آزمايشگاه فيزيك حالت جامد

شماره آزمايش: 1

خواص دي‌الكتريكها

اندازه گيري زمان بي‌قيدي در دي‌الكتريك ها

هدف: در اين آزمايش ضرايب دي‌الكتريك يك مايع دي‌الكتريك تعيين شده و تغييرات اين ضـــرايب با فركانس و درجه حرارت مطالعه مي‌گردد، زمان بي‌قيدي ممان دو قطبي دائم اين مايع تعيين و تغييرات آن با درجه حرارت بررسي مي‌شود.

تئوري:

ضـريب دي‌الكتريك اســتاتيك: ميدان الكتريكي بين صــفحات يك خازن مســطح كه فاصله صفحات آن d و دانسيته بار هر يك به ترتيب σ مي‌باشند عبارتست از:

$$E_v = 4\pi\sigma = \frac{V_v}{d} \qquad (1)$$

اگر سطح مشترك اين صفحات A فرض شود ظرفيت الكتريكي خازن:

$$C_v = \frac{A.\sigma}{V_v} \equiv \frac{q}{V_v} \qquad (2)$$

وقتي فضـــاي خالي بين صـــفحات را با يك دي‌الكتريك پركنيم ملاحظه مي‌گردد كه اختلاف پتانسيل جديد V بين صفحات برقرار مي‌گردد (چرا؟) كه از Vv كوچكتر ا ست و نتيجتاً C، ظرفيت جديد خازن از Cv بزرگتر مي‌شـــود. نســـبت $\frac{C}{Cv} = \varepsilon_s$ را ضـــريب دي‌الكتريك استاتيك مي‌ناميم و

$$\varepsilon_s = \frac{Vv}{V} = \frac{C}{Cv} \qquad (3)$$

در اين حالت دانسيته مؤثر بارهاي دي‌الكتريك به ميزان

$$P = \sigma - \sigma' = \frac{E_v}{4\pi}(1 - \frac{1}{\varepsilon_s}) = \frac{E}{4\pi}(\varepsilon_s - 1) \qquad (4)$$

كاهش يافته اســـت. كميت P را پلاريزاســـيون (Polarization) مي‌نامند و بر مبناي خواص اتم‌ها و ملكول‌هاي تشكيل دهنده‌ي دي‌الكتريك تشريح مي‌گردد.

پلاريزاسيون (Polarization)

در اتم آزاد توزيع بارهاي الكتريكي به‌شـــكلي اســـت كه مركز ثقل بارهاي مثبت و منفي بر يكديگر منطبق بوده و بنابراين ممان دو قطبي اتم برابر صـــفر اســـت. در صورتي كه اتم در يك ميدان الكتريكي قرار گيرد بارهاي مخالف آن در نتيجه نيروهاي وارده از يكديگر دور مي‌گردند و در شرايط تعادل (تساوي نيروهاي جاذبه الكتريكي و نيروهاي ناشـــي از ميدان خارجي) يك ممان دو قطبي ايجاد مي‌شـــود. اين نوع پلاريزاســـيون الكتروني را P_e مي‌ناميم. همين مطلب در مورد اتم‌ها و يون‌هاي يك ملكول نيز صادق است و در نتيجه پلاريزاسيون اتمي و يوني Pa هم وجود دارد.

بعضـي از مولكول‌ها ذاتاً داراي ممان دو قطبي دائمي P_d هســتند و لذا وقتي در يك ميدان الكتريكي خارجي واقع شـــوند مايلند كه تا حدودي در امتداد ميدان آرايش گيرند بنابراين پلاريزاسيون كل دي الكتريك را مي‌توان به صورت :

$$P=P_e+P_a+P_d \qquad (5)$$

نشان داد و بر همين اساس دي الكتريك‌ها به سه دسته تقسيم مي‌شوند:

الف: موادي كه در آنها $P_a+P_d=0$ بوده و پلاريزاسيون كل آنها منحصر به نوع الكتروني است. بيشتر عناصر از قبيل الماس در اين دسته‌اند.

ب: موادي كـه در آنهـا تنهـا $P_d=0$ اســـت. نظير تركيبـات چنـد اتمي و از جملـه كريســتال‌هاي يوني (از قبيل هالوژن‌هاي قليايي) در اينگونه اجســام P_s دو تا ســه برابر P_e است. در حالي كه در تركيبات غير يوني معمولاً Pa<Pe و $\frac{P_a}{P_e}$ كوچك است.

ج: موادي كه شـامل دو قطبي دائمي نيز مي‌باشـند كه پلاريزاسـيون كل آنها P_d + $P=P_e+P_a$ است.

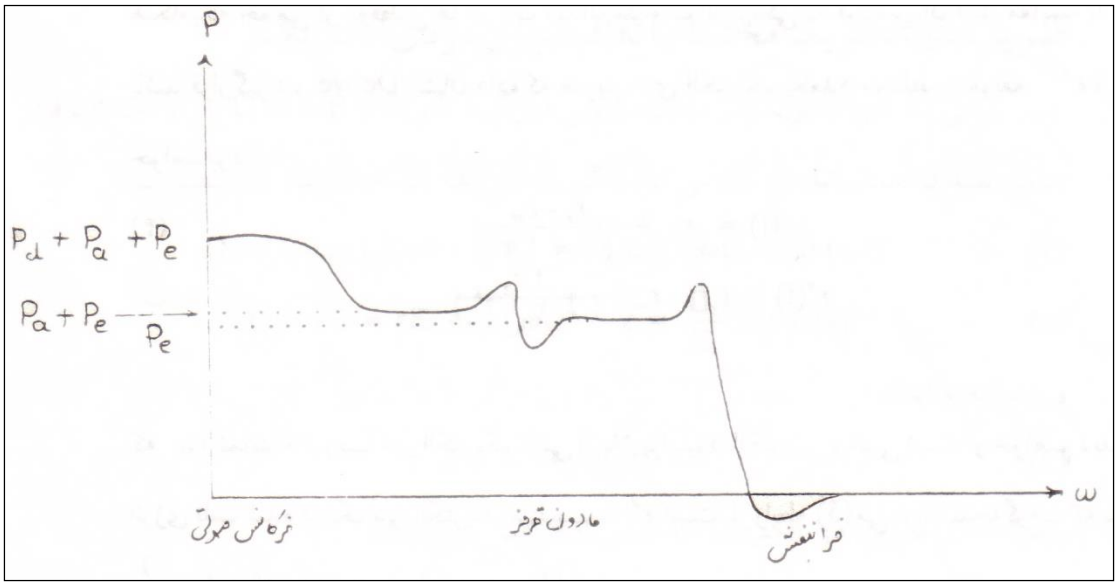
پلاريزاسيون در ميدان الكتريكي متناوب:

در فركانس‌هاي پايين هر سه عامل ياد شده، به پلاريزاسيون دي‌الكتريك و به ضريب دي‌الكتريك كمك مي‌نمايند. ولي با افزايش فركانس، دو قطبي‌هاي دائمي قادر به تعقيب نوسانات ميدان خارجي نبوده و در نتيجه پلاريزاسيون منحصر به اتمي، يوني و يا الكتروني مي‌گردد. اگر فركانس ميدان باز هم افزايش يابد، پلاريزاسيون كل به ميزان پلاريزاسيون الكتروني تقليل مي‌يابد. در شكل (1) تغييرات پلاريزاسيون را در فركانس‌هاي مختلف مشاهده مي‌نماييد. (سعي نماييد شكل (1) را تفسير كنيد)

در اين آزمايش نظر ما توجه به ناتواني دو قطبي‌هاي دائمي نظير هپتاكلرودي فنيل است كه با افزايش فركانس از تعقيب نوسانات ميدان متناوب خارجي باز مي‌ماند. اين ماده از اين نظر انتخاب شده كه كاهش P در فركانس‌هاي صوتي به خوبي انجام مي‌پذيرد.

گرايش دو قطبي در امتداد ميدان الكتريكي خارجي و سرعت اين عمل بستگي به شكل و چگونگي اثر متقابل آنها به محيط اطرافشان دارد. اثر متقابل بين دو قطبي‌ها مانع پيروي آنها از تغييرات ميدان الكتريكي در زمان مشخصه τ (زمان نوسانات آزاد دو قطبي) مي‌گردد. زمان مشخصه τ زمان بي قيدي ناميده شده و تابع درجه حرارت T، ضريب چسبندگي η(مايع محتوي دوقطبي‌ها) و شعاع يوني a به قرار زير مي‌باشد:

$$\tau = \frac{4\pi\eta a^3}{KT} \qquad (6)$$



شکل 1

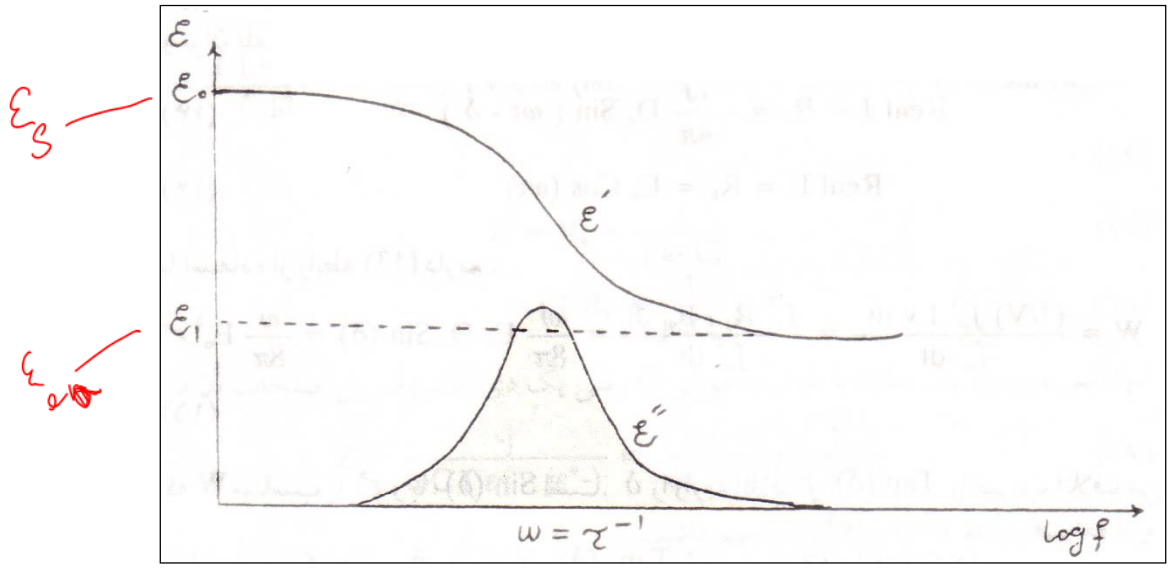
هنگامي كه جمعي از دو قطبي ها در يك ميدان متناوب الكتريكي كه فركانس آن قابل مقايسه با $\frac{1}{\tau}$ باشد قرار گيرند، دبی (Debye) نشان داده كه ضريب دي‌الكتريك به‌صورت يك عدد مختلط با مؤلفه‌های ε'' و ε' خواهد بود.

$$\varepsilon'(f) = \varepsilon_{en} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{en}}{(1+ f^2\tau^2)} \qquad (7)$$

$$\varepsilon''(f) = (\varepsilon_s - \varepsilon_{en})\frac{f\tau}{(1+ f^2\tau^2)} \qquad (8)$$

كه ε_{en} نماينده ضريب دي‌الكتريك ناشي از پلاريزاسيون الكتروني و اتمي است و خواهيم ديد كه انرژي تلف شده در يك دي‌الكتريك متناسب با ε'' است. از رابطه (8) مي‌توان نتيجه گرفت كه به ازاء $f = \frac{1}{\tau}$ ، ε'' ماكزيمم خواهد بود.

f_0 را فركانس بي‌قيدي نامند از رابطه (8) ديده مي‌شود كه در فركانس‌هاي پايين وقتي $f<<f_0$ ، $\varepsilon''=0$ و در نتيجه اتلاف انرژي وجود ندارد و در فركانس هاي بالا $f>>f_0$ دو قطبي ها نمي‌توانند از ميدان الكتريكي تبعيت كنند. در اين حالت از رابطه (7) نتيجه مي‌شود كه $\varepsilon' = \varepsilon_{en}$. در شكل (2) تغييرات ε' و ε'' بر حسب فركانس نشان داده شده است.



شكل (2) منحني تغييرات ضرايب دي الكتريك ε' و ε'' بر حسب فركانس ميدان الكتريكي

ضريب دي‌الكتريك مختلط و اتلاف انرژي در دي‌الكتريك:

وقتي يك دي‌الكتريك در ميدان متناوبي قرار گيرد P و D $(D=\varepsilon E)$ با اختلاف فاز نسبت به ميدان اعمال شده نوسان مي‌كنند. اگر $E=E_0\exp(i\omega t)$ باشد در اين صورت:

$$D=D_0\exp[i(\omega t-\delta)]=D_0\exp(i\omega t).\exp(-i\delta) \qquad (9)$$

$$D=\varepsilon E=\varepsilon E_0\exp(i\omega t)\rightarrow\varepsilon=\frac{D_0}{E_0}\exp(-i\delta) \qquad (10)$$

و با توجه به اينكه

$$\varepsilon=\varepsilon'+i(-\varepsilon'') \qquad (11)$$

و مؤلفه‌هاي ضريب دي‌الكتريك ε تابعي از فركانس مي‌باشند:

$$\varepsilon'(f)=\frac{D_0}{E_0}\cos(\delta) \qquad (12)$$

$$\varepsilon''(f)=\frac{D_0}{E_0}\sin(\delta) \qquad (13)$$

به دست مي‌آيد. با استفاده از روابط (11) و (9) جريان دي‌الكتريك:

$$J = \frac{1}{4\pi}\frac{d}{dt}D = i\omega D_0 \exp(i\omega t - \delta) = \frac{i\omega}{4\pi} \qquad (14)$$

و توان تلف شده در واحد حجم دي‌الكتريك (W)

$$real\ J = R_J = -\frac{\omega}{4\pi} D_0 \sin(\omega t - \delta) \qquad (15)$$

$$real\ E = R_E = E_0 \cos(\omega t) \qquad (16)$$

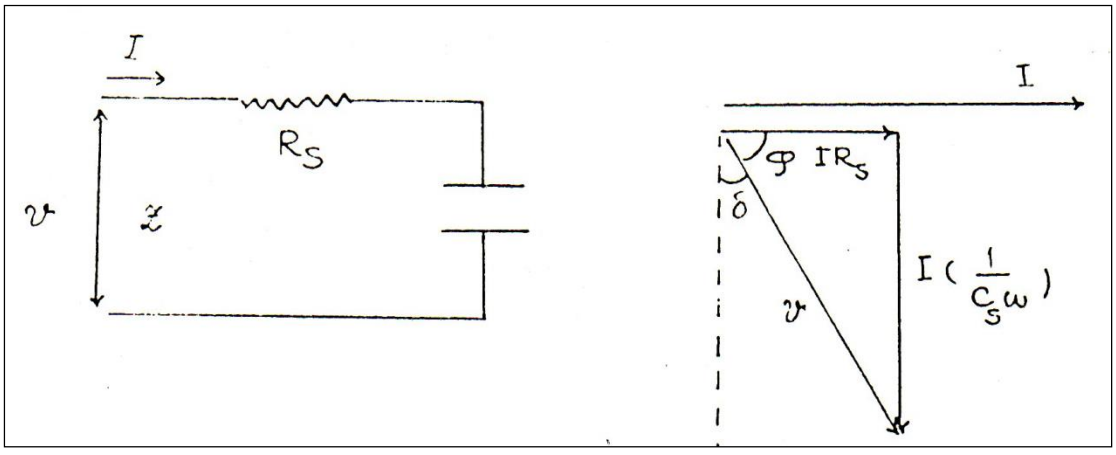
با استفاده از رابطه (15) داريم:

$$W = \frac{(1/V)\int_0^T IVdt}{\int_0^T dt} = \frac{\int_0^T R_J.R_E dt}{\int_0^T dt} = \frac{\omega}{8\pi} E_0 D_0 \sin(\delta) = \frac{\omega}{8\pi} E_0^2 \varepsilon'' \qquad (17)$$

كه W متناسب با ε'' و با $\sin(\delta)$ است. δ را زاويه اتلاف و $\tan(\delta)$ را ضريب اتلاف مي‌نامند (براي مقادير كوچك δ مي‌توان $\tan(\delta)$ را ضريب اتلاف اختيار كرد.

روش آزمايش:

براي اندازه‌گيري ε' و ε'' مي‌توان از يك پل وتستون استفاده نمود كه در آن يك خازن نشتي (خازن دي‌الكتريك) به كار رفته است. از نظر الكتريكي يك خازن نشتي را مي‌توان مجموع سري يك خازن ايده آل C_s (بدون نشت) و يك مقاومت ايده آل R_s فرض كرد (شكل (3)).



شكل 3

انرژي تلف شده در خازن نشتي: با توجه به شكل برداري مدار

$$I = I_0 \cos(\omega t)$$
$$V = Vo\cos(\omega t + \phi)$$

$$P_{av} = \frac{\int IVd\theta}{\int d\theta} = \frac{1}{2\pi}\int IV\cos(\omega t)\cos(\omega t + \phi) = \frac{1}{2} I_0 V_0 \sin(\delta) \qquad (18)$$

$$Z = R_s + \frac{1}{i\omega C_s} \qquad (19)$$

$$V = I(R_s + \frac{1}{i\omega C_s}) \qquad (20)$$

امپدانس ورودي يك خازن با ظرفيت هوايي C وقتي يك دي‌الكتريك بين صـــفحات آن قرار گيرد:

$$Z = \frac{-i}{\omega C(\varepsilon' - i\varepsilon'')} = \frac{(\varepsilon - i\varepsilon')}{\omega C(\varepsilon'^2 - \varepsilon''^2)} \qquad (21)$$

و با مقايسه روابط (19) و (21) خواهيم داشت:

$$\frac{R_s}{\varepsilon''} = \omega(\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2)C \qquad (22)$$

$$C_s = \frac{C(\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2)}{\varepsilon'} \qquad (23)$$

$$\tan(\phi) = \cot an(\delta) = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon''} \qquad (24)$$

انتظار مي‌رود كه به ازاء فركانس بي‌قيدي حداكثر انرژي در دي‌الكتريك جذب گردد و بنابراين تغييرات $\tan(\delta)$ بر حســـب فركانس مي‌بايســـتي داراي يك ماكزيمم باشـــد (چگونه از رابطه (24) مي‌توان اين موضـــوع را نتيجه گرفت و آيا در عمل اين شـــرط صادق است؟)

براي اندازه گيري ε' و ε'' بايد $\tan(\delta)$ و C_s را با استفاده از پل وتستون به دست آورد.

در حالت تعادل با توجه به شـــكل (4) و با دانســـتن اينكه خازن نشـــتي را مي‌توان معادل يك خازن ايده آل C_s و يك مقاومت ايده آل R_s فرض نمود خواهيم داشت:

$$\frac{h}{1-h}=\frac{C_2}{C_S}=\frac{R_s}{R_2} \qquad (25)$$

و با استفاده از روابط (22) و (24) و (25) خواهيم داشت:

$$\tan(\phi)=\tan(\delta^{-1})=\frac{\varepsilon'}{\varepsilon''}=\frac{1}{\omega R_2 C_2} \qquad (26)$$

و همچنين بااستفاده از روابط (23) و (25) خواهيم داشت:

$$\frac{h}{1-h}=\frac{C_2\varepsilon'}{C(\varepsilon'^2+\varepsilon''^2)}=\frac{C_2}{C_s} \qquad (27)$$

و نتيجتاً ضرايب دي‌الكتريك:

$$\varepsilon''=\frac{(1-h)}{hC}C_2\frac{\tan(\phi)}{(1+\tan(\phi)^2)} \qquad (28)$$

$$\varepsilon'=\frac{(1-h)}{hC}C_2\frac{\tan(\phi)^2}{(1+\tan(\phi)^2)}=\varepsilon''\tan(\phi) \qquad (29)$$

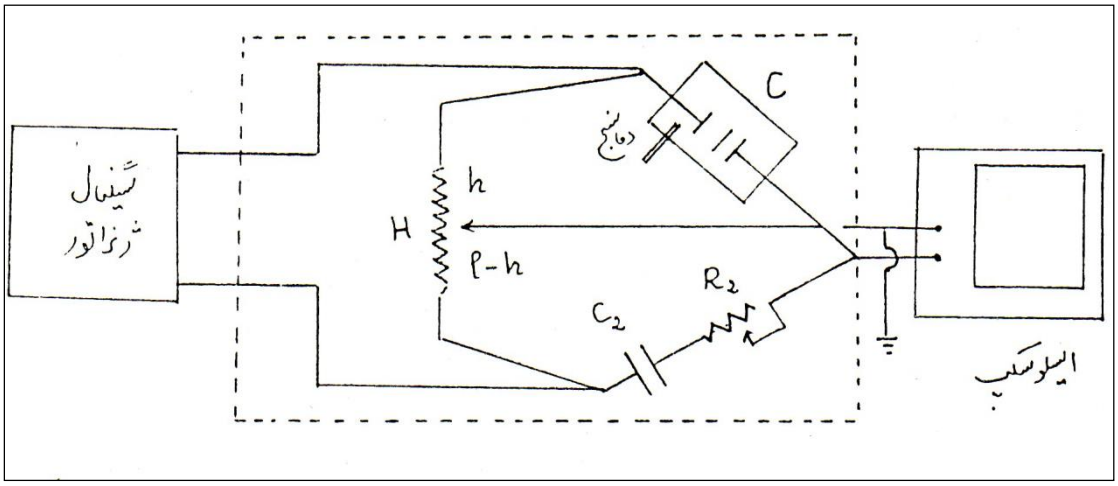
دراکثرآزمایش‌ها $\frac{C_2}{C_s}=1$ است.

وسايل مورد نياز:

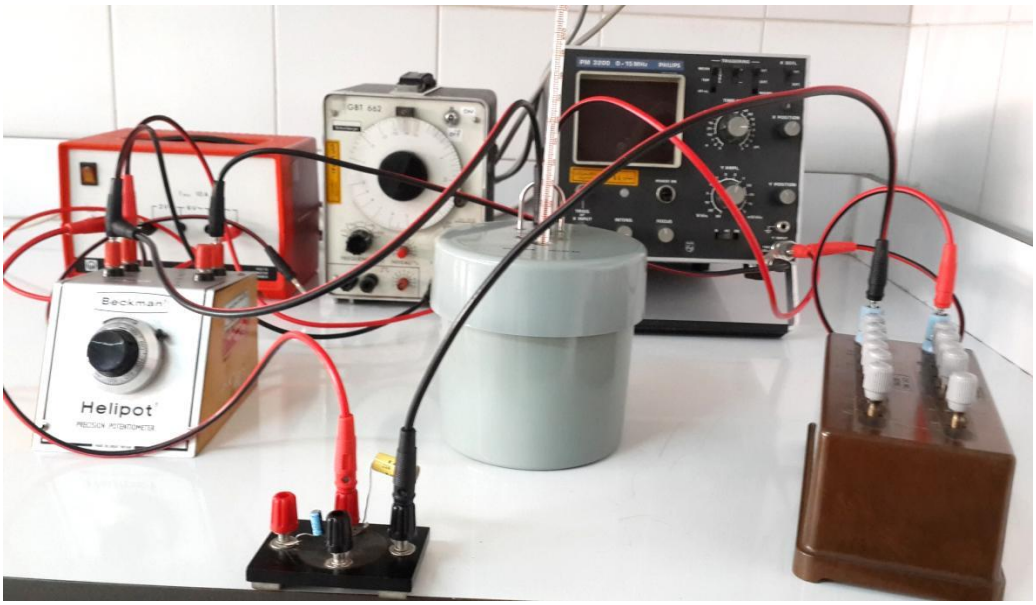
سيگنال ژنراتور، اسيلوسكوپ، خازن محتوي دي‌الكتريك، ظرف گرمايش، دما سنج، مقاومت هلي‌پات، جعبه مقاومت، اتصالات، سيم‌هاي رابط و BNC

الف) اندازه‌گيري مشخصات دي‌الكتريك در حرارت اتاق

مدار را مطابق دياگرام شكل (4) يا عكس شكل (5) ببنديد:



شكل 4



شكل (5)

فركانس نوسـان سـاز را از 100 سـيكل تا 1 MHz در حدود بيسـت پله لگاريتمي تغيير دهيد و در هر مرحله تعادل پل را با تنظيم مقاومت R_2 و مقاومت H برقرار كنيد. (در حالت تعادل كامل در روي اسيلوسكوپ يك خط راست مشاهده مي‌گردد).

براي حصـــول تعادل كامل مقاومت‌هاي H و R_2 را متناوبا تغيير دهيد. پس از تنظيم كامل، مقاومت‌هاي H و R_2 را براي فركانس مربوطه يادداشت كنيد.

ب) اندازه گيري مشخصات دي الكتريك در درجه حرارت هاي مختلف

1- دماي خازن حاوي دي‌الكتريك را يادداشـــت كرده و مشـــخصـــات دي‌الكتريك را در دماي اتاق با استفاده از مدار بالا به دست آوريد. پس از پايان كار مجدداً دماي خازن را يادداشـــت كنيد ودر صـورت تغيير مقدار متوسـط آن رادر نظر گرفته و در گزارش كار خود ذكر كنيد.

2- آزمايش فوق را با گرم كردن ظرف گرمايش براي دماي 35 درجه ســـانتيگراد تكرار كنيد.

3- آزمايش فوق را براي دماي 50 درجه سانتيگراد تكرار كنيد.

توجه:

همواره در حين گرمايش از همزن براي تعادل گرمايي مايع درون ظرف استفاده كنيد.

خواسته هاي آزمايش:

1- با جايگزيني نتايج حاصـــل در روابط (26) ، (27) و (28) ، $Tan(\delta)$ ، ε' و ε'' رادر فركانس‌هاي مختلف محاسبه كنيد.

2- منحني تغييرات ε' و ε'' را بر حســـب Log(f) در ابعاد نيم لگاريتمي براي هر درجه حرارت اندازه‌گيري شده رسم نماييد.

3- براي هر منحني فركانس بي‌قيدي را به دســـت آورده و با يكديگر مقايســـه كنيد.

4- $Tan(\delta)$ رابر حسب log(f) رسم كنيد و شكل منحني حاصله را بررسي كنيد.

5- منحني ε' را بر حسب ε'' رسم كنيد و شكل حاضر را تغيير دهيد.

سوالات:

1- اندازه‌گيري ε' و ε''و $Tan(\delta)$ چرا از نظر عملي حائز اهميت است؟

2- چرا براي اندازه‌گيري تغييرات ظرفيت خازن با فركانس از يك پل استفاده گرديد و چه نوع اشكالاتي در اين طريقه اندازه‌گيري وجود دارد؟

3- آيا مي توانيد شيوه ديگري براي اندازه‌گيري ضرايب دي‌الكتريك پيشنهاد كنيد؟

4- يك دي‌الكتريك را نام ببريد كه جذب انرژي آن در فركانس هاي بالا (Radio and Micro Wave) باشد.

مراجع

1- Deker, Solid State Physucs Chap.6

2- Kittle, Introduction to Solid State Ed.5,Chap .13

3- Kittle Elementary Solid State Physics, Chap.4,page 6

4- The Taylor Manual of Advanced Undergraduate Experiments page 306

5- Methods of Experimental Physics Vol .6-B Page 1