

VILNIAUS UNIVERSITETAS

**INFORMACIJOS REGISTRAVIMO FIZIKINIŲ TECHNINIŲ PAGRINDŲ  
LABORATORINIAI DARBAI**

Laboratoriniai darbai skirti Vilniaus universiteto Fizikos fakulteto Fizikos bei  
Fizikinių technologijų vadybos specialybių studentams

Paruošė Vygintas Jankauskas

Vilnius, 2018

# Laboratorinis darbas Nr. 1

## 1. Krūvininkų dreifinio judrio tyrimas organiniame fotoreceptoriuje elektrofotografiniu lėkio trukmės metodu

### Darbo tikslas

Įsisavinti paviršinio potencialo greitaeigių kitimų matavimo būdą bei susipažinti su krūvio pernašos mechanizmais didelės varžos organiniuose sluoksniuose.

### Užduotys

1. Eksperimentiškai išmatuoti išsielektrinimo kinetiką organiniame fotoreceptoriuje eksponuojant jį trumpu ir stipriu šviesos impulsu.
2. Išmatuoti krūvininkų dreifinio judrio organiniame fotoreceptoriuje priklausą nuo elektrinio lauko stiprio mažo krūvio dreifo metodu.
3. Atlikti išsielektrinimo kinetikos skaičiavimą, naudojantis krūvininkų judrio matavimų duomenimis bei palyginti su eksperimentiškai išmatuotomis kinetikomis.

### Kontroliniai klausimai

1. Kokiais metodais gali būti matuojamas paviršinis potencialas. Tų būdų privalumai ir trūkumai?
2. Kaip pagal charakteringą lūžį dreifo kinetikose nustatyti dreifuojančių krūvininkų lėkio trukmės ir apskaičiuoti dreifinį judrį  $\mu$ ?
3. Kuo skiriasi mažo krūvio dreifas nuo erdvinio krūvio riboto režimo?
4. Kodėl krūvininkų dreifinis judris organiniuose puslaidininkiuose stipriai priklauso nuo elektrinio lauko stiprio?

## 1.1. Teorinė medžiaga

### 1.1.1. Krūvininkų pernaša ir dreifinis judris organiniuose fotopulsuolaidininkiuose

Organiniai puslaidininkiai perneša krūvį dėka sužadintų  $\pi$ -elektronų, delokalizuotų  $\pi$ -konjuguotos srities ribose. Tos sritys turi apimti visą arba nemažą dalį organinės molekulės. Organiniuose puslaidininkiuose krūvio pernaša vyksta paprastai šuoliuojant krūvininkams tarp delokalizuotų sričių. Dėl to atsiranda specifinių krūvininkų pernašos ypatybių. Gerai žinomas teorinis modelis yra išvystytas Bässlerio ir Borsenbergerio ir yra pagrįstas Monte-Carlo skaičiavimo metodika [1]. Pagal šitą modelį - krūvininkų pernaša vyksta 3 dimensijų lokalizuotų būsenų masyve, kuris yra charakterizuojamas energetine ir erdvine netvarka. Šiuo atveju judris  $\mu$  yra energetinės ir erdvinės netvarkos, o taip pat ir elektrinio lauko funkcija:

$$\mu = \mu_0 \exp \left[ - \left( \frac{2\sigma}{3kT} \right)^2 \right] \exp \left\{ C \left[ \left( \frac{\sigma}{kT} \right)^2 - \Sigma^2 \right] E^{1/2} \right\}, \quad (1.1.1)$$

čia  $\sigma$  - šuoliavimo vietų energijos plotis, pagal kurį galima įvertinti energetinę netvarką,  $\Sigma$  - parametras, kuris aprašo erdvinę netvarką,  $\mu_0$  - judrio faktorius,  $C$  - empirinė konstanta.

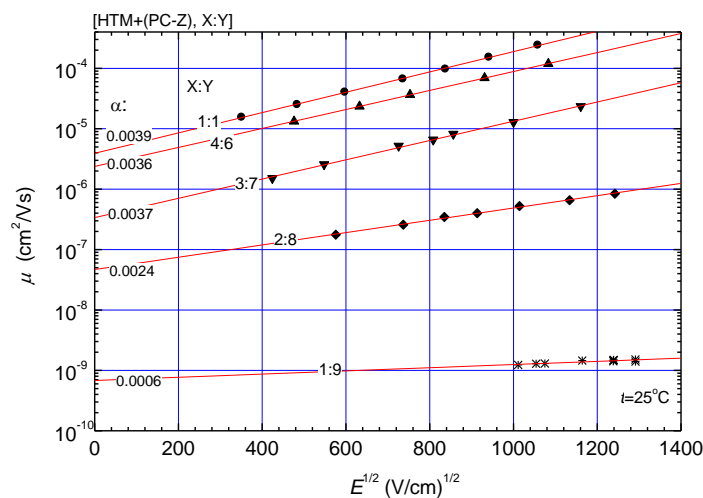
Dreifinio judrio priklausomybę nuo elektrinio lauko stiprio empiriškai galime išreikšti formule

$$\mu = \mu(0) \cdot \exp(\alpha\sqrt{E}), \quad (1.1.2)$$

čia  $\mu(0)$  - judrio vertė, kai elektrinio lauko stipris  $E = U/d \rightarrow 0$ ,  $U$  – įtampa, tarp bandinio priešingų paviršių,  $d$  – bandinio storis,  $\alpha$  - polinkio koeficientas. Pagal Pulo-Frenkelio teoriją apytikrę vertę galima apskaičiuoti pagal formulę  $\alpha = \frac{e}{kT} \sqrt{\frac{e}{4\pi\epsilon\epsilon_0}}$  [2], čia  $\epsilon$  - medžiagos santykinė

dielektrinė skvarba, kuri daugumai organinių fotopulsaidininkių yra 2,5-3,5 intervale. Ši teorija nepaaiškina medžiagos struktūros įtakos. Pilniau tai aiškina Bässlerio teorija, ir konkreti koeficiento  $\alpha$  vertė priklauso nuo energetinės ir erdvinės netvarkos krūvininkus pernešančioje medžiagoje.

Tipiškos dreifinio judrio priklausos nuo elektrinio lauko stiprio priklausą ištiesinančiose koordinatėse pavaizduotos 1.1.1 pav..

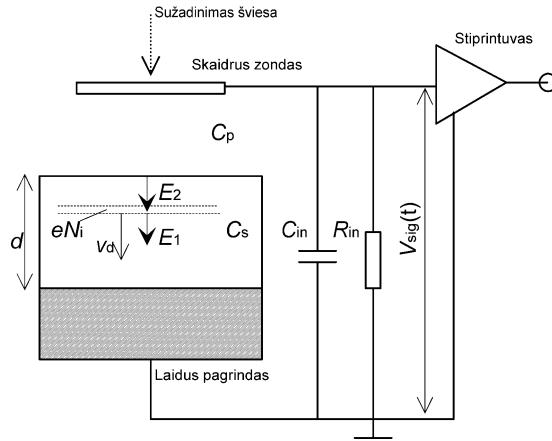


1.1.1 pav. Skylių dreifinio judrio priklausos nuo elektrinio lauko stiprio sluoksniuose su skirtingais skylių pernašos medžiagos (HTM) ir polimerinės rišamosios medžiagos (PC-Z) santykiais. Koeficiento  $\alpha$  vertė nurodyta  $(\text{cm}/\text{V})^{1/2}$  vienetais

### 1.1.2. Dreifinio judrio matavimo metodai organiniuose puslaidininkiuose

Organiniuose puslaidininkiuose krūvininkų judriai yra maži, todėl klasikiniai krūvininkų pernašos tyrimo metodai (Holo reiškiny, magnetovarža ir kt.) nėra tinkami. Todėl dažniausiai naudojamas tiesioginis lėkio trukmės metodas (time of flight – TOF). Metodas pagrįstas mažo krūvio paketo dreifo per tarpelektrodinį nuotolį trukmės matavimu [3]. Būtent, matuojama krūvininkų dreifo srovės kinetika, laisvus krūvininkus sužadinus arti vieno iš elektrodų. To elektrodo įtampos poliarumas rodo matuojamų krūvininkų ženklą. Srovės impulso trukmė  $t_t$  leidžia nustatyti atitinkamų krūvininkų judrį  $\mu$ .

Elektrofotografiniams fotoreceptoriams skirtose medžiagose siekiama dreifinį judrį nustatyti esant stipriems elektriniams laukams –  $(0.5 \div 1) \cdot 10^6$  V/cm. Todėl tokiems matavimams geriausiai tinka elektrofotografinis lėkio trukmės metodas (xerographic time of flight – XTOF), kuriame elektrinis laukas bandinyje sudaromas nusodinant vainikiniu išlydžiu sukurtus jonus. Izoliacinės tiriamo sluoksnio savybės leidžia išlaikyti sluoksnio paviršiuje išlydžiu nusodintą krūvį, nepaisant nedidelių sluoksnio įtrūkimų ar defektų. Elektrofotografinė tyrimo metodika pagrįsta daugelyje darbų [5, 6, 7]. Jai yra būdinga atviros grandinės konfigūracija (1.2.1 pav.).



1.2.1 pav. Dreifinio judio matavimo schema didelės varžos fotopulsaidininkio sluoksnyje naudojant elektrofotografinį mažo krūvio lėkio trukmės metodą

1.2.1 pav. parodyta supaprastinta elektrofotografinio lėkio trukmės metodo (XTOF) schema. Apatinis elektrodas, kuris tarnauja kaip sluoksnio pagrindas, yra įžemintas. Viršutiniu elektrodu tarnauja sluoksnio paviršius, kuris tamsoje įelektrinamas vainikinio išlydžio elektrintuvu. Trumpas stipriai sugeriamos šviesos impulsas generuoja ploną skylių (elektronų) arba skylių ir elektronų porų sluoksnį prie sluoksnio paviršiaus. Šviesos bangos ilgis parenkamas taip, kad šviesos sugerties gylys  $\delta(\lambda) \ll d$ ,  $d$  – sluoksnio storis. Kaip parodyta 1 pav. Skylės, veikiamos elektrinio lauko, juda per sluoksnį žemyn link laidaus pagrindo. Paprastai užtikrinama, kad injektuotų krūvininkų skaičius  $N_i$  būtų daug mažesnis už paviršinių krūvį, taip kad dreifuojantis krūvis nežymiai pakeistų elektrinio lauko stiprį, t.y.  $E_1 \cong E_2$  ir vidinio elektrinio lauko stipris suskaičiuojamas pagal formulę  $E_0 = U_0/d$ , čia  $U_0$  yra sluoksnio paviršiaus potencialas. Ši sąlyga žinoma kaip mažo krūvio dreifo (MKD) sąlyga. Injektuotų krūvininkų debesėlis elektriniame lauke  $E_0$  juda dreifiniu greičiu  $v_d = \mu E_0$ , čia  $\mu$  yra dreifinis judio. Žinodami lėkio trukmę  $t_t$ , kurią užtrunka krūvininkų paketas nueidamas nuo sužadavimo vietos iki laidaus pagrindo, galime surasti dreifinį judio

$$\mu = \frac{d^2}{U_0 t_t}, \quad (1.2.1)$$

Tipinės signalų formos, pagal kurias galima nustatyti  $t_t$ , parodytos 2 pav. Skirtingi atvejai parodo galimą skirtingą dreifuojančių krūvininkų sąveiką su pagavimo centrais. Matavimuose išlaikoma, kad elektrinė talpa tarp skaidraus zondo ir sluoksnio paviršiaus  $C_p$  (1.2.1 pav.) yra daug mažesnė, nei sluoksnio talpa  $C_s$ , nes tik tokiu atveju elektrodas žymiai nesumažins sluoksnio paviršinio potencialo bei elektrinio lauko stiprio sluoksnyje. Reikiamai parinkus registruojančios grandinės parametrus yra galimos dvi modos: diferencialinis režimas (current-mode) ir integralinis režimas (voltage-mode).

Yra parodyta [5, 13], kad kai zonu registruojamos potencialo pokyčio charakteringos trukmės bus ilgesnės nei sistemos laiko pastovioji  $R_{in}(C_p + C_{in})$  registruojamas signalas bus lygus

$$V_{sig}(t) = R_{in} C_p \cdot \frac{dU(t)}{dt}. \quad (1.2.2)$$

Tai bus diferencialinis režimas (current-mode).

Iš kitos pusės, jei varža  $R_{in}$  labai didelė ir krūvio nutekėjimas per ją nežymus, lyginant su stebimų procesų indukuoto krūvio zonde kitimu, tai gaunamas integralinis režimas (voltage-mode). Tada [5, 13]

$$V_{sig}(t) = -\frac{C_p}{C_p + C_{in}} \cdot \Delta U(t). \quad (1.2.3)$$

Nesant sąveikos su pagavimo centrais įelektrinto sluoksnio potencialo kitimą po sužadavimo galime išreikšti

$$U(t) = U_0 - \frac{e\mu N_i U_0 t}{\varepsilon \varepsilon_0 d}, \text{ kai } 0 < t < t_i. \quad (1.2.4)$$

Integralinio režimo atveju registruojamas signalas bus

$$V_{\text{sig}}(t) = \frac{C_p}{C_p + C_{in}} \cdot \frac{e\mu N_i U_0 t}{\varepsilon \varepsilon_0 d}, \text{ kai } 0 < t < t_i. \quad (1.2.5)$$

Diferencialinio režimo atveju registruojamas signalas bus

$$V_{\text{sig}}(t) = -R_{in} C_p \cdot \frac{e\mu N_i U_0}{\varepsilon \varepsilon_0 d}, \text{ kai } 0 < t < t_i, \quad (1.2.6)$$

ir lygus nuliui, kai  $t > t_i$ , kai parodyta 1.2.2(a) pav. Diferencialinis režimas yra priimtinesnis, nes rezultatų interpretacija yra paprastesnė. Iš kitos pusės integralinis režimas leidžia detektuoti labai lėtus krūvininkų judėjimus. Turime pastebėti, kad visada matuojant diferencialiniu režimu ypač trumpuose laikuose pradinėje stadijoje signalas registruojamas integraliniu režimu, kuris nuo laiko momento  $t > R_{in}(C_p + C_{in})$  pereina į diferencialinį režimą.

Apibendrinant galima susumuoti reikalingas sąlygas elektrofotografinio lėkio trukmės matavimo metodui:

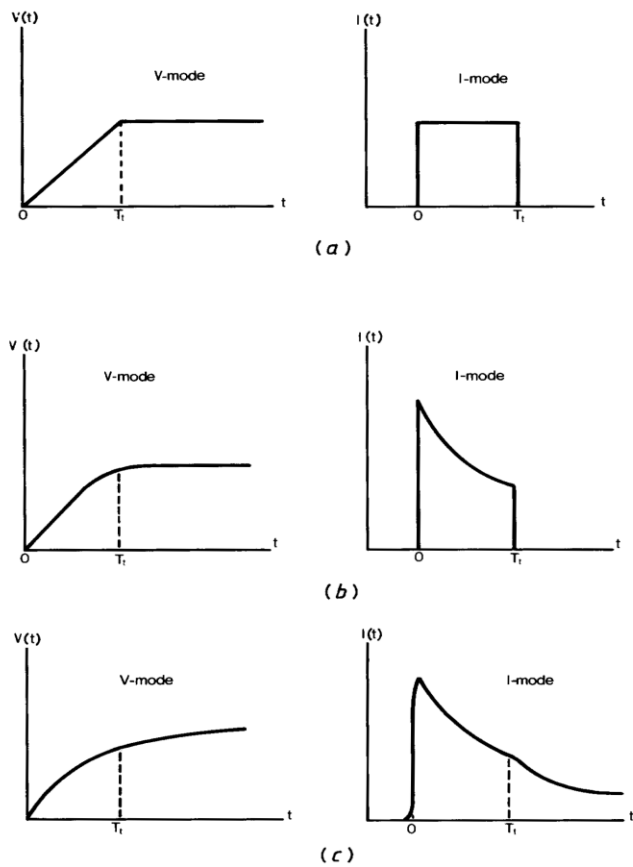
- 1) pageidautina, kad šviesos sugerties gylysis  $\delta \ll d$ ;
- 2) sužadavimo trukmė  $t_{\text{ex}} \ll t_i$ ,
- 3) dielektrinės relaksacijos trukmė  $\rho \varepsilon_0 \varepsilon \gg t_i$ ,
- 4) krūvininkų gyvavimo trukmė  $\tau \geq t_i$ ,
- 5) mažo krūvio dreifo sąlyga  $eN_i \ll C_s U_0$ , čia  $C_s$  sluoksnio talpa.

1.1.2 pav. schematiškai pateikti tipiniai signalai diferencialiniame ir integraliniame režimuose. Signalų pavidalas stipriai priklauso nuo krūvininkų paketo sąveikos su tiriamos medžiagos sluoksniu. Šios sąveikos klausimai nagrinėti daugelyje darbų [8]. Tipiškas realaus signalo pavidalas pateiktas 1.1.3 pav., kuriame pateiktas lėkio trukmės  $t_i$  atskaitymo būdas.

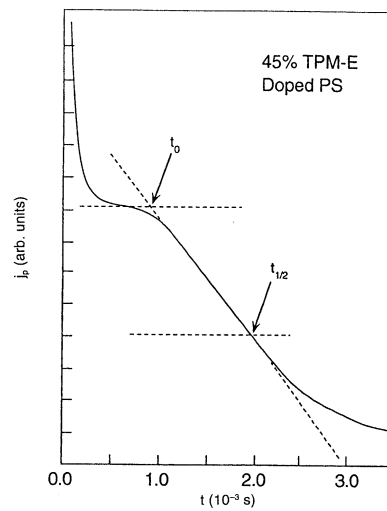
Daugeliu atvejų krūvininkų pernaša organinėse medžiagose yra dispersinė, lūžis MKD signalo kinetikoje būna neryškus. Tais atvejais lėkio trukmę galima nustatyti diferencialiniame režime gautą kinetiką atvaizdavus dvigubame lg-lg mastelyje (1.1.4 pav.). Tuo atveju srovė aproksimuojama [9]:

$$I(t) \propto \begin{cases} t^{-(1-\alpha_i)}, & \text{kai } t < t_i, \\ t^{-(1+\alpha_f)}, & \text{kai } t > t_i, \end{cases} \quad (1.2.7)$$

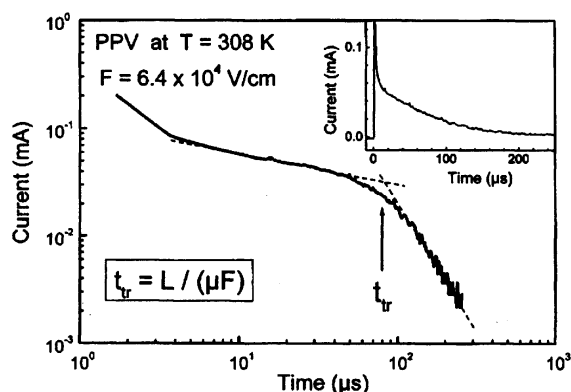
čia  $\alpha_i$ ,  $\alpha_f$  yra dispersiniai parametrai. Lėkio trukmė surandama kaip aproksimuojančių tiesių susikirtimo momentas. Parametrų vertė yra dispersijos matas. Kuo parametrai  $\alpha_i$ ,  $\alpha_f$  artimesni nuliui, tuo yra stipresnis krūvininkų pernašos dispersiškumas.



1.2.2 pav. MKD signalai diferencialiniame (current-mode) ir integraliniame (voltage-mode) režimuose įvairias krūvininkų pagavimo-išlaisvinimo atvejais. (a) – pagavimo nėra (idealizuotas atvejis); (b) – tik pagavimas; (c) – pagavimas ir išlaisvinimas [6]



1.2.3 pav. Tipinė fotosrovės kinetika organinėje skyles pernešančioje kompozicijoje [10]



1.2.4 pav. MKD srovės signalai dispersinės pernašos atveju dvigubame logaritminiame atvaizdavime [11]

### 1.1.3. Fotoreceptoriaus išsielektrinimas stipraus impulsinio eksponavimo atveju

Šiuolaikiniuose lazeriniuose spausdintuvuose ir kopijavimo aparatuose, darančiuose 10-20 kopijų per sekundę fotoreceptoriaus ekspozicija darosi tokia trumpa, kad ją galima laikyti impulsine. Organinių fotoreceptorių greitaeigiškumą gali riboti ne itin didelis krūvininkų judris organinėse medžiagose bei stipri jo priklausau nuo elektrinio lauko stiprio. Panagrinėkime, kaip išsielektrins fotoreceptorius, jei jį apšviesime galingu stipriai sugeriamos šviesos impulsu. Tarkime, kad šviesa injektuoja visus elektrinimo metu nusodintus ant paviršiaus krūvininkus, t.y. generuotas krūvis lygus paviršiniam krūviui. Suskirstysime injektuotą krūvininkų debesėlį į  $n$  sluoksnelių ir kiekvienam šių sluoksnelių galios tokia elektrinio lauko stiprio formulė:

$$E(i) = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon} (n - i + 1) \quad (1.3.1)$$

čia  $i$  – sluoksnelio numeris. Kadangi krūvininkų judris priklauso nuo elektrinio lauko stiprio, tai būtina atsižvelgti į judrio priklausą nuo elektrinio lauko stiprio (1.1.2 lygtis):

$$\mu(i) = \mu_0 e^{\alpha \sqrt{E(i)}}. \quad (1.3.2)$$

Sluoksnelių judėjimo greitis priklausys nuo sluoksnelio numerio  $i$ :

$$v(i) = E(i)\mu(i). \quad (1.3.3)$$

Fotoreceptoriaus paviršinis potencialas kris dėl šio judėjimo. Potencialo laiko išvestinę skaičiuojama pagal tokią išraišką:

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{\sigma}{n\epsilon_0 \epsilon} \sum_1^n v(i). \quad (1.3.4)$$

Kiekvienas iš sluoksnelių pasieks pagrindą per laiko trukmę  $t(i)$ , kurią galima apskaičiuoti

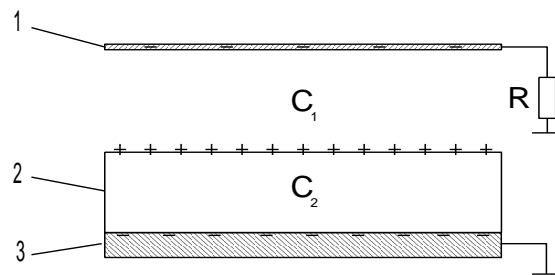
$$t(i) = \frac{d}{v(i)}. \quad (1.3.5)$$

Sluoksneliui pasiekus fotoreceptoriaus pagrindą, jį atitinkantis narys toliau neįskaičiuojamas (1.3.4) sumoje. Šiuos skaičiavimus galima atlikti skaitmeniškai. Darbe siūlome pasinaudoti paruošta skaičiuojančia programa „Issielektrinimas“ [12], kuriai reikia nurodyti krūvį pernešančio sluoksnio parametrus: storį, pradinį potencialą  $U_0$ , judrį nuliniame elektriname lauke  $\mu(0)$  ir priklausos nuo elektrinio lauko stiprio koeficientą  $\alpha$ .

### 1.1.4. Greitai kintančio paviršinio potencialo matavimas

Bandinio paviršinis potencialas matuojamas naudojant talpinius zondus. Matavimo principas pagrįstas talpiniame zonde indukuoto krūvio matavimu [13]. Talpinis zondas - tai bet kokia elektrai laidži plokštelė (1). Priartinus laidžią plokštelę prie įelektrinto sluoksnio (2)

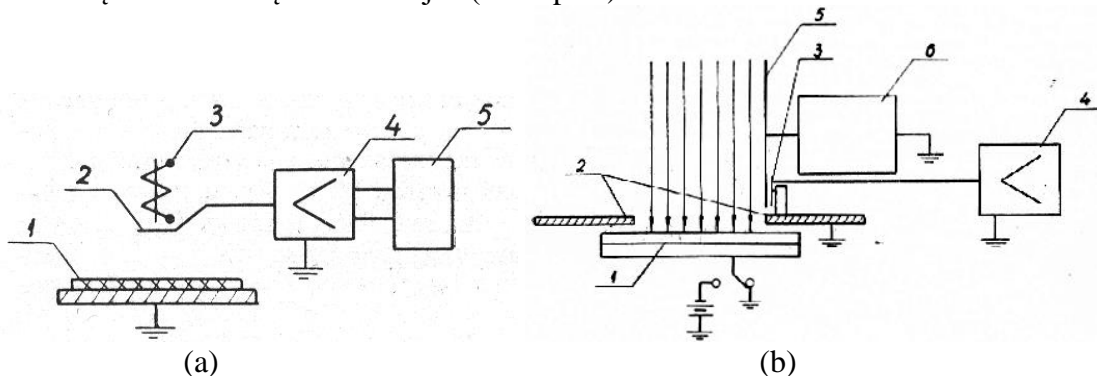
paviršiaus, joje indukuojasi krūvis, kurio dydį lemia sluoksnio paviršinis potencialas bei elektrinių talpų sluoksnio paviršius – zondas  $C_1$  ir sluoksnio paviršius - sluoksnio pagrindas  $C_2$  (3) santykis.



1.4.1 pav. Zondas (1) ir elektrofotografinis sluoksnis (2)

Matuoti krūvį tiesiogiai yra sudėtinga. Naudojami keli matavimo metodai.

Vienas iš būdų yra dinaminio elektrometro metodas. Šiame metode keičiamas talpos dydis tarp sluoksnio paviršiaus ir zondo  $C_1$ . Gaunamas kintamas signalas proporcingas šios talpos moduliacijos gyliui, talpų  $C_1/C_2$  santykiui bei paviršinio potencialo dydžiui. Kadangi su dinaminio elektrometru įvykdomas nuolatinio dydžio pakeitimas kintamu, tai tolesnis kintamo signalo stiprinimas leidžia pasiekti didelį sistemos jautrį, kartu eliminuojant nulio dreifą. Naudojamos kelios dinaminio elektrometro konstrukcijos (1.4.2 pav.).



1.4.2 pav. Dinaminio elektrometro schemas. a – su virpančiu zondų virš sluoksnio paviršiaus (1 – tiriamas sluoksnis, 2 – signalinis elektrodas, 3 – elektromagnetinė virpinimo sistema, 4 – stiprintuvas, 5 – registruojantis prietaisas). b – su besisukančiu disku su išpjovomis (1 – tiriamas sluoksnis, 2 – ekranas, 3 – signalinis elektrodas, 4 – selektyvus stiprintuvas, 5 – besisukantis diskas su išpjovomis, 6 – variklis)

Virpančiame zonde gaunamas signalas proporcingas slinkties srovei, pratekančiai grandinėje virpantis zondas – sluoksnio paviršius. Apkrovos varžoje gaunamas signalas gali būti išreikštas

$$V_s = R \cdot \frac{dQ}{dt} = RC_1 \frac{dU}{dt} + RU \frac{dC_1}{dt}, \quad (1.4.1)$$

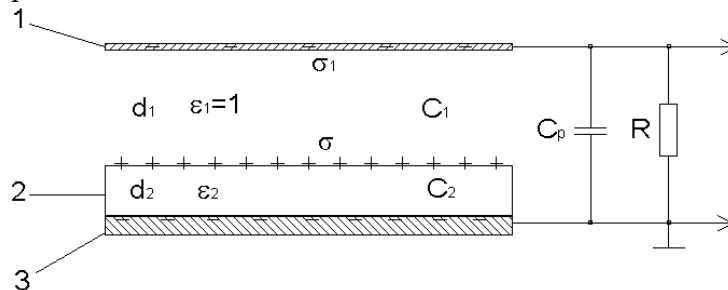
čia  $Q$  – indukuotas krūvis,  $U$  – sluoksnio paviršiaus potencialas,  $R$  – zondo apkrovos varža. Tik antrasis formulės narys yra proporcingas matuojamam potencialui  $U$  ir parodo tikrąją paviršinio potencialo kitimo eigą. Tuo tarpu pirmasis narys dinaminio elektrometro atveju įneša klaidingą signalą, kurio dydis tam tikrais atvejais gali viršyti antrojo nario dydį. Pirmojo nario įtaką galima sumažinti didinant talpos kitimo  $C_1(t) = C_1^0(1 + A \cdot \sin \omega t)$  amplitudę  $A$  arba dažnį  $\omega$ , nors tai ir sunkiai techniškai realizuojamas uždavinys. Tada, didėjant išvestinei  $dC_1/dt$ , didės antrojo nario dydis bei mažės paklaidos signalo dalis. Be to pirmojo signalo įtaką galima sumažinti naudojant dažninę filtraciją. Selektivių stiprintuvu stiprinant  $\omega$  dažnio signalą pirmojo nario įnašas gali būti daug kartų nuslopintas.

Norint stebėti potencialo kitimus, kurių charakteringa kitimo trukmė yra mažesnė nei kelios milisekundės, įprastiniai dinaminės sistemos elektrometrai tampa netinkami dėl išaugusio 1.4.1



formulės pirmojo nario, t.y.  $C_1 \cdot dU/dt > U \cdot dC_1/dt$ . Be to negalima stebėti trumpesnių potencialo kitimų nei talpos moduliacijos dažnis. Tokiais atvejais naudojamos potencialo matavimo sistemos su nejudančiu zondų.

Greitų procesų registravimo sistema su schematiškai pavaizduota 1.4.3 paveiksle. Zondas (1) patalpintas atstumu  $d_1$  nuo sluoksnio (2) paviršiaus. Sluoksnio storis -  $d_2$ , santykinė dielektrinė skvarba -  $\epsilon_2$ . Zondas per varžą  $R$  sujungtas su sluoksnio pagrindu (3). Zonde indukuojasi priešingo ženklo, nei sluoksnio paviršinis krūvis  $\sigma$ , krūvis, kurio tankis  $\sigma_1$ .



1.4.3 pav. Greitų procesų elektrofotografiniame sluoksnyje stebėjimo sistemos schema. 1 – šviesai skaidrus laidus zondas, 2 – tiriamasis sluoksnis, 3 – sluoksnio pagrindas,  $R$  – apkrovos varža,  $C_p$  – parazitinė talpa,  $C_1$  – talpa sluoksnio paviršius – zondas,  $C_2$  – talpa sluoksnio paviršius – sluoksnio pagrindas (sluoksnio talpa)

Pagal elektrostatikos dėsnius krūvio tankis zonde 1 proporcingas sluoksnio paviršiniam potencialui  $U$ :

$$\sigma_1 = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} \cdot U, \quad (1.4.2)$$

čia  $c_1, c_2$  – paviršiaus ploto vieneto talpos. Nagrinėsime atvejį, kai  $c_1 \ll c_2$ , nes tik tokiu atveju elektrodas žymiai nesumažins sluoksnio paviršinio potencialo bei elektrinio lauko stiprio sluoksnyje. Tokiu atveju  $S$  ploto zonde indukuotas krūvis bus lygus

$$q = S c_1 U.$$

Keičiantis sluoksnio paviršiniam potencialui dėl varžos  $R$  įtakos, lėtinančios krūvio nutekėjimą, zonde atsiras tam tikras nekompensuotas krūvis  $q_z$ , kurį galime išreikšti:

$$q_z(t) = q(t) - S c_1 U(t), \quad (1.4.3)$$

čia  $q(t)$  – tikrasis zondo ir parazitinės talpos  $C_p$  krūvis. Šis krūvio pokytis apkrovos varžoje  $R$  bei talpose  $C_1$  ir  $C_p$  lemia zondo potencialą  $V(t)$ , kurį galima išreikšti formule

$$V(t) = q_z(t) (S c_1 + C_p). \quad (1.4.4)$$

Diferencijuodami (1.4.3) gauname:

$$\frac{dq_z(t)}{dt} = \frac{dq(t)}{dt} - S c_1 \frac{dU(t)}{dt}, \quad (1.4.5)$$

Tikrojo elektrodo krūvio  $q(t)$  kitimas vyksta dėl krūvio nutekėjimo per varžą  $R$ , todėl

$$\frac{dq(t)}{dt} = \frac{V(t)}{R}. \quad (1.4.6)$$

Iš 1.4.5, atsižvelgdami į 1.4.6 ir 1.4.4, gauname

$$\frac{dV(t)}{dt} \cdot (S c_1 + C_p) = \frac{V(t)}{R} + S c_1 \cdot \frac{dU(t)}{dt}. \quad (1.4.7)$$

Ši lygtis aprašo zondo potencialo  $V$  kitimą dėl tiriamojo sluoksnio potencialo kitimo bei krūvio nutekėjimo per varžą  $R$ . Praktinę naudą turi du ribiniai atvejai.

Tegu

$$\frac{V(t)}{R} \ll Sc_1 \cdot \frac{dU(t)}{dt}, \quad (1.4.8)$$

t.y. varža  $R$  labai didelė, krūvio nutekėjimas per ją nežymus. Tada

$$\frac{dV(t)}{dt} = -\frac{Sc_1}{Sc_1 + C_p} \cdot \frac{dU(t)}{dt}, \quad (1.4.9)$$

t.y. zondo potencialas daugiklio bei adityvios konstantos tikslumu atkartoja sluoksnio paviršini potencialą. Iš 1.4.9 gauname formulę išreiškiančią matavimo sistemos perdavimo koeficientą

$$V(t) = -\frac{Sc_1}{Sc_1 + C_p} \cdot \Delta U(t), \quad (1.4.10)$$

čia  $\Delta U(t)$  - sluoksnio potencialo pokytis nuo stebėjimo pradžios. Nelygybėje P1-8 galime pakeisti  $V(t)$ , ir gauname

$$\frac{\Delta U(t)}{R(Sc_1 + C_p)} \ll \frac{dU(t)}{dt},$$

arba

$$\frac{\Delta U(t)}{dU(t)/dt} \ll R(Sc_1 + C_p) \quad (1.4.11)$$

t.y. šis matavimo režimas, kurį galima pavadinti integraliniu režimu, galios tokiems stebimiems procesams, kada sluoksnio potencialo kitimo charakteringa trukmė bus mažesnė nei sistemos laiko pastovioji  $R(Sc_1 + C_p)$ .

Kitas ribinis atvejis gaunamas, kai

$$\frac{dV(t)}{dt} \cdot (Sc_1 + C_p) \ll \frac{V(t)}{R},$$

arba

$$\frac{V(t)}{dV(t)/dt} \gg R(Sc_1 + C_p), \quad (1.4.12)$$

t.y. kai zondo potencialo pokyčio charakteringa trukmė bus ilgesnė nei sistemos laiko pastovioji  $R(Sc_1 + C_p)$ . Tada

$$V(t) = RSc_1 \cdot \frac{dU(t)}{dt}. \quad (1.4.13)$$

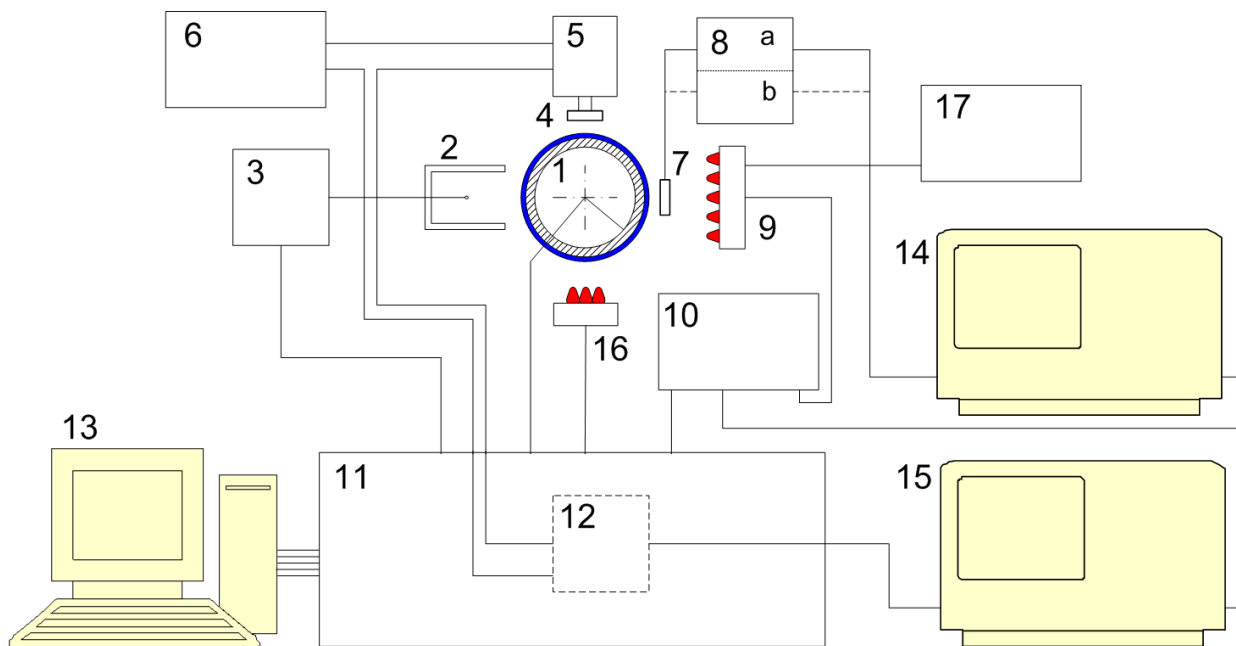
Šiuo atveju zondo potencialas proporcingas sluoksnio potencialo išvestinei. Sistemos jautris tuo didesnis, kuo didesnė varža  $R$  bei talpa  $Sc_1$ , bet iš kitos pusės jų vertės negali būti per didelės, kad būtų tenkinama 1.4.12 nelygybė.

## 1.2. Darbo priemonės ir matavimų eiga

### 1.2.1. Krūvininkų pernašos tyrimo elektrofotografiniame režime aparatūra

Aparatūros schema krūvininkų judrio matavimui ir greitaeigio išsielektravimo tyrimui organiniuose fotoreceptoriuose elektrofotografiniame režime pavaizduota 2.1.1 pav. Tiriamasis cilindrinis fotoreceptorius (1), įtvirtintas laikiklyje, yra sukamas apie jo išilginę ašį pavara su žingsniniu varikliu ir gali būti sustabdomas reikiamose pozicijose. Matavimų atlikimui įelektrinama fotoreceptoriaus sritis (apie 30% pagal perimetrą) korotronu (2) sukant fotoreceptorių nedideliu greičiu. Vainikinį išlydį sukelia aukštos įtampos šaltinis (3), gaminantis aukštą įtampą proporcingai jo valdymo įtampai. Toliau besisukant fotoreceptoriumi įelektrinta sritis prasisuka pro pradinio potencialo matavimo virpantį zondą (4), kuris prijungtas prie įtampos kartotuvo ir kurio signalas

perduodamas į sinchrodetektorių (12). Zondo virpėjimą užtikrina sinusinių virpesių generatorius, kurio signalas taip pat naudojamas ir sinchrodetektoriuje. Pradinio sluoksnio paviršiaus potencialo matavimas yra būtinas matuojant judrį mažo krūvio dreifo režime. Fotoreceptoriaus sukimas sustabdomas, atsidūrus įelektrintai sričiai po potencialo kinetikos matavimo zonu (7), kuris yra skaidrus eksponuojančiai šviesai. Atliekant matavimus sluoksnis sužadinas stipriai sugeriamos (sluoksnių su ftalocianino fotogeneracine medžiaga atveju – 650-800 nm diapazono) pakankamai trumpu šviesos impulsu, kurį generuoja šviesos diodų rinkinys (9). Šviesos impulso energija reguliuojama keičiant trukmę elektrinio impulso, kurį generuoja impulsų generatorius G5-54 (10). Esant impulso trukmei 1-3  $\mu$ s sudaromas mažo krūvio dreifo režimas. Kai trukmė 100-300  $\mu$ s pasiekiamas pilnas fotoreceptoriaus išsielektrinimas, atitinkantis jo veikimą elektrofotografiniame aparate. Kartu šis generatorius naudojamas oscilografų (14, 15) sinchronizacijai.

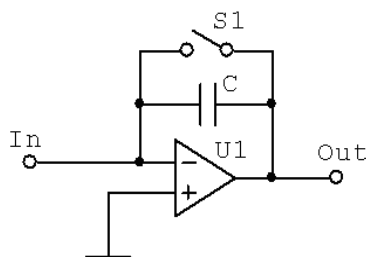


2.1.1 pav. Elektrofotografinių cilindrinų fotoreceptorių išsielektrinimo tyrimo, apšvietus trumpu šviesos impulsu, aparatūros schema. 1 – tiriamasis fotoreceptorius, 2 – elektrintuvas, 3 – aukštos įtampos keitiklis, 4 – pradinio potencialo matavimo zondas, 5 – kartotuvas, 6 – sinusinių virpesių generatorius, 7 – potencialo kinetikos matavimo zondas, 8 – integratorius (a) ir greitaeigis (b) stiprintuvas 9 – impulsinis šviesos šaltinis (šviesos diodų rinkinys), 10 – impulsų generatorius G5-54, 11 – valdymo blokas, 13 – valdantis kompiuteris, 14 – kinetikų registravimo oscilografas, 15 – pradinio potencialo matavimo oscilografas, 16 – išelektrinimo šviesos diodų rinkinys, 17 – pagalbinis maitinimo šaltinis.

Prie zondo (7) prijungiant arba labai didelės jėgimo varžos integratorių (8a), arba stiprintuvą su reguliuojama jėgimo varža (8b) sudaromi integralinis arba diferencialinis matavimo režimai.

Matavimams integraliniame režime, t.y. norint stebėti potencialo kinetiką  $U(t)$  prie kinetikos matavimo zondo reikia prijungti integratorių, kurio struktūrinė schema pateikta 2.1.2 pav. Kai jungiklis S1 sujungtas, integratorių neveikia ir išėjime yra nulinis signalas. Jungiklį S1 atjungus, operacinis stiprintuvas U1 pradeda integruoti į jėgimą  $I_n$  atitekančią elektros krūvį. Priklausomai nuo integravimo įjungimo momento matavimo stende galima stebėti arba tik potencialo pokyčio kinetiką (integravimas įjungiamas sustojus įelektrintai vietai po potencialo kinetikos matavimo zonu), arba visą išsielektrinimo kinetiką, įskaitant ir pradinio potencialo išmatavimą (tam integravimas turi būti įjungiamas įelektrintai vietai dar nepasiekus potencialo kinetikos matavimo zondo, t.y., kol zondas yra virš neįelektrintos fotoreceptoriaus srities, kurios paviršiaus potencialas lygus nuliui). Šiuos perjungimus atlieka kompiuterinis valdiklis (13, 11), kuris taip pat valdo ir

žingsninį variklį, sukiojančią fotoreceptorių (žiūr. toliau, valdymo programos JUDRIS.EXE ir INETRO.EXE).



2.1.2 pav. Integratoriaus schema

Matuojant fotoišsielektrinimo greičio kinetiką  $dU/dt(t)$  (t.y. diferencialiniame režime) kinetikos matavimo zondas apkraunamas apkrovos varža  $R$ , kurios dydis parenkamas galimai maksimalus ( $200\text{-}100\cdot 10^6 \Omega$  ribose), bet toks, kad aparatūros laiko pastovioji  $RC_I$  ( $C_I$  – zondo talpa), būtų žymiai trumpesnė už stebimos potencialo kinetikos trukmę arba lėkio trukmę  $t_t$ . Zondo signalas papildomai stiprinamas greitaėgiu stiprintuvu.

Kinertikos registravimui pasibaigus fotoreceptorių išelektrinamas išelektrinimo šviesos diodų rinkinio (16, 2.1.1 pav.) šviesa.

### 1.2.2. Matavimų eiga

Tiriamas fotoreceptorių įtvirtinamas specialiaje aparatūros laikiklyje. Tvirtinant būtina atkreipti dėmesį, kad tiriamojo cilindro laidus pagrindas patikimai susijungtų su kolektoriumi. Atliekant matavimus sluoksnį su laikikliu reikia uždengti tamsia dėže, tam kad apsaugotume nuo pašalinės šviesos. Be to daugelis fotoreceptorių nuo ryškios pašalinės šviesos degraduoja, todėl jų nereikia ilgai laikyti dienos šviesoje.

Išsielektrinimo kinetikos matavimo valdymą atlieka kompiuteryje (2.1.1 pav., 13) vykdoma valdymo programa. Įjungus kompiuterį, jame pasileidžia DOS operacinė sistema. Valdymo programa yra C:\1\_DARBASI\INERT0.EXE. Ji sudaryta su BorladPascal programavimo kalba. Paleidus programą atliekamas vienas matavimo ciklas. Programos funkcionavimą užtikrina valdymo blokas (11, 2.1.1 pav.), kuris pavaizduotas 2.2.1 paveiksle. Bloko priekiniame skydelyje išdėlioti jungikliai, kurie leidžia arba rankiniu būdu įjungti elektrinimą, apšvietimus, integravimą (viršutinė padėtis), arba perduoti įjungimų valdymą kompiuterio programai (apatinė padėtis). Be to perjungėjas „Elektrinimas“ turi tris padėtis – vidurinėje padėtyje bandinio elektrinimas visiškai išjungiamas.

Integratoriaus-stiprintuvo bloke (8a,b 2.1.1 pav.) zondo (7) kabelis BNC jungtimi prijungiamas prie integratoriaus įėjimo. Integratorių galima atpažinti iš greta esančios integruojančios talpos perjungimo rankenėlės. Integratoriaus išėjimas sujungiamas su skaitmeninio oscilografo įėjimu.

Toliau reikia atlikti zondų jautrio gradavimą. Elektrinimo intensyvumo potenciometras valdymo bloke (2.2.1 pav.) pasukamas į kairiąją kraštinę padėtį, trijų padėčių perjungėjas „Elektrinimas“ statomas į vidurinę padėtį, kad kol atliekamas gradavimas fotoreceptoriaus elektrinimas būtų išjungtas. Perjungėju „Gradavimas“ prijungus į fotoreceptoriaus pagrindą kontrolinę įtampą (apie +215 V) patikrinamas pradinio potencialo matavimo zondo (4, 2.1.1 pav.) veikimas bei išsielektrinimo kinetikos matavimo zondo (7, 2.1.1 pav.) signalas. Paleidus programą INERT0.EXE perjungėjas „Gradavimas“ junginėjamas aukštyn-žemyn  $\sim 2$  Hz dažniu. Oscilografais matuojami signalų, atsirandančių junginėjant kontrolinę įtampą ( $U_k=+215$  V), dydžiai  $V_{i\text{ kontr}}$  bei apskaičiuojami abiejų zondų perdavimo koeficientai  $K_i = U_k/V_{i\text{ kontr}}$ .



2.2.1 pav. Valdymo bloko priekinis skydelis

Atliekant pirmąją užduotį toliau naudojamas integrorius (8a, 2.1.1 pav.). Trijų padėčių perjungėjas „Elektrinimas“ perjungiamas į apatinę padėtį ( $\equiv$ valdymas kompiuteriu), o elektrinio intensyvumo potenciometras pasukamas tiek, kad kontrolinis voltmetras dešinėje bloko pusėje rodytų 5 V – 9 V. Matavimas paleidžiamas programa INERT0.EXE. Pasirenkamas didelis ekspozicijos intensyvumas, kad praktiškai visas paviršinis krūvis būtų injektuojamas į sluoksnį. Tam ilginama generatoriaus (10) impulso trukmė tiek, kad tolesnis jos ilginimas jau praktiškai daugiau nekeičia išsielektrinimo kinetikos. Tikėtina, kad esant nustatytam šviesos diodų rinkinio režimui trukmė bus apie 100 – 300  $\mu$ s. Naudojant šią šviesos diodų rinkinio impulso galią matuojamos išsielektrinimo kinetikos  $U(t)$  keliems skirtingiems pradiniam potencialams (rekomenduojama pasirinkti 400 V – 800 V). Tikros potencialų vertės apskaičiuojamos remiantis zondo gradavimo duomenimis. Oscilografu užregistruotų kinetikų duomenys išsaugomi USB laikmenoje. Toliau šios eksperimentinės kinetikos darbo eigoje turės būti palyginamos su teoriškai suskaičiuotomis kinetikomis, kurių skaičiavimui bus panaudoti eksperimentiškai nustatyti krūvininkų judrio parametrai.

Norint atlikti dreifinio judrio matavimus ekspozicijos intensyvumą reikia sumažinti iki mažo krūvio dreifo lygio, trumpinant impulsų generatoriaus (10, 2.1.1 pav.) impulsų trukmę. Atliekant kontrolinius matavimus integraliniame režime parenkama tokia šviesos impulsų trukmė, kad dėl apšvietimo fotoreceptoriaus potencialo pokytis būtų apie  $0,1 \cdot U_0$ .

Tada zondo (7) kabelis BNC jungtimi prijungiamas prie greitaeigio stiprintuvo įėjimo (8b, 2.1.1 pav.). Stiprintuvo įėjimą galima atpažinti iš greta esančios apkrovos varžos perjungimo rankenėlės. Rankenėle parenkamas reikalingas apkrovos varžos dydis. Stiprintuvo išėjimas sujungiamas su skaitmeninio oscilografo įėjimu.

Registruojamos išsielektrinimo  $dU/dt(t)$  kinetikos esant skirtingiems fotoreceptoriaus įelektrinimo potencialams kuo platesniame pradinio potencialų intervale ( $\sim 70$  V - 1000 V). Tam kontrolinio voltmetro dešinėje bloko pusėje rodomos įtampos turi parenkamos intervale nuo  $\sim 3,8$  V iki  $\sim 10$  V. Matavimui valdyti taip pat naudojama programa INERT0.EXE. Pradinis potencialas dabar matuojamas virpančiu zonu (4, 2.1.1 pav.). Pradinis potencialas apskaičiuojamas remiantis šio zondo gradavimo duomenimis. Oscilografu užregistruotos kinetikos analizuojamos ir esant reikalui išsaugomos USB laikmenoje perkėlimui į kompiuterį. Pagal charakteringą lūžį kinetikoje nustatoma lėkio trukmė, apskaičiuojamas dreifinis judris (1.2.1 formulė) ir sudaromas jūrio priklausos nuo kvadratinės šaknies iš elektrinio lauko stiprio grafikas (1.1.1 pav. pavaizduotos priklausos tipo). Iš šių eksperimentinių duomenų, pasinaudojant 1.1.2 formule, nustatomi charakteringi parametrai  $\mu(0)$  ir  $\alpha$ .

Toliau atliekami įelektrinto sluoksnio išsielektrinimo, eksponuojant stipriu šviesos impulsu, skaičiavimai pasinaudojant programa „Išsielektrinimas“ (Issielektrinimas\_1darbui.exe). Paleidus programą į parametrų verčių pasirinkimo langus įrašomos nustatytos tiriamo sluoksnio parametrų vertės – storis ( $\mu$ m), pradinis potencialas (V), judris nuliniame elektriniame lauke ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ), koeficientas  $\alpha$  ( $\text{cm}/\text{V}$ )<sup>1/2</sup>. Paskutiniame lange nurodoma kokia dalis paviršinio krūvio injektuojama į sluoksnį. Paprastai reikia pasirinkti 1. Teoriškai suskaičiuotos kinetikos palyginamos su eksperimentiškai išmatuotomis kinetikomis, padaromos išvados.

### 1.3. Literatūra

1. Borsenberger P.M., Pautmeier L., Bäessler H., *J.Chem Phys*, **94**(8), 5447 (1991).
2. Juodvišis A., Mikalkevičius M., Vengris S., *Puslaidininkių fizikos pagrindai*, Vilnius: Mokslas, 1985, p. 169.
4. Kao K., Хуанг В. Перенос электронов в твердых телах. – М.: Мир, – 1984, т.2, с.56-74.
5. Viščiakas, J., Gaidelis, V., Montrimas, E., Pocius, Z., The kinetics of the photoconductivity of the selenium layers under electrophotographic conditions, *Lietuvos fizikos rinkinys*, **6**, No.1 (1966) 77-87.  
Montrimas, E., Gaidelis, V., Pažėra, A., The discharge kinetics of negatively charged Se electrophotographic layers, *Lietuvos fizikos rinkinys*, **6**, No 4 (1966) 569-578.
6. Vaezi-Nejad, S. M., Xerographic time of flight experiment for the determination of drift mobility in high resistivity semiconductors, *Int. J. Electronics*, **62**, No 3 (1987) 361-384.
7. Archie Y. C. Chan and C. Juhasz, Xerographic-mode transient charge technique for probing drift mobility in high-resistivity materials, *Int. J. Electronics*, **62**, No 4 (1987) 625-632.
8. Charge Transport in Disordered Solids with Applications in Electronics, Sergei Baranovski (Editor), Publisher: Wiley (2006).
9. Scher, H., Montroll, W.E., Anomalous transit-time dispersion in amorphous solids, *Phys.Rev. B*, **12** (1975) 2455-2477.
10. Borsenberger P.M., Weiss D.S. Hole transport in triphenylmethane-doped poly(styrene). *Journal of imaging science and technology*, **41** , No 2 (1997) 185-191.
11. Lebedev, E., Dittrich, Th., Petrova-Koch, V., Karg, S., Brutting, W., *Appl. Phys. Lett*, **71** (18), 3 (1997) 2686-2688.
12. Skaičiavimo būdo ir programos idėja , habil.dr. Valentas Gaidelis.
13. Гайдялис В.И., Маркевич Н.Н., Монтримас Э.А., Физические процессы в электрофотографических слоях ZnO, Вильнюс: Минтис, 1968.

## Laboratorinis darbas Nr. 2

### 2. Organinio fotoreceptoriaus ciklinio nuovargio ir fotojautrio tyrimas

#### Darbo tikslas

Susipažinti su organinio fotoreceptoriaus sandara, susipažinti su krūvio pernašos reiškiniais jame. Įsisavinti paviršinio potencialo matavimo būdus.

#### Užduotys

1. Ištirti nuovargio reiškinius, pasireiškiančius fotoreceptoriuje kartoiant elektrinimo-ekspozicijos veiksmus. Įvertinti krūvininkų fotogeneracijos kvantinį našumą bei efektyviają fotoreceptoriaus talpą.
2. Išmatuoti tiriamojo fotoreceptoriaus sensitometrinę kreivę ir nustatyti fotojautrią ekspozicijos šviesai.

#### Kontroliniai klausimai

1. Kokiais metodais gali būti matuojamas paviršinis potencialas. Tų būdų privalumai ir trūkumai.
2. Kaip sugraduoti fotoreceptorių matavimo stendo potencialo matavimo zondus. Kokiai matavimo sistemai zondo gradavimas yra nereikalingas?
3. Kaip pagal sensitometrinę organinio fotoreceptoriaus kreivę nustatyti fotoreceptoriaus fotojautrią?
4. Kuo pasireiškia fotoreceptoriaus ciklinis nuovargis?

### 2.1. Teorija

#### 2.1.1. Organinių fotoreceptorių ypatybės

Organiniai fotoreceptoriai naudojami elektrofotografiniuose kopijavimo aparatuose ir lazeriniuose spausdintuvuose. Organiniai fotoreceptoriai paprastai susideda iš aliumininio cilindro, padengto elektrofotografiniu sluoksniu (EFS).

Spektrinis fotoreceptoriaus fotojautris apibrėžiamas formule [1,3]:

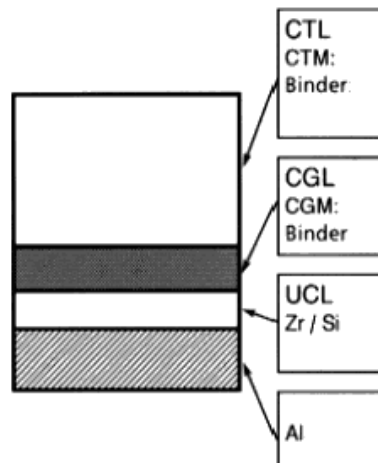
$$S_{\lambda} = \left( \frac{1}{L_{\lambda} \cdot t_L} \right)_{\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{1}{2}}, \quad (1.1.1)$$

kurioje  $L_{\lambda}$  yra apšvietos intensyvumas  $\lambda$  bangos ilgio monochromatine šviesa,  $t_L$  – ekspozicijos trukmė, per kurią įelektrinto fotoreceptoriaus paviršiaus pradinis potencialas  $U_0$  sumažėja du kartus.

Fotojautrio nustatymas susiveda į nustatymą ekspozicijos dozės  $L \cdot t_L$ , reikalingos pradinio potencialo  $U_0$  sumažinimui 2 kartus. Su kai kuriomis išlygomis (t.y., laikant, kad galioja pakeičiamumo dėsnis) ekspozicijos intensyvumas, nustatant fotojautrią gali būti ne nuolatinis, o impulsinis. Fotojautri šiuo atveju galima nustatyti matuojant sensitometrinę charakteristiką, t.y. EFS

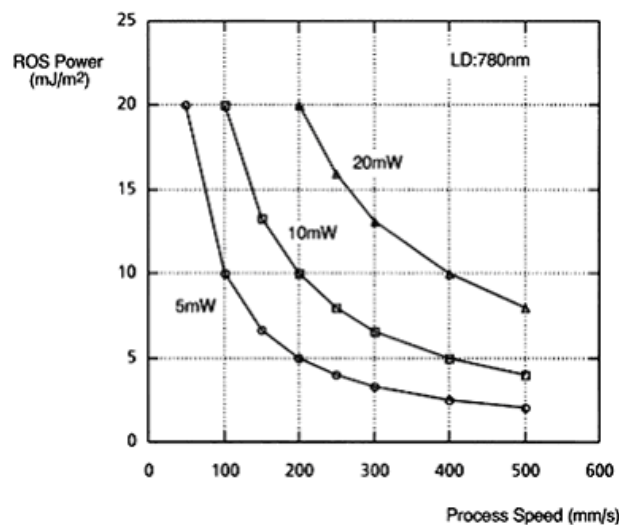
potencialo priklausomybę nuo ekspozicijos dozės  $L \cdot t_L$ . Fotojautrį surasime pagal (1.1.1) formulę, nustatę kokia ekspozicijos dozė pradinį potencialą sumažina 2 kartus.

Organinio fotoreceptoriaus fotojautrus sluoksnis daromas iš didelės varžos fotopulsaidininių. Vystantis organinių fotopulsaidininių technologijai jie praktiškai išstūmė neorganinius a-Se, a-Si ar kitus neorganinius sluoksnius: virš 90% pasaulyje gaminamų cilindrų yra iš organinių pulsaidininių. Organinio EFS struktūra gali būti įvairi. Vienas iš variantų pateiktas 1.1.1 pav.. Kadangi organinių fotopulsaidininių pasaulyje kol kas vyrauja skyles pernešančios medžiagos, tai tokios struktūros elektrinimo potencialas, kad ji galėtų veikti, turi būti neigiamas (tai yra tam tikras trūkumas, žiūr. sk. 1.1.3).



1.1.1 pav. DL tipo organinio EFS struktūra. CTL – krūvio pernašos sluoksnis, susidedantis iš krūvį pernešančios medžiagos ir rišamosios medžiagos, CGL, CGL - krūvio generacinis sluoksnis, susidedantis iš fotogeneracinės medžiagos ir rišamosios medžiagos, UCL – barjerinis adhezinis sluoksnis, Al – laidus pagrindas

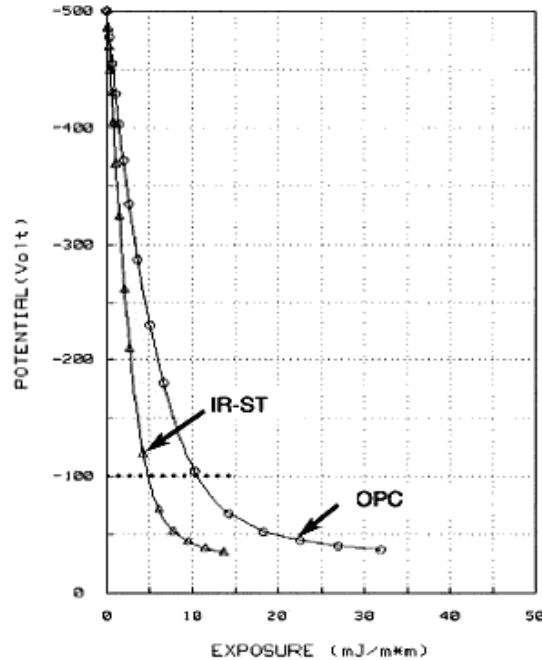
Organiniai fotoreceptoriai, jiems dirbant lazeriniame spausdintuve, sukami tam tikru greičiu. Kuo didesnis linijinis paviršiaus judėjimo greitis, tuo našesnis bus aparatas. Kadangi lazerinio spausdintuvo eksponavimo lazerio galia yra ribota, tai didėjant sukimo greičiui, mažės eksponavimo energija, tenkanti ploto vienetui (1.1.2 pav.).



1.1.2 pav. Eksponavimo energijos, tenkančios ploto vienetui, priklauso linijinio cilindro paviršiaus sukimo greičio



Fotoreceptoriaus paviršiaus pradinio potencialo sumažėjimą lemia jo fotojautris eksponavimo šviesai ir eksponavimo energijos, tenkančios ploto vienetui dydis (1.1.3 pav.). Eksponavimo energiją galima keisti ir specialiai keičiant eksponavimo šaltinio galią. Tada remiantis eksperimentiškai išmatuota fotoreceptoriaus charakteristika galima pagal (1.1.1) formulę apskaičiuoti fotoreceptoriaus spektrinį fotojautrį.



1.1.3 pav. Fotoreceptoriaus paviršiaus potencialo priklausoma nuo eksponavimo dozės tipiškiems organiniams fotoreceptoriams

Iš to kas pasakyta, matome, kad organiniams fotoreceptoriams būtinas didelis fotojautris. Galime suskaičiuoti maksimalų fotojautrį, kurį lemia šviesos kvanto energija, dielektriniai bei geometriniai fotoreceptoriaus parametrai.

Kaip žinoma, elektrofotografinio sluoksnio paviršiaus potencialas išreškiamas  $U_0 = \sigma_0 l / \epsilon \epsilon_0$ , čia  $\sigma_0$  - pradinis paviršinis krūvio tankis. Potencialas mažės judant fotogeneruotiems krūvininkams. Tarkime, kad fotogeneracija vyksta paviršiuje ir per trukmę  $dt$  bus injektuotas krūvis  $d\sigma$ :

$$d\sigma(t) = e\beta L_1 dt, \quad (1.1.2)$$

čia  $L_1$  – krintančių kvantų skaičius į sluoksnio ploto vienetą per laiko vienetą,  $\beta$  – krūvininkų fotogeneracijos kvantinis našumas. Jei prilipimo nėra nei sekliuose, nei giliuose lygmenyse, neatsižvelgiame į dreifuojančių krūvininkų erdvinį krūvį, o tai pat laikome, kad silpnėjant elektrinio lauko stipriui sluoksnyje  $\beta$  nemažėja, paviršinio krūvio kitimą aprašys lygtis:

$$\sigma(t) = \sigma_0 - e\beta L_1 t. \quad (1.1.3)$$

O potencialas aprašomas

$$U(t) = \frac{(\sigma_0 - e\beta L_1 t)l}{\epsilon \epsilon_0} = U_0 - \frac{e\beta L_1 l t}{\epsilon \epsilon_0}. \quad (1.1.4)$$

Pagal EFS spektrinio fotojautrio apibrėžiamą (1.1.1) reikia surasti laiko momentą  $t_L$ , kai  $U(t) = \frac{1}{2} U_0$

$$\frac{1}{2} U_0 = U_0 - \frac{e\beta L_1 l t_L}{\epsilon \epsilon_0},$$

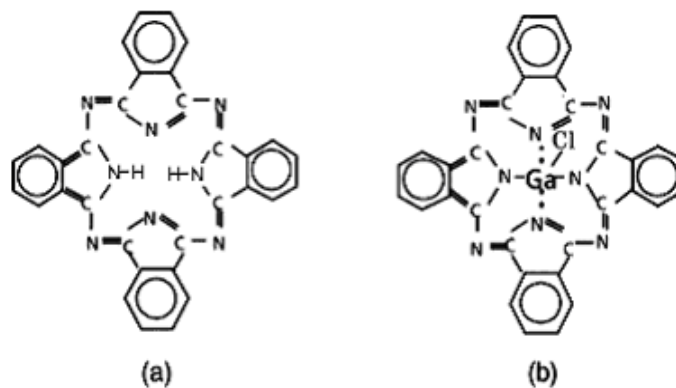
$$\text{ir} \quad t_L = \frac{\epsilon \epsilon_0 U_0}{2e\beta L_1 l}$$

Atsižvelgiant, kad  $L_\lambda = h\nu L_1 = \frac{hcL_1}{\lambda}$ , gauname, kad

$$S_\lambda = \frac{2e\beta\lambda}{\varepsilon\varepsilon_0hcU_0}. \quad (1.1.5)$$

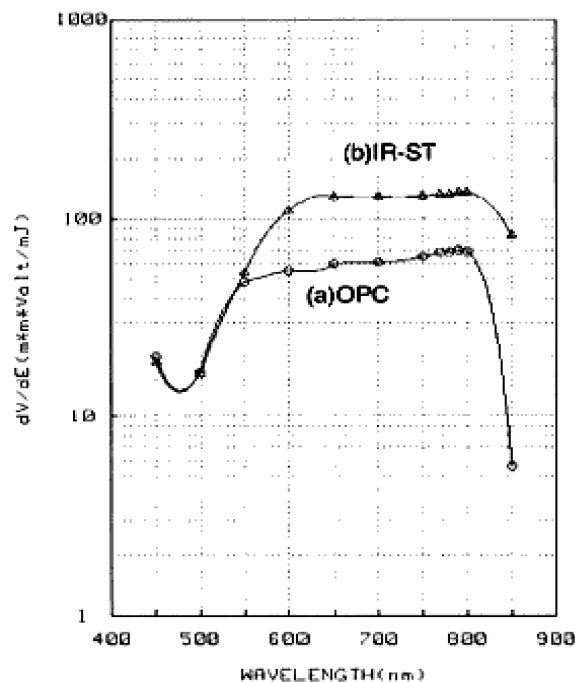
Pagal šią formulę galime apskaičiuoti, koks galimas maksimalus fotoreceptoriaus fotojautris. Pvz., jei  $\lambda = 780 \text{ nm}$ ,  $\varepsilon = 2,8$ ,  $l = 10 \mu\text{m}$ ,  $\beta = 1$ , tai  $S_\lambda = 635 \text{ m}^2/\text{J}$ . Realiai jis visuomet mažesnis dėl prilipimo sekliuose bei giliuose lygmenyse, dreifuojančių krūvininkų erdvinio krūvio, mažesnio už vieneta  $\beta$  ir jo mažėjimo silpnėjant elektrinio lauko stipriui sluosnyje [1, 3 ir kt.].

Efektyvios krūvio fotogeneracinės medžiagos (CGL sudedamoji dalis, apie 50 %, 1.1.2 pav.), kurios pastaraisiais metais ypač plačiau naudojamos cilindriniais fotoreceptoriams yra įvairios ftalocianino formos. Bemetali (a) ir galio chlorido (b) ftalocianinų formulės pateiktos 1.1.4 pav..



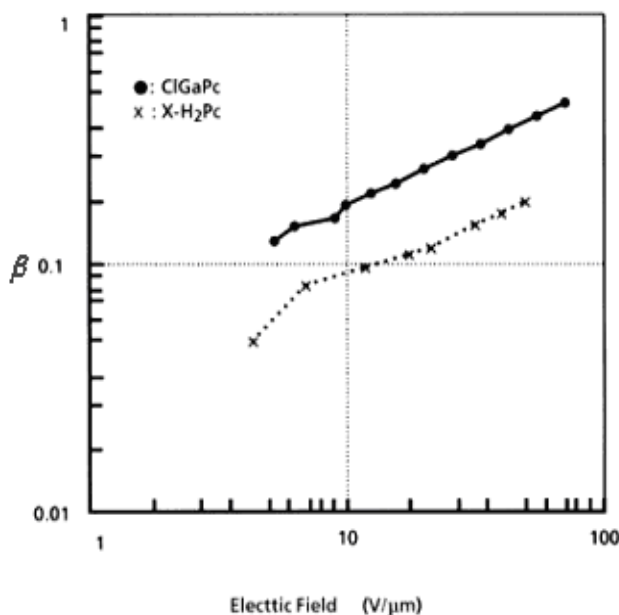
1.1.4 pav. Bemetalis (a) ir galio (b) ftalocianinas

Šios medžiagos užtikrina didelį pradinio potencialo mažėjimo greitį 1,6 – 2,2 eV šviesos kvantų energijų intervale. Jo spektrinis pasiskirstymas pateiktas 1.1.5 pav..



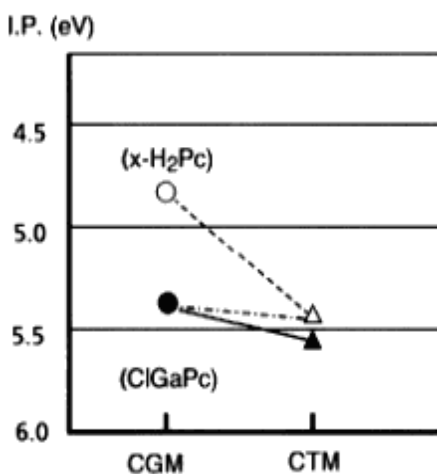
1.1.5 pav. Bemetali (a) ir galio (b) ftalocianino sluosnių potencialo mažėjimo spektrinis pasiskirstymas

Krūvininkų fotogeneracijos kvantinis našumas ftalocianino junginiuose, kaip organinei medžiagai, yra didelis ir palyginti silpnai priklauso nuo elektrinio lauko stiprio [4] (1.1.6 pav.).



1.1.6 pav. Fotogeneracijos kvantinio našumo ftalocianino junginiuose priklausa nuo elektrinio lauko stiprio [4]

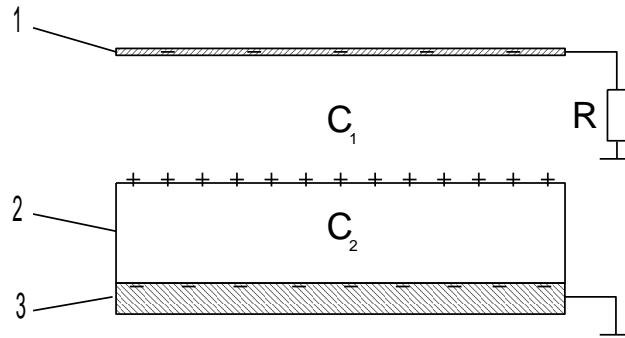
Fotogeneracinės ir krūvį pernešančios medžiagos energetiniai lygmenys privalo būti suderinti. Apie juos galima spręsti iš tų medžiagų jonizacijos potencialų. Reikia, kad nesudarytų didelio barjero skylių patekimui iš krūvio fotogeneracinės medžiagos (CGM) į skyles pernešančią medžiagą (CTM) (1.1.7 pav.). Matome, kad ClGaPc yra parankesnis už bemetalį H<sub>2</sub>Pc.



1.1.7 pav. Fotogeneracinių ir krūvį pernešančios medžiagų energetiniai lygmenys

### 2.1.2. Paviršinio potencialo matavimo metodai

Tiriamą fotoreceptoriaus paviršinį potencialą matuojamas naudojant talpinius zondus. Matavimo principas pagrįstas talpiniame zonde indukuoto krūvio matavimu. Talpinis zondas - tai bet kokia elektra laidži plokštelė (1). Priartinus laidžią plokštelę prie įelektrinto sluoksnio (2) paviršiaus, joje indukuojasi krūvis, kurio dydį lemia sluoksnio paviršinis potencialas bei elektrinių talpų sluoksnio paviršius – zondas C<sub>1</sub> ir sluoksnio paviršius - sluoksnio pagrindas C<sub>2</sub> (3) santykis.



1.2.1 pav. Zondas (1) ir elektrofotografinis sluoksnis (2).

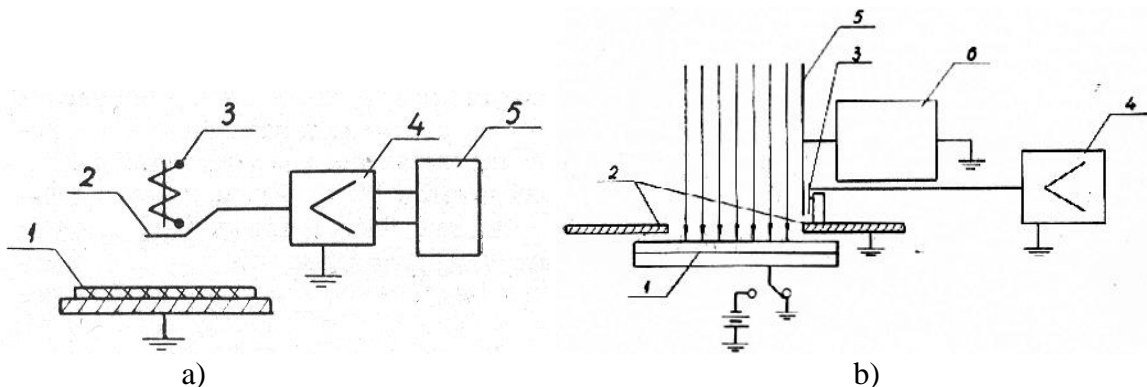
Matuoti krūvį tiesiogiai yra sudėtinga. Naudojami keli matavimo metodai.

Vienas iš būdų yra virpančio zondo (arba dinaminio elektrometro) metodas. Šiame metode keičiamas talpos dydis tarp sluoksnio paviršiaus ir zondo  $C_1$ . Gaunamas kintamas signalas proporcingas šios talpos moduliacijos gyliui, talpų  $C_1/C_2$  santykiui bei paviršinio potencialo dydžiui. Kadangi su dinaminio elektrometru įvykdomas nuolatinio dydžio pakeitimas kintamu, tai tolesnis kintamo signalo stiprinimas leidžia pasiekti didelį sistemos jautrį, kartu eliminuojant nulinio dreifą. Naudojamos kelios dinaminio elektrometro konstrukcijos (1.2.2. pav.).

Virpančiame zonde gaunamas signalas proporcingas slinkties srovei, pratekančiai grandinėje virpantis zondas – sluoksnio paviršius. Apkrovos varžoje gaunamas signalas gali būti išreikštas

$$V_s = R \cdot \frac{dQ}{dt} = RC_1 \frac{dU}{dt} + RU \frac{dC_1}{dt}, \quad (1.2.1)$$

čia  $Q$  – indukuotas krūvis,  $U$  – sluoksnio paviršiaus potencialas,  $R$  – zondo apkrovos varža. Tik antrasis formulės narys yra proporcingas matuojamam potencialui  $U$  ir parodo tikrąją paviršinio potencialo kitimo eigą. Tuo tarpu pirmasis narys dinaminio elektrometro atveju įneša klaidingą signalą, kurio dydis tam tikrais atvejais gali viršyti antrojo nario dydį. Pirmojo nario įtaką galima sumažinti didinant talpos kitimo  $C_1(t) = C_1^0(1 + A \cdot \sin \omega t)$  amplitudę  $A$  arba dažnį  $\omega$ , nors tai ir sunkiai techniškai realizuojamas uždavinys. Tada, didėjant išvestinei  $dC_1/dt$ , didės antrojo nario dydis bei mažės paklaidos signalo dalis. Be to pirmojo signalo įtaką galima sumažinti naudojant dažninę filtraciją. Selektivių stiprintuvu stiprinant  $\omega$  dažnio signalą pirmojo nario įnašas gali būti daug kartų nuslopintas.



1.2.2 pav. Dinaminio elektrometro schemas. a – su virpančiu zonde virš sluoksnio paviršiaus (1 – tiriamas sluoksnis, 2 – signalinis elektrodas, 3 – elektromagnetinė virpinimo sistema, 4 – stiprintuvas, 5 – registruojantis prietaisas). b – su besisukančiu disku su išpjovomis (1 – tiriamas sluoksnis, 2 – ekranas, 3 – signalinis elektrodas, 4 – selektyvus stiprintuvas, 5 – besisukantis diskas su išpjovomis, 6 – variklis)

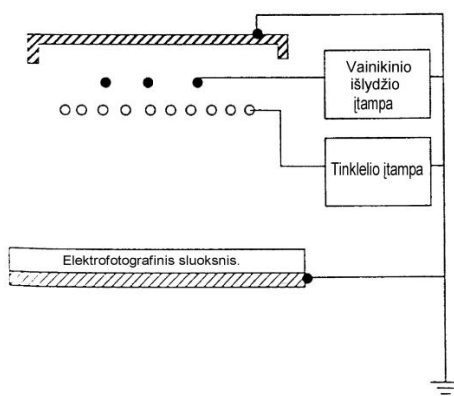
Norint stebėti potencialo kitimus, kurių charakteringa kitimo trukmė yra mažesnė nei kelios milisekundės, įprastiniai dinaminės sistemos elektrometrai tampa netinkami dėl išaugusio 1.2.1 formulės pirmojo nario, t.y.  $C_1 \cdot dU/dt > U \cdot dC_1/dt$ . Be to negalima stebėti trumpesnių potencialo kitimų nei talpos moduliacijos dažnis. Tokiais atvejais naudojamos potencialo matavimo sistemos su nejudančiu zonu.

### 2.1.3. Organinių fotoreceptorių įelektrinimas

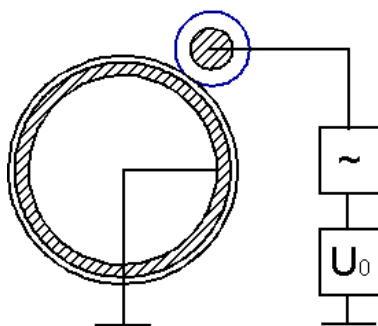
Tyrinėjant elektrofotografinius sluoksnius jų paviršius yra įelektrinamas. Tai galima padaryti vainikinio išlydžio elektrintuvais, tokiais kaip korotronas ir skorotronas. Jų pagrindą sudaro viena ar kelios 40-70 μm storio vielytės. Vainikinio išlydžio elektrintuvai pasižymi dideliu efektyvumu. Trukumais būtų tai, kad jie skleidžia pakankamai didelį kiekį ozono, azoto oksido ir ultravioletinę spinduliuotę. Ypač daug jų išsiskiria elektrinant neigiamai. Todėl siekiama sukurti tokias EFS struktūras, kurias reiktų elektrinti teigiamai.

Vainikinis išlydis be ekranuojančio elektrodo dažniausiai duoda netolydų įelektrinimą. Mažesnę įelektrinimo netolydumą duoda korotronas. Korotronas – tai vainikinio išlydžio elektrizatorius, kuris turi pagalbinį elektrodą, patalpintą virš vainikinio elektrodo ir elektrinamo sluoksnio. Pagalbinio elektrodo paskirtis keisti lauko geometriją, tam, kad užtikrintų tolygesnį įelektrinimą. Dažniausiai pagalbinis elektrodas turi žemesnę potencialą, negu vainikinis elektrodas. Kitas elektrizatorius – skorotronas – turi metalinį tinklelį tarp vainikinio išlydžio elektrodo ir elektrofotografinio sluoksnio. Tinklelio paskirtis analogiška vakuuminio triodo valdančiajam tinkleliui. Skorotronas užtikrina dar geresnį elektrinimo vienalytiškumą, tačiau jų srovės tankis gali būti nepakankamas, kad įelektrintų dideliu greičiu besisukančius cilindrinus fotoreceptorių.

Yra žinomas dar kitas elektrinimo būdas – elektrinimas pusiau laidžiu guminiu voleliu, prie kurio prijungta aukšta kintama įtampa su nuolatine dedamąja. Šiuo atveju vainikinis išlydis vyksta mažame oro tarpelyje tarp volelio ir cilindro paviršiaus ties volelio atsiplėšimo vieta. Besisukant cilindriui, jis elektrinamas iki nuolatinės dedamosios potencialo. Šis elektrinimo būdas skleidžia žymiai mažiau ozono, tačiau elektrinimo srovės tankis gali būti nepakankamas greitaeigiuose aparatuose.



1.3.1 pav. Elektrintuvo skorotronto schema



1.3.2 pav. Elektrinio voleliu principas

## 2.2. Darbo priemonės ir matavimų eiga

### 2.2.1. Organinių fotoreceptorių tyrimo stendo ypatumai

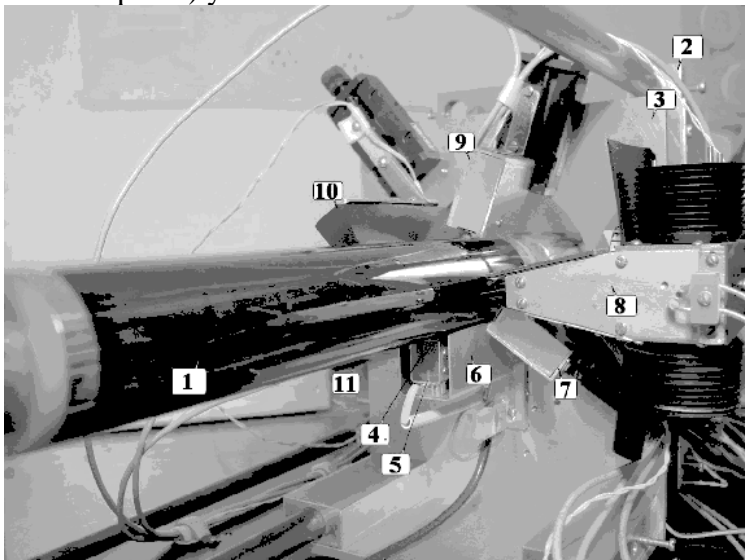
Cilindrų matavimo stendo vidinis vaizdas parodytas 2.1.1 paveiksle. Čia matomas tiriamasis cilindras, trys paviršinio potencialo zondai, elektrinio ir eksponavimo mazgai.

Organinių fotoreceptorių tyrimo stendo blokinė schema pavaizduota 2.1.2 pav. Jame tiriamasis cilindro pavidalo elektrofotografinis fotoreceptorius elektrinamas, trijose vietose matuojamas paviršinis potencialas, atliekamas eksponavimas tiriančiąja 780 nm šviesa ir trynimas papildomu šviesos šaltiniu.

Zondų ir kitų elementų išdėstymas toks, kad susidaro tokia įvykių seka:

1. Elektrinimas (2);
2. Pradinio potencialo  $U_1$  matavimas (pirmasis zondas (5));
3. Eksponavimas pagrindiniu šviesos šaltiniu (8,9) (780 nm šviesa);
4. Išsielektrinimo potencialo  $U_2$  matavimas (antrasis zondas (6));
5. Eksponavimas pagalbinu šviesos šaltiniu (11) (720 nm šviesa);
6. Likutinio potencialo  $U_3$  matavimas (trečiasis zondas (7));

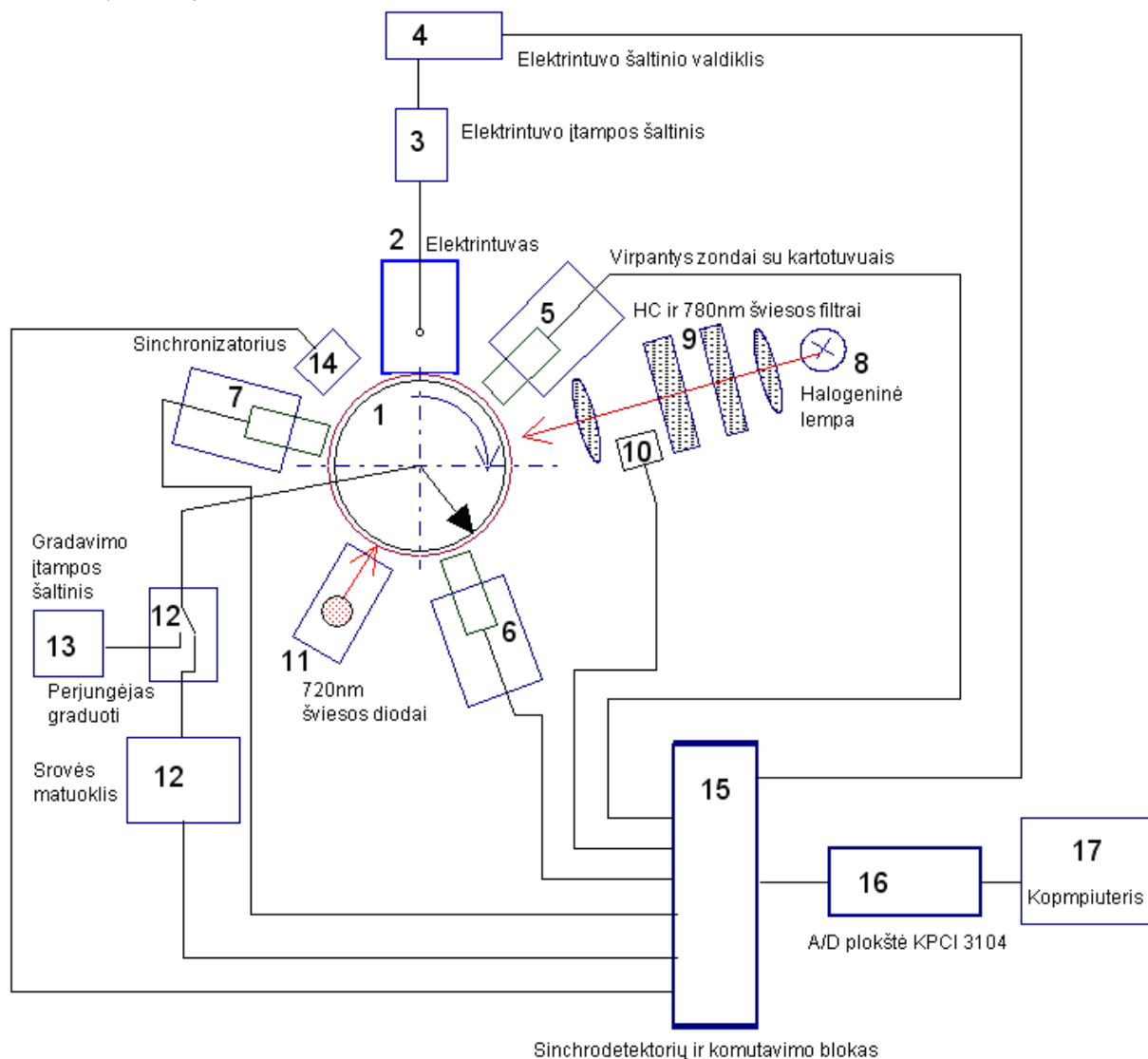
Fotoreceptorius (1) (2.1.2 pav.) elektrinamas korotono tipo elektrintuvu (2). Elektrintuvo ilgis (t.y. elektrinamos srities plotis) yra 44 mm.



2.1.1 pav. Organinių fotoreceptorių matavimo stendo zondų įrenginio vaizdas

1 – cilindras, 2 – cilindro sukimo mechanizmas, 3 – zondų stalelis, 4 – vainikinio išlydžio elektrintuvas, 5 – korotono kontraelektrodas, 6 – ekranas, 7 –  $U_1$  elektrometro zondas, 8 –

pagrindinis (780 nm) šviesos šaltinis, 9 -  $U_2$  elektrometro zondas, 10 – pagalbinis 720 nm šviesos šaltinis, 11 -  $U_3$  elektrometro zondas

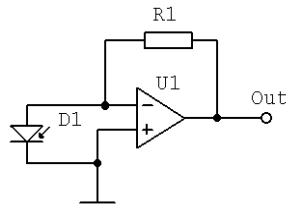


2.1.2 pav. Organinių fotoreceptorių tyrimo stendo blokinė schema. Paaiškinimai tekste

Paviršiniam potencialui matuoti stende naudojami virpantys zondai (5, 6, 7). Zondų virpinimo dažniai priklauso nuo mechaninio rezonanso dažnio ir yra apie 270-290 Hz. Virpančių zondų signalai per kartotuvus perduodami į kompiuterio duomenų surinkimo plokštę KPCI-3104 (16). Valdymo programa plokštėje atlieka sinchroninį zondų signalų detektavimą ir tolesnį jų apdorojimą bei registravimą. Valdymo programa registruoja tokius signalus: pradinis potencialas (pirmas zondas, 5); išsielektrinimo potencialas (antras zondas, 6); liktinis potencialas (trečias zondas, 7); elektrinio srovės dydis (12); fotodiodo (10) srovės signalas, proporcingas pagrindinio šviesos šaltinio ekspozicijos galios dydžiui.

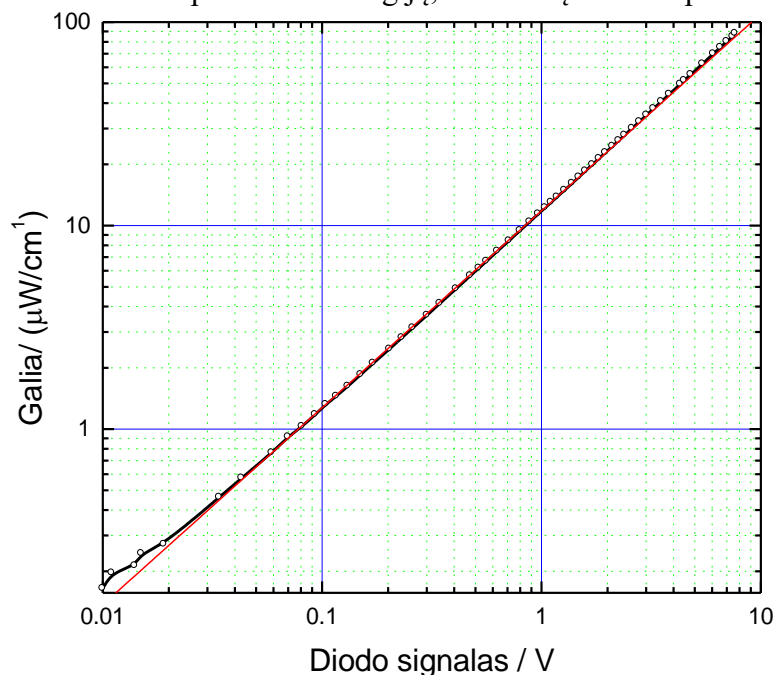
Ekspozicijos 780 nm šviesos intensyvumas matuojamas fotodiodu (10), įmontuotu ekspozicijos įrenginyje. Norint gauti įtampą proporcingą fotodiodo srovei panaudotas keitiklis srovė-įtampa, kurio schema pateikta 2.1.3 pav. .

Ekspozicijos šaltinis šviesą sukoncentruoja į labai siaurą juostelę cilindro paviršiuje išilgai cilindro ašies. Spinduliavimo energijos matuokliu IL-1400, pastačius fototutiklį cilindro paviršiaus vietoje, buvo išmatuota energija, tenkanti cilindro ilgio vienetui bei juos atitinkantis kontrolinio fotodiodo (10) fotosrovės signalas. Išmatuota priklausomybė tarp kontrolinio fotodiodo signalo ir IL-1400 parodymų pateikta 2.1.2 pav.



2.1.3 pav. Eksponuojančios 780 nm šviesos intensyvumo matavimo fotodiodo jungimo schema

Organinio fotoreceptoriaus sukimo periodą galima keisti 0,5 - 1,5 s ribose. Rekomenduojama periodo trukmė yra 0,78 s. Eksponavimo energija, tenkanti cilindro paviršiaus ploto vienetui priklauso nuo linijinio sukimo greičio bei pagrindinio šviesos šaltinio eksponavimo galios. Konkreti energija apskaičiuojama pasinaudojant 2.1.4 pav. pateikta priklausą. Kadangi ši priklausą praktiškai yra tiesinė, galima, remiantis ja, apskaičiuoti proporcingumo koeficientą ir jį naudoti tolesniame matavimo duomenų apdorojime. Be to reikia apskaičiuoti kokiam plotui tenka eksponavimo šaltinio spinduliuojama galia, atsižvelgiant į linijinį fotoreceptoriaus paviršiaus sukimosi greitį, ir suskaičiuoti eksponavimo energiją, tenkančią cilindro paviršiaus ploto vienetui.



2.1.4 pav. Eksponavimo galios priklausą nuo šviesą registruojančio fotodiodo signalo (po keitiklio srovė-įtampa)

### 2.2.2. Matavimų eiga

Pradedant matavimus tiriamąjį cilindrinį fotoreceptorių reikia įtvirtinti matavimo aparatūroje. Į cilindrinio fotoreceptoriaus galus įdedami dielektriniai laikikliai, kurie tvirtinami ant aparatūros pusašių. Dielektrinis laikiklis su kontaktiniu lapeliu turi būti dedamas toje pusėje, kur yra kolektorius. Tvirtinant būtina atkreipti dėmesį, kad tiriamojo fotoreceptoriaus laidus pagrindas patikimai susijungtų su kolektoriumi. Jei tiriamo fotoreceptoriaus skersmuo kitoks, nei buvo tirtas anksčiau, reikia sureguliuoti elektrintuvo, pagrindinio apšvietėjo, zondų, padėtis. Elektrintuvo padėtis reguliuojama taip, kad jo korpuso kraštas būtų 2-3 mm atstumu nuo fotoreceptoriaus paviršiaus. Pagrindinio apšvietėjo padėtis reguliuojama taip, kad jis fokusuotų šviesą į siaurą ruoželį. Zondų virpančiosios plokštelės sureguliuojamos, kad būtų ~2 mm atstumu virš fotoreceptoriaus paviršiaus. Perjungėju „Gradavimas“ prijungus prie fotoreceptoriaus pagrindo kontrolinę įtampą (~235 V) patikrinami trijų zondų signalai: signalų amplitudės turi būti apie 0,7-1,2 V. Jei taip nėra, koreguojamos zondų padėtys.



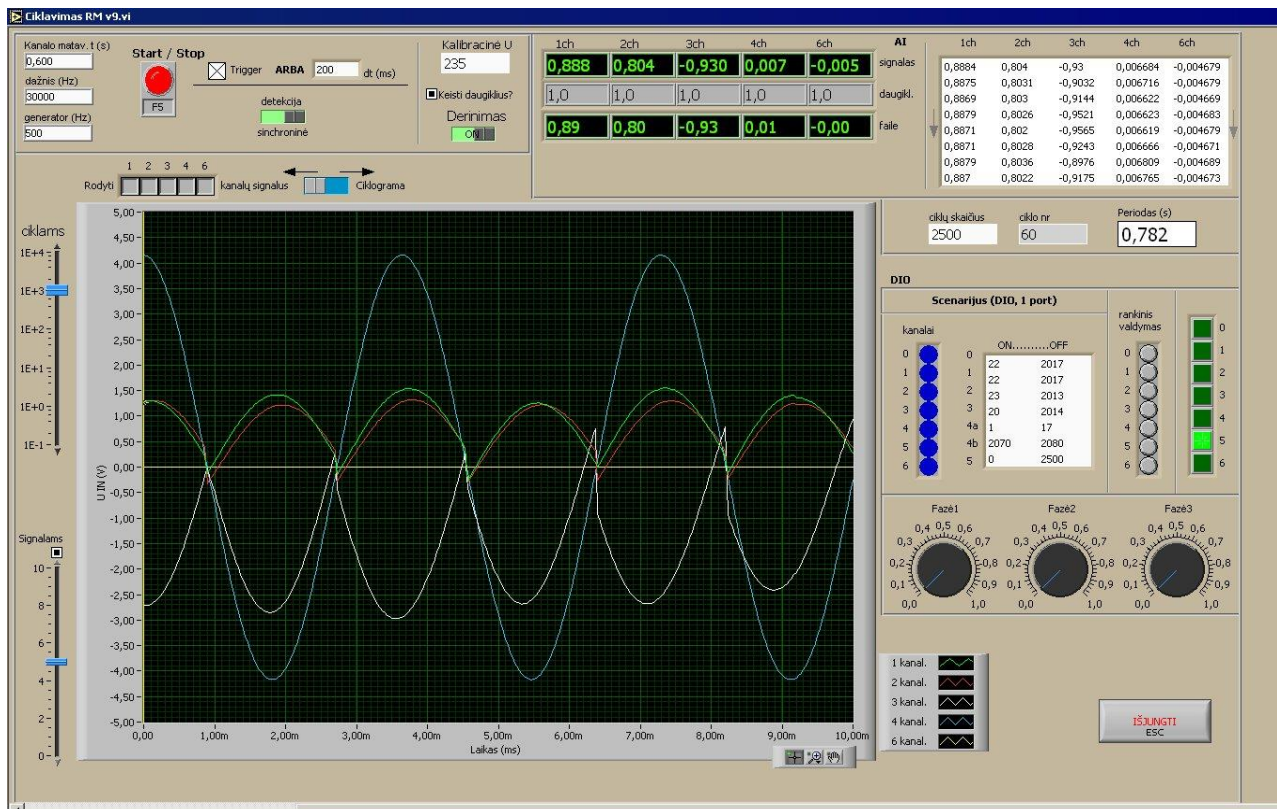
Valdymo bloko išvaizda pateikta 2.2.1 pav. Jo maitinimo iš 220 V tinklo įjungimo jungiklis yra galiniame skydelyje dešinėje pusėje. Valdymo bloko skydelio apatinėje dalyje išdėstyti trijų padėčių perjungėjai, kurie valdo įvairius stendo elementus. Trijų padėčių perjungėjai leidžia pasirinkti: vidurinėje padėtyje valdomas elementas visuomet išjungtas; viršutinėje padėtyje – įjungtas (rankinis valdymas); apatinėje padėtyje valdymas perduodamas kompiuterio programai (automatinis valdymas). Derinant aparatūrą reikiami elementai gali būti valdomi rankiniu būdu. Kol neatliktas zondų gradavimas, negalima elektrinti fotoreceptoriaus, nes susikaupęs elektrinis krūvis sluoksnyje neleis teisingai sugraduoti zondus. Tam perjungėją „Elektrinis1“ geriausiai pastatyti vidurinėje padėtyje.



2.2.1 pav. Valdymo bloko priekinio skydelio išvaizda

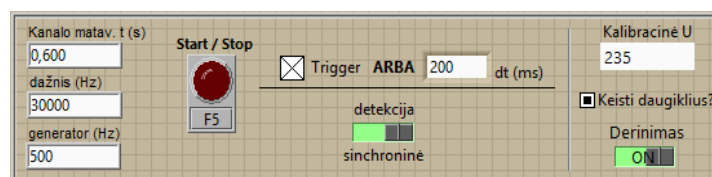
Įjungus valdymo bloko maitinimą pradeda sukti cilindrinis fotoreceptorius, įtvirtintas matavimo aparatūroje. Variklio išjunginėti (jungiklis „Variklis“) nereikia dėl elektrinės schemos specifikos. Elektrintuvo įtampą galima reguliuoti valdymo bloke potenciometru, esančiu virš jungiklio „Elektrinis1“. Elektrintuvo įtampa gali būti reguliuojama dviem režimais: įtampos stabilizavimo režimu („*U-stab*“) ir srovės stabilizavimo režimu („*I-stab*“). Fotoreceptorius stabiliausiai elektrinamas srovės stabilizavimo režime („*I-stab*“). Tačiau kai fotoreceptoriaus elektrinimas išjungtas, turi būti įjungtas „*U-stab*“ režimas. Perjungti į „*I-stab*“ režimą galima pradėjus sukti fotoreceptorį ir įjungus fotoreceptoriaus elektrinimą.

Visą matavimų eigą ir duomenų registravimą valdo R. Maldžiaus su „LabView“ parašyta programa. Programos langas parodytas 2.2.2 pav.



2.2.2 pav. Elektrofotografinių cilindrų ciklogramos valdymo programos langas

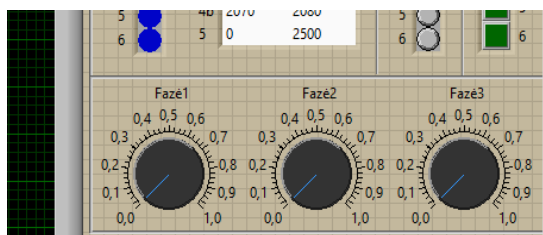
Programa registruoja signalą šešiuose analog input (AI) kanaluose (AI0 – AI5) ir valdo (on/off) digital port1 (DIO, 0...6) kanalą. Signalai atitinkamai dauginami iš koeficientų ir vidurkinami cilindro apsisukimo periodu (gaunamas „taškas“ rezultatų faile, t.y. vienas „taškas“ atitinka vieno ciklo suvidurkintą potencialo vertę). Ketvirtas ir šeštasis kanalai (AI3, AI5) – daviklių signalai. Trijų pirmų kanalų (AI0,1,2) signalai yra detektuojami sinchroniškai penktojo kanalo (AI4) signalui (sinchrodetekcija). Taigi generatoriaus signalas jungiamas prie penkto kanalo (AI4). Sinchroninį detektavimą galima išjungti ir tada programa skaičiuoja signalo modulius (pseudo-detekcija). Ši funkcija įjungiama/išjungiama mygtuku skydelyje (žr. 2.2.3 pav.).



2.2.3 pav. Valdymo skydelio fragmentas, skirtas programos startui bei derinimo procedūroms atlikti.

„LabView“ aplinkoje programa startuoja paspaudus „run“ meniu juostoje ir vėliau laikinai stabdoma arba tęsiama toliau mygtuku „Start/Stop“ (2.2.3 pav.) arba F5 klavišu klaviatūroje. Atlikus visus matavimo ciklus (jų skaičių galima nurodyti „ciklų skaičius“ langelyje) programa sustoja automatiškai ir į Windows aplinką išeinama mygtuku „IŠJUNGTI“ arba klavišu „Esc“. Išjungus programą, matavimų duomenys įrašomi į failą, kurio vardą ir vietą vartotojas pasirenka startuojant programą (matavimo pradžioje). Atkreipkite dėmesį į varnelę ties „trigger“ (2.2.3 pav.) – ji rodo, kad ciklo pradžią nurodo aparatūra, t.y. besisukančio cilindro daviklis. Priešingu atveju – kai varnelė neuždėta – ciklo pradžia nurodoma žingsniu (pvz. cilindro apsisukimo periodas 200 ms, žr. 1 pav.).

Pagal nutylėjimą mygtukas „derinimas“ (2.2.3 pav.) yra įjungtas, todėl pradėjus vykdyti programą, leidžiama derinti trijų kanalų sinchroninio detektavimo fazę (žr. 2.2.4 pav.). Oscilogramos lange turi būti įjungti „kanalų signalai“ rodymas. Kanalų sinchroninio detektavimo fazės turi būti tokios, kad oscilogramos lange būtų stebimi |sinωt| pavidalo signalai. Fazės derinimo metu ciklai neskaiciuojami, t.y. į duomenų failą jie nėra įrašomi.



2.2.4 pav. Sinchrodetekcijos fazės derinimo valdymas.

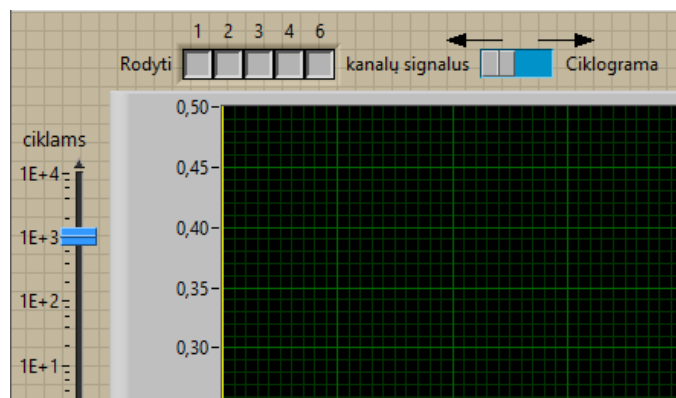
Po fazės suderinimo, mygtuką „derinimas“ perjunkite į padėtį „off“ ir pereisite į daugiklių (koeficientai iš kurių dauginami kanalų signalai) nustatymo etapą. Pirmus penkiolika ciklų programa įjungs DIO kanalą, kuriame prijungtas kalibravimo potencialas (235 V). Po penkiolikos ciklų programa nustato daugiklių vertes bei toliau skaičiuoja matavimo ciklus bei registruoja signalus. Galima pastebėti, kad automatiškai nuimama varnelė ties „keisti daugiklius?“. Tai padaryta tam, kad vėliau, kartojant matavimą, arba kartojant fazės derinimą (norint stebėti signalo formą ir pan.), daugikliai nebūtų perskaiciuojami iš naujo. Jei daugiklius perskaiciuoti norėsite, prieš pereinant į „derinimas“ etapą, uždėkite varnelę ties „keisti daugiklius?“.

DIO kanalai seka scenarijaus nurodymus (2.2.5 pav.): kanalai įjungiami/išjungiami, nurodant ciklų numerį, ties kuriuo bus arba įjungiamas, arba išjungiamas. Kurie kanalai seka scenarijų nurodoma mėlynu kanalo mygtuku kairėje pusėje (žr. 2.2.5 pav.) – mėlyna spalva rodo, kad kanalas aktyvuotas, o balta – neaktyvus. Jei pageidaujate kanalus valdyti priverstinai („rankiniu“ būdu) – naudokitės pilkais mygtukais scenarijaus dešinėje pusėje (2.2.5 pav.). Žali kvadratai dešinėje informuoja vartotoją apie kanalo būseną.

DIO				Scenarijus (DIO, 1 port)		rankinis valdymas	
kanalai		ON.....OFF					
0	<input checked="" type="radio"/>	0	22	2017	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	0
1	<input checked="" type="radio"/>	1	22	2017	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	1
2	<input checked="" type="radio"/>	2	23	2013	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	2
3	<input checked="" type="radio"/>	3	20	2014	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	3
4	<input checked="" type="radio"/>	4a	1	17	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	4
5	<input checked="" type="radio"/>	4b	2070	2080	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	5
6	<input checked="" type="radio"/>	5	0	2500	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	6

2.2.5 pav. DIO kanalų valdymas ir scenarijaus nustatymas.

Kanalų signalų oscilogramą cilindro apsisukimo metu arba ciklogramos pildymo kinetiką galima stebėti perjungiant atitinkamą mygtuką bei parenkant kanalo numerį mygtuku (žr. 2.2.6 pav.). Šliaužiklio formos valdymo elementas lango dešinėje pusėje yra skirtas tam, kad palengvintų signalo stebėjimą ir jo skleidimą y-ašyje.



2.2.6 pav. Signalų vizualizavimo ir valdymo sritis.

Darbo metu atliekami du tyrimai. Pirmojo tyrimo metu parenkama ekspozicijos energija, kuri sumažina išsielektrinimo potencialą (antrojo zondo parodymai) iki vertės, kuri 1,5-2 kartus didesnė, nei liktinis potencialas, kurį matuoja trečiasis zondas (150-50 V). Tokiomis sąlygomis atliekama 2000-2500 matavimo ciklų. Antrojo tyrimo metu lėtai (galima nedideliais laipteliais) keičiamas ekspozicijos intensyvumas ir gaunama prieklausa, kaip priklauso išsielektrinimo potencialas nuo ekspozicijos energijos, nekeičiant fotoreceptoriaus elektrinimo sąlygų.

Matavimų rezultatus valdymo programa surašo į tekstinį failą, kuriame yra tokie duomenų stulpeliai: ciklo laikas (s); pirmas zondas (pradinis potencialas/V); antras zondas (išsielektrinimo potencialas/V); trečias zondas (liktinis potencialas/V); elektrinimo srovės signalas (V), fotodiodo, registruojančio ekspozicijos šviesos intensyvumą, signalas (V).

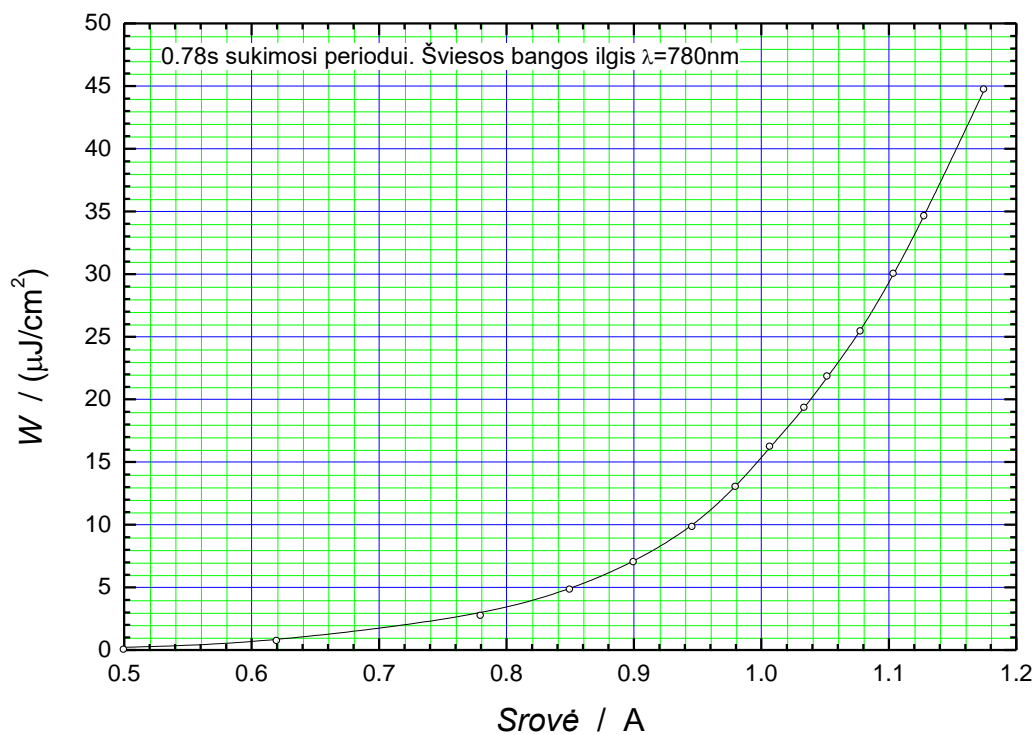
Šiuos failus reikia perkelti į Origin, MS Excel ar kitą programą, kuri gali atlikti matematinius veiksmus su rezultatais bei rezultatus pavaizduoti grafiškai.

Pirmojo matavimo rezultatai pateikiami tiesiogiai. Pagal matuotą fotoreceptoriaus parametrų (pradinis potencialas, potencialas po pagrindinės ekspozicijos, liktinis potencialas) kitimą daromos išvados apie ciklinį fotoreceptoriaus nuovargį. Pagal elektrintuvo geometrinius išmatavimus apskaičiavus elektrinimo srovės tankį, atskaičiuojama efektyvioji fotoreceptoriaus talpa. Šiems skaičiavimams reikalingi duomenys: fotoreceptoriaus sukimo periodas bei jo diametras, elektrinamos fotoreceptoriaus dalies plotis – 4,4 cm, elektrinimo srovės signalo perdavimo koeficientas –  $[1/(0,21 \cdot 10^6)] \text{A/V}$ .

Analizuojant antrojo matavimo rezultatus sudaroma išsielektrinimo potencialo prieklausa nuo fotoreceptoriaus ekspozicijos energijos tankio, t.y. sudaroma sensitometrinių kreivių, kuri pateikiama pusiau logaritminiame mastelyje. Ekspozicijos energijos tankis šioje prieklausoje atidedamas logaritminiame mastelyje. Ekspozicijos energijos tankis ( $\text{mJ/cm}^2$ ) apskaičiuojamas remiantis 2.1.4 pav. duomenimis bei atsižvelgus į konkretų fotoreceptoriaus sukimo periodą bei jo diametrą. Pagal ekspozicijos energijos tankio vertę, reikalingą fotoreceptoriaus potencialo sumažinimui 2 kartus, apskaičiuojamas spektrinis fotoreceptoriaus fotojautris (1.1.1 formulė). Remiantis 1.1.5 formule įvertinamas krūvininkų fotogeneracijos kvantinis našumas, padaromos išvados vertinant gautą vertę.

Remdamiesi eksperimentine sensitometriniu kreive nustatykite, kokių maksimalių greičių gali būti sukamas tiriamas fotoreceptorius nurodytai ekspozicijos energijai (pvz.  $10 \mu\text{J/cm}^2$ ), kad potencialas ryškinimo srityje neviršytų 150 V.

Parinkant ekspozicijos intensyvumą gali praversti ekspozicijos energijos prieklausa nuo pagrindinio šviesos šaltinio lempos srovės (2.2.7 pav.).



2.2.7 pav. Eksponavimo galios priklausoma nuo šviesos šaltinio lempos srovės (3 cm cilindriui)

## 2.2. Literatūra

1. P.M. Borsenberger, D.S. Weiss, *Organic Photoreceptors for Xerography*, New York: Marcel Dekker, 1998.
2. A.Undzėnas, *Organinių junginių fotonikos pagrindai*, Vilnius: Vilniaus universitetas, Fizikos institutas, 1999.
3. В.И. Гайдялис, Н.Н. Маркевич, Э.А. Монтримас, *Физические процессы в электрофотографических слоях ZnO*, Вильнюс: Минтис, 1968.
4. Masaharu Shirai, *A New OPC "IR-ST" Technology for Laser Beam Printer & Copier*, Fuji Xerox technical report, 1996, No11.

## Laboratorinis darbas Nr. 3

### 3. Elektrofotografinio sluoksnio spektrinio fotojautrio pasiskirstymo tyrimas

#### Darbo tikslas

Įsisavinti paviršinio potencialo matavimo būdą bei susipažinti su krūvio generacijos ir pernašos mechanizmais didelės varžos sluoksniuose.

#### Užduotys

3. Ištirti tiriamojo elektrofotografinio sluoksnio spektrinio fotojautrio priklausą nuo bangos ilgio, nustatyti sensibilizatoriaus tipą arba iš kokios medžiagos pagamintas sluoksnis, apskaičiuoti krūvininkų fotogeneracijos kvantinį našumą.

#### Kontroliniai klausimai

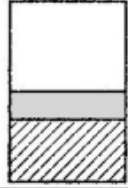
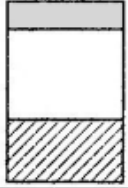



5. Kokiais metodais gali būti matuojamas paviršinis potencialas. Tų būdų privalumai ir trūkumai.
6. Kaip sugraduoti elektrofotografinio sluoksnio paviršinio potencialo matavimo zondą. Kokiai matavimo sistemai gradavimas nereikalingas?
7. Kaip sugraduoti pro monochromatorių praėjusios šviesos intensyvumą?
8. Kaip pagal elektrofotografinio sluoksnio išsielektravimo apšvietus kreivę nustatyti sluoksnio fotojautrį?

### 3.1. Teorinė medžiaga

#### 3.1.1. Fotoreceptorių tipai ir pagrindinės charakteristikos

Elektrofotografinio sluoksnio (EFS), dažnai vadinamo fotoreceptoriumi, savybės lemia kopijavimo-dauginimo aparatų bei skaitmeninio spausdinimo lazerinių spausdintuvų naudojamus ekspozicijai šviesos šaltinius, veikimo spartą, kopijų kokybę. Elektrofotografinio sluoksnio charakteristikas didele dalimi lemia fotoreceptorių puslaidininkinės medžiagos ir fizikinių reiškinių vyksmo sąlygos įelektrintuose sluoksniuose.

EFS struktūra priklauso nuo naudojamų puslaidininkinių medžiagų. Galimi struktūros tipai parodyti 1.1.1 pav.

Se	$\alpha$ -Si	OPC (DL)	OPC (IDL)	OPC (SL)
				
+	+	-	+	+

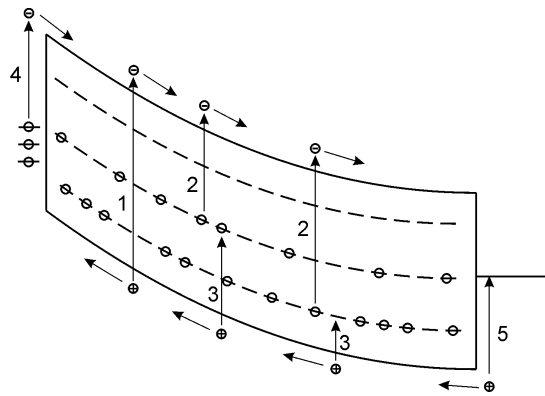
1.1.1. pav. Pagrindiniai EFS struktūrų tipai ir jų paviršiaus elektrinio poliškumas

Įelektrintame fotoreceptoriuje susidaro savotiškos fizikinės sąlygos, kurios įprastai vadinamos „elektrofotografiniu režimu“ [1,2]. Įelektrintas fotoreceptorius yra nepusiausvyrinė sistema, o kadangi potencialui krentant keičiasi prilipimo ir rekombinacijos būsenų bei paviršinių ir tūrinių lygmenų užpildymo lygis, tai fotoreceptoriuje vykstantys procesai yra nestacionarūs. Dažnai EFS potencialo relaksacijos laikas žymiai viršija Maksvelo relaksacijos trukmę ( $\tau_M$ ). Toks EFS puslaidininkių elgesys sąlygojamas laisvų ir kvazilaisvų krūvininkų pašalinimu iš sluoksnio juos įelektrinant. Fotoreceptoriaus kontaktai (vienas jų - tai įelektrinant nusodinti jonai) yra stipriai užtvariniai. Kadangi įelektrinant ir eksponuojant fotoreceptoriuje susidaro ir keičiasi erdvinio krūvio tankis, tai fotoreceptoriaus tūryje pažeidžiama neutralumo sąlyga.

Fotoreceptorius turi įsielektrinti iki didelio potencialo, sukurančio jame ( $10^5 - 10^6$ ) V/cm elektrinio lauko stiprį, o potencialo mažėjimas tamsoje turi būti pakankamai lėtas. Šias savybes užtikrina plati draudžiamųjų energijų juosta, 1 eV dydžio užtvarinis barjeras tarp pagrindo elektrodo ir puslaidininkinio sluoksnio, maža negilių lygių koncentracija sluoksnio tūryje ir paviršiuje. Didelis fotoreceptoriaus fotojautris, mažas fotoišelektrinimo inertiškumas ir nežymus liktinis potencialas užtikrinami dideliu krūvininkų fotogeneracijos kvantiniu našumu, pakankamo dydžio krūvininkų dreifiniu judriu, maža seklių ir gilių prilipimo būsenų koncentracija. Šie paminėti reikalavimai, o taip pat fotopuslaidininkio fizikinės-mechaninės savybės, atsparumas elektrinimui, šviesai, atmosferos poveikiams, nekenskingumas žmogui ir aplinkai, kaina ir kiti praktiniai rodikliai išskiria iš daugelio puslaidininkių tik kai kurias medžiagas – a-Se, kai kuriuos chalkogenidinius stiklus, a-Si ir eilę organinių fotopuslaidininkių.

### 3.1.2. Išsielektrinimo tamsoje mechanizmai ir dėsningumai

Fotoreceptorių išsielektrinimas tamsoje dažniausiai charakterizuojamas trukme, per kurią pradinis potencialas sumažėja du kartus ( $t_{U/2}$ ) arba potencialo kritimo greičiu pradinėje išsielektrinimo stadijoje  $(dU/dt)_{t=0}$ . Įvairaus tipo fotoreceptorių potencialo pusiau kritimo laikas keičiasi plačiose ribose: nuo keleto sekundžių a-Si:H sluoksniuose iki keleto valandų organinių puslaidininkių sluoksniuose. Tiesioginės koreliacijos tarp fotoreceptoriaus elektrinės varžos ir potencialo kritimo tamsoje greičio nėra, nes elektrinant iš fotoreceptoriaus ekstrahuojami laisvi krūvininkai, ir fotoreceptoriaus efektyvioji elektrinė varža gali stipriai padidėti. Potencialo kritimas tamsoje yra sąlygojamas naujų laisvų krūvininkų generacija fotoreceptoriaus tūryje, krūvininkų injekcija iš jo paviršiaus ar krūvininkų termoelektronine emisija iš pagrindo elektrodo.



1.2.1 pav. Įelektrinto elektrofotografinio sluoksnio juostinė schema:

1 – perėjimas juosta-juosta; 2,3 – perėjimai iš arba į lokalines būsenas; 4 – generacija iš paviršiaus; 5 – termoelektroninė emisija iš pagrindo

Dėl reiškinio lėtumo nagrinėjant fotoreceptoriaus išsielektrinimą tamsoje galima nesiskaityti su krūvininkų dreifiniu greičiu bei jų prilipimu į seklias būsenas. Sluoksnio išsielektrinimas tamsoje sąlygojamas krūvininkų generacija iš paviršinių būsenų (1.2.1 pav., 4 perėjimas), generacija iš būsenų, lokalizuotų sluoksnio tūryje (2 ir 3 perėjimai), termoelektronine emisija iš pagrindo (5). Visi šie energiniai šuoliai gali vykti tiek dėl terminės aktyvacijos, tiek ir dėl elektrinio lauko poveikio. Fotoreceptoriaus potencialo kritimas tamsoje priklauso nuo dominuojančio krūvininkų generacijos mechanizmo ir nuo paviršiuje ir tūryje pasiskirsčiusio krūvio. Bendru atveju potencialo kritimas tamsoje gali būti apskaičiuotas, naudojantis nenutrūkstamumo ir Puasono lygtimis kartu su lygtimis, aprašančiomis krūvininkų generacijos kinetiką arba krūvininkų termoelektroninę emisiją iš pagrindo į sluoksnį.

EFS išsielektrinimas tamsoje gali būti sąlygotas elektronų ar skylių termine generacija iš santykinai gilių energinių būsenų sluoksnio tūryje susidarant teigiamam ar neigiamam erdviniam krūviui  $\rho(t)$  [4]. Toks atvejis realizuojamas, kai elektronų sužadinimo tikimybė  $f = v \cdot \exp(-E/kT)$ , kur  $v = N_c S v$  – dažninis faktorius,  $N_c$  – efektyvioji būsenų koncentracija,  $S$  – krūvininkų pagavimo skerspjūvis,  $v$  – krūvininkų šiluminis greitis, yra daug didesnė (1.2.1 pav., perėjimas 2) negu skylių sužadinimo tikimybė (3 perėjimas), ir tokiu būdu potencialui krentant didėja erdvinis krūvis  $\rho(t)$ . Jei būsenų aktyvacijos energija nepriklauso nuo elektrinio lauko stiprio, tai krūvio generacijos greitis  $dm/dt$  yra aprašomas lygtimi:

$$\frac{dm}{dt} = -m \cdot v \cdot \exp(-E/kT), \quad (1.2.1)$$

čia  $m$  – užpildytų elektronais (ar skylėmis) būsenų koncentracija.

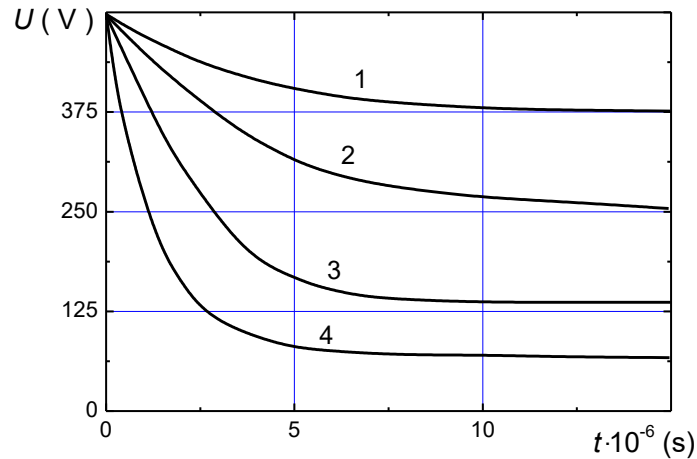
Gaunama, kad potencialo kitimą aprašo lygtis

$$U(t) = \sigma^2 \{ 2\varepsilon\varepsilon_0 \cdot \rho_0 + 2\varepsilon\varepsilon_0 \cdot e \cdot m [1 - \exp(-f \cdot t)] \}^{-1}, \quad (1.2.2)$$

.čia  $\rho_0$  - erdvinis krūvis.

Potencialo kritimo dėl terminės krūvininkų generacijos iš lokalinių lygmenų sluoksnio tūryje, kai  $\rho(t) \neq 0$ , kinetikos kreivės pavaizduotos 1.2.2 pav. Išsielektrinimas tamsoje, priklausantis nuo krūvininkų terminės generacijos iš būsenų, lokalizuotų sluoksnio tūryje, su erdvinio krūvio susidarymu ir efektyviojo sluoksnio storio ( $L$ ) mažėjimu yra būdingas eilei įvairios prigimties fotoreceptorių, tokių, kaip chalkogenidinių stiklų ir organinių puslaidininkių.





1.2.2 pav. Potencialo kritimas tamsoje dėl krūvininkų generacijos iš lokaliųjų lygmenų.  $f = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,  $U_0 = 500 \text{ V}$ ,  $\varepsilon = 8$ .  $m_0$ : 1 –  $2,75 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ; 2 –  $5,5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ; 3 –  $1,1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ; 4 –  $2,2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$

Kai fotoreceptoriaus išsielektrinimas tamsoje nusakomas krūvininkų termine generacija iš paviršinių energinių lygių, tada paviršinio krūvio tankio kitimo greitis išreiškiamas [4]:

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\sigma \cdot \nu \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT}\right). \quad (1.2.3)$$

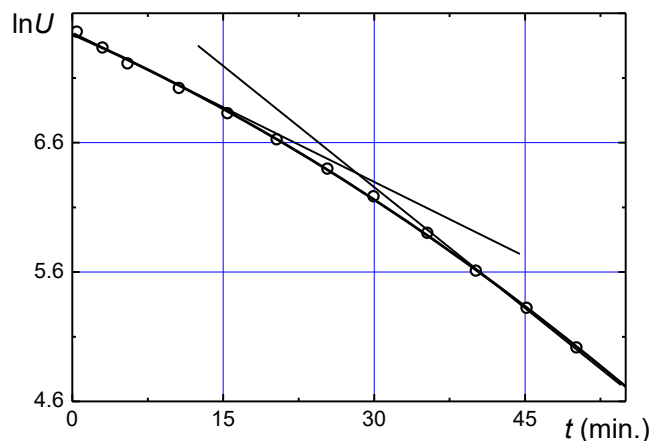
Sprendžiant šią lygtį randama potencialo kritimo išraiška, kai erdvinis krūvis sluoksnyje  $\rho_0 = 0$ .

$$U = U_0 \cdot \exp\left[-\nu \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)t\right] = U_0 \cdot \exp(-f \cdot t), \quad (1.2.4)$$

Kai paviršiaus krūvis  $\sigma$  pilnai ekranuojamas erdviu gaunama:

$$U(t) = U_0 \exp(-2f \cdot t) \quad (1.2.5)$$

Iš (1.2.4) ir (1.2.5) matyti, kad fotoreceptoriaus be erdvinio krūvio potencialo relaksacijos trukmė yra 2 kartus didesnė, palyginus su relaksacijos trukme, kai paviršinis krūvis yra pilnai ekranuotas erdviu. Kai erdvinis krūvis  $\rho_0 = \text{const}$ , tai jo poveikis didelių potencialų srityje yra mažesnis, negu mažų potencialų srityje. Tokie potencialo kitimo dėsningumai gerai pasireiškia ZnO bei kai kurių chalkogenidinių stiklų fotoreceptorių atvejais (1.2.3 pav.).



1.2.3 pav. ZnO elektrofotografinio sluoksnio potencialo natūrinio logaritmo kritimo tamsoje priklausomybė nuo laiko:

1 – teorinė, apskaičiuota pagal (1.2.4); 2 – teorinė, apskaičiuota pagal (1.2.5); taškai – eksperimentinės reikšmės

Fotoreceptoriaus išsielektrinimas tamsoje gali vykti dėl elektronų (arba skylių) termoelektroninės emisijos iš metalinio pagrindo į pus-laidininkio sluoksnį. Termoelektroninės emisijos srovės tankis aprašomas Ričardsono – Dėšmano formule:

$$j_0 = D_e \cdot A \cdot T^2 \cdot \exp(-\varphi/kT), \quad (1.2.6)$$

čia  $D_e$  – barjero kvantinis skaidrumas ir  $D_e \approx 1$ ,  $A$  vadinama termoelektronine konstanta,  $T$  – temperatūra,  $\varphi$  - barjero aukštis elektronams (arba skylėms), kuris susidaro dėl išėjimo iš metalo ir puslaidininkio darbų skirtumo. Esant stipriam elektriniam laukui, užtveriamasis barjeras yra moduluojamas ir sumažėja dydžiu  $\Delta\varphi = e\sqrt{eF/4\pi\epsilon\epsilon_0}$ , kur  $F$  – elektrinio lauko stipris barjero aplinkoje. Todėl termoelektroninės srovės tankis stipriai padidėja:

$$j = j_0 \exp\left(\frac{\Delta\varphi}{kT}\right). \quad (1.2.7)$$

Injektuoti elektronai (arba skylės), pasiekę fotoreceptoriaus paviršių mažina paviršinio krūvio tankį greičiau [4]

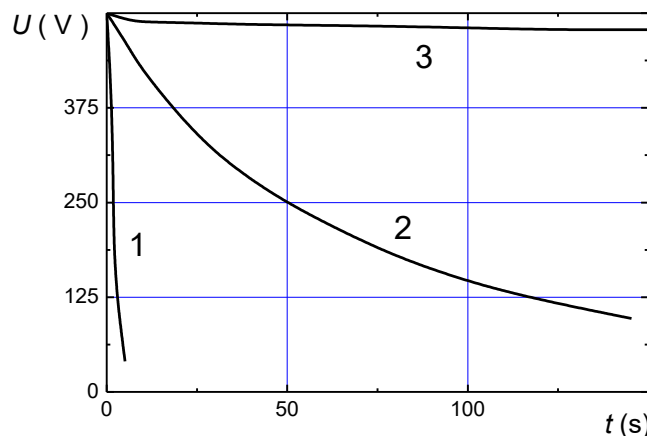
$$\frac{d\sigma}{dt} = -A \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{\varphi}{kT}\right) \cdot \exp\left(\frac{e}{kT} \sqrt{eU/4\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right). \quad (1.2.8)$$

čia  $l$  – sluoksnio storis.

Nedidelių potencialų atveju ir neatižvelgiant į erdvinį krūvį ( $\rho_0=0$ ) gaunama, kad potencialo mažėjimas vyksta tiesiškai:

$$U = U_0 - \frac{lAT^2 t}{\epsilon_0 \epsilon} \exp\left(-\frac{\varphi}{kT}\right). \quad (1.2.9)$$

Fotoreceptoriaus išsielektrinimas tamsoje labai stipriai priklauso nuo potencinio barjero dydžio (1.2.4 pav.).



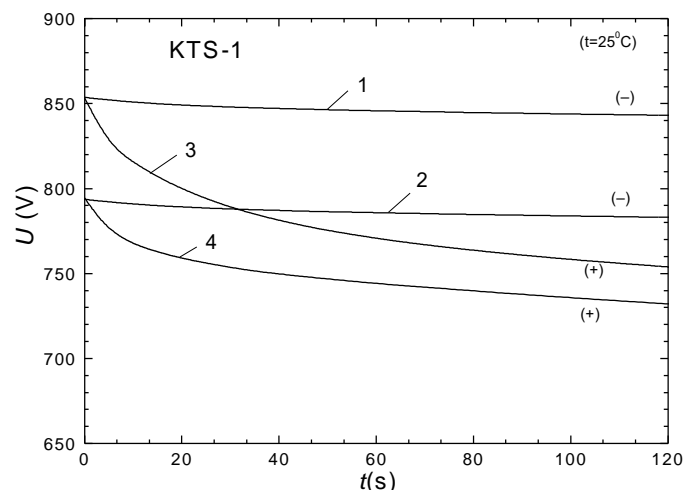
1.2.4 pav. Potencialo kritimo dėl termoelektroninės emisijos iš pagrindo;  $\epsilon = 6$ ,  $l = 2 \cdot 10^{-3}$  cm; 1 –  $\varphi = 0,9$  eV; 2 –  $\varphi = 1,0$  eV; 3 –  $\varphi = 1,1$  eV

Aprašytų teorinių potencialo kritimo tamsoje dėsnų palyginimas su konkrečių fotoreceptorijų eksperimentinėmis potencialo kinetikos priklausomybėmis leidžia ne tik nustatyti išsielektrinimo tamsoje fizikines priežastis, bet ir surasti krūvininkų būsenų parametrus. Krūvininkų injekcija iš sluoksnio paviršiaus ir pagrindo gali būti pilnai išjungta, jei tarp sluoksnio ir jo pagrindo arba ant sluoksnio paviršiaus sudaromos didelės varžos puslaidininkio arba dielektriko plonos plėvelės, o taip pat kai paviršinis krūvis pilnai ekranuojamas erdvinio krūviu. Minėti fotoreceptorijų išsielektrinimo tamsoje dėsniniai yra kiek supaprastinti. Realiai išsielektrinimas vyksta ne tik dėl krūvininkų terminės generacijos iš paviršiuje ir tūryje lokalizuotų būsenų, bet dažnai krūvininkų generacija vyksta stipraus elektrinio lauko poveikyje, t. y. elektrinis laukas sumažina potencinių duobių gylį ir padidina generuotų krūvininkų koncentraciją. Be to, dažnai išsielektrinimas vyksta ne

iš vieno tipo energinių būsenų, o iš jų spektro, sužadavimo iš kurių tikimybė sąlygojama jų energiniu gyliu.

Jei fotoreceptorius, įelektrinto kaip teigiamai, taip neigiamai, potencialo kritimo tamsoje greitis abiem atvejais yra toks pats, yra didelė tikimybė, kad išsielektrinimas vyksta dėl krūvininkų generacijos fotoreceptorius tūryje. Tačiau, kada fotoreceptorius, įelektrinto, pavyzdžiui, teigiamai, potencialo kritimo greitis yra žymiai didesnis, palyginus su neigiamo potencialo kritimo greičiu, tai galima teigti, kad teigiamo potencialo kritimas yra sąlygojamas krūvininkų injekcija iš paviršinių būsenų arba iš pagrindo.

Organinių puslaidininkių fotoreceptoriai dažnai sudaromi iš atskirų krūvininkų generacijos (FGS) ir transportinio (KTS) sluoksnių bei barjerinio ir apsauginio sluoksnių. Kai KTS padengiamas ant Al plėvelės, padengtos skylių barjeriniu sluoksniu, o ant KTS paviršiaus padengiamas FGS, tada fotoreceptorius darbo potencialas yra teigiamas. Tačiau, kada pirma ant barjerinio sluoksnio padengiamas KGS, o ant jo paviršiaus padengiamas KTS, tada darbo potencialas yra neigiamas. Daugiasluoksnio fotoreceptorius, kurio KTS sudarytas iš skylių transportinės medžiagos (hidrazonų darinio) mišinio su polikarbonatu, ir FGS, sudarytas iš bemetalo ftalocianinio polivinilbutiralo rišiklyje, įelektrinto teigiamai ir neigiamai, išsielektrinimo tamsoje greitis priklauso nuo potencialo poliškumo (1.2.5 pav.). Neigiamai įelektrinto fotoreceptorius Al – B – KTS – KGS išsielektrinimas vyksta lėtai, o tai rodo, kad barjerinis sluoksnis efektyviai mažina skylių injekciją iš Al į KTS, o taip pat, kad skylių generacija KTS tūryje yra nežymi. Teigiamo potencialo kritimo greitis, yra žymiai didesnis už neigiamo potencialo kritimo greitį, ir šis išsielektrinimas negali būti sąlygojamas elektronų injekcija iš Al, nes šio tipo KTS elektronai yra nejudrūs.



1.2.5 pav. Dvigubo organinio sluoksnio su KGS (IDL) ir KTS potencialo kritimas tamsoje

Teigiamo potencialo kritimas taip pat negali vykti dėl skylių generacijos KTS tūryje, nes tada tokiu pat greičiu turėtų vykti ir neigiamo potencialo kritimas. Tokiu būdu teigiamo potencialo kritimas yra sąlygojamas skylių injekcija iš plono (nuo 0,1 μm iki 0,2 μm) FGS į KTS. Skylių rezervuaras tokiuose daugiasluoksniuose fotoreceptoriuose yra ftalocianino kristalai ir paviršiaus būsenos. KTS teigiamo potencialo kritimas (6 pav.) sąlygojamas skylių injekcija iš paviršinių būsenų.

### 3.1.3. Išsielektrinimo mechanizmai veikiant spinduliuotei bei dėsningumai

EFS integrinis fotojautris apibrėžiamas formule [1,4]

$$S = \left( \frac{1}{L \cdot t_L} \right)_{\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{1}{2}}, \quad (1.3.1)$$

kurioje  $L$  yra pastovus apšvietos intensyvumas balta šviesa,  $t_L$  – ekspozicijos trukmė, per kurią pradinis potencialas  $U_0$  sumažėja du kartus.

Spektrinis EFS fotojautris apibrėžiamas analogiška formule:

$$S_\lambda = \left( \frac{1}{L_\lambda \cdot t_L} \right)_{\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{1}{2}}, \quad (1.3.2)$$

kurioje  $L_\lambda$  yra apšvietos intensyvumas monochromatine  $\lambda$  bangos ilgio šviesa,  $t_L$  – ekspozicijos trukmė, per kurią pradinis potencialas  $U_0$  sumažėja du kartus.

Elektrofotografinio sluoksnio paviršiaus potencialas  $U_0 = \sigma_0 l / \varepsilon \varepsilon_0$  mažės dėl fotogeneruotų krūvininkų judėjimo, čia  $\sigma_0$  – pradinis paviršinis krūvio tankis. Tarkime, kad fotogeneracija vyksta paviršiuje, laiko momentu  $t$  per trukmę  $dt$  bus injektuotas krūvis  $d\sigma$ :

$$d\sigma(t) = e\beta L_1 dt, \quad (1.3.3)$$

čia  $L_1$  – krūvininkų kvantų skaičius į EFS ploto vienetą per laiko vienetą,  $\beta$  – krūvininkų fotogeneracijos kvantinis našumas. Jei prilipimo nėra nei sekliuose, nei giliuose lygmenyse, neatsižvelgiame į dreifuojančių krūvininkų erdvinį krūvį, o tai pat laikant, kad silpnėjant elektrinio lauko stipriui sluoksnyje  $\beta$  nemažėja, paviršinio krūvio kitimą aprašys lygtis:

$$\sigma(t) = \sigma_0 - e\beta L_1 t. \quad (1.3.4)$$

O potencialas aprašomas

$$U(t) = \frac{(\sigma_0 - e\beta L_1 t)l}{\varepsilon \varepsilon_0} = U_0 - \frac{e\beta L_1 t l}{\varepsilon \varepsilon_0}. \quad (1.3.5)$$

Pagal EFS spektrinio fotojautrio apibrėžiamą (1.3.2) reikia surasti laiko momentą  $t_L$ , kai  $U(t) = \frac{1}{2} U_0$

$$\frac{1}{2} U_0 = U_0 - \frac{e\beta L_1 t_L l}{\varepsilon \varepsilon_0},$$

$$\text{ir} \quad t_L = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U_0}{2e\beta L_1 l}$$

Atsižvelgiant, kad  $L_\lambda = h\nu L_1 = \frac{hcL_1}{\lambda}$ , gauname, kad

$$S_\lambda = \frac{2e\beta \lambda l}{\varepsilon \varepsilon_0 hc U_0}. \quad (1.3.6)$$

Pagal šią formulę galime apskaičiuoti, koks galimas maksimalus EFS fotojautris. Pvz., jei  $\lambda = 800$  nm,  $\varepsilon = 2,5$ ,  $l = 10$   $\mu$ m,  $\beta = 1$ , tai  $S_\lambda = 728$  m<sup>2</sup>/J. Realiai jis visuomet mažesnis dėl prilipimo sekliuose bei giliuose lygmenyse, dreifuojančių krūvininkų erdvinio krūvio,  $\beta$  mažėjimo silpnėjant elektrinio lauko stipriui sluoksnyje. Šie išsielektrinimo modeliai yra nagrinėti [1, 2, 4] ir dažniausiai sprendžiami skaitmeniškai.

Apšvietus fotoreceptorių fotogeneruoti krūvininkai dreifiniu greičiu  $v_d = \mu E$  ( $\mu$  – krūvininkų dreifinis judris,  $E$  – elektrinio lauko stipris) juda link fotoreceptoriaus paviršiaus arba link pagrindo. Skylių arba elektronų dreifinis judris fotoreceptoriuje arba jo krūvio transportiniame sluoksnyje (KTS) turi būti pakankamai didelis, t.y. krūvininkų tranzito trukmė  $t_t$  turi būti mažesnė už laiko tarpą tarp ekspozicijos ir ryškinimo  $t_{ER}$ . Lėtaeigių kopijavimo dauginimo aparatų atvejais krūvininkų dreifinis judris neįtakoja fotoreceptoriaus jautrio sumažėjimo. Fotogeneruotų krūvininkų prilipimas į seklias prilipimo būsenas, terminio išlaisvinimo trukmė iš kurių yra didesnė už laiką  $t_{ER}$  apriboja tokių fotoreceptorių panaudojimą greitaeigiuose kopijavimo aparatuose ir lazeriniuose spausdintuvuose. Krūvininkų pagavimas į gilius centrus, išlaisvinimas iš kurių per laiką  $t_{ER}$  nevyksta, iššaukia liktinio potencialo  $U_R$  susidarymą ir fotoreceptoriaus fotojautrio mažėjimą.

Fotogeneracijos kvantinis našumas skaičiuojamas pagal formulę:

$$\beta = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 hc}{e L_\lambda l \lambda (1 - R)} \cdot \frac{dU}{dt} \Big|_{t=0} \frac{kl}{1 - kl - \exp(-kl)}, \quad (1.3.7)$$

čia  $\varepsilon$  - sluoksnio dielektrinė skvarba,  $L_\lambda$  - šviesos, kurios bangos ilgis  $\lambda$  intensyvumas,  $U$  - sluoksnio potencialas,  $k$  - absorbcijos koeficientas,  $R$  - atspindžio koeficientas,  $l$  - sluoksnio storis,  $dU/dt|_{t=0}$  - pradinis potencialo mažėjimo greitis. Kvantinis našumas gali būti skaičiuojamas kritusiam į paviršių kvantų skaičiui. Ši išraiška analogiška kvantinio našumo išraiškai savosios absorbcijos srityje:

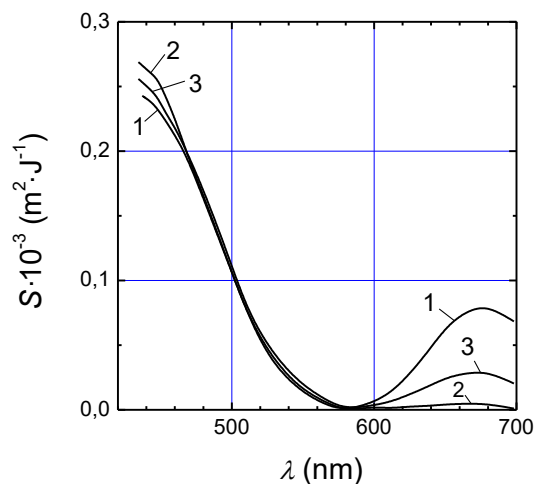
$$\beta = \frac{\varepsilon\varepsilon_0hc}{eL_\lambda l\lambda(1-R)} \cdot \frac{dU}{dt} \Big|_{t=0} . \quad (1.3.8)$$

Atspindžio koeficientas, reikalingas kvantinio našumo apskaičiavimui, nustatomas išmatavus dielektrinę skvarbą. Atsižvelgus į tai, kad EFS laidumas mažas, turim:

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} , \quad (1.3.9)$$

čia  $n$  - lūžio rodiklis.

EFS spektrinio jautrio pasiskirstymas priklauso nuo sluoksnio struktūros ir gamybos technologijos. Pavyzdžiui, keičiantis pagrindo temperatūrai a-Se sluoksnio garinimo metu (1.3.1 pav.) keičiasi spektrinio jautrio pasiskirstymas.



1.3.1 pav. Se fotoreceptorių fotojautrio spektrinis pasiskirstymas esant skirtingoms pagrindo temperatūroms  $t_p$ : 1 -  $t_p = 80^\circ \text{C}$ , 2 -  $t_p = 50^\circ \text{C}$ , 3 -  $t_p = 10^\circ \text{C}$ . Sluoksnio garinimo greitis –  $3 \mu\text{m}/\text{min}$

Elektrofotografiniai a-Se sluoksniai, pagaminti aukštoje temperatūroje, yra fotojautrūs ne tik mėlynoje, bet ir raudonoje spektro srityje. Raudona šviesa, praėjusi per a-Se sluoksnį, sugerama trigonalinio Se pasluoksnyje, ir čia sukurtos krūvininkų poros atskiriamos ir dreifuoja vidinio elektrinio lauko veikiami. Šiuo atveju trigonalinio Se pasluoksnio – krūvininkų generacijos sluoksnis (KGS), o viršutinis a-Se sluoksnis atlieka krūvio transportinio sluoksnio (KTS) vaidmenį. Tokių dvigubų sluoksnų integralinis fotojautris yra žymiai didesnis, negu viengubo a-Se sluoksnio.

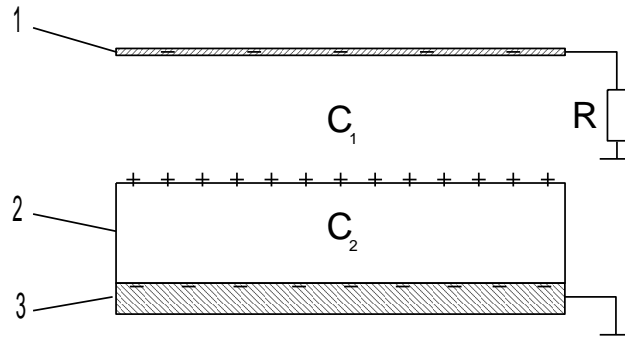
### 3.1.4. Paviršinio potencialo matavimo metodai

Tiriant elektrofotografinio sluoksnio išsielektrinimo tamsoje kinetiką bei matuojant elektrofotografinio sluoksnio spektrinio fotojautrio priklausomybę nuo bangos ilgio reikia matuoti EFS paviršinį potencialą bei jo kitimą.

Bandinio paviršinis potencialas matuojamas naudojant talpinius zondus. Matavimo principas pagrįstas talpiniame zonde indukuoto krūvio matavimu (1.4.1 pav). Talpinis zondas - tai bet kokia elektra laidanti plokštelė (1). Priartinus laidžią plokštelę prie įelektrinto sluoksnio (2) paviršiaus, joje indukuojasi krūvis, kurio dydį lemia sluoksnio paviršinis potencialas bei elektrinių talpų sluoksnio paviršius – zondas  $C_1$  ir sluoksnio paviršius - sluoksnio pagrindas  $C_2$  (3) santykis.

Matuoti krūvį tiesiogiai yra sudėtinga. Naudojami keli matavimo metodai.

Vienas iš būdų yra virpančio zondo (arba dinaminio elektrometro) metodas. Šiame metode keičiamas talpos dydis tarp sluoksnio paviršiaus ir zondo  $C_1$ . Gaunamas kintamas signalas proporcingas šios talpos moduliacijos gyliui, talpų  $C_1/C_2$  santykiui bei paviršinio potencialo dydžiui. Kadangi su dinaminium elektrometru įvykdomas nuolatinio dydžio pakeitimas kintamu, tai tolesnis kintamo signalo stiprinimas leidžia pasiekti didelį sistemos jautrį, kartu eliminuojant nulio dreifą. Naudojamos kelios dinaminųjų elektrometrų konstrukcijos (1.4.2 pav.).

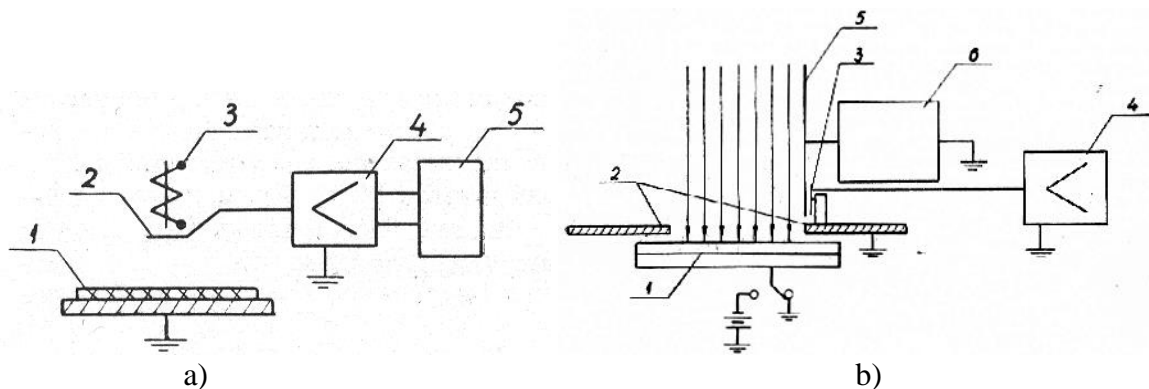


1.4.1 pav. Zondas (1) ir elektrofotografinis sluoksnis (2).

Virpančiame zonde gaunamas signalas proporcingas slinkties srovei, pratekančiai grandinėje virpantis zondas – sluoksnio paviršius. Apkrovos varžoje gaunamas signalas gali būti išreikštas

$$V_s = R \cdot \frac{dQ}{dt} = RC_1 \frac{dU}{dt} + RU \frac{dC_1}{dt}, \quad (1.4.1)$$

čia  $Q$  – indukuotas krūvis,  $U$  – sluoksnio paviršiaus potencialas,  $R$  – zondo apkrovos varža. Tik antrasis formulės narys yra proporcingas matuojamam potencialui  $U$  ir parodo tikrąją paviršinio potencialo kitimo eigą. Tuo tarpu pirmasis narys dinaminio elektrometro atveju įneša klaidingą signalą, kurio dydis tam tikrais atvejais gali viršyti antrojo nario dydį. Pirmojo nario įtaką galima sumažinti didinant talpos kitimo  $C_1(t) = C_1^0(1 + A \cdot \sin \omega t)$  amplitudę  $A$  arba dažnį  $\omega$ , nors tai ir sunkiai techniškai realizuojamas uždavinys. Tada, didėjant išvestinei  $dC_1/dt$ , didės antrojo nario dydis bei mažės paklaidos signalo dalis. Be to pirmojo signalo įtaką galima sumažinti naudojant dažninę filtraciją. Selektivių stiprintuvu stiprinant  $\omega$  dažnio signalą pirmojo nario įnašas gali būti daug kartų nuslopintas.



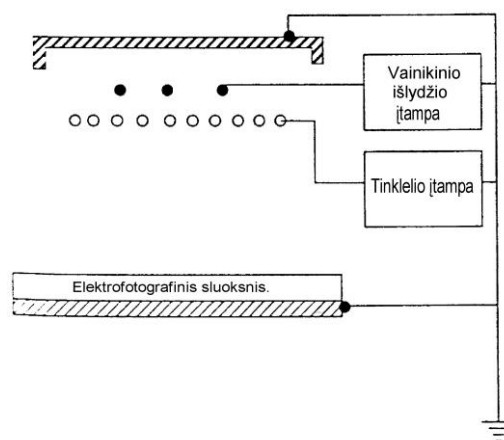
1.4.2 pav. Dinaminųjų elektrometrų schemas. a – su virpančiu zonu virš sluoksnio paviršiaus (1 – tiriamas sluoksnis, 2 – signalinis elektrodas, 3 – elektromagnetinė virpinimo sistema, 4 – stiprintuvas, 5 – registruojantis prietaisas). b – su besisukančiu disku su išpjovomis (1 – tiriamas sluoksnis, 2 – ekranas, 3 – signalinis elektrodas, 4 – selektyvus stiprintuvas, 5 – besisukantis diskas su išpjovomis, 6 – variklis)

Norint stebėti potencialo kitimus, kurių charakteringa kitimo trukmė yra mažesnė nei kelios milisekundės, įprastiniai dinaminės sistemos elektrometrai tampa netinkami dėl išaugusio 1.4.1 formulės pirmojo nario, t.y.  $C_1 \cdot dU/dt > U \cdot dC_1/dt$ . Be to negalima stebėti trumpesnių potencialo kitimų nei talpos moduliacijos dažnis. Tokiais atvejais naudojamos potencialo matavimo sistemos su nejudančiu zonu.

### 3.1.5. Elektrofotografinio sluoksnio įelektrinimas

Tyrinėjant elektrofotografinius sluoksnius jų paviršius yra įelektrinamas. Tai galima padaryti vainikinio išlydžio elektrintuvais, tokiais kaip korotronas ir skorotronas. Jų pagrindą sudaro viena ar kelios 40-70 μm storio vielytės. Vainikinio išlydžio elektrintuvai pasižymi dideliu efektyvumu. Trukumais būtų tai, kad jie skleidžia pakankamai didelį kiekį ozono, azoto oksido ir ultravioletinę spinduliuotę. Ypač daug jų išsiskiria elektrinant neigiamai. Todėl siekiama sukurti tokias EFS struktūras, kurias reiktų elektrinti teigiamai.

Vainikinis išlydis be ekranuojančio elektrodo dažniausiai duoda netolydų įelektrinimą. Mažesnę įelektrinimo netolydumą duoda korotronas, kuris buvo pasiūlytas 1958 metais. Korotronas tai vainikinio išlydžio elektrizatorius, kuris turi pagalbinių elektrodą, patalpintą virš vainikinio elektrodo ir elektrinamo sluoksnio. Pagalbinio elektrodo paskirtis keisti lauko geometriją, tam, kad užtikrintų tolygų įelektrinimą. Dažniausiai pagalbiniis elektrodas turi žemesnę potencialą, negu vainikinis elektrodas. Kitas elektrizatorius – skorotronas – turi metalinį tinklelį tarp vainikinio išlydžio elektrodo ir elektrofotografinio sluoksnio. Tinklelio paskirtis analogiška vakuuminio triodo valdančiajam tinkleliui. Prie tinklelio prijungiama potencialas, artimas tam, kurį norima suteikti elektrofotografiniam sluoksniui. Skorotronas užtikrina dar geresnę elektrinimo vienalytiškumą.



1.5.1 pav. Elektrintuvo skorotronto schema

## 3.2. Darbo priemonės ir matavimų eiga

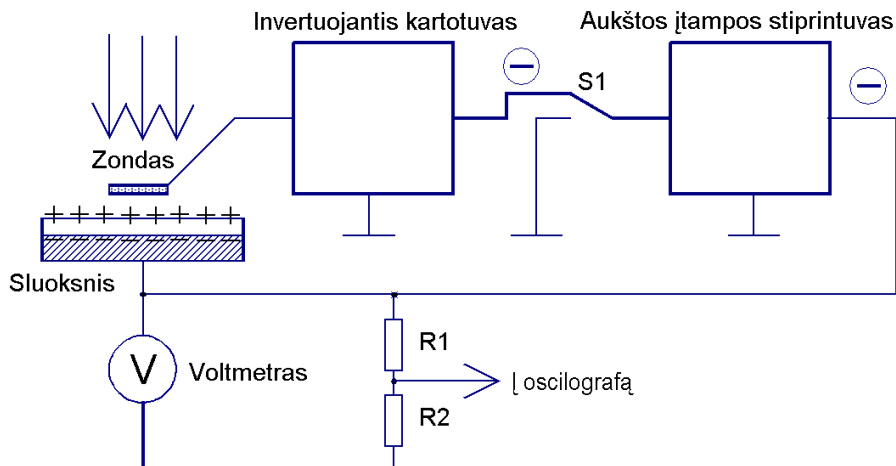
### 3.2.1. Elektrofotografinio sluoksnio paviršiaus potencialo matavimo stendo ypatumai ir jo paruošimas

Tyrimo stendas leidžia įelektrinti tiriamą elektrofotografinį sluoksnį ir greitai po elektrinimo matuoti jo paviršinį potencialą. Tyrimo stendas pritaikytas 45 x55 mm dydžio bandiniams, bet galima tirti ir kiek mažesnius sluoksnelius.

Skyriuje 1.4. aprašyti paviršinio potencialo matavimo būdai leidžia gauti signalą, proporcingą potencialui, tačiau norint gauti absoliučią potencialo vertę būtina atlikti zondo jautrio gradavimą, nes jautris priklauso nuo daugelio zondo schemas parametrų. Be to zondo jautris gali

keistis ilgo eksperimento metu dėl įvairių trikdančių faktorių. Darbe gali būti naudojama matavimo sistema, kurioje nereikalingas gradavimas. Jos struktūra parodyta 2.1.1 pav.

Šios sistemos veikimas pagrįstas neigiamo grįžtamojo ryšio veikimu. Zondo stiprintuvas paprastai duoda invertuotą signalą, o aukštos įtampos stiprintuvas būna neinvertuojantis. Stiprintuvas savo išėjimo signalu mažina potencialų skirtumą tarp sluoksnio paviršiaus ir zondo. Kai elektrinio lauko stipris tarp zondo ir sluoksnio paviršiaus pasidaro artimas nuliui, aukštos įtampos stiprintuvo išėjime nusistovi įtampa artima paviršiniam sluoksnio potencialui. Kad taip įvyktų, abu schemas stiprintuvai turi turėti pakankamai didelį stiprinimą.



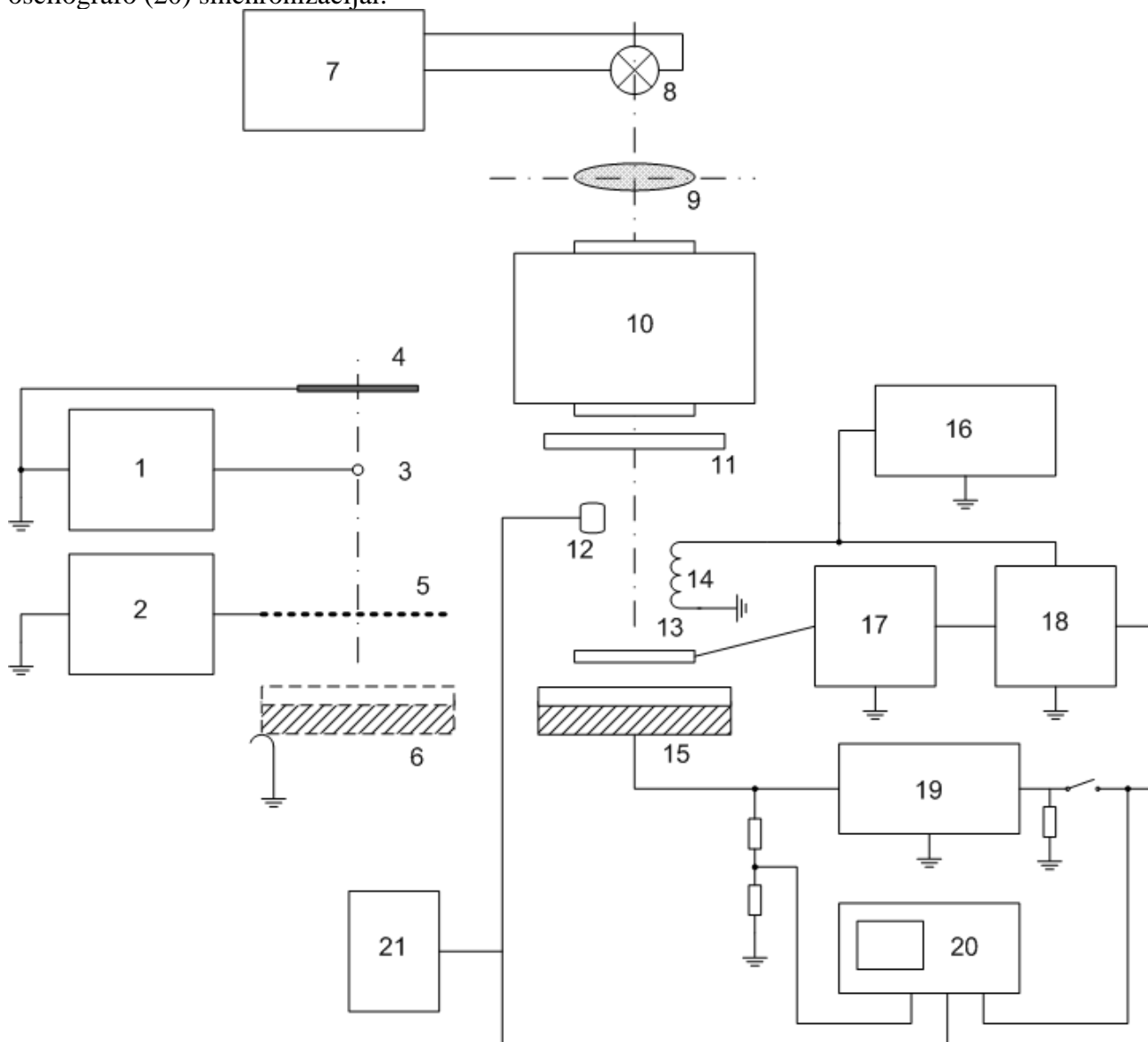
2.1.1 pav. Sluoksnio paviršinio potencialo matavimas, naudojant kompensuojantį stiprintuvą

Reali eksperimentinio įrenginio schema parodyta 2.1.2 pav. Aukštos įtampos šaltinis (1) ir tinklelio potencialo šaltinis (2) naudojami skorotrono tipo elektrintuve (3, 4, 5). Įelektrintas tiriamasis sluoksnis (6) elektrinamas, kai perstumiamas į elektrinimo padėtį. Darbo metu registruojami potencialo kitimai nėra labai greiti, todėl sluoksnio paviršinio potencialo matavimui darbe naudojamas virpantis zondas (13). Virpesių generatoriaus signalas virpina zondą (16). Jo mechaninio virpėjimo dažnis parenkamas artimas (bet truputį besiskiriantis) mechaninio rezonanso dažniui. Sinchrodetektoriaus panaudojimas (18) su virpančiu leidžia atpažinti sluoksnio paviršinio potencialo ženklą ir tuo garantuoja kompensavimo sistemos veikimą tiek teigiamo, tiek ir neigiamo elektrinimo atvejais. Kad sinchrodetektorius teisingai detektuotų kintamos įtampos signalą, būtina suderinti fazės sukimo grandinę (rankenėlė „Fazė“, 2.1.3 pav.), nes rezonanso sistemose susidaro tam tikri fazės postūmiai. Fazės derinimo metu sinchrodetektoriaus signalo integravimo pastovioji  $RC$  sumažinama, nustatant  $C_{\text{sinchrodet.}} = 0$ . Įjungus gradavimo įtampą derinama fazė ir vien tik teigiamus arba vien neigiamus pusperiodžius. Suderinus fazę padidinama sinchrodetektoriaus  $RC$ , pasukant  $C_{\text{sinchrodet.}}$  rankenėlę į 7 padėtį. Tai padarius galima įjungti aukštos įtampos kompensuojantį stiprintuvą. Registruojančiu prietaisu matuojamas varžiniu dalikliu padalintas aukštos įtampos stiprintuvo signalas. Galima matuoti ir nenaudojant kompensacinio stiprintuvo. Tuo atveju reikia atlikti zondo jautrio gradavimą. Tam prie sluoksnio pagrindo prijungiamas įtampos šaltinis perjungėju „Gradavimas“ (2.1.3 pav.). Oscilografu matuojamas sinchrodetektoriaus signalo dydis apskaičiuojamas perdavimo koeficientas.

Sluoksnis elektrinamas paspaudus mygtuką „Elektrinimas“. Tada automatiškai atjungiamas kompensuojančio grįžtamojo ryšio grandinė, sluoksnio laikiklis perstumiamas po vainikinio išlydžio elektrizatoriumi ir įjungiamas aukštos įtampos šaltinis (1). Elektrinimo trukmė parenkama perjungėju „Elektrinimo trukmė“. Pasibaigus elektrinimui sluoksnis grįžta į potencialo matavimo padėtį. Sluoksniui grįžus reikia nedelsiant pradėti matuoti išsielektrinimo kinetiką apšvietus monochromatine šviesa. Šviesa įjungiamas atidarant sklendę (11) ir suformuojant „pusiau begalinį“ monochromatoriaus (10) šviesos impulsą. Tam spaudžiamas mygtukas „Sklendė“ arba jungiamas jungiklis „Sklendė“ elektrintuvo tinklelio ir šviesos sklendės valdymo bloke (2.1.4 pav.). Šviesos

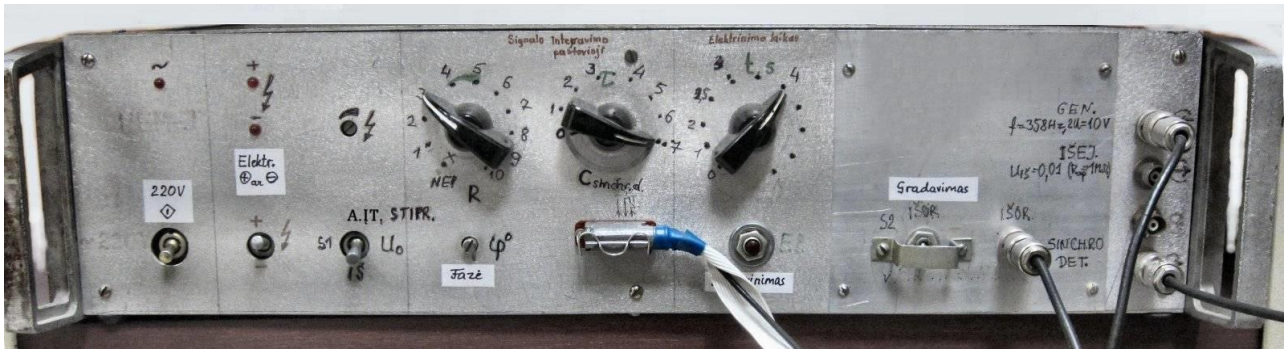


impulso pradžią registruoja fotodiodas (12). Jo signalas panaudojamas kinetiką registruojančio oscilografo (20) sinchronizacijai.



2.1.2 pav. Elektrofotografinio sluoksnio spektrinio fotojautrio tyrimo aparatūros schema:

1 – aukštos įtampos šaltinis, 2 – įtampos šaltinis, 3 – vainikinės iškvovos elektrodas, 3 – kontraelektrodas, 5 – tinklelis, 6 – elektrofotografinis sluoksnis elektrinimo padėtyje, 7 – lempos maitinimo šaltinis, 8 – lempa, 9 – kondensatorius, 10 – monochromatorius, 11 – šviesos sklendė, 12 – fotodiodas šviesos registracijai ir sinchronizacijai, 13 – virpantis zondas, 14 – zondo virpinimo sistema, 15 – elektrofotografinis sluoksnis matavimo padėtyje, 16 – virpesių generatorius, 17 – kartotuvai, 18 – sinchrodetektorius, 19 – kompensuojantis stiprintuvas, 20 – registruojantis prietaisas (skaitmeninis oscilografas), 21 – fotodiodo signalo matuoklis.



2.1.3 pav. Pagrindinio valdymo bloko priekinis skydelis



2.1.4 pav. Elektrintuvo tinklelio ir šviesos sklendės valdymo blokas

### 3.2.2. Matavimų eiga ir rezultatų analizė

Spektrinio fotojautrio priklausos matavime sluoksnis turi būti apšviečiamas pusiau begaliniu monochromatinės šviesos impulsu, kurio intensyvumas turi būti  $10^{17}$  kvantų/ $m^2s$ . Tokį intensyvumą reikia išlaikyti keičiant bangos ilgį. Šviesos intensyvumas registruojamas įmontuotu fotodiodu ir prie jo prijuntu voltmetru. Tačiau tiek lempos (8) spektras, tiek fotodiodo fotojautris nėra pastovūs. Todėl pradėdant darbą reikia atlikti monochromatoriaus šviesos intensyvumą registruojančio fotodiodo gradavimą. Tam apšviestumo energijos matuokliu IL1400 matuojamas apšvietimo energijos tankis toje srityje, kur bus patalpintas tiriamasis sluoksnis. Keisdami monochromatoriaus plyšius išgauname  $10^{17}$  kvantų/ $m^2s$  apšviestumą ir užregistruojame fotodiodo parodymus. Vėliau šie parodymai bus reikalingi tokio paties apšviestumo atkūrimui. Duomenis surašome į 1 lentelę.

Tiriamas elektrofotografinis sluoksnis pritvirtinamas sluoksnio laikiklyje. Tvirtinant būtina atkreipti dėmesį, kad tiriamojo bandinio laidus posluoksnis patikimai susijungtų su sluoksnio laikikliu. Perjungėju prijungus į sluoksnio pagrindą kontrolinę įtampą ( $\sim 200$  V) patikrinamas sinchrodetektoriaus suderinimas.

Tiriamąjį elektrofotografinio sluoksnio išsielektrinimo kinetikos matuojamos elektrindami sluoksnį iki pastovaus potencialo, kuris sudarytų elektrinio lauko stiprį iki  $10^6$  V/cm. Sluoksnio spektrinis fotojautris nustatomas išmatuojant išsielektrinimo kinetiką kiekvienam pasirinktam bangos ilgiui iš tyrimo intervalo esant  $10^{17}$  kvantų/ $cm^2s$  apšviestumui ir nustatant ekspozicijos trukmę  $t_L$ , per kurią pradinis potencialas  $U_0$  sumažėja du kartus. Remiantis šiais matavimais sudaromas sluoksnio spektrinio fotojautrio pasiskirstymo grafikas. Fotogeneracijos kvantinis našumas nustatomas analizuojant fotoišsielektrinimo kinetiką. Pradinėje kinetikos dalyje surandama maksimalaus išsielektrinimo greičio vertė  $dU/dt$ , ir pagal formulę (1.3.7-8) apskaičiuojamas krūvininkų fotogeneracijos kvantinis našumas.

Matavimų duomenys surašomi į priede pateiktą 1 lentelę.

### 3.3. Literatūra

1. J. Sidaravičius, E. Montrimas, *Fizikiniai teoriniai informacijos registravimo ir spausdinimo procesų pagrindai*, Vilnius: Technika, 2005.
2. P.M. Borsenberger, D.S. Weiss, *Organic Photoreceptors for Xerography*, New York: Marcel Dekker, 1998.
3. A.Undzėnas, *Organinių junginių fotonikos pagrindai*, Vilnius: Vilniaus universitetas, Fizikos institutas, 1999.
4. Гайдялис В.И., Маркевич Н.Н., Монтримас Э.А., *Физические процессы в электрофотографических слоях ZnO*, Вильнюс: Минтис, 1968.

Priedas 3 darbui

1 lentelė. Duomenys šviesos intensyvumo gradavimui bei sluoksnio spektrinio fotojautrio matavimas

Bangos ilgis / nm	Kvantai / m <sup>2</sup> s	$P / \text{W/m}^2$	$P / \mu\text{W/cm}^2$	Fotojautrio įtampa / V	$t_{1/2} / \text{s}$	$U_0 / \text{V}$	$(dU/dt)_{\text{max}} / \text{V/s}$	$S_{\lambda} / \text{m}^2\text{J}^{-1}$	$\beta$
400	10 <sup>17</sup>	0.04966	4.966						
420	10 <sup>17</sup>	0.0473	4.730						
440	10 <sup>17</sup>	0.04515	4.515						
460	10 <sup>17</sup>	0.04318	4.318						
480	10 <sup>17</sup>	0.04138	4.138						
500	10 <sup>17</sup>	0.03973	3.973						
520	10 <sup>17</sup>	0.0382	3.820						
540	10 <sup>17</sup>	0.03679	3.679						
560	10 <sup>17</sup>	0.03547	3.547						
580	10 <sup>17</sup>	0.03425	3.425						
600	10 <sup>17</sup>	0.03311	3.311						
620	10 <sup>17</sup>	0.03204	3.204						
640	10 <sup>17</sup>	0.03104	3.104						
660	10 <sup>17</sup>	0.0301	3.010						
680	10 <sup>17</sup>	0.02921	2.921						
700	10 <sup>17</sup>	0.02838	2.838						
720	10 <sup>17</sup>	0.02759	2.759						
740	10 <sup>17</sup>	0.02684	2.684						
760	10 <sup>17</sup>	0.02614	2.614						
780	10 <sup>17</sup>	0.02547	2.547						
800	10 <sup>17</sup>	0.02483	2.483						
820	10 <sup>17</sup>	0.02422	2.422						
840	10 <sup>17</sup>	0.02365	2.365						
860	10 <sup>17</sup>	0.0231	2.310						
880	10 <sup>17</sup>	0.02257	2.257						
900	10 <sup>17</sup>	0.02207	2.207						
920	10 <sup>17</sup>	0.02159	2.159						
940	10 <sup>17</sup>	0.02113	2.113						
960	10 <sup>17</sup>	0.02069	2.069						
980	10 <sup>17</sup>	0.02027	2.027						
1000	10 <sup>17</sup>	0.01986	1.986						

# Turinys

<b>1. Krūvininkų dreifinio judrio tyrimas organiniame fotoreceptoriuje elektrofotografiniu lėkio trukmės metodu .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1. Teorinė medžiaga .....</b>	<b>2</b>
1.1.1. <i>Krūvininkų pernaša ir dreifinis judris organiniuose fotopulsaidininkuose.....</i>	2
1.1.2. <i>Dreifinio judrio matavimo metodai organiniuose puslaidininkuose .....</i>	3
1.1.3. <i>Fotoreceptoriaus išsielektrinimas stipraus impulsinio eksponavimo atveju .....</i>	7
1.1.4. <i>Greitai kintančio paviršinio potencialo matavimas.....</i>	7
<b>1.2. Darbo priemonės ir matavimų eiga.....</b>	<b>10</b>
1.2.1. <i>Krūvininkų pernašos tyrimo elektrofotografiniame režime aparatūra .....</i>	10
1.2.2. <i>Matavimų eiga .....</i>	12
<b>1.3. Literatūra.....</b>	<b>14</b>
<b>2. Organinio fotoreceptoriaus ciklinio nuovargio ir fotojautrio tyrimas .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1. Teorija.....</b>	<b>15</b>
2.1.1. <i>Organinių fotoreceptorių ypatybės .....</i>	15
2.1.2. <i>Paviršinio potencialo matavimo metodai .....</i>	19
2.1.3. <i>Organinių fotoreceptorių įelektrinimas .....</i>	21
<b>2.2. Darbo priemonės ir matavimų eiga.....</b>	<b>22</b>
2.2.1. <i>Organinių fotoreceptorių tyrimo stendo ypatumai .....</i>	22
2.2.2. <i>Matavimų eiga .....</i>	24
<b>2.2. Literatūra.....</b>	<b>29</b>
<b>3. Elektrofotografinio sluoksnio spektrinio fotojautrio pasiskirstymo tyrimas.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1. Teorinė medžiaga .....</b>	<b>30</b>
3.1.1. <i>Fotoreceptorių tipai ir pagrindinės charakteristikos .....</i>	30
3.1.2. <i>Išsielektrinimo tamsoje mechanizmai ir dėsningumai .....</i>	31
3.1.3. <i>Išsielektrinimo mechanizmai veikiant spinduliuotei bei dėsningumai.....</i>	35
3.1.4. <i>Paviršinio potencialo matavimo metodai .....</i>	37
3.1.5. <i>Elektrofotografinio sluoksnio įelektrinimas.....</i>	39
<b>3.2. Darbo priemonės ir matavimų eiga.....</b>	<b>39</b>
3.2.1. <i>Elektrofotografinio sluoksnio paviršiaus potencialo matavimo stendo ypatumai ir jo paruošimas .....</i>	39
3.2.2. <i>Matavimų eiga ir rezultatų analizė .....</i>	42
<b>3.3. Literatūra.....</b>	<b>43</b>
<b>Turinys .....</b>	<b>45</b>