

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Eksperimentaalfüüsika ja tehnoloogia instituut

Mihkel Veske

**PDMS KILE SUHTELISE DIELEKTRILISE LÄBITAVUSE
JA LÄBILÖÖGIPINGE MÕÕTMINE**

Bakalaureusetöö

Juhendaja: vanemteadur Andres Punning

Tartu 2011

Sisukord

SISUKORD	1
1 SISSEJUHATUS	2
2 DIELEKTRILINE LÄBITAVUS	3
2.1 DIELEKTRILISE LÄBITAVUSE MÕÕTMINE	4
<i>Ühe mõõtmisega puutuvate elektrootide meetod (meetod 1)</i>	5
<i>Kahe mõõtmisega puutuvate elektrootide meetod (meetod 2)</i>	5
<i>Kahe mõõtmisega mittepuutuvate elektrootide meetod (meetod 3)</i>	6
2.2 MAHTUVUSE MÕÕTMINE	7
2.3 MAHTUVUSE ARVUTAMINE	9
2.4 SAGEDUSE N OPTIMEERIMINE	10
2.5 TASAPARALLEELNE PLAAT	12
2.6 KATSEKORRALDUS	14
2.7 MÕÕTMISTULEMUSED	15
3 LÄBILÖÖGIPINGE	16
3.1 POLÜMEERI LÄBILÖÖGIPINGET MÕJUSTAVAD TEGURID	17
<i>Keskkond</i>	17
<i>Niiskus</i>	17
<i>Temperatuur</i>	17
<i>Pinge mõjumise aeg</i>	18
<i>Polümeeri paksus</i>	18
<i>Elektrooti kuju</i>	18
3.2 LÄBILÖÖGIPINGE MÕÕTMINE.....	19
3.3 KATSEKORRALDUS	21
3.4 MÕÕTMISTULEMUSED	23
4 KOKKUVÕTE	24
5 SUMMARY	25
6 VIITED	26
LISAD 1	28
LISAD 2	29
LISAD 3	30

1 Sissejuhatus

Viimastel aegadel on aktuaalseks muutunud mitmesuguste tehniliste seadmete miniaturiseerimine. Kiibistatakse mitte ainult elektroonikat, vaid üha enam ka mehaanikat. Miniaturiseerimine ei saa aga toimuda ilma, et mõõtmeid kahandaks ka täiturmehhanismid koos täiturite ehk aktuaatoritega. Seoses sellega on huviorbiiti tõusnud ained ja materjalid, mis suudavad elektrilise mõjutamise tulemusena oma kuju muuta (st toimida aktuaatorina).

Üheks selliseks aineteklassiks on elektroaktiivsed polümeerid (EAP). EAPd võib jagada kahte klassi: elektroonseteks ja ioonseteks [1]. Elektroonsed EAPd muudavad oma kuju kuloniliste (elektrostriktiivsete, elektrostaatiliste, piesoelektriliste ja ferroelektriliste) jõudude mõjul. Ioonseid EAPsid aktueerivad elektrokeemilised protsessid, ioonide liikuvus ja difusioon. Ioonseid EAPd töötavad küll madalate pingete juures, kuid tarbivad võimsust, et hoida staatilist asendit.

Elektrolüüdi kuivamise tõttu on probleemne selle töötamine õhu käes. Elektroonsed EAPd see-eest on õhus küllalt stabiilsed ning ka võimsuskadu asendi hoidmisel on tühine. Vastukaaluks eelistele on nende puudus töötada hästi vaid kõrgete pingete juures (suurusjärg kilovolt).

Käesoleva töö eesmärk on aidata kaasa elektroonsete EAPde, täpsemalt dielektriliste elektroaktiivsete polümeeride (DEAPde) toimimise parandamisele. Teoorias [2] on teada, et DEAPde aktueerimisvõime on seda suurem, mida suuremat pinget need ilma läbilöögita kannatavad ja mida suurem on aktueeruva materjali Poissoni koefitsient ning suhteline dielektriline läbitavus ϵ .

Aktueeruvaks materjaliks on eriline silikoonkumm PMDS, polüdimetüülsiloksaan. PDMSi dielektrilist läbitavust suurendada pole kuigi keeruline, tuleb kilesse vaid sobivat ainet sisse segada või lahustada. Probleeme tekitab tõik, et ϵ suurendamisel halvenevad tavaliselt kaks ülejäänud parameetrit – pingetaluvus ja Poissoni koefitsienti mõjutav Youngi moodul.

Et pärast uue koostisega kile valmimist saaks teada, kuidas on muutunud tema suhteline dielektriline läbitavus ja läbilöögitugevus, töötati käesoleva uurimistöo raames välja kaks meetodikat vastavate suuruste mõõtmiseks. Kuivõrd meetodikaid hakatakse rakendada üsna kitsa ülesande raames, ei seatud ka mõõtetäpsusele väga kõrgeid nõudmisi ega ootusi. 10% mõõdetu kõikumist loeti heaks tulemuseks.

2 Dielektriline läbitavus

Dielektriline läbitavus ϵ väljendab elektrivälja mõju ainele ja aine mõju elektriväljale. Dielektrilise läbitavuse määrab ära aine võime välja mõjul polariseeruda ning ta näitab, kui mitu korda aine nõrgendab elektrivälja võrreldes selle tugevusega vaakumis,

$$\epsilon = \frac{E_{\text{vaakum}}}{E_{\text{aine}}}$$

Elektriväli nõrgeneb, kuna aine polaarsed osakesed (molekulid, kristallid) orienteerivad end välja sihis suunda, kus nende potentsiaalne energia on minimaalne, mis vastab välise elektrivälja suunale vastupidisele orientatsioonile.

Eksperimendist on teada, et materjali polariseeritus ei muutu välise välja muutudes hetkeliselt vaid mõningase viivitusega. Seepärast ei muuda aine üldiselt mitte ainult talle langeva elektrivälja tugevust, vaid ka faasi ning dielektrilist läbitavust on mõistlik vaadelda kui kompleksset suurust,

$$\vec{\epsilon} = \epsilon_r + i \cdot \epsilon_i = \epsilon \cdot e^{i \cdot \delta}$$

Selle reaalosa ϵ_r näitab, kui palju välise välja energiast salvestatakse ainesse, kusjuures enamike tahkiste ja vedelike puhul $\epsilon_r > 1$. Kompleksse dielektrilise läbitavuse imaginaarosa ϵ_i , tuntud ka kui kaofaktor näitab, kui dissipatiivselt mõjub aine välisele väljale. ϵ_i on alati suurem nullist ning tavaliselt palju väiksem kui ϵ_r . Kaofaktor hõlmab endas nii dielektrilistest kadudest kui juhtivusest tingitud efekte [3].

Kompleksne dielektriline läbitavus on tavaliselt üsna keeruline funktsioon ainele rakendatava elektrivälja sagedusest ν , mis muuhulgas peab arvestama erinevatel sagedustel esinevat erineva tugevusega dispersiooni ja rahuldama Kramersi-Kronigi seoseid.

Aine mõju staatilisele elektriväljale kirjeldatakse staatilise dielektrilise läbitavuse ϵ_s ehk ϵ_{DC} kaudu,

$$\epsilon_s = \lim_{\nu \rightarrow 0} \epsilon(\nu)$$

Kõrgetel sagedustel on vastavaks tähistuseks ϵ_∞ . Staatiline dielektriline läbitavus on küllalt hea suurus, mida kasutada ka nullist erinevate madalate sageduste juures, kusjuures kitsas sagedusvahemikus võib seda vaadelda kui konstantset suurust.

Kuna antud uurimistöökontekstis dielektrilise läbitavuse faasimuutvad omadused huvi ei paku, vaadeldakse edaspidi vaid dielektrilise läbitavuse amplituudi ϵ .

2.1 Dielektrilise läbitavuse mõõtmine

Dielektrilise läbitavuse mõõteviis sõltub oluliselt sellest, millises sageduspiirkonnas tulemust saada soovitakse. Ilmselt kõige operatiivsemalt, täpsemalt ja mugavamalt saab ϵ määrata optilises diapsoonis, kus kasutatakse ellipsomeetrilisi ja kahekordse polarisatsiooni interferomeetrilisi (DPI – *dual polarization interferometry*) meetodeid [4]. Elektrotehnikas levinud (madal-)sageduste piirkonnas on ϵ kombeks määrata mõõtekondensaatori vahendusel, kasutades nn paralleelsete plaatide meetodit.

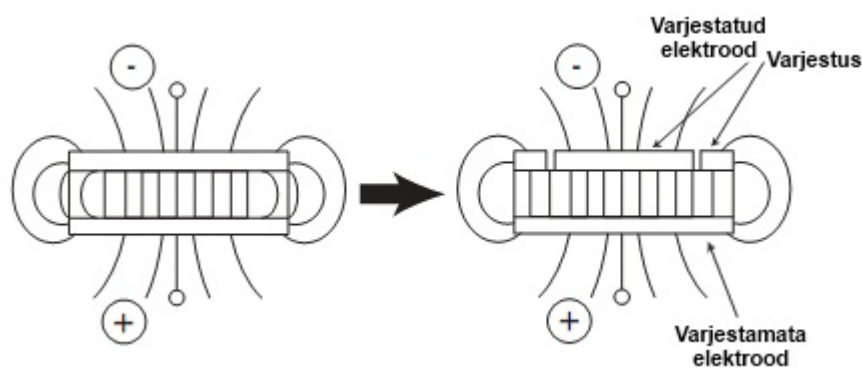
Paralleelsete plaatide (PP) meetodi kohaselt, mida ASTM D150 standardi [5] järgi kutsutakse ka kolme klemmi meetodiks (*three terminal method*), koostatakse ϵ mõõtmiseks uuritavast ainest ja kahest fikseeritud pindalaga siledast elektroodist mõõtekondensaator, mille mahtuvuse ja plaatide vahekauguse teadmisega saab kergesti arvutada aine suhtelise dielektrilise läbitavuse.

PP-meetodi iseärasuseks on, et tuleb arvestada elektroodide lõplikke mõõtmeid võrreldes plaatide vahekaugusega. Valem kondensaatori mahtuvuse arvutamiseks

$$C = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{S}{h}$$

- C – mahtuvus, S – väiksema elektroodi pindala, h – elektroodide keskmine vahekaugus,
- ϵ_0 – vaakumi dielektriline läbitavus, SI süsteemis $\epsilon_0 \approx 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m,

eeldab, et S on võrreldes plaatide vahekaugusega lõpmata suur. Reaalsetes tingimustes see eeldus aga täidetud pole ja mõõdetud mahtuvus ületab arvutusliku tuntaval määral. Viga tekib elektroodide äärealadel põhimahtuvusele lisanduvast parasiitmahtuvusest, mida saab oluliselt vähendada, kui ümbritseda üks elektroodidest varjestusega, mis võtab parasiitmahtuvuse enda kanda ja võimaldab põhielektroodide vahel moodustuda oluliselt homogeensemaj elektriväljal (Joonis 1). Varjestatud elektroodi kasutamisel võib äärealadel tekkiva parasiitmahtuvuse mõju lugeda tühiseks.



Joonis 1. Mõõtekondensaatori plaatidevahelise elektrivälja jõujoonte kuju sõltuvus varjestusest [3].

Kui mingil põhjusel (näiteks vastavate katsevahendite puudumisel) pole võimalik varjestatud elektroodi kasutamine, saab parasiitmahtuvust mingil määral arvesse võtta ka teoreetilisel tasandil. Lisad 1-s toodud tabelist saab katsekorraldusele vastavast lahtrist leida parasiitmahtuvuse C_e ligikaudse väärtuse, mis lahutatuna mõõdetud mahtuvusest peaks andma suuruse, mida saab kasutada ε arvutamiseks. Tuleb siiski märkida, et eelistatum on kasutada varjestatud elektroode, kuna nii saab täpsemad tulemused.

Paralleelsete plaatide meetodit saab ε mõõtmiseks kasutada vähemalt kolmel viisil:

- ühe mõõtmisega puutuvate elektroodide meetodil,
- kahe mõõtmisega puutuvate elektroodide meetodil,
- kahe mõõtmisega mittepuutuvate elektroodide meetodil.

Ühe mõõtmisega puutuvate elektroodide meetod (meetod 1)

Selle meetodi kasutamisel leitakse ε kondensaatorist, kus uuritav materjal on vahetus kokkupuutes elektroodidega. ε ja tema B-tüüpi mõõtemääramatus 95%-sel usaldusnivool ühtlase jaotuse eeldusel

$$\varepsilon = \frac{4}{\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{C \cdot h}{d^2} \qquad u_\varepsilon = \varepsilon \cdot \sqrt{\left(\frac{u_C}{C}\right)^2 + \left(\frac{1.65 \cdot \Delta h}{\sqrt{3} \cdot h}\right)^2 + \left(\frac{3.3 \cdot \Delta d}{\sqrt{3} \cdot d}\right)^2}$$

- d – varjestatud (ringja) elektroodi läbimõõt.

Kirjeldatavatest meetoditest on meetod 1 lihtsaim ja nõuded katsevahenditele kõige vabamad, mistõttu seda kasutatakse dielektrilise läbitavuse mõõtmisel kõige sagedamini. Üks oluline vigade allikas, mis selle meetodiga on kerge tekkima, on elektroodi ja mõõdetava aine vahele jääv õhukiht. Õhukihi toimel lisandub uuritavast ainest kondensaatorile järjestikku õhkkondensaator, mille mõju on seda suurem, mida väiksem on aine paksus ja mida suurem selle ε [3].

Õhukihi toime saab elimineerida, kui jääkade elektroodide asemel sadestada elektroodid uuritava aine pinnale või kasutada spetsiaalseid korduvkasutatavaid elektritjuhtivaid kilesid, milledest üks peab olema ka varjestatud. Nii saab küll (eriti õhukeste ainekihtide korral) oluliselt suurendada ε määramise täpsust, kuid toob endaga kaasa tülrika vajaduse uuritava materjali ettevalmistamiseks, mistõttu seda kasutatakse vaid eriti kriitilistel või suurt täpsust taotlevatel juhtudel.

Kahe mõõtmisega puutuvate elektroodide meetod (meetod 2)

Üldine katsekorraldus erineb eelkirjeldatast selle poolest, et kondensaatori mahtuvust mõõdetakse kahel käigul: esimene kord siis, kui elektroodide vahel on uuritav aine (mahtuvus C) ja teisel korral, kui selle asemel on kuiv õhk (C_0). Uurimisobjekti dielektriline läbitavus avaldub kui

$$\varepsilon = C / C_0$$

st valemis ei sisaldu plaatide pindalad S . Plaadid peavad küll mõlemal juhul olema üksteisest ühekaugusel, kuid kuna selle numbrilise väärtuse teadmine pole otseselt vajalik, saab sobiva katsekorraldusega ka kauguse määramise ebatäpsusest tuleneva vea kõrvaldada.

Meetod pole siiski väga märkimisväärselt täpsem kui jääkade elektrodidega meetod 1, kuna õhukiht elektroodi ja ainetüki vahel peamise veaallikana on alles.

Kahe mõõtmisega mittepuutuvate elektrodide meetod (meetod 3)

Õhukihi mõjust vabanemiseks saab kasutada meetodit, kus mõõtekondensaatori mahtuvus mõõdetakse jällegi kahel korral, koos uuritava ainega ja ilma, hoides elektrodide vahekauguse mõlemal juhul ühesuuruse. Erinevalt 2. meetodist ei viida varjestatud elektroodi sedapuhku uuritava materjaliga kokku, vaid hoitakse õige pisut eemal. Et varjestamata elektrood ja uuritav materjal peavad siiski kontaktis olema, tuleb muidugi hoolitseda nende vaheliste hea kontakti eest. Enamasti on see siiski saavutatav suurema vaevata ning dielektriline läbitavus avaldub seostest [3]

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \frac{S}{x} \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{S}{h}}{\epsilon_0 \cdot \frac{S}{x} + \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{S}{h}} = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S}{h + \epsilon \cdot x} = \frac{\epsilon \cdot C_0 \cdot (h + x)}{h + \epsilon \cdot x} = \frac{C_0 \cdot \frac{H}{h}}{\frac{1}{\epsilon} + \left(\frac{H}{h} - 1\right)}$$

ehk

$$\epsilon = \left(\frac{C_0 \cdot \frac{H}{h}}{C} + 1 - \frac{H}{h} \right)^{-1} = \left[1 - \left(1 - \frac{C_0}{C} \right) \cdot \frac{H}{h} \right]^{-1}$$

kus

- C_0, C – kondensaatori mahtuvus ilma uuritava materjalita ja koos sellega,
- x – uuritava materjali ja varjestatud elektroodi vahelise õhukihi keskmine paksus,
- H – elektrodide keskmine vahekaugus, h – uuritava materjali keskmine paksus.

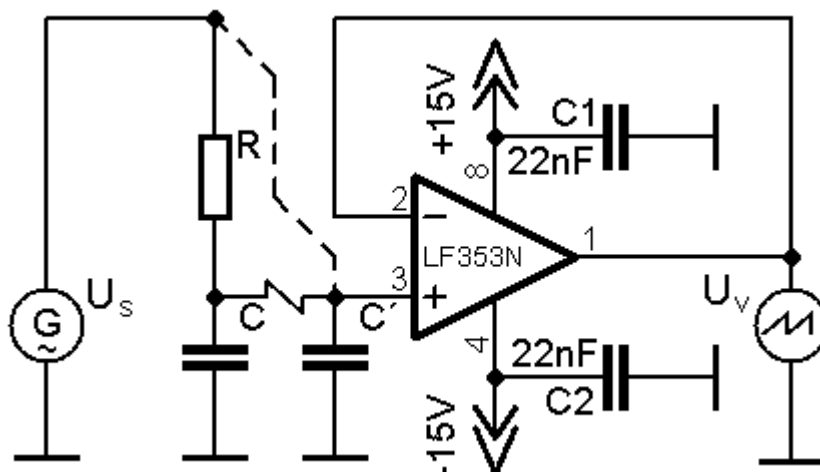
Võrreldes meetodiga 2 on näha, et jällegi pole vaja teada elektroodi pindala, kuid on lisandunud tarvidus mõõta elektrodide vahemaad, mistõttu ka nõuded kondensaatori tehnilisele keerukusele on suuremad.

Alljärgnevas tabelis on kokkuvõtvalt esitatud erinevate meetodite täpsuse ja keerukuse vahekord.

Meetod	1 (jäik elektrood)	2	3	1 (õhuke elektrood)
Täpsus	madal	kõrgem	keskmine	kõrge
Keerukus	madal	kõrgem	keskmine	kõrge
Mõõtmiste arv	1	2	2	1

2.2 Mahtuvuse mõõtmine

Kõige lihtsamaks ja levinumaks viisiks mahtuvuse mõõtmisel on teha seda LCR-meetri abil. Kui mahtuvus jääb nanofaradite suurusjärku, on nende abil teostatav küllalt täpne mõõtmine. Probleem tekib siis, kui mõõdetav mahtuvus jääb väljapoole kättesaadava aparaadi mõõteulatust või sellele väga lähedale. Eeldatavate mahtuvuste alampiirid jäävad antud töös suurusjärku paarkümmend pF.



Joonis 2. Elektriskeem dielektrilise läbitavuse mõõtmiseks.

Mahtuvuse mõõtmiseks koostati takistist R ja mõõterakust C reaktiivne pingejagur (Joonis 2), mille väljundpinge U_v sõltub sisendpingest U_s kui

$$U_v = \frac{(\omega C)^{-1}}{\sqrt{R^2 + (\omega C)^{-2}}} \cdot U_s$$

Et mõõdetav mahtuvus C on eeldatavasti küllaltki väike, tuleb vajalikul määral arvesse võtta ka skeemis esinevaid parasiitseid induktiivsusi, aktiivtakistusi ja mahtuvusi.

1. Induktiivsuste arvestamiseks piisab, kui hoida kasutatavad juhtmed lühikesed ja sirged ning sisendpinge sagedus piisavalt madal (helisageduse piirkonnas).
2. Parasiitsetest aktiivtakistusest (mõõteriista sisendtakistus, juhtmete takistused, kondensaatori plaatide vaheline takistus) olulisim on pingeid mõõtva ostsillograafi sisendtakistus. Kasutatud TDS 2024 korral on see andmelehe [6] kohaselt $1\text{M}\Omega$. Võttes sisendpinge sageduseks 5kHz ja kondensaatori orienteeruvaks mahtuvuseks 30pF , on viimase mahtuvuslik takistus samas suurusjärgus:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 5\text{kHz} \cdot 30\text{pF}} = 1\text{M}\Omega$$

Seega, kuivõrd ostsillograaf on C-ga ühendatud paralleelselt, muudaks tema skeemi lülitamine ilma täiendavate abinõusid tarvidusele võtmata oluliselt skeemi toimimist. Üks võimalus

probleemi lahendamiseks oleks vaadata ostsillograafi andmelehelte järgi tema sisendparameetrid ja viia arvutustesse vastavad parandused. Teiseks variandiks, mis jõudis ka praktikasse, on lülitada pingejaguri ja ostsillograafi vahele üks operatsioonivõimendi baasil pingejärgur, mis suurendaks pingemõõtja sisend- ja vähendaks jaguri väljundtakistust. Operatsioonivõimendi LF353 evib andmelehe [7] andmetel sisendtakistust $10^{12} \Omega$ mis, nagu näitas ka praktika, peaks olema piisav, et lugeda see lõpmata suureks ja jätta arvutustest kõrvale.

3. Parasiitsest mahtuvusest C' võimendi paraku ei päästa. Takisti R ja ühendusjuhtmete mahtuvuse võib lugeda küll tühiseks, kuid kuna kasutatud op-võimendi suur sisendtakistus on saavutatud sisendahelas väljatransistori kasutamise, tingib see arvestatava lisamahtuvuse mõõteahelas. Erinevalt eeltoodud parasiitidest on selle kaasamine arvutustesse siiski küllalt lihtne ja läbipaistev, kuna parasiitne ja mõõdetav mahtuvus on skeemi ühendatud paralleelselt ja nende ühismahtuvus on üksikute mahtuvuste algebraline summa.

Et saavutada signaal-müra võimalikult soodsat suhet, antakse signaaligeneraatorist G pingejaguri sisendisse nii suure amplituudiga signaal, kui palju pingejärgur ilma moonutusteta vähegi on võimeline võimendama. Arusaadavalt asub see piir seda kõrgemal, mida kõrgem on operatsioonivõimendi toitepinge. Andmeleht ei soovita kiibi toiteklemmidele rakendada rohkem kui $\pm 18V$, seega praktikasse jõudnud $\pm 15V$ on üsna viimane stabiilne lagi.

Skeemis esinevad kondensaatorid $C1$ ja $C2$ on toitepinge stabiliseerimiseks, st nende abil püsib pilt ostsillograafi ekraanil oluliselt rahulikum.

Kui võrd tundmatuteks suurusteks mõõteskeemis on nii C kui C' , tuleb kondensaatorraku mahtuvuse mõõtmist alustada parasiitse osa mahtuvuse väljaselgitamisest. Selleks mõõdetakse läbi võimendi (et taandada arvutustest välja 1-st veidi erinev võimendus) esmalt sisendpinge amplituud U_s . Seejärel ühendatakse skeemist välja C , mõõdetakse pinge amplituud U_{v0} jaguril $R-C'$, taastatakse C asukoht skeemis ning korratakse väljundpinge mõõtmist, saades tulemuseks U_v .

Kui sisend- (ja väljund-)pinge sagedus on ν , siis mõõteraku mahtuvus C avaldub kui

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot R} \cdot \left(\frac{\sqrt{U_s^2 - U_v^2}}{U_v} - \frac{\sqrt{U_s^2 - U_{v0}^2}}{U_{v0}} \right)$$

2.3 Mahtuvuse arvutamine

Olgu pinge sisendis

$$\mathbf{U}_s = U_{\text{sis}} \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot t)$$

Siis pinge väljundis

$$\mathbf{U}_{\text{välj}} = \frac{X_C}{R + X_C} \cdot \mathbf{U}_s = \frac{(i \cdot \omega \cdot C)^{-1}}{R + (i \cdot \omega \cdot C)^{-1}} \cdot \mathbf{U}_s$$

Vaadeldgem vaid väljundpinge amplituudi, mida mõõdetakse läbi võimendi, mille võimendus on a:

$$U_V = a \cdot |\mathbf{U}_{\text{välj}}| = a \cdot \sqrt{\left| \frac{(i \cdot \omega \cdot C)^{-1}}{R + (i \cdot \omega \cdot C)^{-1}} \cdot U_{\text{sis}} \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot t) \right| \cdot \left| \frac{(-i \cdot \omega \cdot C)^{-1}}{R + (-i \cdot \omega \cdot C)^{-1}} \cdot U_{\text{sis}} \cdot \exp(-i \cdot \omega \cdot t) \right|} = a \cdot \frac{(\omega \cdot C)^{-1}}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot C)^{-2}}} \cdot U_{\text{sis}}$$

Kuigi a on pingejärguri võimendus ja ligikaudu võrdne 1-ga, on mõistlik ta siiski välja taandada:

$$U_V = a \cdot \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \cdot U_{\text{sis}} = a \cdot \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \cdot \frac{U_s}{a} = \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \cdot U_s$$

kus U_s on sisendpinge amplituud mõõdetuna läbi pingejärguri.

Nüüd, tehes mõõtmise ilma mõõtekondensaatori C-ta, on pinge amplituud väljundis

$$U_{V0} = \frac{(\omega \cdot C')^{-1}}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot C')^{-2}}} \cdot U_s$$

millest

$$C' = \frac{1}{\omega \cdot R} \cdot \frac{\sqrt{U_s^2 - U_{V0}^2}}{U_{V0}}$$

Lülitades mõõteskeemi ka raku C, on pinge mõõtmise tulemuseks

$$U_V = \frac{[\omega(C + C')]^{-1}}{\sqrt{R^2 + [\omega(C + C')]^{-2}}} \cdot U_s$$

millest otsitav mahtuvus

$$C = \frac{1}{\omega \cdot R} \cdot \frac{\sqrt{U_s^2 - U_V^2}}{U_V} - C' = \frac{1}{\omega \cdot R} \cdot \left(\frac{\sqrt{U_s^2 - U_V^2}}{U_V} - \frac{\sqrt{U_s^2 - U_{V0}^2}}{U_{V0}} \right)$$

ja B-tüüpi mõõtemääramatus 95%-sel usaldusnivool ühtlase jaotuse eeldusel

$$u_C = \frac{1.65}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\left(\frac{d}{\mathbf{U}_s} \cdot C \cdot \Delta U_s \right)^2 + \left(\frac{d}{\mathbf{U}_{V0}} \cdot C \cdot \Delta U_{V0} \right)^2 + \left(\frac{d}{\mathbf{U}_V} \cdot C \cdot \Delta U_V \right)^2 + \left(\frac{d}{\mathbf{U}} \cdot C \cdot \Delta U \right)^2 + \left(\frac{d}{\mathbf{R}} \cdot C \cdot \Delta R \right)^2 + \left(\frac{d}{\mathbf{C}'} \cdot C \cdot \Delta C' \right)^2}$$

2.4 Sageduse v optimeerimine

Lähtugem asjaolust, et skeemis esinevate induktiivsuste arvestamata jätmiseks peavad kasutatavad sagedused olema küllalt madalad. Näiteks kui võtta mingi lõigu/juhtmejupi karakterseks induktiivsuseks $10\mu\text{H}$ ja kasutada sagedust 5kHz , jääb tekkiv induktiivne reaktiivtakistus suurusjärku 1 oom:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 5\text{kHz} \cdot 10\mu\text{H} = 0.31\Omega$$

Kui aktiivtakisti takistuseks võtta näiteks $100\text{k}\Omega$ on selge, et niikaua kuni induktiivsus on takistiga ühendatud järjestikku ja faasi muutus huvi ei paku, on induktiivsuse arvestamata jätmisest tekkiv viga piisavalt väike, et see kõrvale jätta.

Nüüd leidkem sisendpinge sagedus, mis oleks mõistlik valida, et skeemi tundlikkus oleks suurim. Selleks on esmalt tarvilik leida aktiivtakistuse R ja reaktiivtakistuse X_C suhe, kui tundlikkus on suurim. Defineerides tundlikkuse kui väljundpinge muutuse aktiivtakistuse ühikulise muutuse peale,

$$s = \frac{dU_V}{dR}$$

tuleb

$$s = \frac{d}{dR} \left(\frac{X_{CC'}}{\sqrt{R^2 + X_{CC'}^2}} \cdot U_s \right) = \frac{R \cdot X_{CC'}}{(R^2 + X_{CC'}^2)^{1.5}} \cdot U_s$$

Et tundlikkus oleks maksimaalne, peab kehtima

$$\frac{ds}{dR} = \frac{X_{CC'} \cdot U_s}{(R^2 + X_{CC'}^2)^{1.5}} - \frac{3 \cdot R^2 \cdot X_{CC'} \cdot U_s}{(R^2 + X_{CC'}^2)^{2.5}} = \frac{X_{CC'} \cdot (R^2 + X_{CC'}^2) \cdot U_s - 3 \cdot R^2 \cdot X_{CC'} \cdot U_s}{(R^2 + X_{CC'}^2)^{2.5}} = 0$$

millest tuleneb, et

$$X_{CC'} = \sqrt{2} \cdot R$$

Kui mõõtekondensaatori plaatidevaheline kaugus jätta vahemikku $h = 30 \dots 300\mu\text{m}$, ringjate plaatide aktiivseks diameetriks lugeda $d = 36.3\text{mm}$ ja PDMSi orienteeruvaks dielektriliseks läbitavuseks võtta $\epsilon = 2.1$, on raku mahtuvust oodata vahemikus

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4h} = 8.85 \frac{\text{pF}}{\text{m}} \cdot 2.1 \cdot \frac{\pi \cdot (36.3\text{mm})^2}{4(30 \dots 300\mu\text{m})} = (640 \dots 64)\text{pF}$$

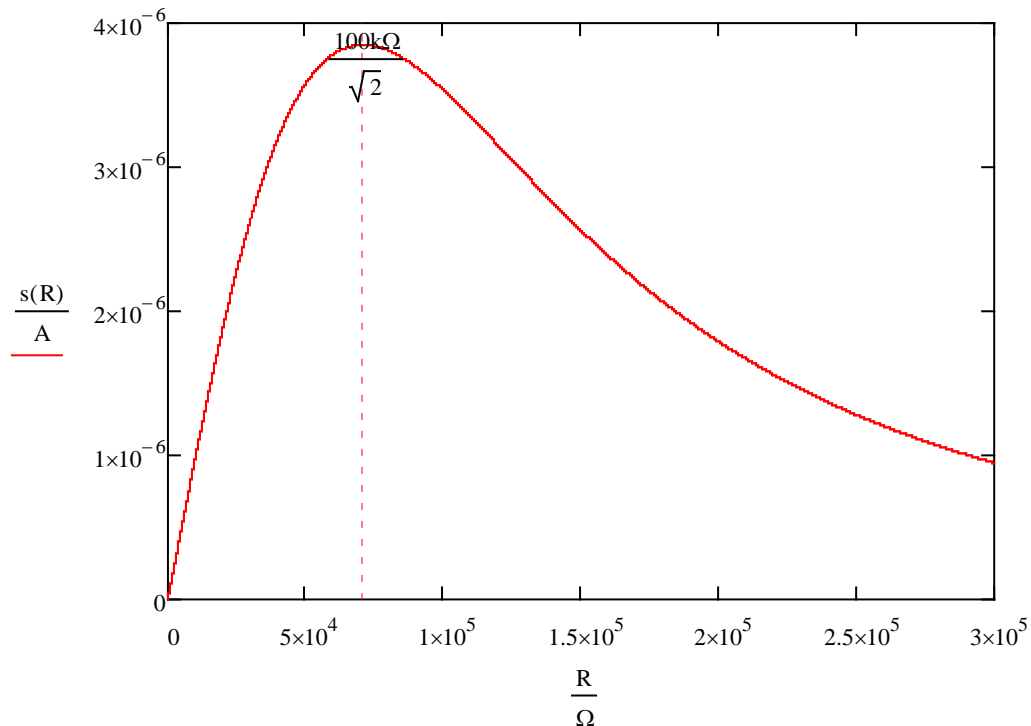
Kui arvestada, et

$$X_{CC'} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot (C + C')} = \sqrt{2} \cdot R$$

ja pingejärguri ligikaudne sisendmahtuvus ning takisti takistus on vastavalt $C' = 60\text{pF}$, $R = 102.4\text{k}\Omega$, jääb otsitav sagedus piirkonda

$$\nu = [2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot R \cdot (C + C')]^{-1} = [2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot 102.4\text{k}\Omega \cdot (640 \dots 64 + 60)\text{pF}]^{-1} = (1.6 \dots 8.9)\text{kHz}$$

Joonestades ülles tundlikkuse graafiku sisendpinge 1V ja mahtuvustakistuse 100kΩ juures,



on näha, et tundlikkuse muutumise kiirus on aeglasem suurtel takistustel, mis viitab veelkord madalamate sageduste eelisele kõrgete ees. 1.9 ja 8.9 kHz aritmeetiline keskmine on 5.25kHz, mis allapoole lähima täisarvuni ümardatult annab optimaalseimaks sisendpinge sageduseks 5kHz.

2.5 Tasaparalleelne plaat

Üheks oluliseks parameetriks dielektrilise läbitavuse määramisel kondensaatori kaasabil on viimase plaatide vahelise kauguse piisavalt täpne määramine. Lähteülesanne nägi ette, et kile paksus, millega arvestada, võiks jääda vahemikku 30-300 μm . Et mahtuvus ja koos sellega ϵ määrata täpsusega vähemalt 10%, ei tohi ka d suhteline viga seda piiri ületada. Nagu selgus, on see üsna raskesti käsitletav piirang.

Paksuse mõõtmisel koosneb tekkiv määramatus vähemalt kolmest komponendist: mõõteriista ebatäpsus, kile ebahütlus ja plaatide karedus. Mõõtemetoodika väljatöötamisel jõuti järeldusele, et nimetatud kolmele lisandub neljaski: ühe elektroodi kõrvalekalde määr tasaparalleelsusest.

Õhukeste kilede paksuse mõõtmisel tuleb silmas pidada, et nende paksus sõltub olulisel määral rakendatud rõhust. See tähendab, et näiteks mikromeetriga kile paksuse mõõtmisel on tulemus märgatavalt erinev, kui mõõta paksust kas vahetult või läbi kahe jäiga (klaas-)plaadi. Teisel juhul saadud tulemus võiks olla adekvaatsem, kuna plaadid jagavad mõõtepeade poolt avaldatava jõu suuremale pinnale ja lisaks on väiksem kile traumeerimise oht. Miinuseks puhverdava klaasi kaasamisele on aga suurenenud mõõtemääramatus selle tasarööpsuse ideaalsuse hälbest.

Mikromeetriga kaasneva mehaanilise rõhu probleeme saab leevendada, kui kruviku asemel kasutada piisava täpsusega (0.1 μm) laserkaugusmõõtjat. Fikseerides mõõtja ja mõõdetava statiivi külge, pole kuigi keeruline sooritada usaldusväärne mõõtmine täpsusega 1 mikron. Võttes aga arvesse, et kasulik ja soovitatav oleks mõõtmine sooritada ühe kile piires mitmest punktist, muutub veelgi aktuaalsemaks küsimus kasutatava alusplaadi tasaparalleelsusest. Asja teeb keerulisemaks tõik, et lisaks paksuse mõõtmisele peab kile osalema ka mahtuvuse määramise protsessis. See tähendab, et millisel pinnal paksust ka ei mõõdetaks, peab see pind olema küllalt hea elektrijuht.

On ilmne, et tavalise (labori) klaasi kui ühe kergemini kättesaadava sileda materjali korral viimane nõue täidetud pole. Loogiliselt viib mõte siit kohe peegliteni, mis üldiselt kujutavad endast metallikihiga kaetud klaasplaate. Paraku on enamiku laiatarbe- (aga ka eri- [8])peeglite reflekteeriv element kaetud paksema või õhema kaitsekihiga, mis hoiavad seda väliskeskkonnas mehaanilisel või keemilisel teel kahjustumast. Antud ülesande seisukohast tähendab see nende kasutuskõlbmatuks tunnistamist.

Järgmine võimalus, mida uuriti ja prooviti, oli vajaliku peegli valmistamine iseseisvalt. Selleks lepiti kokku aeg vaakumaurustusseadme kasutamiseks, otsiti välja paar prepareerimisklaasi kui kättesaadavat, odavat ja piisava tasaparalleelsuse astmega materjali ning 200mg juhendaja soovitatud 99.9% puhtusastmega kulda kui materjali, mis peegeldab hästi, ei oksüdeeru ega valmista suure tõenäosusega muulgi moel olulisel määral lisaprobleeme.

Peegli alusena kasutati ~7x3x0.2cm laboriklaasi. Et vaakumaurustamise ja üldse igasuguse metallikihi katmise juures on võtmetähtsusega aluspinna piisav puhtus, läbisid kõik klaasid eripuhastuse. Selleks keedeti neid umbes veerand tundi kaaliumdikromaadi $K_2Cr_2O_7$ ja kontsentreeritud väävelhappe segus, misjärel loputati klaase ühe- ja mitmekordselt destilleeritud veega. Plaatide puhtust hinnati nende märgamisvõime järgi: kui mitmekordselt destilleeritud vesi märgas ühtlaselt kogu plaati, loeti klaas puhtaks.

Iga klaas kaeti umbes 51x46mm pindalaga ca 200nm paksuse kulla- või vasekihiga. Vask oli kaasatud n.ö igaks juhuks – ei olnud teada, kui hästi metall klaasi kinnitub ning vask oli hea kättesaadav element, et võrrelda selle nakkuvust kulla omaga.

Kokku kaeti metalliga kaheksa plaati ja nende testimine andis eranditult ühe ja sama tulemuse: kirjeldatud meetodil ei õnnestu klaasi metalliseerida nii, et peegelkiht jääks aluse külge piisava (kergemat kraapimist taluva) tugevusega. Katses küll selgus, et kindlasti oleks abi klaasi matistamisest (prepeareerimisklaasi matt nurk hoidis sinna sattunud sadestust kinni väga hästi), kuid koostöös juhendajaga laideti see variant maha. Argumentideks esiteks tõdemus, et õhukest klaasi saab matistada vaid üsna ebameeldivate ja tülikate kemikaalide kaasabil ning teiseks teadmatus selle protsessi täpsusest (klaas peab jääma ka pärast töötlust piisavalt siledaks ja tasaparalleelseks).

Palju edasi ei viinud ka järgnenud uurimistöö kommertsmaailmas, kus siledade ja/või metalliseeritud pindade tootmine on igapäevarutiin. Metallide poleerimisega tegelevad firmad andsid alla plaadi tasaparalleelsuse tagamise punktis, galvaanikud aga töö taskukohase hinna osas.

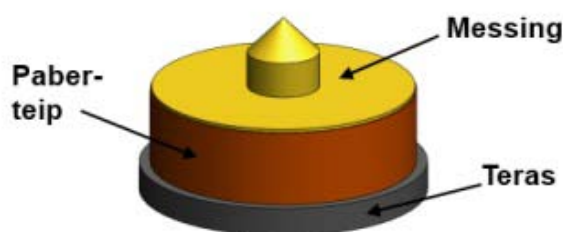
Probleemi lahendas TÜ Füüsika Instituudi nanostruktuuride füüsika laborist leitud ITO (indiumtinaoksiid) klaas, mille elektrijuhtiv (ITO-) kiht on kaitsekatteta ja makroskoopiline tasaparalleelsuse ja pinnasileduse kõikumine jääb 5 μ m piiresse. Esialgu tekitas mõningasi kõhklusi ITO kihi mitte just väga suur juhtivus (pindtakistus 1cm kohta umbes 100 Ω), kuid kuna mõõteskeemi ühendatuna on ta jadamisi umbes kolm suurusjärku suurema takistusega, on selle panus üldise tulemuse kõikumisse küllalt väike.

2.6 Katsekorraldus

Varemkirjeldatud meetoditest dielektrilise läbitavuse mõõtmiseks valiti kõige esimene, ühe mõõtmisega puutuvate elektrodide meetod. Põhiliseks argumendiks tema lihtsus ja jõukohasus.

Statiivi külge on ühendatud laserkaugusmõõtja, mida saab vajadusel liigutada vertikaalsihis. Statiivi jalamil on ITO klaas, juhtiv külg laseri poole, mille peal on uuritav aine (PDMS kile). ITO-kiht kui kondensaatori varjestamata elektrod on ühendatud mõõteskeemi maaga.

Kondensaatori teine elektrod kujutab endast messingist treitud silindrit (Joonis 3), mille alumine külg on võimalikult siledaks poleeritud. Silindri alumise osa perimeetri ümber on paigutatud maalriteibiga silindrist isoleeritud varjestav terasrõngas, mille alumine külg paikneb silindri põhjaga samas tasandis. Varjestus suundub maasse, elektrod takisti külge. Silinder ja rõngas kokku moodustavad varjestatud elektroodi („mõõtepommi“), mida saab kile peale ja sealt maha tõsta.



Joonis 3. Varjestatud elektrod ehk „mõõtepomm“.

Kile paksuse mõõtmiseks asendatakse esmalt kilega klaas tühja klaasiga, nullitakse laserkaugusmõõtja näit, taastatakse eelnev katseskeem ning mõõdetakse kile paksus. Kuna ITO klaas on läbipaistev, tuleb mõlemal korral vastavalt klaasi ja kile pinnale panna üks ja sama võimalikult tasaparalleelne peegeldav pind. Vastasel korral mõõdab kaugusmõõtja valesid vahemaid. Mõõtetäpsuse huvides on mõistlik paksus mõõta mitmest eri punktist ning saadud suurused keskmistada.

Mahtuvuse mõõtmine algab sisendpinge amplituudi kindlakstegemisega. Selleks ühendatakse operatsioonivõimendi sisend pingejagurist lahti 5kHz siinussignaali generaatori väljundisse ja ostillograafi abil registreeritakse näit op-võimendi väljundis. Seejärel taastatakse elektriskeem, jättes mõõtepommi küll skeemi ühendatuks kuid kilele asetamata. Nii on pingejagurist väljas mõõtekondensaator C, kuid kohal kõik muud parasiitsed mahtuvused (sh varjestatud elektroodi enda ning operatsioonivõimendi sisendi mahtuvus). Mõõtnud pinge amplituudi pingejaguri väljundis, jääb pärast mõõtepommi asetamist kilele veel sooritada viimane operatsioon ja korrata amplituudi mõõtmist.

2.7 Mõõtmistulemused

nr	R [kΩ]	v [kHz]	d [mm]	h [μm]	U _s [V]	U _v [V]	C' [pF]	C [pF]	ε	u _ε
							$\frac{\sqrt{U_s^2 - U_v^2}}{2 \cdot \pi \cdot v \cdot R \cdot U_v}$	$\frac{\sqrt{U_s^2 - U_v^2}}{2 \cdot \pi \cdot v \cdot R \cdot U_v} - C'$	$\frac{4}{\epsilon_0 \cdot \pi} \cdot \frac{C \cdot h}{d^2}$	
1	102.20	10.0			3.08	3.04	25			
	102.20	10.0			3.12	2.48		94		
2	102.20	10.0			3.08	3.04	25			
	102.20	10.0			3.12	1.68		218		
3	102.40	5.00			6.08	6.00	51			
	102.40	5.00	36.30	120	6.08	5.12		148	1.94	0.17
4	102.40	5.00			6.24	6.16	50			
	102.40	5.00	36.30	70	6.24	4.44		257	1.96	0.27
5	102.40	5.00			9.00	8.70	82			
	102.40	5.00	36.30	90	9.00	7.60		115	1.13	0.12
6	102.40	5.00			9.00	8.80	67			
	102.40	5.00	36.30	88	9.00	7.10		175	1.69	0.18

Tabel 1. Faradmeetri testmõõtmiste protokoll.

Katsed 1 ja 2 kujutavad endast teada oleva mahtuvusega 5% tolerantsiga täppiskondensaatori mahtuvuse mõõtmist, et näha faradmeetri usaldatavust. Esimesel juhul on tulemuse erinevus kondensaatori kehtale kirjutatust umbes 7%, teisel juhul 1%. Mõlemad on enam-vähem samas suurusjärgus kondensaatori lubatud hälbe teha nominaalsest mahtuvusest, mistõttu seadme täpsus võib tegelikkuses olla paremgi kui sellest testimisest välja paistab.

Järeldused: mõõtemetoodika mahtuvuse mõõtmiseks on usaldusväärne.

Katsete 3 ja 4 käigus mõõdeti ilma lisanditeta PDMSi dielektrilist läbitavust, mis [9] andmetel jääb vahemikku 2.3-2.8. Eeldades, et kasutatud kile tegelik $\epsilon = 2.3$, jääb selle erinevus mõõdetust veidi suuremaks kui B-tüüpi mõõtemääramatus.

Järeldused: mõõtemetoodika ϵ mõõtmiseks ei anna päris korrektseid tulemusi, vaid hindab neid süstemaatiliselt väiksemaks. Vea tõenäoline allikas on elektroodi ja kile vahele jääv õhukiht.

Katsete 5 ja 6 käigus mõõdeti dielektrilist läbitavust PDMS kiles, kuhu oli segatud selle ϵ oodatavalt suurendama pidavat ainet. Katsetulemused näitasid, et ϵ hoopis vähenes, kusjuures vähenes rohkem kiles, kus lisandit rohkem (katses 5 oli lisandit 20 massiprotsenti PDMSi massist, katses 6 kümme).

Järeldused: katse ei kinnitanud ootust, et lisandi juurde segamisega kile ϵ suureneks oluliselt.

Tulemuse võis tingida lisandi liiga nõrk seondumine PDMSiga.

3 Läbilööginge

Läbilööginget V_B võiks defineerida kui minimaalset elektrilist pinget, mille rakendamisel ainele tema isoleerivad omadused kaovad ja elektrijuhtivus kasvab oluliselt. Materjali läbilööginge pole üldiselt just kuigi kindel suurus, pigem liigitub ta statistilise parameetrina. Kui mõne materjali kohta antaksegi numbriline suurus, tähistab see tavaliselt pinge keskmist väärtust selle ainetüki piires [10].

Läbilööginge võib praktilisel tasemel defineerida mitmeti. Üks võimalus selleks on kokku leppida teatud lävivool, mis peab ainet vähemalt läbima ja vastavat pinget lugeda läbilöögingeks.

Kirjanduse [11] eeskujul on käesolevas töös V_B -ks loetud pinget, millest alates lühisvool läbi ainetüki muutub pidevaks ning ennastsäilitavaks (st pinge mõõdukal langetamisel läbilööki ei lakka).

Dielektrilist läbilööki on uuritud palju [12] ja vastavalt on selle kohta loodud ka teoreetilisi käsitlusi [13]. Ilmselt suurim edu selles vallas on olnud vaakumi ja gaaside läbilöökide kirjeldamisel, kus V_B kirjeldamiseks on laialdaselt kasutatav Friedrich Pascheni poolt 1889. aastal publitseeritud temanimeline võrrand:

$$V_B = \frac{B \cdot p \cdot h}{\ln(A \cdot p \cdot h) - \ln\left(\ln\left(\frac{1}{\gamma}\right)\right)}$$

A ja B on seejuures konstandid, mis sõltuvad gaasist, p gaasi rõhk, h elektroodide vahemaa ning γ sekundaarelektroni emissiooni tõenäosus.

Polümeeridele analoogilise universaalse võrrandi/kirjelduse koostamine on komplitseeritud, kuna juba uuritav keha ise on oluliselt mitmekesisema ehitusega. Seepärast olgu alljärgnevalt esitatud vaid lühike kvalitatiivne ülevaade, mis ja kuidas läbilööki polümeerides mõjutab.

3.1 Polümeeri läbilöögipinget mõjustavad tegurid

(refereering allikatest [12] ja [14])

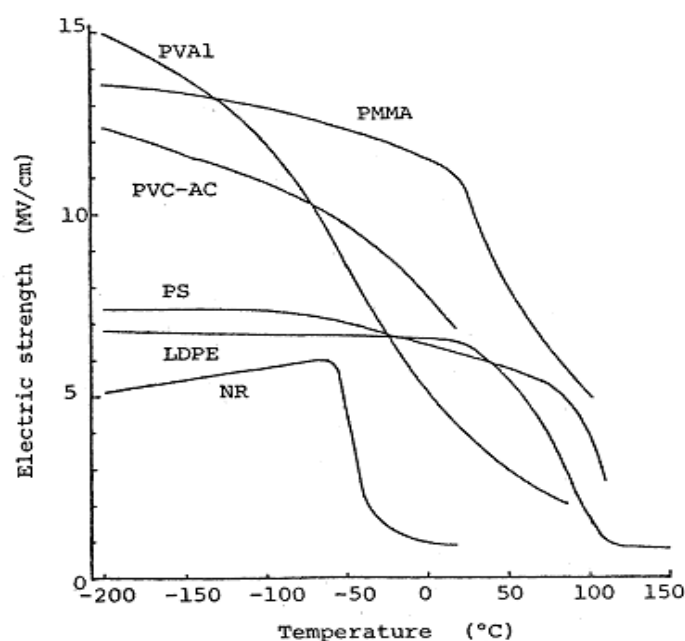
Keskkond. Üldine reegel on, et näiteks õlisse või gaasi asetatud kile V_B on tavaliselt väiksem kui vaakumis mõõdetu. Seda tingib nn ääreefekt, mis seisneb kile äärealadel laengu mahajooksus kile pindadelt ümbritseva keskkonna kaudu. Äärealade mõju saab vähendada või sootuks elimineerida, kui kasutada spetsiaalse kujuga ainetükke ja elektroode. Oluliseks abiks on ka alaliskõrgepinge eelistamine vahelduvale.

Niiskus. Eraldi keskkonna liik on õhk. Kui mõõtmine toimub vaakumis või väga kuivas gaasis, pole niiskusel muidugi mingit rolli. Vabades tingimustes toimuvate mõõtmiste puhul võib õhuniiskus aga olulisel määral alandada läbilöögitugevust.

Temperatuur. On vähe füüsikalisi parameetreid, mida temperatuur ei mõjutaks ning läbilöögipinget pole kindlasti üks neist. Pigem vastupidi: läbilöögipinget pole enne praktilist tähtsust, kui pole teada temperatuur, mille juures mõõtmine toimus. Läbilöögitugevuse $F_B = UB / h$, h kile paksus, sõltuvust temperatuurist T saab jämedalt vaadelda kahes osas:

- madalate temperatuuride regioon, kus $\partial F_B / \partial T \approx 0$, st temperatuuri kasvades läbilöögitugevus praktiliselt ei muutu ja võib vähesel määral isegi kasvada;
- kõrgete temperatuuride regioon, kus $\partial F_B / \partial T < 0$ – temperatuuri kasvades läbilöögipinget kahaneb oluliselt.

Joonis 4-1 on näitena toodud mõningate ainete F_B sõltuvus temperatuurist.

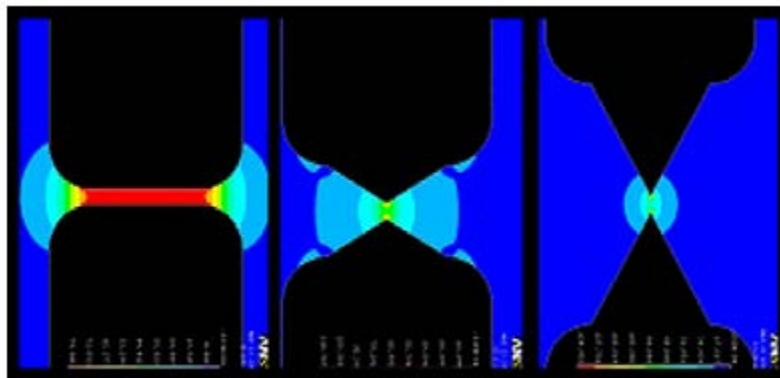


Joonis 4. Mõningate ainete läbilöögitugevuse sõltuvus temperatuurist [15].

Pinge mõjumise aeg. Üldreeglina ilmneb läbilöök aines mõningase viivitusega pärast piisavalt kõrge potentsiaalide vahe rakendumist. Viivitus võib varieeruda üsna laiades piirides, nanosekundist kuni tundideni olles tugevas sõltuvuses mehhanismist, mille alusel läbilöök toimub. Seega talub ainetükk üldiselt tugevat lühiajalist (suurusjärgus kümned nanosekundid) pingepulssi paremini kui kehtvat.

Polümeeri paksus. Materjali läbilöögipinget kasvab aeglasemalt kui materjali paksus. Seepärast kehtib kuni teatud piirini reegel, et õhema materjali läbilöögitugevus on paksema omast suurem.

Elektroodi kuju. Füüsikaline nähtus, mis lõppkokkuvõttes laengut läbi aine liigutab, on elektriväli. Kui aine poolt tekitatud elektriväli saab vastu välisele, siis laeng suunatult läbi materjali ei liigu ja vastupidi. Fikseeritud potentsiaalide vahega elektrodide vahelise elektrivälja tugevus mingis punktis on aga tugevas sõltuvuses elektrodide kujust. Kui silindriliste kontaktide vahel on elektriväli selle keskregioonis üsna ühtlaselt jaotunud, siis koonusjate elektrodide korral koondub see põhiosas üsna kitsasse piirkonda vahetult teravikke ühendava sirge ümbruses. Elektrivälja tugevuse simulatsioon erineva kujuga elektrodide vahel on esitatud Joonis 5-l.



Joonis 5. Elektrivälja jaotumine erineva kujuga elektrodide vahel [11].

Elektroodi kuju mõju tugevnenud elektrivälja E_g saab arvesse võtta võimendusfaktoriga β_g :

$$E_g = \beta_g \cdot \frac{U}{d}$$

kus

- U – elektrodidevaheline pinge,
- d – nende vähim kaugus üksteisest,
- U / d elektrivälja tugevus silindriliste elektrodide kasutamisel.

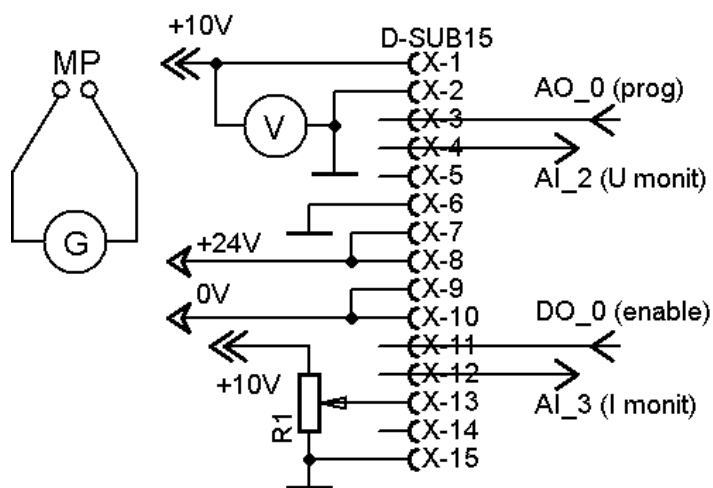
Lapiku elektroodi korral $\beta_g = 1$ ning mida teravam koonuse tipunurk, seda suurem võimendusfaktor.

3.2 Läbilöögipinge mõõtmine

Läbilöögipinge mõõtmiseks rakendatakse kilele kasvava tugevusega kõrgepinget ning monitooritakse elektroodidevahelise voolu tugevust. Kui tekib läbilöök, suureneb vool oluliselt ning kui on teada pinge, mille juures voolutugevus hüppe tegi, on teada ka läbilöögipinge.

Kõrgepinge allikana kasutati ettevõtte UltraVolt toodetavat kõrgepingegeneraatorit 6HVA24-P1 [16]. Väljundi juhtimine ja jälgimine ning seadmele toite jagamine toimub DA-15-tüüpi pesa kaudu.

6HVA24-P1-l on kaks silmapaistvat omadust: suhtlusprotokolli lihtsus ja võimekus sisemiselt piirata väljundvoolu tugevust. Väljundpinge muutmiseks vahemikus 0 kuni 6kV piisab viikude 2 ja 3 vahele 0 kuni +10V pinge rakendamisest, väljundvoolu tugevust vahemikus 0 kuni 167 μ A märgib pinge 0 kuni +10V viigul 12. Väljundvoolu piiraja on eriti kasulik just läbilöögipinge mõõtmisel, kus lühise tekkimine väljundis on üks katse osa. Tänu sisemisele limiteeritusele puudub vajadus ühendada väljundisse kaitsetakisteid, mille puhul peaks eraldi hoolt kandma, et pinge neist läbi lööma ei hakkaks.



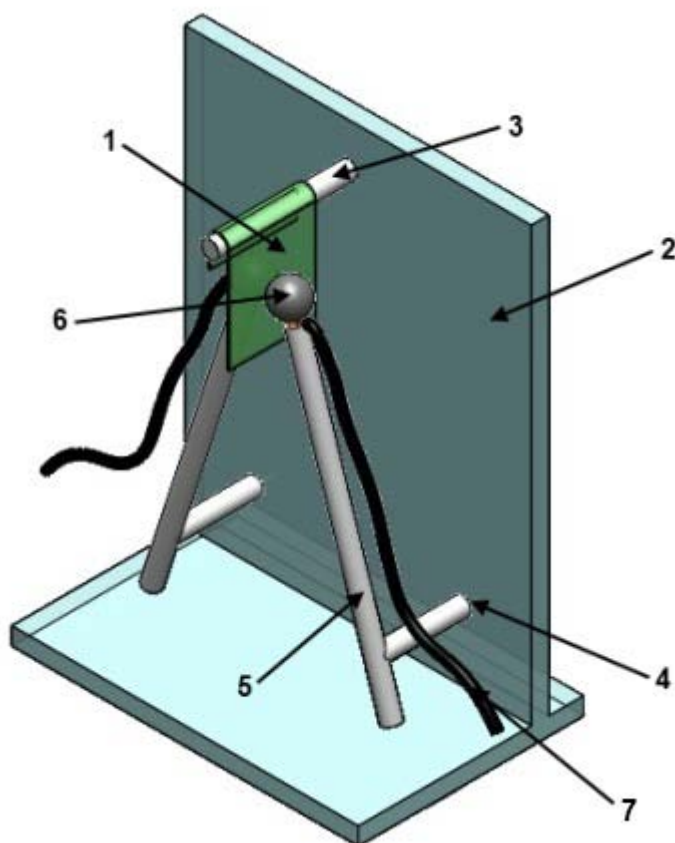
Joonis 6. Juhtmete ühendused läbilöögipinge mõõtmiseks.

Läbilöögipinge mõõtmiseks vajalikud ühendused on esitatud Joonis 6-l. Et +10V referentspinge täpsusest sõltub olulisel määral generaatori väljundi ja tagasiside täpsus, mõõdetakse seda eraldi voltmeetril V. Potentsiomeeter R1 vahendusel määratakse kindlaks maksimaalse väljundvoolu tugevus. Igaks juhuks, lootuses saavutada paremat toimimist, on generaatori toite- ja signaalimaad üksteisest lahus. Andmelehes selle vajadust küll eraldi ei mainita, kuid ei nähtud ka erilist põhjust ühest lisajuhtmest lahtisaamise lootuses hakata katsetama ühise maaga varianti.

Et kõrgepingega opereerimine toimuks võimalikult operatiivselt, teostati generaatori töö juhtimine programsete vahenditega. Visuaalprogrammeerimiskeskkonnas LabView jooksev arvutiprogramm (Lisad 2) suhtleb generaatoriga läbi National Instrumentsi toodetud USB-6009 [17] andmehõivekarbikese, mille kaudu saab väljastada ja võtta vastu analoog- ning digitaalsignaale.

Selline lahendus teeb kogu mõõtmisprotsessi küllaltki automaatseks: pärast juhtmete korrektset ühendamist tuleb vaid käivitada rakendus, valida sobiv pinge kasvukiirus ja alustada mõõtmist. Läbilöögi tekkides peatub pinge kasv väljundis ning programmi seiskamise järel kuvatakse väljundvoolu sõltuvus kõrgepingest nii graafiku kui tabelina, mida saab kasutada edasises andmetöötles. Ühe mõõtmisprotsessi graafik on toodud Lisad 3-s.

3.3 Katsekorraldus



Joonis 7. Statiiv koos elektrootidega uuritava kile pingestamiseks. Numbrite tähendus tekstis.

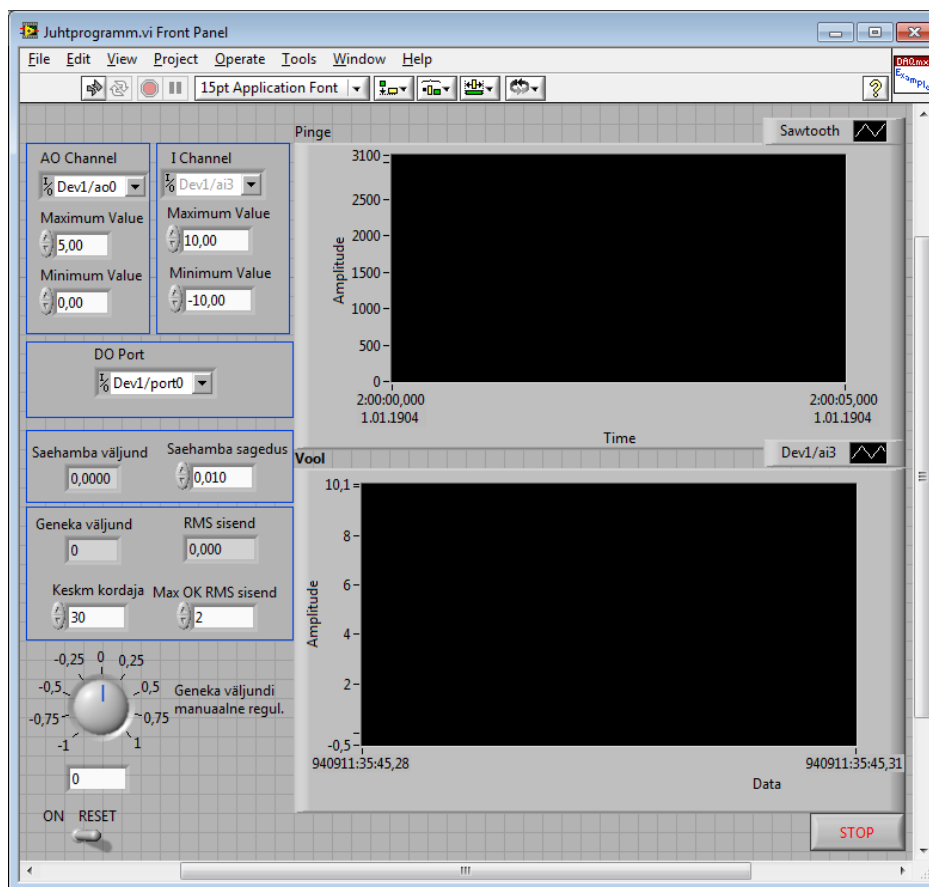
Uuritav kile 1 (Joonis 7) paigutatakse pleksiklaasist statiivil 2 olevale teflonpulgale 3 rippuma ning viiakse mõlemalt poolt kontakti elektrootidega. Elektrootid kujutavad endast hästi kõrgepinget taluvast teflonist valmistatud kinnitustelje 4 ümber pöörlevaid pulki 5, mille otsas on terasest kuulikesed 6. Kuulikeste külge on ühendatud paksu isolatsioonikihiga vaskjuhtmed 7, millede kaudu kõrgepinge juhatakse kileni.

Et mis tahes ainetüki kõrgepingetaluvus sõltub olulisel määral pinge mõjumise kestusest, tuleb selle kasvukiirus eeldatava läbilöögipingel lähedal valida küllalt madal. V_B ligikaudse väärtuse V_B' teada saamiseks valitakse juhtprogrammi (Joonis 8) lahtrist „Saehamba sagedus“ mõni veidi suurem arv, näiteks 0.010, mis vastab pinge kasvukiirusele

$$v = 3kV \cdot v_{\text{Saehammas}} = 3kV \cdot 0.01\text{Hz} = 30 \frac{\text{V}}{\text{s}}$$

Nii saab kiirendada generaatori jõudmist ligikaudse läbilöögipingeni, mille saavutamisest annab märku tugevnenud särin ja väljundvool ning viimase muutumine pidevaks. Mõnikord võib juhtuda, et enne läbilöögipunkti esinevad voolupiigid panevad programmi arvama, et juba on jõutud eesmärgini ning pinge kasv tuleks peatada, kuigi tegelikkuses on stabiilse väljundvoolu tekkeni veel

veidi aega. Sellest saab üle, kui suurendada parameetriga „Keskm kordaja“ määratud keskmistamisele minevate mõõtmiste arvu. Vajadusel võib automaatse seiskamise üldse välja lülitada, kirjutades sellesse lahtrisse mõne piisavalt suure arvu (näiteks 1000000).



Joonis 8. Juhtprogrammi kontrollaken.

Kui V_B on käes, tuleks sooritada kordusmõõtmine, olles enne kas elektroodide väänamise ja/või kile asukoha muutmisega vahetanud ka elektroodi ja kile kokkupuutepunkti. Kordusmõõtmise sooritamisel tuleb täpsema tulemuse saamiseks paarsada volti enne varem leitud pingeni jõudmist vähendada kasvukiirus minimaalseni (umbkaudu 3V/s), kirjutades lahtrisse „Saehamba sagedus“ väärtuse 0.001. Et V_B varieerub kiletüki piires üsna tuntavalt, tuleks sooritada kindlasti mitu kordusmõõtmist, soovitatavalt vähemalt viis. Antud aine läbilöögitugevus F_B avaldub sellisel juhul keskmise läbilöögipingega ja kile keskmise paksuse suhtena.

Et läbilöök esineb küllalt erinevatel pingetel, on mõõtemääramatuse hindamisel mõistlik arvesse võtta vaid tulemuse kõikumist, mitte otsese mõõtmise täpsust:

$$u_F = F_B \cdot \sqrt{\left(\frac{t \cdot \rho(V_B)}{\sqrt{6} \langle V \rangle}\right)^2 + \left(\frac{t \cdot \rho(h)}{\sqrt{6} \langle h \rangle}\right)^2}$$

kus $\rho(V_B)$ ja $\rho(h)$ on vastavalt läbilöögipingega ja paksuse standardhälbed ja t Studenti koefitsient 95%-sel usaldusnivool 5 vabadusastme juures.

3.4 Mõõtmistulemused

nr	h [μm]							$\langle h \rangle$ [μm]	V_B [kV]						$\langle V_B \rangle$ [kV]	F_B [kV/mm]	u_F [kV/mm]
															$\langle V_B \rangle / \langle h \rangle$		
1	88	89	85	87	93	86	88	4.4	4.6	4.4	2.3	3.0	4.1	3.8	43	10	
2	37	27	25	26	32	25	29	2.8	2.8	2.4	2.5	2.3	2.0	2.5	86	18	
3	102	108	116	116	115	109	111	-	-	-	-	0.5	-	-	-	-	
4	88	92	83	93	84	88	88	4.8	4.6	4.9	6.0	4.5	4.5	5.1	57	7	
5	73	80	70	57	73	63	69	2.1	1.8	2.6	2.5	2.5	2.2	2.3	33	6	

Tabel 2. Läbilöögitugevuse testmõõtmiste protokoll.

Katsetes 1 ja 2 mõõdeti ilma lisanditeta PDMSi läbilöögitugevust. Õhemast kilest löi pinget küll kergemini läbi, kuid läbilöögitugevus on õhemal kilel suurem.

Järeldused: lisanditeta PDMS käitus ootuspäraselt.

Katses 3 püüti läbilööki tekitada kiles, kus lisaks PDMSile oli sisse segatud ka 10 massiprotsenti lisandainet, mis ootuste kohaselt oleks pidanud kile ϵ tublisti suurendama ja läbilöögitugevust alandama. Paraku ei suutnud kõrgepingegeneraator anda välja küllalt kõrget pinget, mis tekitaks kiles läbilöögi. Ainus kord kui läbilöök tekkis oli ilmselt initsieeritud asjaolust, et elektrodide vahele sattus kile keskmisest paksusest oluliselt õhem piirkond, mistõttu seda ei saa arvestada.

Järeldused: 6HVA24-P1 kasutamisel peab läbilöögi tekkeks kile paksus olema alla 100 μm .

Katsetes 4 ja 5 mõõdeti läbilöögitugevust 20 massiprotsendilise lisandikogusega kiledes. Eelduste kohaselt oleks katses 4 F_B pidanud tulema väiksem kui katses 1, kuivõrd kilede paksused mõlemal juhul on ühesuured. Paraku mõõtmine seda ei kinnitanud. Võrreldes katseid 4 ja 5 on näha, et kile paksuse vähenemisel läbilöögitugevus ei kasva. Nendest ei maksa ilmselt aga teha väga põhjanevaid järeldusi, kuna katses 5 kasutatud kile paksus kõikus keskmise ümber tunduvalt rohkem kui ülejäänutes.

Järeldused: usaldusväärsemate tulemuste saavutamiseks peab kile paksus olema ühtlasem ning lisandid paremini lahustunud/segunenud.

4 Kokkuvõte

Dielektriline läbitavus ϵ väljendab elektrivälja mõju ainele ja aine mõju väljale ning näitab, kui mitu korda elektrivälja tugevus aine sees on nõrgem võrreldes tugevusega vaakumis. Aine läbilöögitugevus on ainet iseloomustav keskmine suurus, mis võrdub minimaalse alalispinge, mis kutsub aines esile elektrilise läbilöögi ning aine keskmise paksuse suhtega. Käesoleva töö eesmärgiks on näidata viisid, kuidas mõõta ilma eriseadmeteta need suurused PDMS kiles.

Kõige lihtsam viis tahke dielektrilise aine ϵ määramiseks madalatel sagedustel suurusjärg 10% mõõtemääramatusega on kasutada ühe mõõtmisega paralleelsete puutuvate elektrodide meetodit. Meetod kaasab endas vajadust mõõta küllalt täpselt läbipaistvate kilede paksusi ning suhteliselt väikeseid mahtuvusi. Paksused saab mõõta sileda tasaparalleelse plaadi ning laserkaugusmõõtja abil, mahtuvuse leidmisel on lisaks ostsillograafide ja signaaligeneraatorile abiks RC-pingejagur ning suure sisendtakistusega operatsioonivõimendi baasil pingejagur.

Läbilöögitugevust mõõdeti definitsioonijärgselt, kasutades läbilöögi tekitamiseks muudetava väljundiga kõrgepingegeneraatorit ning kile paksuse kindlaks tegemiseks laserkaugusmõõdikut koos sileda tasaparalleelse alusplaadiga. Generaatori juhtimine ja mõõtetulemuste kuvamine realiseeriti NI USB-6009 nimelise andmehõivekarbikese ja visuaalprogrammeerimiskeskonna LabView vahendite ühitamisega.

Üldjoontes said eesmärgid täidetud. Kuigi mõõtmistulemused kinnitasid kahtlust, et kasutatud meetodikad ei anna just väga täpseid tulemusi, on nad siiski piisavad, et vähemalt hinnata ϵ ja F_B väärtusi küllalt ühtlase paksusega PDMS kiledes.

5 Summary

Permittivity ϵ is the measure of how much the electromagnetic field in the matter is weaker than in the vacuum. Dielectric strength V_B of the material is the ratio of average minimum DC voltage which causes the electrical breakdown and means thickness of the material. The subject of current thesis is to demonstrate how the mentioned parameters could be measured in PDMS films without special equipment.

The easiest way to measure ϵ of solid dielectric substance on approximately 10% error level is to use contacting parallel plate method with one measurement. Method includes the necessity to meter small thicknesses and capacitances. Thicknesses could be measured with the help of plane parallel plate and laser gauge, capacitance could be found with a sine generator, oscilloscope, RC voltage divider and high impedance operational amplifier based voltage follower.

Dielectric strength was measured according to the definition. The thickness of film was metered as on measuring permittivity, using laser gauge and plane parallel plate. The electrical breakdown of PDMS was carried out with high voltage generator, which was being controlled by data acquisition device NI USB-6009 led by LabView program.

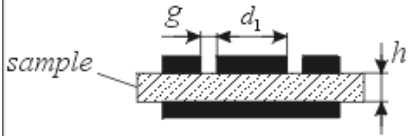
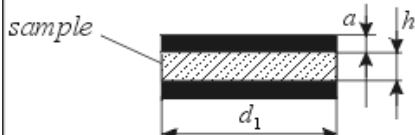
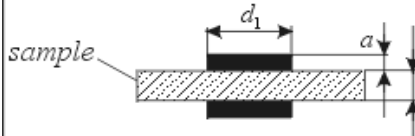
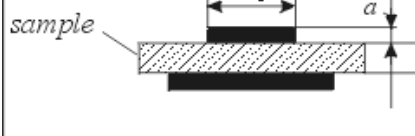
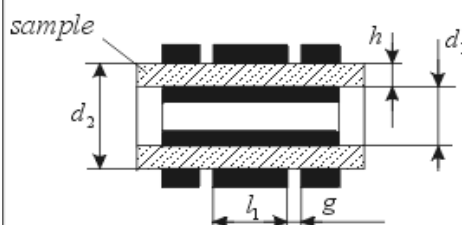
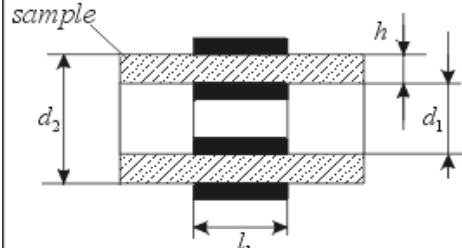
Goals in general were achieved. The results confirmed that the methods used are not very accurate but still valid to estimate ϵ and F_B in PDMS films.

6 Viited

- [1] Carpi, F. *et al.*, „Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers“, 2007
- [2] Rosset, S., „Metal Ion Implanted Electrodes for Dielectric Elastomer Actuators“, 2008
- [3] Agilent Technologies, „Solutions for Measuring Permittivity and Permeability with LCR Meters and Impedance Analyzers“,
http://www.home.agilent.com/agilent/redirector.jsp?action=ref&cname=AGILENT_EDITORIAL&ckey=1000002028%3Aeps%3Aapn&lc=ger&cc=DE&nfr=-536902475.536879640.00, 22.05.2011
- [4] Wikipedia: „Permittivity“, 22.05.2011
- [5] American Society for Testing and Materials (ASTM), ASTM Standard D150
<http://www.astm.org/Standards/D150.htm>, 22.05.2011
- [6] Tektronix, TDS2000C Series Data Sheet,
<http://www2.tek.com/cmswpt/psdownload.lotr?ct=PS&cs=psu&ci=17517&lc=EN>,
22.05.2011, lk. 5
- [7] National Semiconductor, LF353 Dual JFET Input Operational Amplifier datasheet,
<http://www.national.com/profile/snip.cgi/openDS=LF353>, 22.05.2011
- [8] Thorlabs, „Protected Gold Mirrors“,
http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=744, 22.05.2011
- [9] „Material: PDMS“, <http://www.mit.edu/~6.777/matprops/pdms.htm>, 24.05.2011
- [10] Wikipedia: „Breakdown voltage“, 22.05.2011
- [11] Strong, Fabian W. *et al.*, „Electrical discharge across micrometer-scale gaps for planar MEMS structures in air at atmospheric pressure“, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 18 (2008)
- [12] Whitehead, S., „Dielectric Breakdown of Solids“, Clarendon Press, Oxford, 1953
- [13] O'Dwyer, J. J., „The Theory of Electrical Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics“, Clarendon Press, Oxford, 1973
- [14] Hillman, C *et al.*, Failure Mechanisms in High Voltage Printed Circuit Boards, White Paper
- [15] Ieda, M., „Dielectric Breakdown Process of Polymers“, *IEEE Transactions on Electrical Insulation* 3 (1988)

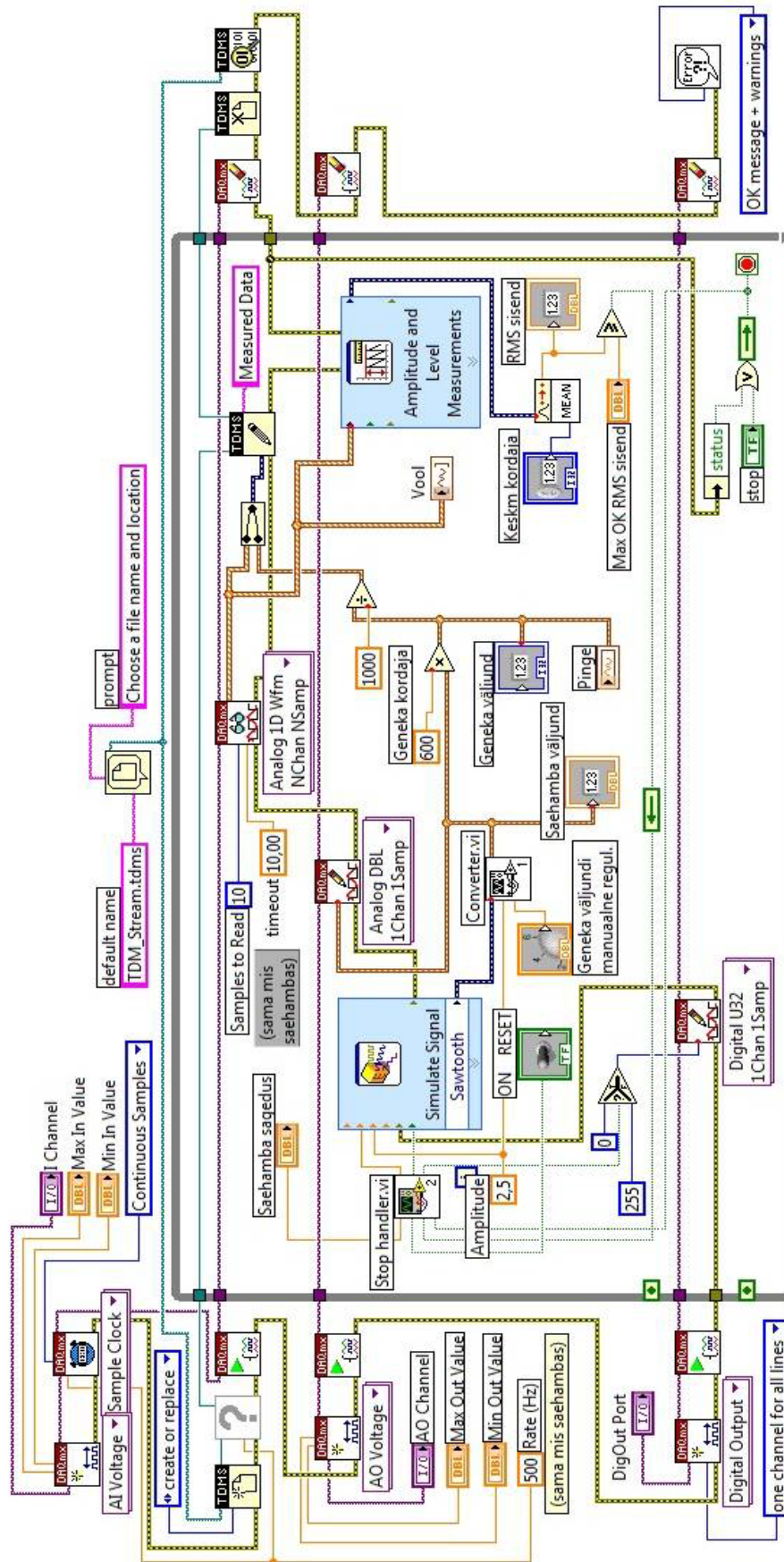
- [16] UltraVolt, Inc., HVA Series – 6HVA24-P1 datasheet,
<http://www.globalspec.com/datasheets/3910/UltraVolt/1C7C0253-2629-4C82-98CE-F45505EF72ED>, 22.05.2011
- [17] National Instruments, USB-6008/6009 User Guide and Specifications,
www.ni.com/pdf/manuals/371303l.pdf, 22.05.2011
- [18] Losonc, Z., „Measuring the Relative Dielectric Constant“,
http://rimstar.org/materials/dielectrics/dielconst_files/capmeasure1.gif, 22.05.2011

Lisad 1

	The capacity of the condenser with vacuum between the electrodes C_0 [pF] [h, g, d, l are in cm]	Correction due to the edge effects C_e [pF] [a, h, d are in cm]
<p>1. Disc electrodes with protecting ring</p> 	$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{h} = 0.08854 \frac{S}{h}$ $S = \frac{\pi}{4} (d_1 + g)^2$	$C_e = 0$
<p>2. Disc electrodes without protecting ring</p> <p>a) electrodes and dielectric with identical diameters</p>  <p>b) identical electrodes smaller than the sample</p>  <p>c) different electrodes</p> 	$C_0 = \epsilon_0 \frac{\pi d_1^2}{4 h} = 0.06954 \frac{d_1^2}{h}$	<p>when $a \leq h$</p> $\frac{C_e}{\pi d_1} = 0.029 - 0.058 \ln h$ <p>$a \leq h$</p> $\frac{C_e}{\pi d_1} = 0.019 \epsilon_1 - 0.058 \ln h + 0.01$ <p>$a \leq h$</p> $\frac{C_e}{\pi d_1} = 0.041 \epsilon_1 - 0.077 \ln h + 0.045$
<p>3. Cylindrical electrodes with protective rings</p> 	$C_0 = \frac{0.2416(l_1 + g)}{\ln(d_2 / d_1)}$	$C_e = 0$
<p>4. Cylindrical electrodes without protective rings</p> 	$C_0 = \frac{0.2416 l_1}{\ln(d_2 / d_1)}$	<p>If $h / (h + d_1) < 1/10$</p> $\frac{C_e}{\pi(d_1 + h)} = 0.019 \epsilon_1 - 0.058 \log h + 0.01$ <p>in the above formulas ϵ_1 is an approximate value of the sample's absolute dielectric permittivity</p>

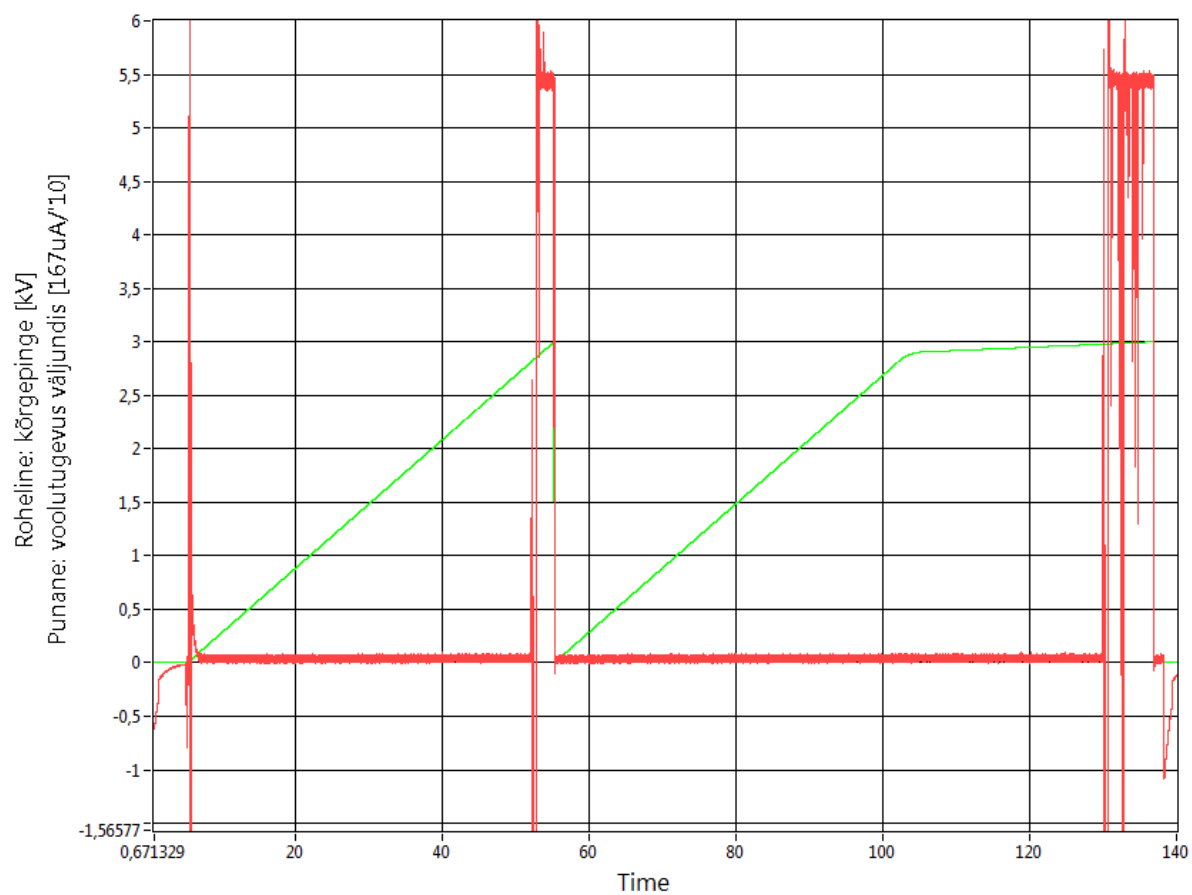
Joonis 9. Parandusliige kondensaatorraku mahtuvusse erinevate elektroodidega [18].

Lisad 2



Joonis 10. Andmehoivekarbikesega suhtlev LabView programm.

Lisad 3



Joonis 11. Kõrgepingegeneraatori väljundvoolu sõltuvus väljundpingest.