedarbību un arī pret piemaisījumiem un defektiem kristālu

režģī. Bieži vien elektroniem piemaisījumu un defektu tuvumā saites enerģija ir ievērojami mazāka nekā ideālā kristālā.

Ar terminu “pusvadītāji” saprot vielu grupu, kam pusvadītāju īpašības spilgti izteiktas jau pie istabas temperatūras. Šādas vielas ir:

- periodiskās sistēmas ceturtās grupas elementi Ge un Si. Šo elementu atomiem ir četri valences elektroni un tie veido dimanta tipa kristālisko režģi, kur realizējās kovalentā saite.
- Dimantveidīgie pusvadītāji. Pie šīs grupas pieskaita III grupas elementu (Al, Ga, In) savienojumus ar V grupas elementiem (P, As, Sb). Šī tipa pusvadītājiem izmanto apzīmējumu  $A^{III}B^V$ . Trešās grupas elementiem ir 3 valences elektroni, bet piektās grupas elementiem – 5, tā kā vidējais valento elektronu skaits uz vienu atomu šajos savienojumos arī ir 4. Katrs atoms veido 4 valentās saites ar tuvākajiem kaimiņiem, tādējādi veidojās kristāliskais režģis, kas līdzīgs dimanta režģim, ar to atšķirību, ka atoma  $A^{III}$  tuvākais kaimiņš ir  $B^V$ , bet atoma  $B^V$  tuvākais kaimiņš -  $A^{III}$ . Uz elektronu pārgrupēšanās rēķina starp  $A^{III}$  u  $B^V$ , tie ir ar atšķirīgas zīmes lādiņiem. Tādēļ  $A^{III}B^V$  kristālā realizējās daļēji kovalentā, daļēji jonu saite. Šie kristāli ir Ge un Si tuvi analogi.
- Otrās un sestās grupas elementu savienojumi arī vidēji satur 4 valences elektronus atomā (ZnTe, ZnSe, CdTe, CdS u.c.). Šiem ( $A^{II}B^{VI}$ ) savienojumiem ir pārsvarā jonu saite. Pusvadītāju īpašības tiem ir mazāk izteiktas kā iepriekšējās pusvadītāju grupās.
- Piektās grupas elementi As, Sb un Bi - pēc savām īpašībām ir līdzīgi pusvadītājiem. To tuvākie analogi  $A^{IV}B^{VI}$  (PbS, PbSe, SeTe, GeTe u.c) ir vidēji ar 5 elektroniem uz vienu atomu. Šīs grupas pusvadītājus izmanto infra sarkanā starojuma uztvērējos. Starp sestās grupas elementu (O, S, Se, Te) un pirmās – piektās grupas elementu savienojumiem ir ļoti daudzi pusvadītāji.
- Sestās grupas elementu savienojumi ar Ti, V, Mn, Fe, Ni, Sm, Eu u.c. Šajos pusvadītājos pārsvarā ir jonu saite. Mainot temperatūru, dažiem no tiem ( $V_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ , NiS,  $Eu_2O$  u. c.) novēro fāzu pārejas pusvadītājs – metāls.

#### ELEMENTU PERIODISKĀ SISTĒMA

IA																VIIA 0	
1 H 1.0079																1 H 1.0079	2 He 4.00260
3 Li 6.941	4 Be 9.01218															9 F 18.998403	10 Ne 20.179
11 Na 22.98977	12 Mg 24.305															17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
19 K 39.0983	20 Ca 40.08	21 Sc 44.9559	22 Ti 47.88	23 V 50.9415	24 Cr 51.996	25 Mn 54.9380	26 Fe 55.847	27 Co 58.9332	28 Ni 58.69	29 Cu 63.546	30 Zn 65.38	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.9216	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80
37 Rb 85.4678	38 Sr 87.62	39 Y 88.9059	40 Zr 91.22	41 Nb 92.9064	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.9055	46 Pd 106.4	47 Ag 107.868	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.80	53 I 126.9046	54 Xe 131.30
55 Cs 132.9054	56 Ba 137.33	57 La 138.9055	58 Ce 140.9077	59 Pr 140.9077	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.4	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.9254	66 Dy 162.50	67 Ho 164.9304	68 Er 167.26	69 Tm 168.9342	70 Yb 173.04	71 Lu 174.967	
87 Fr (223)	88 Ra 226.0254	89 Ac 227.0278	Unq (261)	Unp (262)	Unh (263)	109											

Lantanidī

Aktinidī

90 Th 232.0381	91 Pa 231.0369	92 U 238.029	93 Np 237.0482	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (260)
----------------------	----------------------	--------------------	----------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------

Lantanīdi

Aktinīdi

Paaugstinot temperatūru daļa elektronu siltumkustības dēļ kļūst brīvi strāvas nesēji. Elektronu saiti var saraut arī citi faktori: gaisma, ātru daļiņu plūsma, spēcīgs elektriskais lauks u.c. faktori.

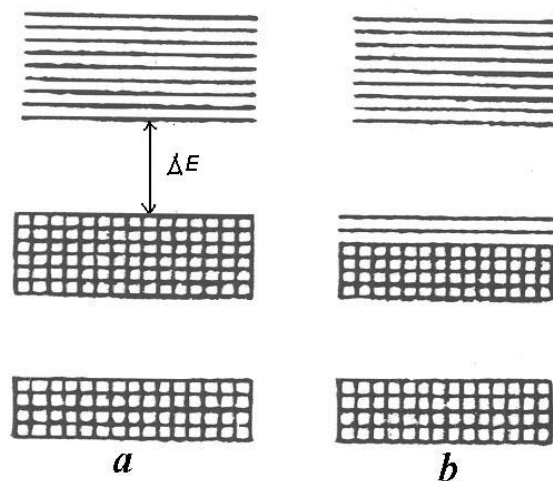
Tā kā cietā vielā atomi vai joni novietoti attālumos, kas līdzīgi atomu rādiusam, tad valences elektroni var pāriet no viena atoma pie cita. Šāda elektronu pārvietošanās var veidot kovalento saiti. Tas var notikt, kad blakus atomu elektronu čaulas ievērojami pārklājas un elektronu pārejas starp atomiem notiek pietiekoši bieži. Šāda aina raksturīga tādām tipiskām pusvadītājam kā germānijam. Visi germānija atomi ir neitrāli un savstarpēji saistīti ar valento saiti. Taču elektrona apmaiņa starp atomiem tieši neizraisa elektrovadāmību, jo elektronu sadalījums ir stingri fiksēts: divi elektroni realizē saiti starp katru atomu pāri – tuvākajiem kaimiņiem. Lai šādā kristālā radītu elektrovadāmību, nepieciešams saraut kaut vienu saiti. To var panākt iedarbojoties ar fotonu, sasildot paraugu vai arī iedarbojoties citādi, atdalot elektronu. Elektrons ir jāpārnes uz kādu citu kristāla režģa vietu, kur jau visas saites ir aizpildītas un elektrons kļūst lieks. Šāds elektrons var turpmāk kristālā migrēt un pārnest negatīvo elektrisko lādiņu. Tas kļūst par vadāmības elektronu.

Tajā pat laikā sarautā saite kļūst par kristālā klejojošu caurumu, jo, pateicoties stiprai apmaiņai, vienas blakus saites elektrons aizņem tukšo vietu, saraujot blakus esošo saiti. Elektrona iztrūkums kādā no saitēm nozīmē, ka atomā (vai atomu pāri) ir pozitīvs lādiņš, kurš var pārvietoties kopā ar elektronu. Jonu saites gadījumā elektronu čaulas pārklāšanās ir mazāka, elektronu pārejas nav tik biežas. Taču saites saraušanas gadījumā arī tad veidojās vadāmības elektroni un caurumi: lieks elektrons kādā kristāla vietā un nekompensēts pozitīvs lādiņš citā vietā. Tie var kristālā brīvi pārvietoties.

Divu dažādi lādētu strāvas nesēju – elektronu un caurumu – klātbūtne ir raksturīga dielektriķu un pusvadītāju īpašība. Ideālos kristālos tie vienmēr rodas pāros. Viena saistīta elektrona ierosināšana, pārvēršot to par vadāmības elektronu, neiztrūkstoši izraisa cauruma rašanos. Abu tipu strāvas nesēju koncentrācijas ir vienādas. Tas nenozīmē, ka to ieguldījums strāvas pārnēsē ir vienāds, jo elektronu un caurumu kustīgums var atšķirties.

Reālos kristālos, kur ir struktūras defekti un piemaisījumi, elektronu un caurumu koncentrācijas var atšķirties un elektrovadāmību var realizēt tikai viens no strāvas nesējiem. Strāvas nesēju dabas un to kustības likumu pilnīgu un korektu aprakstu pusvadītājos dod cietvielu kvantu teorija. Svarīgākos secinājumus var formulēt šādi.

- Elektronu enerģētiskais spektrs kristālos sastāv no zonām. Ir atļautās zonas, kas pilnīgi aizpildītas ar elektroniem. Starp tiem ir intervāli, kur elektronu stāvokļi nevar būt (aizliegtās zonas).
- Elektronu stāvokli zonas robežās raksturo enerģija un kvazi impulss.
- Pie  $T = 0$ , elektroni aizpilda enerģijas zemākos līmeņus saskaņā ar Pauli principu. Katrā stāvoklī, ko raksturo noteikta enerģija, kvazi impulss un viena no iespējamām spina orientācijām, var atrasties tikai viens elektrons. Tāpēc atkarībā no elektronu koncentrācijas kristālā, tie aizpilda dažas zemākās no atļautajām zonām, atstājot tukšas augstākās zonas. Kristāliem, kuriem pie  $T = 0$  K daļa no zemākām zonām ir pilnīgi aizpildītas, bet augstākās zonas ir pilnīgi tukšas, ir dielektriķi un pusvadītāji (1.a att.). Metālos kaut viena no atļautajām zonām jau pie  $T = 0$  K ir daļēji aizpildīta (1.b att.).
- Pusvadītājos un dielektriķos augšējo no atļautajām aizpildītajām zonām sauc par valences zonu, bet zemāko no neaizpildītajām – par vadāmības zonu. Ja  $T > 0$  K, tad siltumkustības dēļ daļa elektronu nonāk no valences zonas vadāmības zonā (daļa ķīmisko saišu tiek sarautas). Valences zonā rodas caurumi



1. att. Pusvadītāju (a) un metālu (b) zonu shēmas

Pusvadītājos strāvas nesēji ir koncentrēti šaurā enerģijas rajonā: elektroni - vadāmības zonas apakšējās malas  $E_c$  tuvumā, t.i., attālumā  $kT$  enerģijas skalā. Caurumi koncentrēti tādā pat enerģijas intervālā valences zonas augšējās robežas tuvumā  $E_v$ , pat augstās temperatūrās ( $\sim 1000^\circ\text{C}$ ,  $kT \sim 0,1\text{ eV}$ ). Zonu platums atkarībā no materiāla ir ar kārtu  $1 - 10\text{ eV}$ .

Aizliegtās zonas platums  $\Delta E$  (minimālā enerģija, kas atdala aizpildīto zonu no tukšās) arī svārstās plašās robežās: no  $\Delta E = 0$  līdz pat vairākiem eV. Pelēkai alvai valentās zonas augšējā robeža sakrīt vadāmības zonas apakšējo robežu (radniecība ar metāliem).

Pusvadītāju un dielektriķu elektromagnētiskā starojuma spēcīga absorbcija sākas, ja fotonu enerģija ir vienāda ar aizliegtās zonas platumu (tiešai optiskai pārejai). Ja  $h\nu \sim \Delta E$ , tad absorbcijas rādītājs  $k \sim 10^4\text{ cm}^{-1}$  un, palielinoties frekvencei, pieaug līdz  $10^5\text{ cm}^{-1}$ . Fotoefekta sliekšnis

$$h\nu_0 = \Delta E + \chi,$$

kur  $\chi$  tieksmes enerģija, t.i., potenciālās barjeras augstums vadāmības elektroniem. Maz leģētos pusvadītājos vadāmības elektronu nav daudz, tāpēc šeit atšķirībā no metāliem fotoelektronu enerģijas izkliede sadursmēs ar vadāmības elektroniem nav liela. Šajos materiālos fotoelektroni savu enerģiju zaudē mijiedarbībā ar valentās zonas elektroniem (trieciena jonizācija) vai kristāliskā režģa siltumkustībā (fononu rašanās).

1. tabula

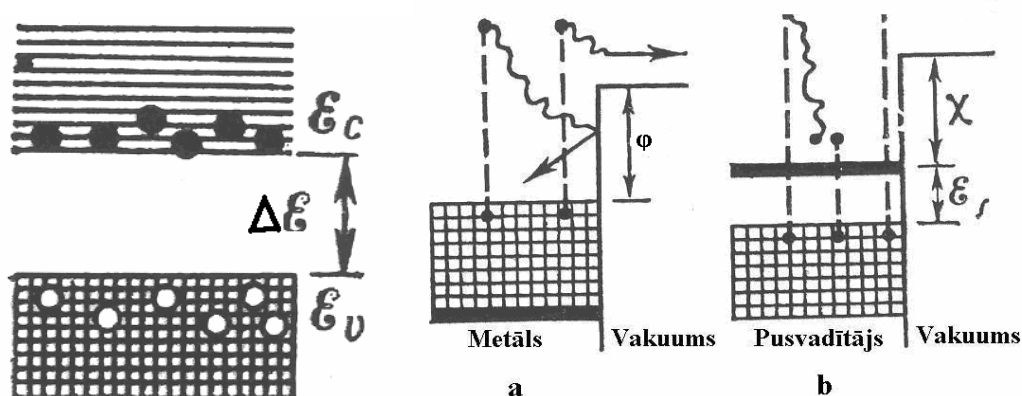
Materiāls	$\Delta E$ , eV	Materiāls	$\Delta E$ , eV
PbSe	0,165	GaAs	1,51
InSb	0,22	GaP	2,35
Te	0,33	CdS	2,58
Ge	0,745	Dimants	5,6
Si	1,17	Pelēkā alva	0

Enerģijas izkliedes ātrums un dziļums, no kāda fotoelektrons var nokļūt vakuumā, atkarīgs no  $\chi$  un no  $\Delta E$  un  $\chi$  attiecības. Ja  $\chi > 2\Delta E$ , tad fotoelektrons, kura sākuma kinētiskā enerģija  $> \chi$  rada elektrona cauruma pāri. Šādā aktā enerģijas izkliedei nepieciešamais ceļš ( $1 - 2\text{ nm}$ ) daudzreiz mazāks par starojuma iespiešanās dziļumu materiālā ( $0,1 - 1\text{ }\mu\text{m}$ ). Tādēļ vairums fotoelektronu ceļā uz virsmu zaudē enerģiju un ārējais fotoefekts nenotiek. Tāda situācija veidojās Si ( $\Delta E = 1,1\text{ eV}$ ;  $\chi = 4,05\text{ eV}$ ), Ge ( $\Delta E = 0,7\text{ eV}$ ;  $\chi = 4,2\text{ eV}$ ), GaAs ( $\Delta E = 1,4\text{ eV}$ ;  $\chi = 4,07\text{ eV}$ ) u.c. pusvadītājos. Šajos materiālos fotoefekta robežas tuvumā kvantu

iznākums ir  $\eta = 10^{-6}$  elektroni uz vienu fotonu. Pat ievērojamā attālumā no fotoefekta sliekšņa, kur  $h\nu = h\nu_0 + 1 \text{ eV}$ ,  $\eta$  nepārsniedz  $10^{-4}$  elektronu uz vienu fotonu.

Ja  $\chi < \Delta E$ , bet lielāks par fotona enerģiju, tad fotoelektroni zaudē enerģiju, radot fononus. Šajā gadījumā elektroni zaudē enerģiju 10 – 30 nm garā kustības ceļā. Tāpēc, ja pusvadītājā samazina  $\chi$ , piemēram, no 4 līdz 0,1 eV, robežas tuvumā saglabājas neliels fotoefekts.

Sārnu metālu – halogenīdu kristālos pārvietošanās lielāka par 50 – 100 nm  $\phi$  nav liels, tāpēc šiem kristāliem sākot no fotoefekta sliekšņa tas strauji pieaug un sasniedz lielas vērtības. Tā CsJ  $\Delta E = 6,4 \text{ eV}$ ,  $\chi = 0,1 \text{ eV}$  un jau pie kvanta enerģijas 7 eV (tikai 0,6 eV no robežas)  $\eta = 0,1$  elektrons uz fotonu.



2.att. Elektroni pusvadītājā izvietojās vadāmības zonas apakšējā slānī, caurumi – valences zonas augšējā slānī.

3. att. Fotoelektronu emisijas shēma no metāla (3.a att.) un no pusvadītāja (3.b att.)

## 2. 4. Sekundārā elektronu emisija un izejas darbs

Sekundārā elektronu emisija ir elektronu emisija, ko izraisa primāro elektronu triecieni. Laika intervāls starp primārā elektrona mijiedarbību ar mērķi un sekundārā elektrona emisiju nepārsniedz  $10^{-14}$ - $10^{-12}$ s. Sekundāro elektronu enerģētiskais spektrs ir ar nepārtrauktu raksturu, sākot no nulles līdz primāro elektronu enerģijas vērtībai.

Sekundāro elektronu plūsma veidojas no elastīgi, kvazielastīgi (enerģija daļēji zudusi kristāliskā režģa svārstību ierosināšanā), neelastīgi atstarotiem elektroniem ( $E_p > 50 \text{ eV}$ ) un patiesi sekundāriem elektroniem ( $E_p \leq 50 \text{ eV}$ ). Pēdējie ir vielas elektroni, kuri ieguvuši pietiekami lielu enerģiju izejas darba pārvarēšanai no primārajiem un neelastīgi atstarotajiem primārajiem elektroniem. Metāliem patiesi sekundāro elektronu visvarbūtīgākā enerģija  $E_m \sim 2\text{-}4,5 \text{ eV}$ , ar maksimuma pusplatumu  $\Delta E_m \sim 12\text{-}15 \text{ eV}$ .

Izejas darbu raksturo elektrona saites enerģija ar cietā ķermeņa (metāla dielektriķa, pusvadītāja) atomiem, tas ir analogs atomu un molekulu jonizācijas enerģijai. Izejas darba lielumā ieguldījumu dod arī katra ķermeņa virsmas rajonā esošais elektriskais dubultslānis, kas saistīts ar pozitīvā un negatīvā lādiņa telpisko sadalījumu. Dubultslāņa biezums pusvadītājos ir ar starpatomu attāluma kārtu.

Izejas darbu var stipri izmainīt dažādu atomu vai molekulu adsorbcija uz ķermeņa virsmas pat tādā gadījumā, ja ķermeņa tilpumā īpašības ir nemainīgas. Metāli, kuru jonizācijas enerģija ir neliela, piemēram, cēzijs, izejas darbu dažādiem pusvadītājiem var samazināt pat līdz 1 eV.

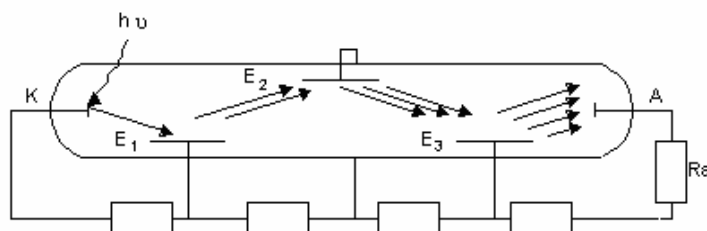


## Dažu materiālu izejas darba vērtības

Materiāls	Izejas darbs, eV	Materiāls	Izejas darbs, eV
L	2,38	Au	4,30
K	2,22	W	4,54
Fe	4,31	Ge	4,76
Cr	4,58	Si	4,8
Co	4,41	Ag <sub>2</sub> O(Cs)	0,75
Mn	3,83	Ta(Cs)	1,1
Cu	4,40	Ni(Cs)	1,3

### 2. 5. FEPa uzbūve un darbības princips

FEPs sastāv no stikla kolbas, kurā iekausēti fotokatods K, emiteri E un anods A (4.att.). FEPA tiek uzturēts augsts vakuums. Elektroni, kurus gaismas iedarbības rezultātā emitē fotokatods (primārie elektroni), pateicoties pieliktajam spriegumam paātrinās emitēra E<sub>1</sub> virzienā. Primārie elektroni izsauc sekundāro elektronu emisiju no emitēra E<sub>1</sub> virsmas. Pēdējie tiek paātrināti emitēra E<sub>2</sub> virzienā, kurš atrodas pie vēl augstāka pozitīva potenciāla, salīdzinot ar iepriekšējo emitēru, un no jauna izsauc elektronu emisiju.



4. att.

Šis process atkārtojas uz visiem nākošajiem emitēriem. Elektronu strāva no pēdējā emitēra nonāk uz anoda A un noplūst caur anoda pretestību R<sub>a</sub> (4.att.). Signālu, kurš veidojas uz anoda pretestības, vajadzības gadījumā var pastiprināt ar elektroniska pastiprinātāja palīdzību.

Lai iegūtu palielinātu potenciālu uz katru nākamo emitēru, izmanto sprieguma dalītāju - ķēdīti no virknē saslēgtām pretestībām.

FEPam ir virkne priekšrocību, salīdzinot ar fotoelementu un elektronisku pastiprinātāju:

- a) iekārtas mazie izmēri,
- b) maza jutība pret ārējiem traucējumiem,
- c) liels pastiprināšanas koeficients.

### FEPa pastiprināšanas koeficients

Kā jau minēts, FEPA vāju fotostrāvu pastiprināšanai izmanto sekundāro elektronu emisiju. Sekundārās elektronu emisijas koeficients ir

$$\sigma = \frac{\hat{i}}{i_0}, \quad /2/$$

kur:  $i_0$  – primārā elektronu plūsma,

$\hat{i}$  – sekundārā elektronu plūsma, kura ir atkarīga no elektronu sākotnējās enerģijas un emitēra virsmas materiāla.

Plaši izmanto emitērus, uz kuru virsmas izveidotas magnija un berīlija oksīdu plēvītes vai arī citu pusvadītāju plēvītes ar augstu sekundārās elektronu emisijas koeficientu. Ja sākotnējā

elektronu plūsma ir  $i_0$  un sekundārās emisijas koeficients  $\sigma$  ir vienāds visiem emiteriem pie kāda brīvi izvēlēta darba sprieguma, tad, izmantojot  $n$  emiterus, iegūst elektronu plūsmu izejā

$$i = i_0 \sigma^n. \quad /3/$$

$\sigma$  sasniedz dažas vienības, bet emiteru skaits parasti nepārsniedz skaitli 13.

FEPa pastiprināšanas koeficients

$$M = \frac{i}{i_0} = \sigma^n \quad /4/$$

var sasniegt vairākus miljonus. Piemēram, ja sekundārās emisijas koeficients  $\sigma = 3$ , tad  $M = 3^{13} \approx 1,06 \cdot 10^6$ .

### FEPa spektrālā un integrālā jutība

Spektrālo jutību raksturo ar fotostrāvas attiecību pret monohromatiskā izstarojuma jaudu, kas izraisa minēto fotostrāvu. Integrālo jutību raksturo ar pilnās fotostrāvas attiecību pret spektrāli nesadalītas krītošās gaismas jaudu. Kā spektrālā, tā arī integrālā FEPa jutība ir atkarīga no fotokatoda īpašībām. Fotokatodi parasti ir pusvadītāju plēvītes, kuru sastāvu un struktūru formē vakuumā. Plaši izmanto skābekļa-cēzija, antimona-cēzija, bismuta-cēzija un citu pusvadītāju fotokatodus (2. tab.). Tiem, atšķirībā no tīru metālu fotokatodiem, ir liela jutība redzamajā, ultravioletajā un infrasarkanajā spektra daļā.

Fotokatodu spektrālā jutība ir ar selektīvu raksturu. Tā nav ierobežota īso viļņu pusē. Taču reālā iekārtā šo līkni ierobežo stikla kolbas (vai lodziņa materiāla) optiskās caurlaidības īsviļņu robeža.

Fotokatodu spektrālās raksturlīknes garo viļņu robežu nosaka fotokatoda materiāla fotoefekta sliekšnis un tas atkarīgs no materiāla struktūras un virsmas stāvokļa. Praksē par fotoefekta sliekšni nosacīti pieņem to viļņu garumu, pie kura relatīvā spektrālā jutība ir 1% no maksimālās. 2. tabulā dotas dažu materiālu fotoefekta garo viļņu robežas.

Fotokatodu jutību var mērīt absolūtās vai relatīvās vienībās. Lai izmērītu fotokatoda absolūto jutību, nepieciešams zināt enerģijas daudzumu  $r(\lambda, T)$ , kurš nokļūst uz fotokatodu laika vienībā, un šīs enerģijas izraisīto fotostrāvu  $i$

$$\gamma(\lambda) = \frac{i}{r(\lambda, T)}. \quad /5/$$

Ja FEPa pastiprināšanas koeficients ir  $M$ , tad FEPa absolūtā jutība ir

$$\gamma_F(\lambda) = M\gamma(\lambda). \quad /6/$$

2. tabula

Materiāls	$\lambda_{\max}(\text{Å})$	$\lambda_0(\text{Å})$	$\phi_0(\text{V})$
Ag-O-Cs	8000-8500	12000-15000	0,82-1,05
Sb-Cs	4200-4800	6200-7000	1,7-2,0
Sb-Cs-O	4400-4900	7500	1,65
Bi-Cs	3800	7500	1,65
Bi-Ag-O-Cs	4500-5000	7500-7800	1,58-1,65
Sb-Li	3700	6200	2,0
Sb-NaN	3700	6700	1,84
(Na <sub>2</sub> K)Sb-Cs	4400	8700-9000	1,37-1,42
Platīns	-	2320	5,32
Sudrabs	-	2780	4,55
Niķelis	-	2680	4,61
Magnijs	-	3450	3,68
Barijs	-	4900	2,52
Natrijs	-	5250	2,35
Cēzijs	-	6400	1,93

Lai mēritu absolūto jutību, nepieciešams izmantot speciālus etalona gaismas avotus ar zināmu enerģijas spektrālo sadalījumu. Vienkāršāk ir izmērīt relatīvo jutību kā viļņu garumu funkciju jeb relatīvo spektrālo jutību. Tam nolūkam izmanto gaismas avotu ar zināmu enerģijas relatīvo sadalījumu spektrā. Par tādu gaismas avotu var kalpot, piemēram, volframa kvēlspuldze, kuras starojuma spektrālo sadalījumu apraksta Kirhofa formula:

$$R(\lambda, T) = e(\lambda, T)R^m(\lambda, T), \quad /7/$$

kur  $R^m(\lambda, T)$  - absolūti melna ķermeņa spektrālā spīdība uz viļņu garuma intervāla vienību,

$e(\lambda, T)$  - kvēldiega materiāla spektrālā izstarošanas spēja,

Absolūti melna ķermeņa spektrālo spīdību  $R^m(\lambda, T)$  apraksta Planka formula:

$$R^m(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}, \quad /8/$$

kur  $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-5} \text{ erg} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$ ,

$c_2 = 1,44 \text{ cm} \cdot \text{K}$ .

Volframa izstarošanas spēja  $e(\lambda, T)$  pie 2800 K dota 3. tabulā.

Volframa izstarošanas spēja pie 2800 K

3. tabula

$\lambda(\text{\AA})$	$e(\lambda, T)$	$\lambda(\text{\AA})$	$e(\lambda, T)$
3500	0,463	6000	0,434
4000	0,463	6500	0,428
4500	0,449	7000	0,423
5000	0,441	7500	0,405
5500	0,439		

Gaismas starojuma jaudu, kas nokļūst uz fotokatodu, var izteikt ar precizitāti līdz konstantam reizinātājam šādā veidā:

$$r(\lambda, T) \sim \Delta\lambda \cdot R(\lambda, T) = \Delta\lambda \cdot e(\lambda, T) \cdot R^m(\lambda, T), \quad /7a/$$

kur  $\Delta\lambda$  - uz fotokatodu nonākušā starojuma spektrālais intervāls.

Saskaņā ar izteiksmēm /5/ un /7a/ fotokatora spektrālo jutību var aprēķināt, izmantojot šādu formulu:

$$\gamma_{(\lambda)} \approx \frac{i}{\Delta\lambda e(\lambda, T) R^m(\lambda, T)} \quad /9/$$

Jutības spektrālo līkni maksimumā parasti normē uz vienu, un tā ir vienāda kā fotokatodam, tā arī FEPam.

### Fotokatoda novecošana un noguršana

Fotokatoda jutība nepaliek nemainīga FEPA kalpošanas laikā. Novērojama lēna jutības samazināšanās ar laiku. Noveco kā pusvadītāju, tā arī tīru metālu fotokatodi. To izskaidro ar fotojutīgā slāņa virsmas struktūras lēnu izmaiņu, kas saistīta ar vakuuma pasliktināšanos FEPA kolbā. Šo parādību sauc par fotokatoda novecošanu.

Fotokatoda jutības izmaiņu darba režīmā (pie apgaismota fotokatoda un uzlikta sprieguma) sauc par fotokatoda noguršanu. Tīru metālu fotokatodi nenogurst, Visstraujākā jutības izmaiņa notiek FEPA pirmajās darba stundās, vēlāk jutība nostabilizējas. Pēc apgaismojuma pārtraukšanas jutība atjaunojas.

Fotokatodu noguršanas mehānismi un cēloņi ir sarežģīti un nav vēl pilnīgi noskaidroti, taču var konstatēt dažas likumsakarības:

- 1) nogurums pieaug, palielinot fotokatoda apgaismojumu,
- 2) nogurums palielinās, palielinot anodspriegumu,

- 3) katoda dzesēšana palielina tā nogurumu
- 4) noguruma rezultātā fotokatoda jutība samazinās visā spektrālajā intervālā nevienmērīgi, fotoefekta sliekšnis pārvēršas uz īso viļņu pusi (palielinās fotokatoda materiāla izejas darbs).

### FEPa tumsas strāva

Pilnīgi aptumšota FEPa anoda ķēdē, ja tas atrodas zem sprieguma, plūst strāva, kuru sauc par tumsas strāvu. Tumsas strāva nosaka FEPa jutības sliekšni, tā traucē vāju gaismas plūsmu mērīšanu. Cēloņi, kas izraisa tumsas strāvu un nosaka tās lielumu, ir šādi:

- a) fotokatoda un emiteru termoelektronu emisija,
- b) noplūdes strāvas FEPa anoda ķēdē,
- c) jonu un optiskā atgriezeniskā saite,
- d) aukstā jeb autoelektronu emisija.

Pie nelieliem spriegumiem (50÷100 voltu uz kaskādes) galvenā tumsas strāvas komponente ir fotokatoda un pirmā emitera termoelektronu emisijas strāva, kuru pastiprina FEPs. Efektīvs tumsas strāvas samazināšanas paņēmieni ir FEPa dzesēšana.

Noplūdes strāvas FEPa anoda ķēdē samazina, izveidojot anoda izvadu cauri stikla kolbai atsevišķi no citu elektrodu izvadiem. Izolācijas pretestību tādā gadījumā nosaka stikla virsmas stāvoklis.

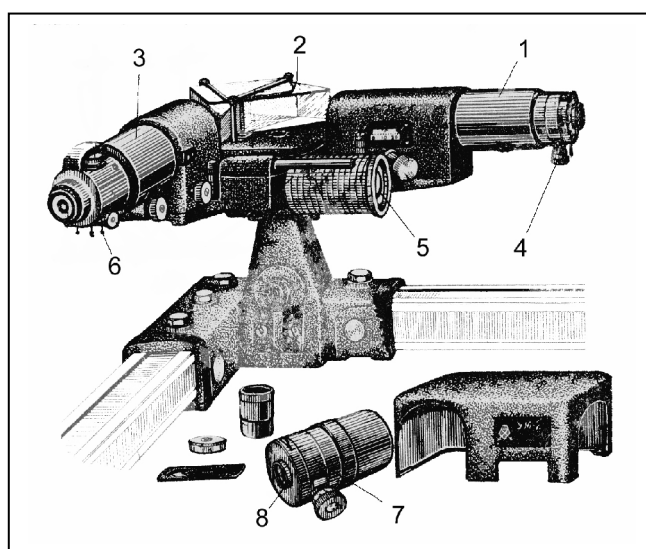
Jonu atgriezeniskās saites lomu nosaka gāzes un cēzija tvaiku daudzums kolbā. Elektronu un atomu sadursmēs veidojas joni, kuri pātrīnās katoda un pirmo emiteru virzienā. Triecien rezultātā pret katoda un emiteru virsmām parādās sekundāro elektronu emisija, kas izsauc tumsas strāvas palielināšanos.

Analoga aina noris optiskās atgriezeniskās saites gadījumā, kad elektroni FEPa anoda daļu tuvumā izsauc stikla balona vai emiteru luminiscenci, Daļa luminiscences gaismas sasniedz fotokatodu un izsauc fotoelektronu emisiju.

Pie lieliem elektriskiem laukiem var parādīties autoelektronu emisija. Lieli lauki var rasties uz emiteru asām malām. Tāpēc, izgatavojot FEPus, emiteru malas noapaļo.

## 3. Darba eksperimentālā daļa

### 3.1. Izmantotā aparatūra



5. att. Stikla monohromators YM – 2

1 – kolimators, 2 – Abe prizma, 3 – kamera, 4 – iejas spraugas platuma regulēšanas veltnis, 5 – prizmas pagriešanas mehānisma skala, 6 – okulāra uzmava, 7 – izejas spraugas uzmava, 8 – izejas sprauga.

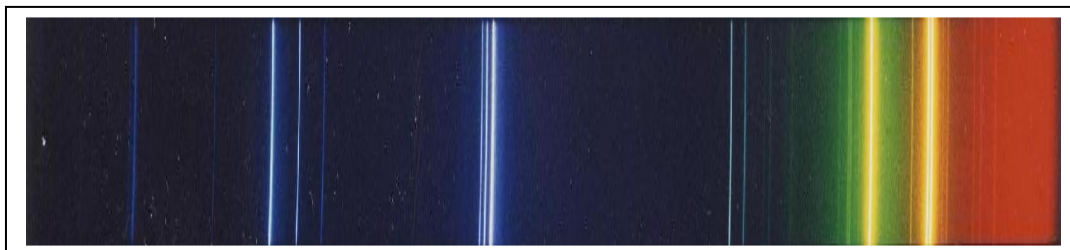


Darba vietas kopskats

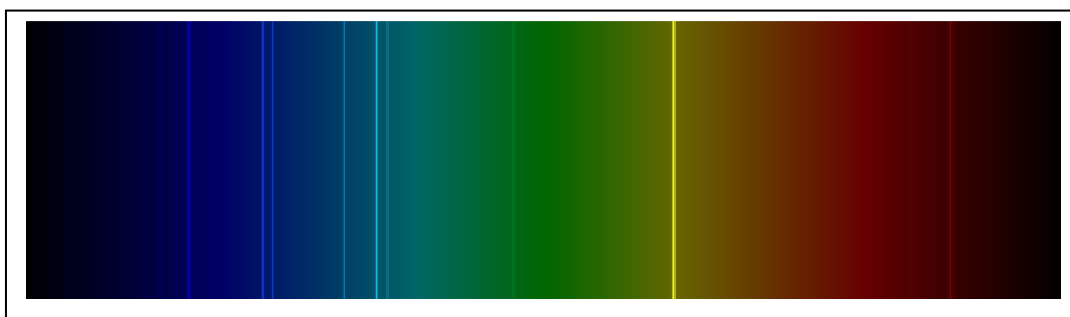
### 3. 2. Monohromatora graduēšana

Graduējot monohromatoru vizuāli, izejas spraugas vietā ievieto okulāra uzmavu. Mainot prizmas pagriezienu leņķi, spektrālo līniju iestāda pret okulāra uzmavas adatas smaili. Prizmas pagriezienu leņķis skaitliski parāda to prizmas stāvokli, kad pret izejas spraugu ir dotā spektrālā līnija. Graduēšanai var izmantot dzīvsudraba spektru (6. att., 4. tab.) vai neona spektru (9. att.). Attēlot grafiski viļņu garumu atkarību no prizmas pagriezienu leņķa!

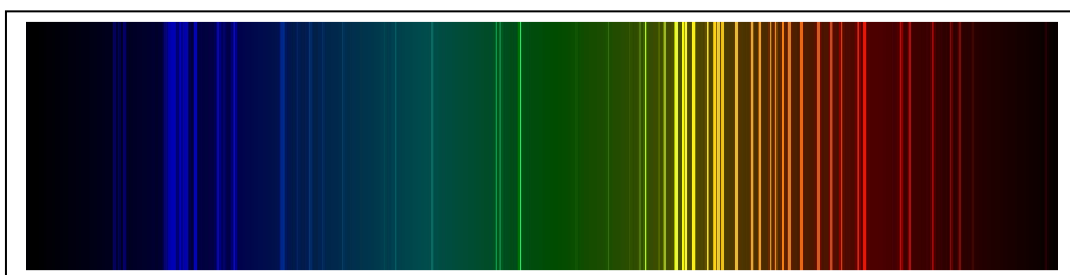
2. zīm.



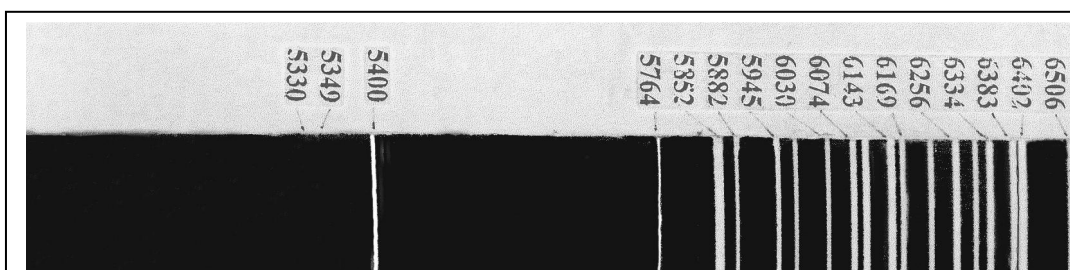
6. att. Dzīvsudraba spektrs



7. att. Hēlija spektrs



8. att. Neona spektrs



9. att. Neona spektrs

4. tabula

$\lambda(\text{\AA})$	Spožums (rel. vien.)	Krāsa
4046,5	60	violeta
4077,8	4	violeta
4108,1	0,5	violeta
4339,2	0,5	zila
4347,5	2	zila
4358,4	50	zila
4916,0	0,5	zili-zaļa
5460,7	100	zaļa
	25	dzeltena
5769,6		(dublets)

Dzīvsudraba spektra raksturīgākās līnijas

### 3.3. Fotokatoda izejas darba mērīšana

Izmanto Einšteina formulu:

$$h\nu = \varphi_0 + \frac{mv^2}{2},$$

kur  $h\nu$  - absorbētā kvantu enerģija,  
 $\varphi_0$  - izejas darbs,  
 $\frac{mv^2}{2}$  - fotoelektrona kinētiskā enerģija.

Gadījumā, kad  $h\nu < \varphi_0$ , fotoefekts nav iespējams. Katrai virsmai var atrast tādu gaismas frekvenci  $\nu_0$ , kur

$$\nu_0 = \frac{\varphi_0}{h}, \quad /10/$$

pie kuras vēl pastāv fotoelektronu emisija. Šo frekvenci jeb tai atbilstošo viļņa garumu

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} \quad /10a/$$

sauc par sarkano robežu jeb dotās virsmas fotoefekta sliekšni. Ja izejas darbu mērī elektronvoltos, bet viļņa garumu angstrēmos, tad

$$\varphi_0 = \frac{12360}{\lambda_0}. \quad /11/$$

$\lambda_0$  atrod ar nepārtraukta spektra gaismas avota (kvēlspuldzes) palīdzību. Ievērot tumsas strāvu!

### 3.4. Tumsas strāvas atkarības no sprieguma mērīšana

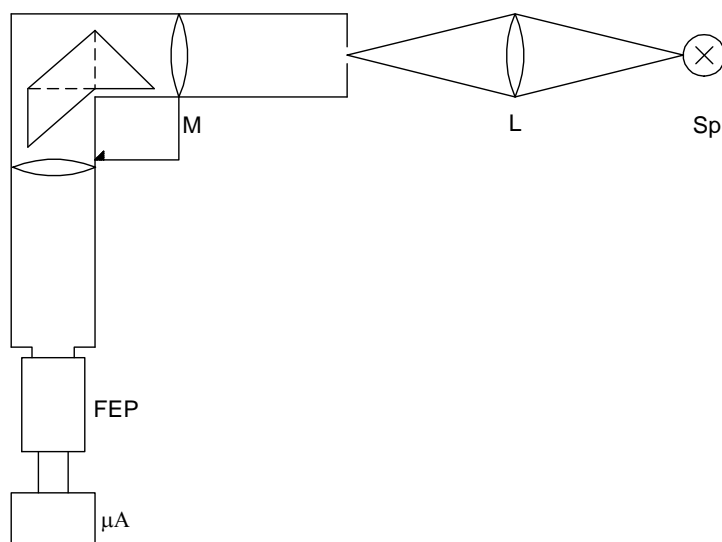
Labi aptumšotam FEPam uzliek spriegumu, pakāpeniski to palielinot. Sprieguma palielināšana uz aptumšoto FEPu izsauc tumsas strāvas pieaugumu. Attēlot šo sakarību grafiski!

### 3.5. Fotokatoda relatīvās spektrālās jutības mērīšana

a) Monohromatora izejas un ieejas spraugu platumi jāizvēlas tādi, lai FEPa jutības maksimumā mēraparāts netiktu pārslogots. Tajā nolūkā prizmu iestāda tā, lai uz izejas spraugu nokļūtu gaismas spektra zaļajā daļā. Ieejas un izejas spraugu platumus izvēlas  $0,02 \div 0,04$  mm (pārbaudīt nulles stāvokli). Abu spraugu platumus ieteicams izvēlēties vienādus.

Anodspriegumu izvēlas minimālu. To pakāpeniski palielina līdz tam laikam, kamēr parādās signāls. Mainot prizmas pagriezienu leņķi, atrod signāla maksimālo vērtību un tad, paaugstinot anodspriegumu, sasniedz vēlamo signāla vērtību. Anodstrāvas lielums nedrīkst pārsniegt maksimālo vērtību, kāda uzrādīta FEPa pasē.

b) Monohromatora ieejas spraugu apgaismo ar kvēlspuldzi (10. att.).



10. att.

- M - monohromators,  
Sp - kvēlspuldze,  
L - lēca,  
FEP - fotoelektronu pavairotājs,  
μA - mikroampērmetrs.

c) Iegūst fotostrāvas atkarību no krītošās gaismas viļņu garuma pie nemainīgiem iekārtas parametriem (spraugas platuma, anodsprieguma). Attēlot šo sakarību grafiski!

d) Ievērot, ka gaismas plūsmas viļņu garumu intervālu, kurš nokļūst uz fotokatodu, nosaka izejas spraugas spektrālais platums  $\Delta\lambda$ . Izejas spraugas spektrālais platums raksturo to viļņu garumu intervālu, ko izejas sprauga ar platumu  $a_2$  izdala no nepārtrauktā spektra, kurš novietojas izejas spraugas plaknē. Lai to aprēķinātu, nepieciešams zināt monohromatora

lineāro dispersiju  $\frac{d\ell}{d\lambda}$ . Pieņemsim, ka  $d\ell = a_2$ , kur  $a_2$  - izejas spraugas lineārais platums un

$d\lambda = \Delta\lambda$ , kur  $\Delta\lambda$  - izejas spraugas spektrālais platums, resp., viļņu garumu intervāls, kurš nokļūst uz fotokatodu. Tad ar pietiekami labu tuvinājumu varam rakstīt:

$$\frac{d\ell}{d\lambda} = \frac{a_2}{\Delta\lambda}$$

un



$$\Delta\lambda = a_2 \frac{d\lambda}{d\ell}.$$

/12/

e) Saskaņā ar izteiksmēm /9/ un /12/ var rakstīt, ka

$$\gamma_{(\lambda)} \approx \frac{i}{a_2 \cdot \frac{d\lambda}{d\ell} \cdot e(\lambda, T) R^m(\lambda, T)}.$$

Šo izteiksmi var nedaudz vienkāršot, ievērojot, pirmkārt, ka izejas spraugas platums netiek mainīts eksperimenta laikā, otrkārt, volframa izstarošanas spēja  $e(\lambda, T)$  redzamajā spektra daļā maz mainās no viļņu garuma (3. tab.). Pie tam, kvēldiegam ir spirāles forma un tādas spirāles starojuma spektrālais sadalījums tuvojās absolūti melna ķermeņa starojuma spektrālajam sadalījumam. Ievērojot sacīto, var rakstīt

$$\gamma_{(\lambda)} = c \cdot \frac{i}{\frac{d\lambda}{d\ell} \cdot R^m(\lambda, T)}.$$

/12a/

Konstanti  $c$  izvēlas tā, lai līkne maksimumā būtu normēta uz vienu. Monohromatora YM-2 apgrieztā lineārā dispersija ir dota tabulā 5. Absolūti melna ķermeņa starojuma spektrālā spīdība pie 2800 K un viļņu garuma intervāla vienību dota tabulā 5. Kvēlspuldzes kvēldiega temperatūru nominālā režīmā tuvināti var pieņemt 2800 K.

5. tabula

$\lambda$ (Å)	$\frac{d\lambda}{d\ell}$ (Å/mm)	$\lambda$ (Å)	$\frac{d\lambda}{d\ell}$ (Å/mm)
7865	335	4358	47
5461	115	4046	33
4861	80		

Monohromatora YM-2 apgrieztā dispersija

6. tabula

$\lambda$ (Å)	$R^m(\lambda, T) \left( \frac{W}{cm^2 \mu m} \right)$	$\lambda$ (Å)	$R^m(\lambda, T) \left( \frac{W}{cm^2 \mu m} \right)$
3800	6,8	5600	70,5
4000	10,5	5800	81,6
4200	15,1	6000	93,0
4400	21,0	6200	104
4600	27,9	6400	116
4800	33,9	6600	127
5000	40,2	6800	138
5200	49,6	7000	148
5400	59,8	7200	158

Absolūti melna ķermeņa spektrālais sadalījums pie 2800 K temperatūras

f) Izmantojot monohromatora graduēšanas raksturlīkni, konstruēt FEPA spektrālās jutības līkni.

#### UZMANĪBU!

- 1) *Eksperimentu uzsākt ar minimālo spriegumu.*
- 1) *Ievērot drošības noteikumus, strādājot ar augstspriegumu.*
- 2) *Lielas gaismas plūsmas, kas nonāk uz FEPA fotokatodu, to sabojā. Neatvērt FEPU, kurš atrodas zem sprieguma! Vispirms atslēgt spriegumu!*

### 3. 6. Monohromatora graduēšanas protokola paraugs

Gaismas avots	Spektrālīnijas viļņa garums, Å	Monohromatora skalas stāvoklis, iedaļas
Dzīvsudraba lampa	$\lambda_1$	$m_1$
.....	$\lambda_2$	$m_2$
.....	$\lambda_3$	$m_3$
Neona lampa	$\lambda_n$	
.....	$\lambda_{n+1}$	$m_{n+1}$
.....	$\lambda_{n+2}$	$m_{n+2}$
.....	$\lambda_{n+3}$	$m_{n+3}$

## 4. Darba uzdevumi

**1. Darba uzdevums:** Monohromatora YM-2 skalas graduēšana. Graduēšanai izmantot neona un dzīvsudraba lampas spektrus (skat. 2.1.). Attēlot grafiski viļņa garuma atkarību no prizmas pagrieziņa leņķi.

**2. Darba uzdevums:** Fotoelektrona pavairotāja fotokatoda materiāla izejas darba noteikšana (skat. 2.2.). Noteikt fotokatoda materiāla izejas darbu eV un sarkanās robežas viļņa garumu Å.

**3. Darba uzdevums:** Tumsas strāvas atkarības no FEPa sprieguma mērīšana. (skat. 2.3.). Attēlot šo sakarību grafiski.

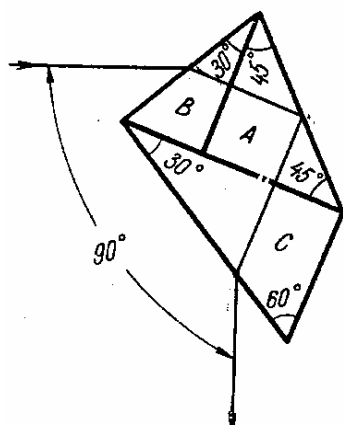
**4. Darba uzdevums: Fotokatoda relatīvās spektrālās jutības mērīšana:** Noteikt FEPa fotokatoda relatīvo spektrālo jutību redzamajā spektra daļā. Uzskatīt, ka graduēšanā izmantotās kvēllampas spektrālais sadalījums atbilst melna ķermeņa spektrālajam sadalījumam (skat. 2.4.). Konstruēt spektrālās jutības līkni.

## 5. Kontroljautājumi

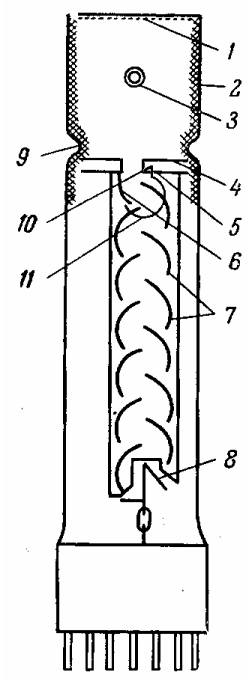
- FEPa pastiprināšanas koeficients
  - Atkarīgs no emiteru skaita un uzliktā sprieguma,
  - nav atkarīgs no uzliktā sprieguma,
  - nav atkarīgs no sekundārās emisijas koeficienta,
- Fotoelektronu pavairotāja (FEP) spektrālā jutība
  - ir ar selektīvu raksturu,
  - nav atkarīga no apvalka materiāla,
  - nav atkarīga no katoda materiāla.
- FEPa tumsas strāva
  - nav atkarīga no katoda materiāla,
  - atkarīga no uzliktā sprieguma,
  - nemainās laikā.

4. Oksīdu katodu spektrālās jutības sarkanā robeža
  - a) sakrīt ar tīru metālu jutības sarkano robežu,
  - b) pārbīdīta uz īso viļņu pusi,
  - c) pārbīdīta uz garo viļņu pusi.
5. Cēzija oksīda fotoefekta garo viļņu robeža ir ap
  - a) 1 – 2 eV,
  - b) 2 – 3 eV,
  - c) 3 – 4 eV.
6. FEP jutības samazināšanās redzamā spektra īsviļņu daļā saistīta ar
  - a) katoda jutības samazināšanos,
  - b) ar absorbciju spektrālaparātā,
  - c) ar absorbciju FEP korpusā.
7. Fotokatodu izgatavošanai parasti izmanto
  - a) metālus,
  - b) pusvadītājus,
  - c) dielektriķus.
8. Valences zona ir
  - a) augšējā aizpildītā,
  - b) zemākā neaizpildītā,
  - c) Augstākā neaizpildītā.
9. 500 nm starojuma kvanta enerģija ir
  - a) 4 eV,
  - b) 2,5 eV,
  - c) 1,5 eV.

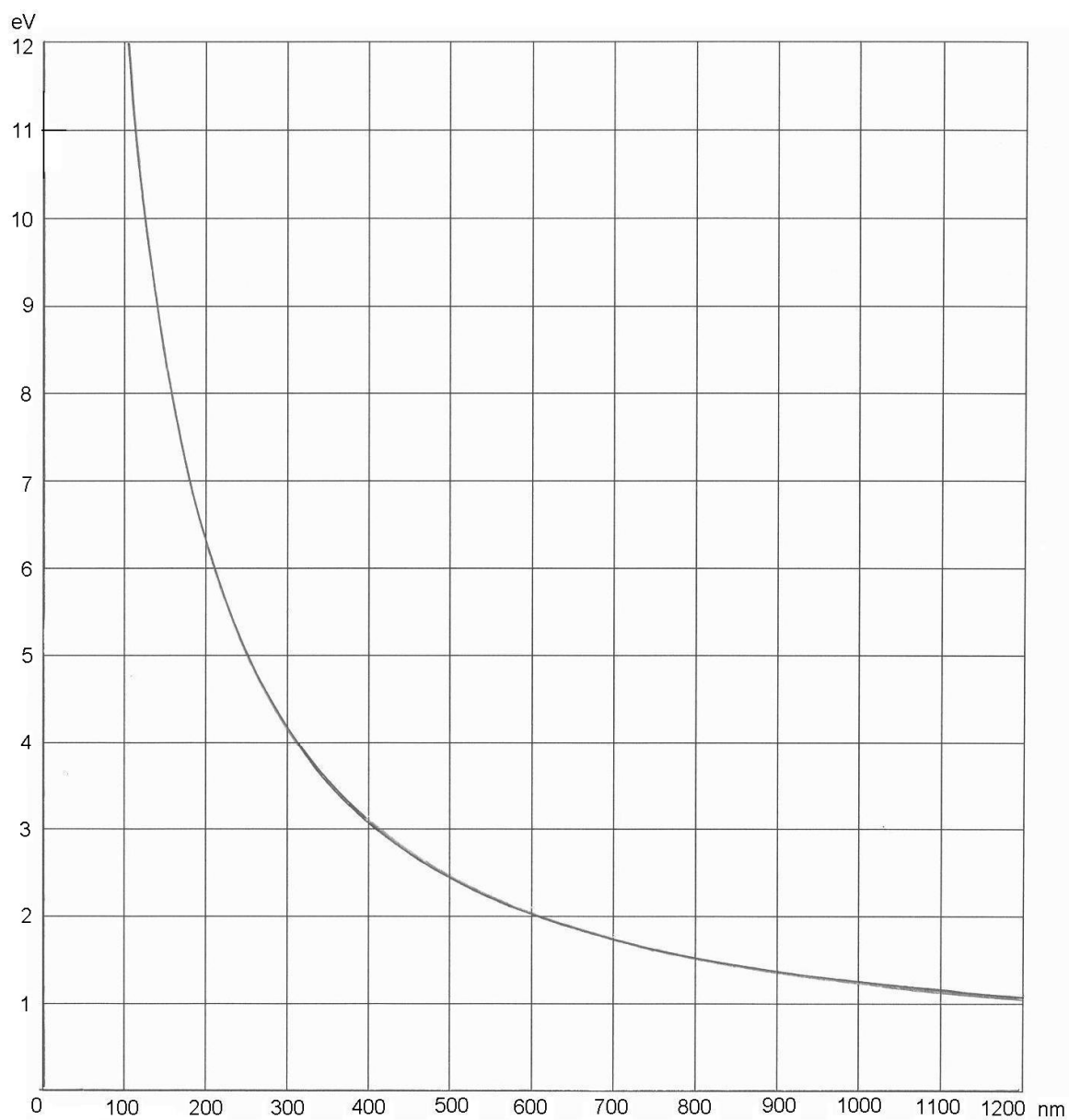
## 6. Pielikums



Abe prizma



Fotoelektronu pavairotājs



Sakarība starp kvanta enerģiju eV un starojuma viļņa garumu nm

## 7. Literatūra

- [1] Соболева Н. А. и др. Фотоэлектронные приборы, М., 1965. 592 с.
- [2] Чечик Н.О. и. Др. Электронные умножители. М., 1957. 576 с.
- [3] Ā. Deme, V. Rēvalds, O. Šmits. Laboratorijas darbi optikā un spektroskopijā. LVU, Rīga., 1979.