Ташкулов К.Д., Ысакова У.А., Салайдин кызы Т., Улукбек кызы М.

КАТУУ ДИЭЛЕКТРИКТЕРДЕГИ ДИЭЛЕКТРДИК ЖОГОТУУ

Ташкулов К.Д., Ысакова У.А., Салайдин кызы Т., Улукбек кызы М.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

K.D. Tashkulov, U.A. Isakova, Salaidin kyzy T., Ulukbek kyzy M.

DIELECTRIC LOSSES IN SOLID DIELECTRICS

УДК: 22/78.5

Жалпы физика курсунда эң чоң бөлүм болуп, туруктуу электр талаасындагы диэлектриктердин абалын окуп үйрөнүү болуп саналат. Бул бөлүмдө негизинен диэлектрдик чөйрөдөгү электростатиканын жалпы теоремасы каралат жана диэлектриктердин поляризациясы боюнча айрым суроолор талкууланат. Айрым окуу колдонмолордо Клаузиус-Мосоттинин формуласы чыгарылат. Бирок физиканын жалпы курсунда өзгөрүлмөлүү талаада диэлектриктердин поляризациясынын өзгөчөлүктөрү талкууланбайт. Бул илимий макалада студенттер жалпы физика курсунда алган диэлектриктердин поляризациясы жөнүндөгү маалыматты кененирээк окуп үйрөнүшөт. Мында туруктуу эмес, өзгөрүлмөлүү электр талаасында диэлектриктер кандай абалда болот? - деген суроого жооп ала алышат. Бул илимий макалада релаксациялык поляризацияга ээ болгон диэлектриктердин диэлектрдик жоготуудагы бурчтун тангенси жана диэлектрдик өткөрүмдүүлүктүн температура-жыштыктык (температурно-частотные) көз карандылыгы изилденет. Изилденип жаткан материал катары органикалык айнекти алууга болот.

***Негизги сөздөр:** диэлектриктер, диэлектриктердин поляризациясы, катуу телолордун зоналык теориясы, диэлектрдик жоготуу, заряддалган бөлүкчөлөр, диэлектрдик өткөрүмдүүлүк, релаксациялык поляризация.*

В курсе общей физики имеется большой раздел, посвящённый поведению диэлектриков в постоянном электрическом поле. Здесь подробно рассматриваются общие теоремы электростатики применительно к диэлектрической среде, излагаются некоторые вопросы поляризации диэлектриков. В некоторых учебниках выводится формула Клаузиуса - Моссоти. Однако в общих курсах физики совсем не обсуждаются особенности поляризации диэлектриков в переменном поле. Данная научная статья несколько расширяет те представления о поляризации диэлектриков, которые получают студенты в общем курсе. Она отвечает на вопрос о том, как ведет себя диэлектрик не в постоянном, а в переменном поле. В научной работе исследуется температурно-частотные зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь у диэлектрика, обладающего релаксационной поляризацией. В качестве исследуемого материала можно взять органическое стекло.

***Ключевые слова:** диэлектрики, поляризация диэлектриков, зонной теории твердого тело, диэлектрическая потеря, заряженные частицы, диэлектрической проницаемости, релаксационная поляризация.*

In the course of general physics there is a large section devoted to the behavior of dielectrics in a constant electric field. We consider here in detail the general theorems of electrostatics with respect to a dielectric medium, and expound some questions of the polarization of dielectrics. In some textbooks, the Clausius-Mossoti formula is derived. However, general courses of physics do not completely discuss the features of the polarization of dielectrics in an alternating field. This scientific work somewhat broadens those ideas about the polarization of dielectrics that students receive in the general course. It answers the question of how the dielectric behaves, not in a constant, but in an alternating electric field. In the scientific work, the temperature-frequency dependences of the permittivity and tangent of the dielectric loss angle for a dielectric having a relaxation polarization are studied. As the material under investigation it is possible to take organic glass.

***Key words:** dielectrics, polarization of dielectrics, band theory of solid body, dielectric loss, charged particles, dielectric permittivity, relaxation polarization.*

Киришүү. Бул илимий макаланын негизинде студенттер «Диэлектриктер» бөлүмүн тереңирээк окуп үйрөнүшөт. Берилген илимий макаланын негизинде «Радиоматериалдар», «Электрорадиоматериалдар», «Диэлектриктердин физикасы», «Катуу телолордун физикасы» боюнча атайын курстарды өткөрүүдө, о.э. диэлектрдик материалдарды термикалык кайра иштетүүнү үйрөтүүчү жогорку окуу жайдагы окуп жаткан студенттерге сунушталат [1,3,4]. Белгилүү усулдук иштелмелерде бул жумуш кездешпейт.

Теориясы. Катуу телолордун заманбап зоналык теориясына ылайык диэлектриктерге тоскоол зонанын кеңдиги 3 эВтон чоң жана локалдык деңгээли терең жайланышкан материалдар кирет. Ошондуктан диэлектриктердин бөлмө температурасында салыштырмалуу өткөрүмдүүлүгү $\leq 10^{-10}\text{ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ болот [2]. Электр талаасында диэлектрикти жайланыштыруу учурунда анын поляризациясы байкалат. Ар кандай учурда диэлектриктин көлөмү жана диэлектрик толук диполдук моментке айланат [5]. Поляризациялануу жөндөмдүүлүгү негизинен диэлектриктин касиети болуп саналат жана заттын диэлектрдик өткөрүмдүүлүгүнүн маанисин мүнөздөйт.

($\varepsilon = \frac{D}{E}$; Мында D - электрдик индукция, E - диэлектриктерде орточо макраскоп-к талаа).

Өзгөрүлмөлүү электр талаасында – поляризацияга жакынырак башка кубулуш, б.а. диэлектрикти ысытууда ички электромагниттик энергиянын жутулушу жүрөт. Бул кубулуш диэлектрдик жоготуу деп аталат. Диэлектрдик жоготуунун кубаттуулугу – сырткы электр талаасынын мүнөздөмөсүнөн (чыңалуусу E, жыштыгы ω), о.э.заттын тегинен көз каран-

ды болгон чоңдукту (диэлектрдик өткөрүмдүүлүк ε, диэлектрдик жоготуунун тангенс $\operatorname{tg}\alpha$ бурчун) аныктайт. Диэлектрдик жоготуудагы бурчтун тангенси – өзгөрүлмөлүү талаадагы диэлектриктердин абалынын негизги мүнөздөмөсү болуп саналат. Бурчтун тангенсинин tgα – диэлектриктин молекулярдык мүнөздөмөсү менен болгон байланышы төмөндө көрсөтүлөт. Диэлектрдик жоготууну окуп үйрөнүү практикалык максаттар үчүн эң керектүү. Диэлектрикти ысытуу пробойго алып келет б.а. диэлектрдик жоготуу изоляциялык касиетин жоготот. Диэлектрдик ысытуу – жыгач буюмдарын кургатуу үчүн, медициналык максаттарга ж.б. колдонулат.

Диэлектрдик жоготуунун формалдык теориясы.

Өзгөрүлмөлүү электр талаасында диэлектрик аркылуу өткөн ток $E = E_o e^{i\omega t}$; Мында (ω – айланма жыштык), жылышуу тогу менен өтүүчү токтун өткөрүмдүүлүгү (омдук) төмөнкүдөй түзүлөт:

$$\delta = \delta_{ом} + \delta_{см} \qquad (1)$$

Омдун законунун дифференциалдык формасын ($\delta_{ом} = \sigma_{ом}$E), жылышуу тогу үчүн Максвеллдин теңдемесин ($\delta_{см} = \frac{1}{4\pi}\frac{dD}{dt}$), электр талаасынын индукциясы менен диэлектриктин поляризациясынын ортосундагы байланышты: (D=E+4πP), пайдаланып толук токтун тыгыздыгы үчүн төмөнкү теңдемени алабыз:

$$\delta = \sigma_{ом}\mathrm{E} + \frac{1}{4\pi}\frac{dD}{dt} + \frac{dP}{dt} \qquad (2)$$

Өзгөрүлмөлүү электр талаасында диэлектриктин поляризациясынын чыңалуусу Е($\mathrm{E} = \mathrm{E_o}e^{i\omega t}$) талаадан φ бурчуна артта калат.

$$\mathrm{P} = \chi E_o e^{i(\omega t-\varphi)} = \chi^* E \qquad (3)$$

Мында χ^*-комплекстүү диэлектрдик кабыл алуу.

$$\chi^* = \chi' - i\chi'' \qquad (4)$$

(3) жана (4) туюнтманы эске алып (2) - туюнтманы төмөнкүдөй кылып, чыныгы жана жалган (мнимый) бөлүктөрүн бөлүп жазууга болот.

$$\delta = (\sigma_{ом} + \omega\varepsilon'')\mathrm{E} + i\frac{\omega}{4\pi}(1 + 4\pi\chi')\mathrm{E} \qquad (5)$$

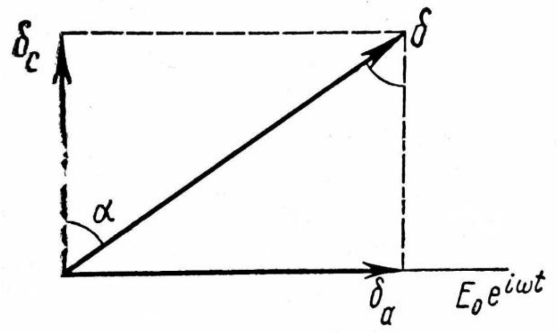
Диэлектрдик кабыл алуу χ - менен диэлектрдик өткөрүмдүүлүк ε ортосундагы байланышты пайдаланып:

$$\varepsilon^* = 1 + 4\pi\chi^*$$
$$\varepsilon' - i\varepsilon'' = 1 + 4\pi(\chi' - i\chi'')$$
$$\varepsilon' = 1 + 4\pi\chi'$$
$$\varepsilon'' = 4\pi\chi''$$

Диэлектрик аркылуу өтүүчү токтун тыгыздыгы үчүн төмөнкү туюнтманы алабыз:

$$\varepsilon = \left(\sigma_{ом} + \frac{\omega\varepsilon''}{4\pi}\right)\mathrm{E} + i\frac{\omega\varepsilon'}{4\pi}\mathrm{E} = \left(\sigma_{ом} + \frac{\omega\varepsilon''}{4\pi}\right)\mathrm{E_o}e^{i\omega t} + \frac{\omega\varepsilon'}{4\pi}\mathrm{E_o}e^{i(\omega t+\frac{\pi}{2})} \qquad (6)$$

Бул теңдеменин 1-бөлчөгү - диэлектрик аркылуу өткөн активдүү токтун тыгыздыгы. Электр энергиясын жоготуу ушул бөлчөк менен шартталат. 2-бөлчөк токтун тыгыздыгы. 1-сүрөттө токтордун вектордук диаграммасынын 6-теңдеме аркылуу сүрөттөлүшү.



1-сүрөт. Өзгөрүлмөлүү электр талаасындагы диэлектрик аркылуу өткөн токтордун вектордук диаграммасы.

Толук токтун активдүү бөлүгүн мүнөздөөчү α бурчун киргизсек:

$$\text{tg}\,\alpha = \frac{\delta_а}{\delta_с} = \frac{4\pi\sigma_{ом} + \omega\varepsilon''}{\omega\varepsilon'} \quad (7)$$

Мында α-бурчу диэлектрдик жоготуу бурчу деп аталат. Жылуулук кубаттуулуктун салыштырмалуу тыгыздыгы Джоул-Ленцтин закону боюнча активдүү токтун тыгыздыгынын эффективдүү мааниси аркылуу же диэлектрдик жоготуу бурчунун тангенси аркылуу төмөнкүдөй болуп берилет:

$$W = \sigma_a \, \text{E}^2_{эфф} = \frac{\omega\varepsilon'}{4\pi} \, \text{E}^2_{эфф} \, tg\alpha \quad (8)$$

Мында $\sigma_а =$ диэлектриктин активдүү салыштырмалуу өткөрүмдүүлүгү.

$$\sigma_а = \sigma_{ом} + \frac{\omega\varepsilon''}{4\pi} \quad (9)$$

Өзгөрүлмөлүү электр талаасында жайланышкан диэлектриктин тешип өтүүчү омдук өткөрүмдүүлүгү болбосо деле ($\sigma_{ом} = 0$) энергияны жоготуу болот. Белгиленген шартта диэлекрдик жоготуунун пайда болушу талаа менен поляризациянын ортосундагы фазалардын жылышы болот.

Диэлектрдик жоготуунун пайда болушунун физикалык механизми. Диэлектриктердин поляризациясынын эки түрүн айырмалоого болот. Серпилгичтүү жана релаксациялык.

Серпилгичтүү поляризация – заряддалган бөлүкчөлөр – электрондор, иондордун серпилгичтүү байланышы менен шартталган. Электр талаасынын таасири астында серпилгичтүү байланышта болгон оң жана терс заряддар аралашып диполь түзүлөт. Серпилгичтүү поляризациянын түзүлүү убактысы 10^{-15}-10^{-12} сек. Заряддалган бөлүкчөлөр-электрондор, иондор же диполдук молекулалар эки же андан көп тең салмактуу абалда болушу мүмкүн. Бул учурда диэлектрик релаксациялык поляризацияга ээ болот. Мындай бөлүкчөлөр начар байланыштагы бөлүкчөлөр деп аталат. Ар бир тең салмактуу абалда начар байланышкан бөлүкчөлөр салыштырмалуу минималдык потенциалдык энергияга ээ болушат. Тең салмактуу абал потенциалдык барьер менен бөлүнөт, начар байланыштагы бөлүкчөлөрдүн бийиктиги (U), кеңдиги өзүн курчап турган өз ара аракеттешүү күчүнөн көз каранды. Жылуулук кыймылынын таасири астында начар байланыштагы бөлүкчөлөр тең салмактуу абалдын биринен экинчисине өтүп турат. Начар байланыштагы бөлүкчөлөрдүн бир абалдан экинчи абалга өтүү убактысы (күтүү убактысы) – релаксация убактысы деп аталат (τ).

$$\tau = \text{A}e^{\frac{U}{RT}} \quad (10)$$

Жылуулук кыймылынын натыйжасында иондор жылышуу артыкчылыгына же ошондой эле ченемдеги диполдордун ориентациялоо артыкчылыгы жүрөт.Диэлектриктер поляризацияланат. Өзгөрүлмөлүү электр талаасында бир эле убакытта талаа барабар мезгилде өзгөрөт, диэлектрик эки жолу поляризацияланат же деполяризацияланат. Сырткы талаанын жарым өзгөрүү мезгилинде радио же эң төмөнкү жыштыкты өлчөө кезиндеги серпилгичтүү поляризация толугу менен калыбына келет же нөлгө чейин төмөндөйт, ошондой эле серпилгичтүү поляризациянын калыбына келүү убактысы аз. Релаксациялык поляризациянын абалы сырткы талаанын жыштыгынан көз каранды. Эгерде сырткы талаа төмөнкү жыштыкка ($\frac{2\pi}{\omega} = \text{T} \gg \tau$) ээ болсо, анда толук калыбына келүүгө жетишет же нөлгө чейин төмөндөйт жана эң жогорку жыштыкка ($\frac{2\pi}{\omega}$=T$\ll \tau$) практикалык такыр (совсем) өспөйт. Релаксациялык поляризациянын теориясы - комплекстүү диэлектрдик жоготуу бурчунун тангенси, чыныгы жана жалган (мнимый) бөлүгү үчүн (тешип өтүүчү (сквозной) өткөрүмдүүлүктү эске албастан) төмөнкү Дебайдын формуласын берет:

$$\varepsilon^{+} = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_0 \mp \varepsilon_{\infty}}{1 + i\omega\tau} \quad (11)$$

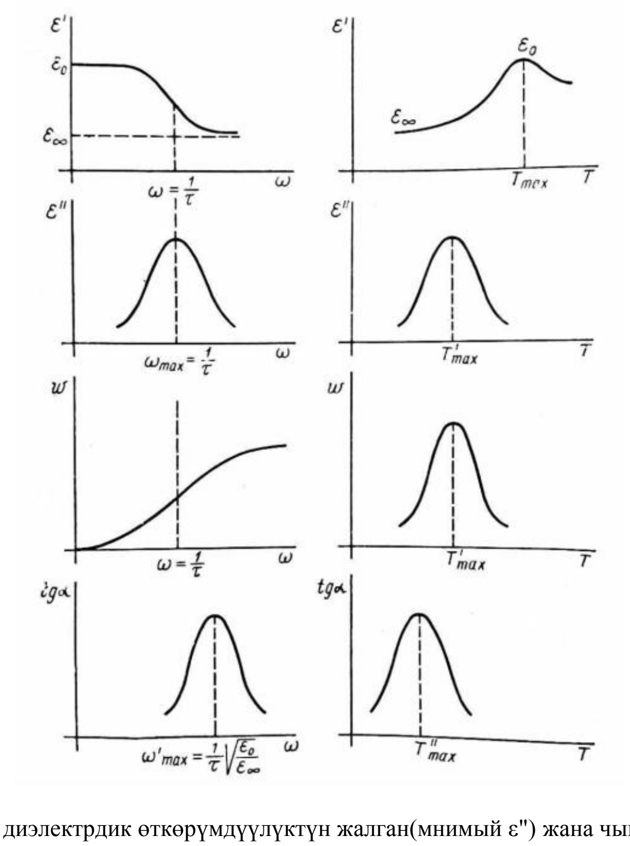
$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (12)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1+\omega^2\tau^2} \qquad (13)$$

$$\text{tg}\,\alpha = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{\varepsilon_0 + \varepsilon_\infty\omega^2\tau^2} \qquad (14)$$

Мында: ε_0 - туруктуу электр талаасындагы диэлектрдик өткөрүмдүүлүктүн мааниси ($\omega = 0$), же статикалык диэлекрдик өткөрүмдүүлүк деп аталат. ε_∞ — инфракызыл жыштыкта өлчөнгөн ($\omega \to \infty$), диэлектрдик өткөрүмдүүлүктүн мааниси, бул учурда диэлектриктин поляризациясы бир гана заряддалган бөлүкчөлөрдүн серпилгичтүү жылышуусуна шартталган болуш керек. ω —сырткы электр талаасынын циклдык жыштыгы, τ – релаксация убактысы.

Дебайдын формуласы – өзгөрүлмөлүү электр талаасында диэлектриктин касиетин сүрөттөйт жана экспериментке дал келет. (11), (14) - формулалардан $\varepsilon', \varepsilon'', tg\alpha$ - сырткы электр талаасынын жыштыгынан, температурадан көз каранды экени көрүнүп турат. Температурадан көз карандылыгы так эмес бул – релаксация убактысы τ($\tau \sim \varepsilon^{\frac{U}{RT}}$) жана статикалык диэлектрдик өткөрүмдүүлүк ε_0($\varepsilon_0 \sim \frac{1}{T}$). Бул көз карандылыктын графиги төмөндө көрсөтүлгөн.



2-сүрөт. Комплекстүү диэлектрдик өткөрүмдүүлүктүн жалган(мнимый ε") жана чыныгы (ε') бөлүктөрүнүн температуралык-жыштыктык көз карандылыгы ($\gamma_{\text{ом}} = 0$). Дилектриктин омдук өткөрүмдүүлүгү эске алынбаган жана диэлектрдик жоготуунун кубаттуулугу.

Жогорку жыштыкта электр талаасынын өзгөрүшү же төмөнкү температурада релаксациялык поляризация пайда болбойт. ε" жана tgα эң төмөнкү маанини алат, диэлектрдик өткөрүмдүүлүк $\varepsilon' \to \varepsilon_\infty$ ге умтулат. Диэлектриктин температурасынын жогорулашы же сырткы электр талаасынын жыштыгы төмөндөгөндө релаксациялык поляризация бирдик убакыт ичинде сырткы талаанын жарым өзгөрүү мезгилине барабар болгон эң чоң деңгээлге жетишет. 2-сүрөттө комплекстүү диэлектрдик өткөрүмдүүлүктүн чыныгы жана жалган (мнимый) бөлүктөрүнүн температурадан жана жыштыктан болгон көз карандылыгы көрсөтүлгөн. Омдук диэлектрдик өтко-

рүмдүүлүк эске алынган эмес. $(\sigma = 0)$ tgα жана диэлектрдик жоготуунун кубаттуулугу көрсөтүлгөн. Диэлектрдик өткөрүмдүүлүк ε' жана tgα чоңоет. Төмөнкү жыштыкта электр талаасынын өзгөрүшү же диэлектриктин температурасы жогору болгон кезде $\frac{T}{2}$ убакыт ичинде релаксациялык поляризация толугу менен түзүлүп бүтөт. Бул учурда диэлектрдик өткөрүмдүүлүк ε_0 маанисине умтулат. Релаксация убактысына талаага диэлектрикти коюуу мезгили дал келген учурда диэлектрдик (ε' жана tgαнын көпчүлүк маанилеринде) жоготуулар көп болот. Ошондой эле tgαнын максимум маанисин байкоо учурунда диэлектриктин жыштыгы (ω_{max}) жана (T_{max}) бири-бири менен байланыштуу болот.

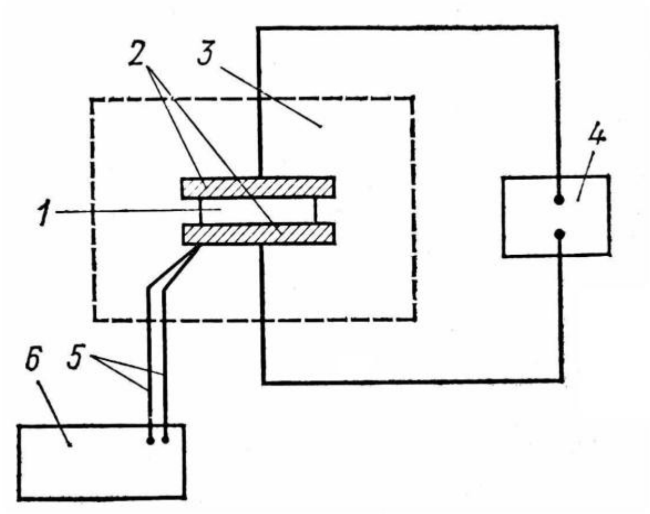
$$\omega_{max} \sim \frac{1}{\tau} \sim e^{-\frac{U}{RT}}$$

Анда tgα нын максимум мааниси – температура жогорулаган кезде чоң жыштыкка жана жыштык жогорулаган кезде чоң температурага карай жылышат. Чындыгында, чоң жыштыктагы релаксациялык поляризация аймагында (областында), б.а. чоң температура кезинде релаксациянын төмөнкү убактысы учурунда толугу менен түзүлгөнгө жетишет.

Иштин максаты. Бул макалада релаксациялык поляризацияга ээ болгон диэлектриктердин диэлектрдик жоготуудагы бурчтун тангенси жана диэлектрдик өткөрүмдүүлүктүн температура – жыштыктык көз карандылыгы изилденет. Изилденип жаткан материал катары органикалык айнекти алууга болот.

Түзүлүштүн курулмасы (иштелмеси) **(3-сүрөт).**

Изилденип жаткан үлгү – печканын ичинде эки жалпак электроддун ортосунда жайгашкан. Печканы чыңалуу – регулятору аркылуу, шаардык сеттен өзгөрүлмөлүү токтон алып ысытууга болот. Үлгүнүн температурасы жез – константан термопарасынын жардамы өлчөнөнт. Ысык спайы электроддун бирөөсүнө таандык, ал эми муздагы бөлмө температурасында жайгашкан. Термо ПАК патенциометр менен өлчөнөт. Үлгүнүн сыйымдуулугу жана диэлектрдик жоготуу бурчунун тангенсин универсалдык мост-«Е12-2» менен өлчөнөт.



3-сүрөт. ε жана $tg\alpha$ нын температуралык көз карандылыгын өлчөөчү түзүлүш.

1-үлгү, 2-электроддор, 3-термостат, 4-көпүрө Е12-2, термобуу, 6-патенциометр.

Мост (көпүрө) сыйымдуулукту жана $tg\alpha$ бурчун жыштыгы 100 жана 1000 Гц болгон учурда өлчөөгө ылайыкташкан. Сыйымдуулуктун чеги 10^{-5} – 100 мкф жана жоготуу бурчунун тангенсинин чеги 0,002 – 0,1ге чейин. Прибордун өлчөө каталыгы: сыйымдуулук ±30% ал эми жоготуу бурчунун тангенси $\pm(10+\frac{0,1}{tg\alpha})$ дан ашпайт.

Студенттер үчүн жумуштун иштелмесинде термо ПАКтын температурадан көз карандылыгы берилген. Ошондой эле патенциометрди жана «Е12-2» көпүрөсүн туура пайдалануу берилген.

Студенттерге тапшырма:

1) Температуранын белгилүү интервалында жыштыгы 100 жана 1000 Гц те диэлектрдик жоготуудагы бурчтун тангенсин жана сыйымдуулукту өлчөгүлө.

2) Жалпак конденсатордун формуласын пайдаланып, үлгүнүн сыйымдуулугунан алынган мааниси боюнча заттын диэлектрдик өткөрүмдүүлүгүн эсептегиле. 100 жана1000 Гц жыштык үчүн, $tg\alpha$ менен εдун температурадан болгон көз карандылыгынын графигин тургузгула. Орг стекло үчүн температурасы 20^0–150^0С, жыштыгы 100 жана 1000 Гц болгондо диэлектрдик өткөрүмдүүлүктүн (ε) азайышы байкалган, ал эми $tg\alpha$ максимум маанини алат, температурасы 70-80^0 С, жыштыгы 1000 Гц болгон кезде.

Адабияттар:

1. Сканави Г.И. Физика диэлектриков. (Область слабых полей). М.-Л.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1949.
2. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. Учебник. - 3-е изд. - М., 2000. - С. 253-255.
3. Киттел Ч. Введение в физику твердого тела. - М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962.
4. Кацнельсон А.А. Введение в физику твердого тела. - М.: Изд-во МГУ, 1984.
5. Кидибаев М.М. Катуу заттардын физикасы. - Бишкек: «Илим», 2006. - 153-163-беттер.

Рецензент: д.ф.-м.н., профессор Тайиров М.М.