مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية - سلسلة العلوم الأساسية المجلد (21) العدد (8) 1999
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research –Basic Science Series Vol. (21) No (8) 1999

قياس ثابت العزل الكهربائي العقدي *ε للمواد ذات الضياع المنخفض بطريقة الأمواج المستقرة

الدكتور حسن غانم*

(ورد إلى المجلة في 1998/9/21، قبل للنشر في 1999/3/17)

□ الملخّص □

يوجد نموذجان من طرائق قياس ثابت العزل الكهربائي للمواد :

- *طرائق تعتمد على دراسة بنية الحقل الكهربائي عند الرنين Résonance، الذي يتميز بتردد الرنين وعامل جودة الدارة. إن إدخال العّينة في الفجوة الرنانة يؤدي لتغيير مميزاتها. بشكل عام، يرتبط القسم الحقيقي لثابت العزل الكهربائي 'ε بتغير التردد، أما الضياع في العازل فيرتبط بتغير عامل جودة الدارة.*
- *طرائق تعتمد على اقتطاع عّينة من المادة، ووضعها في منتصف دليل الموجة ذي المقطع المستطيل واستخدام عدة مسابر كاشفة للأمواج الميكروية. ونركز هذه المسابر على سطح المادة المدروسة. نحصل على خواص المادة بتعيين عوامل الانعكاس والانتقال.*

تعتمد دراستنا على طرائق استخدام الأمواج المستقرة داخل العّينات العازلة، وكذلك طرائق مبنية على دراسة الأمواج المنعكسة من قبل المواد العازلة.

إن امتصاص العّينة لجزء من الموجة الواردة يساهم في تعيين الضياع في هذه العينة، أما معرفة الموجة المنعكسة عن العّينة فيعين القسم الحقيقي 'ε لثابت العزل الكهربائي.

يتم قياس ثابت العزل الكهربائي العقدي للمواد ذات الضياع المنخفض بدقة، تتعلق بمقدار الدقة التي يتم فيها حساب بعض العوامل التي تتعلق بأبعاد دليل الموجة والعّينة معاً.

---

* أستاذ مساعد في قسم الفيزياء كلية العلوم – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.

مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية - سلسلة العلوم الأساسية المجلد (21) العدد (8) 1999
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research –Basic Science Series Vol. (21) No (8) 1999

Mesure du constant diélectrique complexe ε* des matériaux à faible perte par la méthode des ondes stationnaires

Dr. Hassan GHANEM*

(Reçu le 21/9/1998, Accepté le 17/3/1999)

❒ RÉSUMÉ ❒

Il existe deux différents types de méthodes de détermination de la permittivité de matériaux :

- *La méthode de résonance consiste à partir d'une configuration de champ électrique résonante, caracterisée par une fréquence de résonance et un coefficient de surtension du circuit. L'introduction de l'échantillon dans la cavité, modifie ses caractéristiques. En général, la partie réelle du constant diélectrique ε' est liée à la variation de fréquence observée, les pertes diélectriques sont liées à la variation du facteur de surtension.*
- *On prélève un échantillon de matériau, que l'on place dans une section de guide d'ondes et on dispose plusieurs sondes hyperfréquences qu'on applique sur la surface du materiau. Les propriétés sont obtenues par une mesure de reflexion ou de transmission.*

Notre travail s'appuie sur des méthodes utilisant les ondes stationnaires à l'interieur des échantillons diélectriques et des méthodes fondées sur les ondes réfléchies par le diélectrique.

Dans cette méthode, l'absorption de l'onde qui a traversé l'échantillon mesure les pertes diélectriques du matériau. L'onde réfléchie sur la face d'entrée de l'échantillon détermine la partie réelle de la permittivité.

On détermine la constante diélectrique des matériaux à faible perte avec la même précision qui nous permet de calculer les valeurs de deux paramètres dépendants des dimensions du guide d'onde et de l'échantillon.

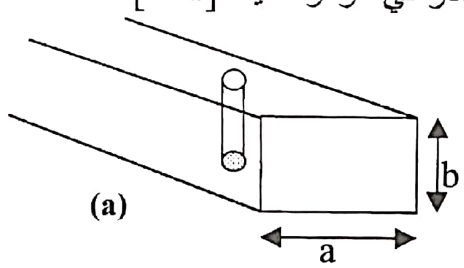
*Maître de Conférences, Departement de Physique, Faculté des Sciences, Université de Tichrine, Lattaquié, Syrie

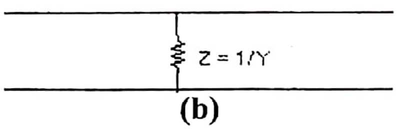
1- مقدمة Introduction :

تعتبر معرفة خواص المواد في مجال الأمواج الميكروية ، وبشكل خاص ثوابت عزلها الكهربائي هامة، من وجهة نظر تصنيع التجهيزات المخصصة لأجهزة الرادار والاتصالات [1]، ومن وجهة نظر المعالجة الحرارية لهذه المواد ضمن أفران الأمواج الميكروية (الطبخ و التسخين). يتعلق الأمر في هذه الحالة بمعرفة خواص هذه المواد في مختلف مراحل المعالجة لنتمكن من تصنيع التجهيزات التي تؤمن انتقال فعال للطاقة [2].

نتناول في هذه الدراسة العيّنات السائلة، أو الصلبة ذات الشكل الحبيبي، أو على شكل بودرة، والتي ثابت عزلها الكهربائي العقدي ε^* يعطى بالعلاقة: $\varepsilon^* = \varepsilon_0(\varepsilon' - j\,\varepsilon'')$. يتم وضع العينات ضمن أنبوب زجاجي أسطواني الشكل، قطره الداخلي d ، وذلك في منتصف الوجه الكبير من دليل موجة مستطيل المقطع، بعداه a و b، كما هو مبين في الشكل (1).

بفرض أن العّينة موضوعة في منطقة يكون فيها الحقل الكهرطيسي متجانساً. يتحقق هذا الشرط من أجل عّينة أسطوانية موضوعة في وسط دليل موجة بشكل موازٍ للجانب الصغير منه، أي أن السطح الأسطواني للعّينة يكون موازياً للحقل الكهربائي، وفي هذه الحالة تكون بنية الحقل الكهرطيسي الموجود داخل المادة منتظمة. إذا كان قطر العّينة صغيراً بشكل كاف وثابت عزلها الكهربائي غير كبير جداً، فإن العّينة يمكن اعتبارها كحاجز رقيق، هذا يعني أن دارتها المكافئة يمكن اختصارها إلى ممانعة عقدية تفرعيه موضوعة في المستوى المار في مركز العّينة [1، 3].





الشكل (1) : (a) – مكان توضع العينة الأسطوانية في وسط دليل الموجة.
(b) – الدارة الكهربائية المكافئة للعينة.

بفرض أن السماحية العقدية المنسوبة للعّينة هي : $Y = G + j\,B$ ، حيث إن:

$$G = \frac{v}{(u-s)^2 + v^2}\left(\frac{2\lambda_g}{a}\right) \quad \text{و} \quad B = \frac{u-s}{(u-s)^2 + v^2}\left(\frac{2\lambda_g}{a}\right) \qquad (1)$$

يرتبط الوسيطان u و v بـ ε' و ε'' حسب العلاقتين التاليتين :

$$u = \frac{k(\varepsilon' - 1)}{(\varepsilon' - 1)^2 + \varepsilon''^2} \qquad (2)$$

$$v = \frac{k\varepsilon''}{(\varepsilon' - 1)^2 + \varepsilon''^2} \qquad (3)$$

إن s و k عبارة عن عاملين، يتعلق الأول s بمقدار كبير بأحد أبعاد دليل الموجة a ، وقطر الأنبوب الحامل للعيّنة المدروسة، بينما يكون ارتباط العامل الثاني k بقطر الأنبوب الحامل للعينة فقط [4] ، كما هو مبين بالعلاقتين التاليتين:

$$K = 2\left(\frac{\lambda_0}{\pi d}\right)^2 + 0.5 \qquad (4)$$

$$S = \ln\left(\frac{4a}{\pi d}\right) - \frac{7}{4} + 2\sum_{n=2}^{\infty}\left(\frac{1}{\sqrt{n^2 - \left(\frac{2a}{\lambda_0}\right)^2}} - \frac{1}{n}\right).\sin^2\frac{n\pi}{2} \qquad (5)$$

يمكننا إعادة كتابة B و G بإدخال u و v كما يلي:

$$B = \frac{2\lambda_g w\left(1 - \frac{s}{k}w\right)}{ka\left[1 - \frac{s}{k}w\right]^2 + \eta} \qquad (6)$$

$$G = \frac{2\lambda_g \varepsilon''(1+\eta)}{ka\left\{\left[1 - \frac{s}{k}w\right]^2 + \eta\right\}} \qquad (7)$$

مع العلم أن: $\eta = \frac{\varepsilon''^2}{(1-\varepsilon')^2}$ و $w=(\varepsilon'-1).(1+\eta)$

بشكل عملي، يمكننا اعتبار قيمة η قريبة من الصفر لأن $\varepsilon'' << \varepsilon'$ وكما أن قيمتها $\frac{\varepsilon''^2}{(1-\varepsilon')^2} \approx 0.02$ من أجل الماء. تصبح العلاقات التي تعطي B و G :

$$B = \frac{2\lambda_g(\varepsilon' - 1)}{ka\left[1 - \frac{s}{k}(\varepsilon' - 1)\right]} \qquad (8)$$

$$G = \frac{2\lambda_g \varepsilon''}{ka\left[1 - \frac{s}{k}(\varepsilon' - 1)\right]^2} \qquad (9)$$

2- تعيين ε' و ε'' لعينات منخفضة الضياع:

يمكننا استنتاج قيم ε' و ε'' بعد تعيين G و B ، حيث إن الثابت الوحيد الذي يطلب تحديده هو $2\lambda_g/ka$

$$\varepsilon'' = G\frac{ka}{2\lambda_g}\left[1-\frac{s}{k}(\varepsilon'-1)\right]^2 \quad و \quad \varepsilon' = 1+\frac{B\dfrac{ka}{2\lambda_g}}{1+B\dfrac{ka}{2\lambda_g}} \qquad (10)$$

ويمكننا أيضاً إجراء التقريب التالي في المعادلتين (6) و (7) : $\varepsilon' >> \varepsilon''$ أي $\eta=0$ و $ws/k<<1$ بقدر ما يكون d قطر أنبوب الحامل للعيّنة المستخدم صغيراً، وكذلك الضياع في المادة العازلة منخفضاً، فتصبح العلاقتان (10) كما يلي:

$$\varepsilon'' = G\frac{ka}{2\lambda_g} \quad و \quad \varepsilon' = 1+B\frac{ka}{2\lambda_g} \qquad (11)$$

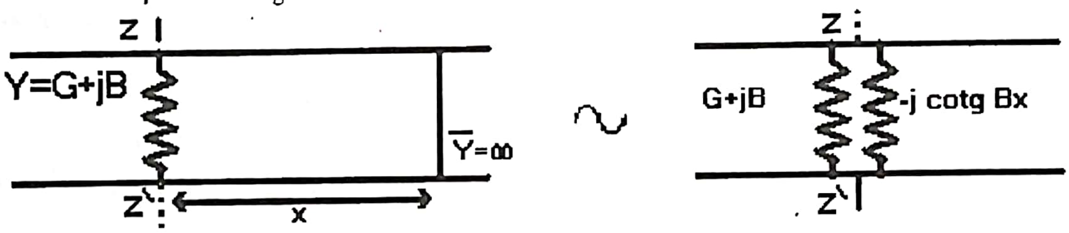
لتعيين السماحية العقدية للعيّنة يمكن استخدام عَينة ثابت عزلها الكهربائي معروف، مثل teflon، حيث يكفي في هذه الحالة تعيين B (لأن G=0 حيث $\varepsilon''=0$)، واستنتاج قيمة العامل $2\lambda_g/ka$ بشكل تجريبي [6, 5]. أن الفائدة من هذه الطريقة التجريبية هي في تقليل الأخطاء، وبشكل خاص التأثيرات الناتجة عن الفتحة الضرورية لإدخال العيّنة، والموجودة في منتصف دليل الموجة المستخدم.

2-1-تعيين السماحية العقدية للعينة المدروسة:

a- استخدام دارة مقصورة :

يتم ذلك بوضع دارة مقصورة على بعد x خلف مستوى النسب للعيّنة، لتكن سماحيتها التخيلية منسوبة لمستوى النسب $-j\cot g\,\beta x$، فتكون السماحية العقدية الكلية منسوبة لمستوى النسب zz' ، كما هو موضح في الشكل (2) هي:

$$Y_b = G + jB - j\cot g\,\beta x \qquad (12) \qquad \text{حيث } \beta = 2\pi/\lambda_g$$

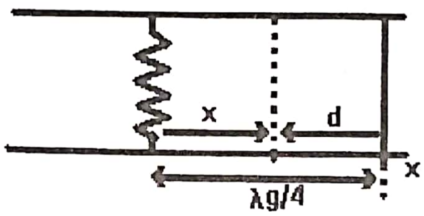


الشكل (2): وضع دارة مقصورة على بعد x خلف مستوى النسب للعينة.

إذا كانت العيّنة موضوعة ضمن أنبوب بدون ضياع، أي مصنوع من SiO_2 ، يجب إضافة سماحية jB_t على التفرع، بحيث تصبح عبارة Y_b :

$$Y_b = G + j\,(B+B_t) - j\cot g\,\beta x \qquad (13)$$

عـــندما يكون الدليل فارغاً، نحصل على الموضع الذي من أجله تكون قيمة الحقل الكهربائي عظـــمى في مستوى النسب، عندما $x = \lambda_g/4$ فأن $\cot g\,\beta x=0$ و $\beta x=\pi/2$ يمكننا أخذ هـــذا الموضع كمبدأ للمسافة على المكبس المقصور؛ أي: $d= (\lambda_g/4) - x$ كما في الشكل (3).

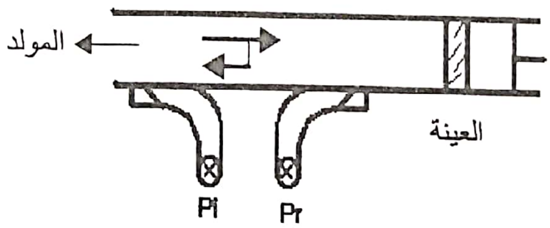


الشكل(3): اتخاذ الموضع d مبدأ لقياس المسافة اعتباراً من المكبس المقصور.

وتصبح علاقة Y_b :

$$Y_b = G + j\,(B + B_t) - j\,tg\,\beta\,d \qquad (14)$$

مـــن أجل قياس B و G نستخدم الرابط الاتجاهي، حيث نضعه بين المولد والعيّنة المدروسة، بيـــنما يوضع المكبس المقصور خلف العينة. يمكننا بوساطة الرابط الاتجاهي قياس الاستطاعة الواردة P_i والاستطاعة المنعكسة P_r، كما هو مبين في الشكل (4).



الشكل (4): قياس B و G باستخدام الرابط الاتجاهي، وذلك بوضعه بين المولّد والعيّنة المدروسة.

نعلم أن عامل الانعكاس يعطى بالعلاقة: $\rho = \dfrac{1-Y_b}{1+Y_b}$، وهذه علاقة عقدية، يمكننا حساب مطال عامل الانعكاس حسب العلاقة :

$$|\rho|^2 = \frac{(G-1)^2 + (B+B_t - tg\beta d)^2}{(G+1)^2 + (B+B_t - tg\beta d)^2} \qquad (15)$$

تكون قيمة ρ أصغريه عندما تتحقق العلاقة:

$$B + B_t = tg\,\beta\,d \qquad (16)$$

وتؤول العلاقة (15) إلى:

$$\left(\frac{G-1}{G+1}\right)^2 = |\rho|^2 = \frac{P_r}{P_i} \qquad (17)$$

b- استخدام ممانعة موافقة تامة(Charge adaptée):

نضـع في هذه الحالة ممانعة موافقة خلف مستوى النسب للعّينة مباشرة، لتكن سماحيتها منسـوبة لمسـتوى النسـب هـي $Y=1$، فـتكون السـماحية العقديـة الكـلية منسوبة لمستوى النسب zz′ هي:

$$Y = G + 1 - jB$$

ولكن $Y=\frac{1-\rho}{1+\rho}$ و $\rho=|\rho|e^{j\theta}$ بالتعويض نجد أن :

$$G + jB = -\frac{2\rho}{1+\rho} = -2\left(\frac{\rho\cos\theta+\rho^2}{1+2\rho\cos\theta+\rho^2} + j\frac{\rho\sin\theta}{1+2\rho\cos\theta+\rho^2}\right)$$

وبالتالي فإن :

$$G = -2\frac{\rho\cos\theta+\rho^2}{1+2\rho\cos\theta+\rho^2}$$

$$B = -2\frac{\rho\sin\theta}{1+2\rho\cos\theta+\rho^2}$$

c- استخدام ممانعة غير موافقة :

تصبح علاقة السماحية العقدية الكلية في مستوى النسب zz′:

$$G + jB = Y - Y'$$

بفرض أن: Y السماحية العقدية للعَينة و Y' سماحية المواءمة العقدية

وتعطى بدلالة عامل الانعكاس $\rho'=|\rho'|e^{j\theta'}$ بالعلاقة: $Y'=\frac{1-\rho'}{1+\rho'}$

بالتعويض نجد أن:

$$G = \frac{1-|\rho|^2}{1+2|\rho|\cos\theta+|\rho|^2} - \frac{1-|\rho'|^2}{1+2|\rho'|\cos\theta'+|\rho'|^2}$$

$$B = -\frac{2|\rho|\sin\theta}{1+2|\rho|\cos\theta+|\rho|^2} + \frac{2|\rho'|\sin\theta'}{1+2|\rho'|\cos\theta'+|\rho'|^2}$$

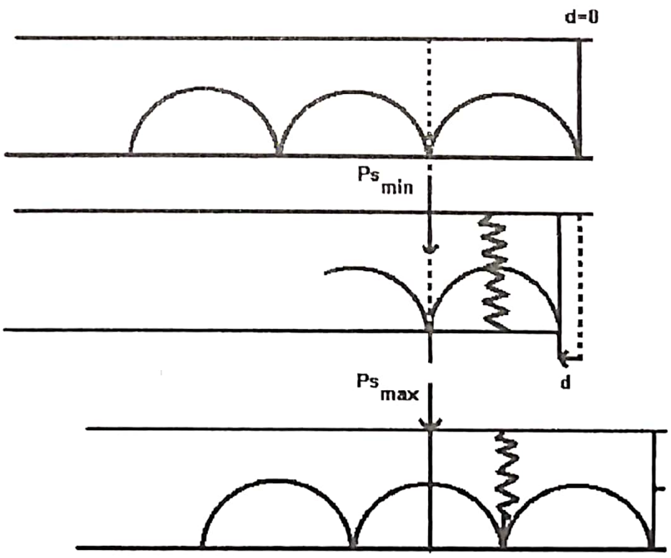
2-2- استخدام خط قياس مزود بمسبر واحد ينتهي بمكبس مقصور:

نستخدم مسبراً مرتبطاً بكاشف بلوري مصنوع من السيليسيوم، بحيث أن الجهد المقيس في ذلك الموضع يكون متناسباً مع الاستطاعة. نضع مسبراً ثابتاً على مسافة $\lambda_g/4$ أمام العيّنة والمكبس المقصور خلف العيّنة، كما هو مبين في الشكل (5)، ثم ننفذ الخطوات التالية:

1. ننقل المكبس المقصور إلى الموضع الذي من أجله $d=0$ بدون وجود العينة.
2. ننقل المكبس المقصور بوجود العيّنة، باتجاه العينة حتى نحصل على قيمة صغرى للحقل الكهربائي، ثم نقيس d_1 و P_{smin}
3. ننقل المكبس المقصور بوجود العينة باتجاه العينة حتى نحصل على قيمة عظمى للحقل الكهربائي، ثم نقيس d_2 وP_{smax}.

لدينا $B + B_t = tg\,\beta\,(d_1\text{-}d_2)$ و $G = \sqrt{\dfrac{P_{s\max}}{P_{s\min}}} = \dfrac{1-|\rho|}{1+|\rho|}$

إن مساوئ هذه الطريقة هي الحاجة لتغيير موضع المكبس المقصور من أجل القياس، كما أن العينة ليست موجودة دوماً في جوار الحقل الكهربائي الأعظمي، بالإضافة إلى أن طريقة القياس يدوية [6].



الشكل(5): وضع مسبر ثابت على مسافة $\lambda_g/4$ أمام العينة، بينما المكبس المقصور خلف العينة.

3-2 استخدام خط قياس مزود بمسبرين ينتهي بمكبس مقصور:

إذا كان S_1,S_2 عبارة عن مسبرين، البعد بينهما $\lambda_g/4$، بحيث يكون المسبر الأول على بعد $\lambda_g/4$ أمام محور العيّنة، ويليه المسبر الثاني على بعد $\lambda_g/2$ من العينة. إذا وضعنا

فـــي هذه الحالة مكبساً مقصوراً على بعد $\lambda_g/4$ خلف العينة يؤدي لظهور قيمة صغرى للحقل عـــند المسبر الأول، وقيمة عظمى للحقل على كل من المسبر الثاني والمحور المار من مركز العيـــنة أيضـــاً. بـــدون تغييـــر موضع المسبرين يمكننا وضع العّينة، مما يؤدي لتغيير طول الموجـــة المستقرة ومطالها أيضاً. تتم العودة للموضع الابتدائي اعتباراً من هذا الموضع، بجعل قيمـــة الحقـــل صغرى عند المسبر الأول، يمكننا أن نلاحظ أن فرق الطور للممانعة المكافئة للعيـــنة تـــم تعويضه بانتقال المكبس، كما هو مبين في الشكل (6). هذا يعني وجود العّينة في مـــنطقة يكـــون الحقل الكهربائي فيها أعظمياً. يمكن الحصول على القسم التخيلي لثابت العزل الكهربائي بمعرفة النسبة بين مطالي الاستطاعتين P_{s1} و P_{s2} للمسبرين الأول والثاني.

لقياس P_{s1} و P_{s2} ننفذ الخطوات التالية:

1- نـــنقل المكبس المقصور (المثبت خلف مستوى العينة)، عندما يكون الأنبوب الحامل للعينة فارغاً، فنحصل على الموضع $d = 0$ الذي من أجله تكون قيمة الحقل الكهربائي صغرى عند المسبر الأول.

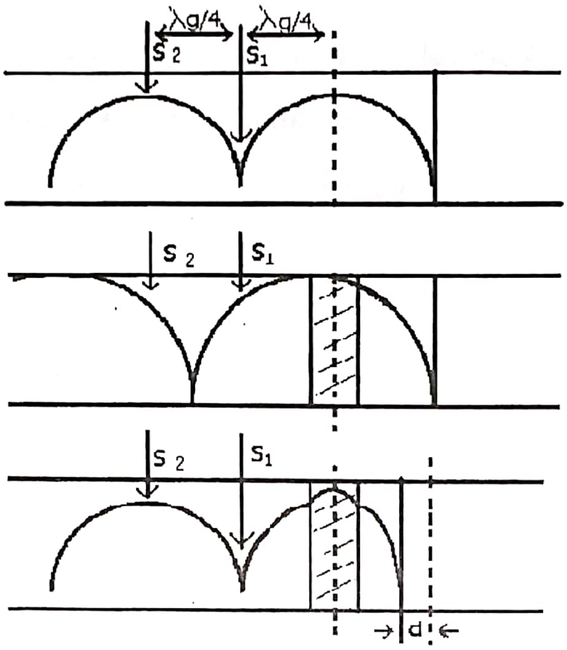
2- نضـــع العّيـــنة في الأنبوب، وننقل المكبس، بحيث نحصل على نهاية صغرى عند المسبر الأول P_{s1}، فتكون النهاية العظمى للحقل على المسبر الثاني P_{s2}.

في هذه الحالة يكون لدينا : $B = tg\,\beta\, d$

وأما $G = \sqrt{\frac{P_{s1}}{P_{s2}}} = \frac{1-|\rho|}{1+|\rho|}$

والاستطاعة الممتصة من قبل العّينة هي : $P_{abs} = P_i \frac{4G}{(G+1)^2}$

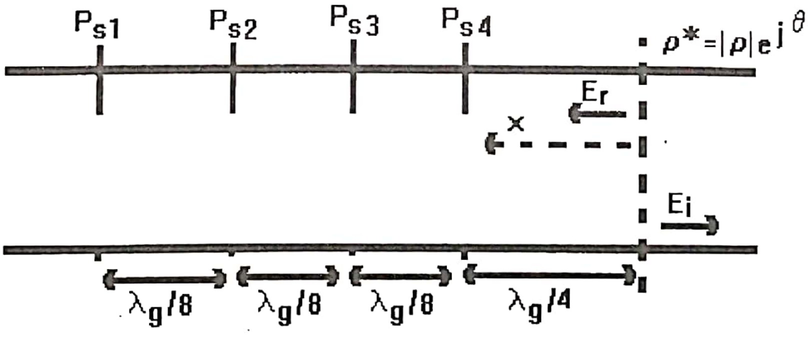
ونحتاج لحساب P_{abs} قياس الاستطاعة الواردة P_i، وذلك باستخدام الرابط الاتجاهي، حيث يتم وضعه بين مولد الأمواج الميكروية والمسبر الأول.



الشكل (6): يتم تعويض فرق الطور للممانعة المكافئة للعينة بانتقال المكبس المقصور.

2-4- استخدام خط قياس مزود بأربعة مسابر ينتهي بمكبس مقصور:

نثبت أربعة مسابر على خط قياس، المسافة بينها متساوية ومساوية لـ$\lambda_g/8$، بينما يبعد أول مسبر أمام العينة بمقدار $\lambda_g/4$ عن مستوى النسب، كما هو مبين في الشكل (7)، يكون عامل الانعكاس في هذا المستوى $\rho = |\rho| e^{j\theta}$ ناتجاً عن السماحية العقدية Y.



الشكل (7): تثبيت أربعة مسابر على خط قياس المسافة بينها متساوية ومساوية لـ $\lambda_g/8$ بينما يبعد أول مسبر أمام العينة بمقدار $\lambda_g/4$ عن مستوى النسب.

إن الحقل الكهربائي المقيس في مستوى المسبر n الذي يتوضع على بعد x من المستوى المرجعي [8,7] يعطى بالعلاقة:

$$E_n = E_i e^{j\beta x} + E_r e^{-j\beta x} \qquad (18)$$

حيث $E_r = E_i |\rho| e^{j\theta}$ ، وبالتعويض عن E_r بقيمتها في العلاقة الأخيرة نجد :

$$E_n = E_i e^{j\beta x}(1+|\rho| e^{j(\theta-2\beta x)}) \qquad (19)$$

إن الإشـارة الملـتقطة مـن قـبل المسـبر n، أي P_{sn} تتناسب مع $|E_n|^2$ (وعامل التناسب هو نفسه من أجل كل مسبر يعطي إشارة P_{sn})؛ أي ذات صيغة تربيعية بالنسبة لعامل الانعكاس.

يكـون بعـد المسـبر الـأول عـن مسـتوى النسـب : $x = \frac{\lambda_g}{2} + \frac{\lambda_g}{8}$ بالـتعويض فـي العلاقـة (19) نحصل على:

$$P_{s1} = E_i^2 \left| 1 + |\rho| e^{j(\theta - \frac{\pi}{2})} \right|^2 = E_i^2 \left(1 + |\rho|^2 + 2|\rho| \sin\theta\right)$$

بينما يبعد المسبر الثاني مسافة $x = \frac{\lambda_g}{2}$، وبالتعويض في العلاقة (19) نجد:

$$P_{s2} = E_i^2 \left| 1 + |\rho| e^{j\theta} \right|^2 = E_i^2 \left(1 + |\rho|^2 + 2|\rho| \cos\theta\right)$$

من أجل المسبر الثالث يكون: $x = \frac{\lambda_g}{2} - \frac{\lambda_g}{8}$

$$P_{s3} = E_i^2 \left| 1 + |\rho| e^{j(\theta + \frac{\pi}{2})} \right|^2 = E_i^2 \left(1 + |\rho|^2 - 2|\rho| \sin\theta\right)$$

واخيراً يبعد المسبر الرابع عن مستوى النسب $x = \frac{\lambda_g}{4}$

$$P_{s4} = E_i^2 \left| 1 + |\rho| e^{j(\theta - \pi)} \right|^2 = E_i^2 \left(1 + |\rho|^2 - 2|\rho| \cos\theta\right)$$

يجب التأكد من أن الإشارات الملتقطة من قبل المسابر الأربعة، تحقق فيما بينها العلاقة التالية:

$$P_{s1} + P_{s3} = P_{s2} + P_{s4} \qquad (20)$$

كما أن فرق الطور بين هذه الإشارات يجب أن يحقق العلاقة :

$$\theta = arctg \frac{P_{s1} - P_{s3}}{P_{s2} - P_{s4}} \qquad (21)$$

إن السماحية العقدية في مستوى النسب تعطى بالعلاقة:

$$Y = G + j(B + B_t - tg\,\beta d) \qquad (22)$$

أما عامل الانعكاس فيحقق العلاقة :

$$\rho = |\rho| e^{j\theta} = \frac{1 - G - j(B + B_t - tg\,\beta t)}{1 + G + j(B + B_t - tg\,\beta t)} \qquad (23)$$

أي أن :

$$|\rho| = \sqrt{\frac{(1-G)^2 + (B + B_t - tg\,\beta d)^2}{(1+G)^2 + (B + B_t - tg\,\beta d)^2}} \qquad (24)$$

$$tg\,\theta = -\frac{2(B + B_t - tg\,\beta d)}{1 - G^2 - (B + B_t - tg\,\beta d)^2} \qquad (25)$$

تفترض طريقة القياس، أن العينة متوضعة في منطقة تكون قيمة الحقل الكهربائي فيها أعظمية، هذا يعني أن القسم التخيلي للسماحية العقدية Y معدوم؛ أي أن:

$$B+B_t= tg\,\beta\, d \qquad (26)$$

ولدينا أيضاً $tg\,\theta = 0$، أي يجب أن يتحقق :

$$arctg\ \frac{P_{s1}-P_{s3}}{P_{s2}-P_{s4}}=0 \qquad (27)$$

وفي هذه الحالة :

$$P_{abs}=P_i\frac{4G}{(G+1)^2} \quad و \quad G=\sqrt{\frac{P_{s4}}{P_{s2}}} \quad و \quad |\rho|^2=\left(\frac{1-G}{1+G}\right)^2 \qquad (28)$$

يجب التنبيه على أنه ليس من الضروري، لتحديد B و G هنا، أن تكون الإشارة على المسبر الرابع P_{s4} أصغرية، أو $\theta=0$؛ لأن هذا يمكن تحقيقه من أجل أي قيمة لـ θ.

2-3-1- تعيين النهاية الصغرى عند أحد المسابر:

لنفرض أن الإشارة المقيسة على المسبر الرابع، على سبيل المثال، هي ذات قيمة أقل من قيم الإشارات المقيسة على بقية المسابر ولنبحث عن النهاية الصغرى الواقعة في جوار هذه القيمة.

نعلم أن الإشارة P_{s4} من الشكل:

$$P_{s4}=E^2(1+\rho^2-2\rho\cos\theta) \qquad (29)$$

عند النهاية الصغرى تكون $\theta = 0$؛ أي أن : $P_{s4\min}=E^2(1-\rho)^2$

فيكون P_{s4} بدلالة $P_{s4\min}$: $P_{s4}=P_{s4\min}+E^2\rho\sin^2\frac{\theta}{2}$

حيث $\theta=\frac{4\pi}{\lambda_g}(x-x_o)$ ، أي أن : $P_{s4}=P_{s4\min}+E^2\rho(\frac{4\pi}{\lambda_g})^2(x-x_o)^2$

وهي من الشكل : $P_{s4}=a+b(x-x_o)^2$ ، وبالتالي يمكننا تقدير الخطأ النسبي في تعيين القيمة الصغرى، أي في حساب النسبة التالية :

$$\frac{P_{s4}-P_{s4\min}}{P_{s2\max}}=\frac{\rho}{(1+\rho)^2}(\frac{2\pi}{\lambda_g})^2(\Delta x)^2 \qquad (30)$$

يمكننا تعيين النهاية الصغرى بأخذ ثلاث نقاط في جوار النقطة الصغرى وبفرض أن الشكل العام لإشارة المسبر الرابع هو : $v= a + b\,x+ c\,x^2$ بفرض أن $x_2=x_1+x,\ x_3=x_1-x$، باستخدام طريقة أصغر المربعات [9]، للحصول على قيم الوسائط a ، b و c بحيث يكون المجموع التالي أصغرياً:

$$R = \sum_{i=1}^{n} (v_i - a - bx_i - cx_i^2)^2 \quad (31)$$

نجد بعدها النهاية الصغرى باشتقاق علاقة v بالنسبة إلى x :

$$x_{\min} = -\frac{b}{2c}, v_{\min} = -\frac{b^2}{4c} \quad (32)$$

2-3-2- الإجراءات التجريبية:

نستخدم خط قياس (عبارة عن قطعة من دليل موجة مستطيل المقطع، أبعاده (a =8.36cm, b =4.32cm مزود بأربعة مسابر وينتهي بمكبس مقصور متحرك وقطر الأنبوب الحامل للعينة d =1.75cm ، أما التردد المستخدم f=2.45GHz، وطول الموجة المرافق له في الهواء λ = 12.34cm بينما طول الموجة ضمن الدليل λ_g =17.34cm.

-نضع الأنبوب الحامل للعينة في مكانه ضمن خط القياس الثابت.

- نغير موضع المكبس المقصور الموجود خلف حامل العينة إلى الموضع d_1، حيث يشير مقياس الجهد الموصول مع المسبر الرابع إلى قيمة صغرى؛ ولتكن v_1.

- نملأ الأنبوب بالسائل المراد تعيين ثابت عزله الكهربائي، ونغير موضع المكبس المقصور من جديد إلى الموضع d_2، الذي من أجله يكون الجهد المسجل على نفس المسبر أصغرياً، وليكن v_2 (يمكن تغيير موضع المكبس المقصور بشكل يدوي أو آلي، باستخدام الحاسوب، وذلك بربط الحاسوب بالتجهيزات المستخدمة وتسجيل النتائج ورسم المنحنيات. من أجل تحديد النهاية الصغرى بدقة عند المسبر الرابع، لابد من استخدام طريقة أصغر المربعات المذكورة في الفقرة(2-3-1).

- نلاحظ أن الفرق $d_1 - d_2$ صغير جداً أمام λ_g، وبالتالي يمكننا اعتبار الموضع الأصلي للمكبس المقصور هو عندما يكون الأنبوب حامل العينة فارغاً أي d_1.

-نحسب قيم B و G من العلاقتين (26)و (28) ثم نستنتج قيم ε' و ε'' من العلاقتين (11). ونحصل على الجدول التالي:

جدول قيم ε' و ε'' للمواد المدروسة.

المادة المدروسة	ε'	ε''
H_2O	77.8	9.8
$CC\ell_4$	2.72	0.31
$CHC\ell_3$	4.85	0.62

إن الخطأ المرتكب في حساب 'ε و "ε يمكن أن يتم من حساب العامل k ، الذي يتعلق بقطر الأنبوب الحامل للعينة فقط، وكذلك من حساب العامل s ، الذي يتعلق بدوره بأحد أبعاد دليل الموجة a ، وقطر الأنبوب الحامل للعيّنة المدروسة.

REFERENCES المراجع

[1] MARCUVITZ, M. 1951 - Waveguide Handbook Mc. Graw Hill, New york,
pp.266-267.

[2] SUCHER M. and FOX J., 1963 - Handbook of Microwave Measurements
Polytechnic Press of the Polytechnic Institute of Brooklyn Vol II, pp. 495-518.

[3] GINZTON E.L. 1957 - Microwave Measurements Mc.Graw Hill Book Company, Inc., pp.307-311.

[4] VON HIPPEL A. R., 1954 - Dielectrics Materials And Applications. New York, MIT Technology Press and Wieley, pp. 241-242.

[5] ENGEN G. F., 1978 – Advance in Microwave Measurement Science. PIEEE, vol. 66, no. 4, pp. 374-384

[6] AFSAR M. N., BIRCH J. R. and CLARCKE R. N., 1986-
The Measurements of Properties of Materials. PIEEE, vol. 74(1), pp.183-199.

[7] MARTIN E., MARGINEDA J. and ZAMARRO J. M., 1982 – An Automatic Network Analyzer Using a Slotted Line Reflectometer. Trans. IEEE on MTT, vol. MTT-30, no. 5, pp. 667-670

[8] XI-PING H., 1987 - Using six-port Reflectometer Measurement of Complex Dielectric Constant IEEE, vol. MI-36 (2), pp.537-539.

[9] JUAN M., MARTA R. and JOSE M., 1993 - A Methode for Measuring the Permittivity without Ambiguity Using Six-port Reflectometer.
IEEE, Trans. On IM, vol. 429 (2), pp. 222-226