مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية – سلسلة العلوم الأساسية المجلد /16/ العدد /3/ 1414 هـ 1994م.

تعيين الخواص الكهرطيسية لشرائح رقيقة ماصة للغرافيت ضمن دليل الموجة و عند التردد 2450 MHz

د. حسن غانم*

□ ملخص □

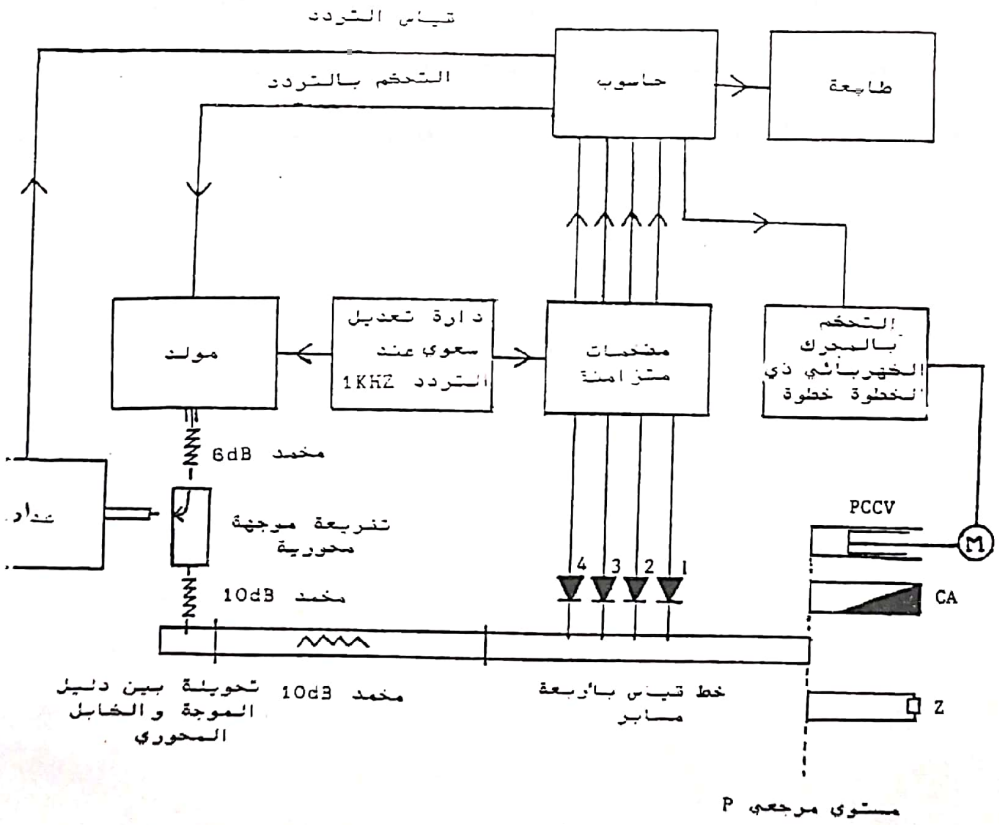
يتناول هذا البحث قياس ممانعة شرائح رقيقة Films ماصة للغرافيت عند التردد 2450 MHz بغية تعيين خواصها الكهرطيسية، كما أنه تطبيق هام من تطبيقات الطريقة الآلية لقياس الممانعات {1} التي تعمل ضمن دليل الموجة RG 112-U وتغطي المجال الترددي 2-3.4gHz والتي تستخدم خط قياس ثابت بأربعة مسابر. بعد معاير المعلومات التي تزودنا بها المسابر وذلك بوساطة مكبس مقصور متغير موضوع في نهاية خط القياس. يزودنا الحاسوب بقيم عامل الإنعكاس للشريحة الملصقة في نهاية خط القياس وذلك بوضع دارة مقصورة، دارة مفتوحة وممانعة الحمولة الملائمة خلف الشريحة. إن قياس عوامل الانعكاس الثلاثة السابقة يسمح لنا بتحديد الخواص الكهرطيسية بسهولة

* الدكتور حسن غانم مدرس في قسم الفيزياء بكلية العلوم – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.

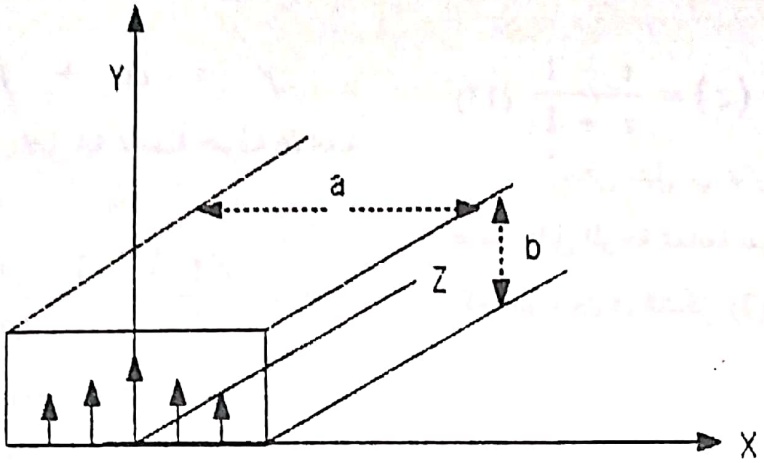
1- تمهيد:

تعتبر تقنية قياس الممانعات في مجال الأمواج الميكروية Microwaves إحدى التقنيات الهامة، التي يُمكن إجراؤها ضمن دليل الموجة Waveguide دون اللجوء لمحلل الشبكات Network Analyser الباهظ الثمن، الذي يعمل بشكل تقليدي بإستخدام الكابل المحوري Coaxial Cable. من أجل تعيين الخواص الكهرطيسية لشرائح رقيقة Films ماصة للغرافيت عند التردد 2450 Mhz.

نستخدم لهذا الغرض المخطط التجريبي المكون من: مولد HP8350 A، إستطاعة مخرجه حوالي 10 mw، مجاله الترددي 4.2 GHz - 1.8، يضبط التردد آلياً أو يدوياً، كما يتم تعديل إشارة المخرج تعديلاً مطالياً على التردد 1 KHz بواسطة جهد خارجي، مخمدات إشارة، مضخم متزامن بأربعة مسالك، خط قياس بأربعة مسابر، مكبس مقصور وحاسوب شخصي يقود الجملة بكاملها على نحو آلي، كما هو مبين في الشكل (1) وذلك بحسب {1}. تتم معايرة الدارة التجريبية وذلك بإنتقال المكبس المقصور ضمن دليل الموجة، حيث يقاس موقعه بالنسبة لمستوي مرجعي P محدد بدقة.



الشكل (1)



الشكل(2)

2- نظرية أدلة الموجة مستطيلة المقطع:

ليكن لدينا موجة RG 112-U، مقطعه مستطيل، طوله a وعرضه b، كما هو مبين في الشكل (2)، يتميز بنمط إنتشار أساسي TE_{10}، ويتوزع الحقل الكهرطيسي ضمن الدليل والذي مركباته هي (2،3،4):

$$E'_y = E_i \sin\frac{\pi x}{a}\exp\left(j\frac{2\pi Z}{\lambda_g}\right) \quad (1)$$

$$H'_x = E_i\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}\frac{\lambda}{\lambda_g}\sin\frac{\pi x}{a}\exp\left(j\frac{2\pi Z}{\lambda_g}\right) \quad (2)$$

$$H'_z = jE_i\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}\frac{\lambda}{2a}\cos\frac{\pi x}{a}\exp\left(j\frac{2\pi Z}{\lambda_g}\right) \quad (3)$$

نحصل على مركبات الحقل الكهرطيسي المنعكس على ممانعة معينة موضوعة في نهاية الدليل، بتبديل E_i بـ E_r و λ_g بـ λ_g في العلاقات السابقة وبالتالي تصبح هذه العلاقات على الشكل:

$$E'_y = E_r \sin\frac{\pi x}{a}\exp\left(-j\frac{2\pi Z}{\lambda_g}\right) \quad (4)$$

$$H'_x = E_r\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}\frac{\lambda}{\lambda_g}\sin\frac{\pi x}{a}\exp\left(-j\frac{2\pi Z}{\lambda_g}\right) \quad (5)$$

$$H'_z = jE_r\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}\frac{\lambda}{\lambda_g}\cos\frac{\pi x}{a}\exp\left(-j\frac{2\pi Z}{\lambda_g}\right) \quad (6)$$

ندعو المقدار $\rho(z)$ عامل الإنعكاس في نقطة معينة، فاصلتها z

$$\rho(z) = \frac{E'_y}{E'_y} = \frac{E_r}{E_i}\exp\left(-j\frac{4\pi Z}{\lambda_g}\right) \quad (7)$$

بفرض أن المحور OZ موجه من المولد نحو ممانعة الحمولة، تُعطى الممانعة العقدية Z(z) بالعلاقة التالية:

$$Z(z) = Z_0\frac{1+\rho(z)}{1-\rho(z)} \quad (8)$$

وأما طول الموجة الحرج λ_c فيعبر عنه بالعلاقة التالية:

$$\left(\frac{1}{\lambda_c}\right)^2 = \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{1}{\lambda_g}\right)^2 \quad (9)$$

وكما تُعطى الممانعة المميزة لدليل الموجة بعلاقة من الشكل:

$$Z_0 = 2\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}\frac{\lambda_g}{\lambda}\frac{b}{a} \quad (10)$$

أما عامل الإنتشار العقدي γ فيُعطى بالعلاقة:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (11)$$

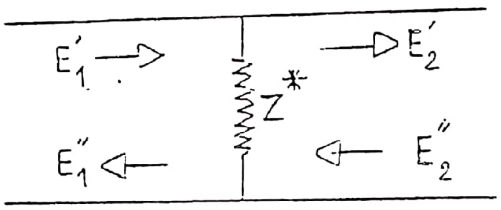
يُمكن تمثيل أية ممانعة حمولة بممانعة عقدية مختزلة:

$$\tau = \frac{Z(z)}{Z_0} = \frac{1+\rho(z)}{1-\rho(z)} \quad (12)$$

يرتبط عامل الإنعكاس مع الممانعة المختزلة بعلاقة من الشكل:

$$\rho(z) = \frac{\tau - 1}{\tau + 1} \quad (13)$$

يُمكن تمثيل أي عائق رقيق موضوع ضمن دليل الموجة بممانعة تفرعية $z^*=r + jx$ كما هو مبين في الشكل (3):



الشكل (3)

كما ترتبط الموجات الواردة مع الموجات المنعكسة على العائق بالعلاقة التالية {2}

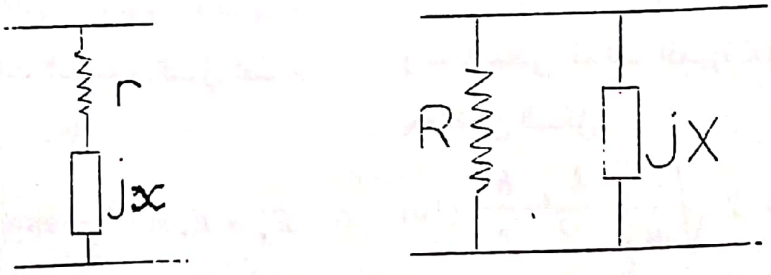
$$\begin{pmatrix} E_1'' \\ E_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{\rho^*} & \overline{t^*} \\ \overline{t^*} & \overline{\rho^*} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_1' \\ E_2'' \end{pmatrix} \quad (14)$$

بفرض أن: $\overline{\rho^*} = -\frac{1}{1+2Z^*}$ و

$$\overline{t^*} = 1 + \overline{\rho^*}$$

يمكننا الإنتقال من الشكل الفرعي الأول للممانعة التي تتكون من مقاومة r موصولة على التسلسل مع ممانعة ردية x إلى الشكل التفرعي الثاني للممانعة والتي تتكون من مقاومة R موصولة على التسلسل مع الممانعة الردية X، كما هو مبين بالشكل (4)، بإستخدام العلاقة التالية:

$$\frac{1}{R} + \frac{1}{jX} = \frac{1}{r + jx} \quad (15)$$



الشكل (4)

3- نظرية الدارات ذات الستة منافذ:

تصنع الدارة المؤلفة من ستة منافذ (6 Ports) بشكل عام من الكابل المحوري، باستخدام تفريعات موجهة (Directifs couplers) أو تفريعات محورية 3 dB. تكون هذه الدارة من منفذ موصول مع مولد الإشارة، وآخر موصول بالممانعة المراد قياسها والمنافذ الأربعة الباقية موصولة مع مسابر الإستطاعة، كما هو مبين في الشكل (5).

يرتبط الجهد المتولد عن كل مسبر إرتباطاً مع عامل إنعكاس الممانعة المراد قياسها وذلك وفقاً للعلاقة التالية:

$$V_m = K_m E_i^2 \left[1+\rho^* \exp\left(-j\frac{4\pi . d_m}{\lambda_g}\right)\right]^2 \quad (16)$$

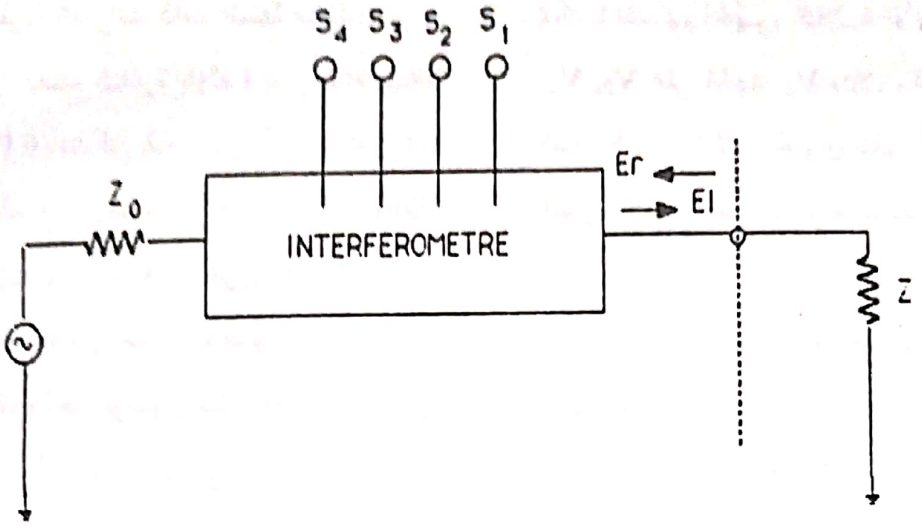
m=1,2,3,4

يمثل E_i مطال الموجة الواردة، أما $\rho^* = \rho \exp(j\varphi)$ فيمثل عامل الإنعكاس العقدي للممانعة المراد قياسها والموضوعة في مستوٍ مرجعي محدد P ، λ_g طول الموجة ضمن دليل الموجة وأما العامل K_m فيعرف حساسية المسبر m.

في الحالة العامة، فإن أحد المسابر الأربعة الموصولة مع الدارة ذات الستة منافذ يقيس تقريباً إستطاعة الموجة الواردة، وبالتالي يمكننا تقسيم الجهود الثلاثة الأخرى V_3, V_2, V_1 على الجهد V_4 مثلاً، ونحصل على جملة ثلاث معادلات تحوي على أحد عشر مجهولاً غير متعلقة بسوية إستطاعة الموجة الواردة.

يمكننا تعيين هذه المجاهيل بإستخدام مجموعة مناسبة من الممانعات المرجعية من بينها الممانعة الملائمة Mached load، ممانعة الدارة المقصورة Shorted circuit وممانعة الدارة المفتوحة Open circuit.

لقد تبينا نظرية الدارات ذات الستة منافذ، ولكن اضطرارنا لإستخدام أدلة الموجة لم يكن مناسباً وذلك لأن تنفيذ دارة ذات ستة منافذ مصنوعة من دليل الموجة، يتطلب تفريعتين موجهتين على الأقل وهذا يعني الحصول على دارة ذات أبعاد هندسية كبيرة عند التردد 2450 MHz، بالرجوع للدوريات والمراجع المختصة توصلنا لتصميم خط دارة قياس (لاقط) مكون من أربعة مسابر، يفصل بين المسبر والذي يليه مسافة ثابتة $\lambda_g/8$، كما أنّ هذه المسابر مثبتة بشكل متناوب على طرفي الوجه الكبير لدليل الموجة ذات المقطع المستطيل RG 112-U.



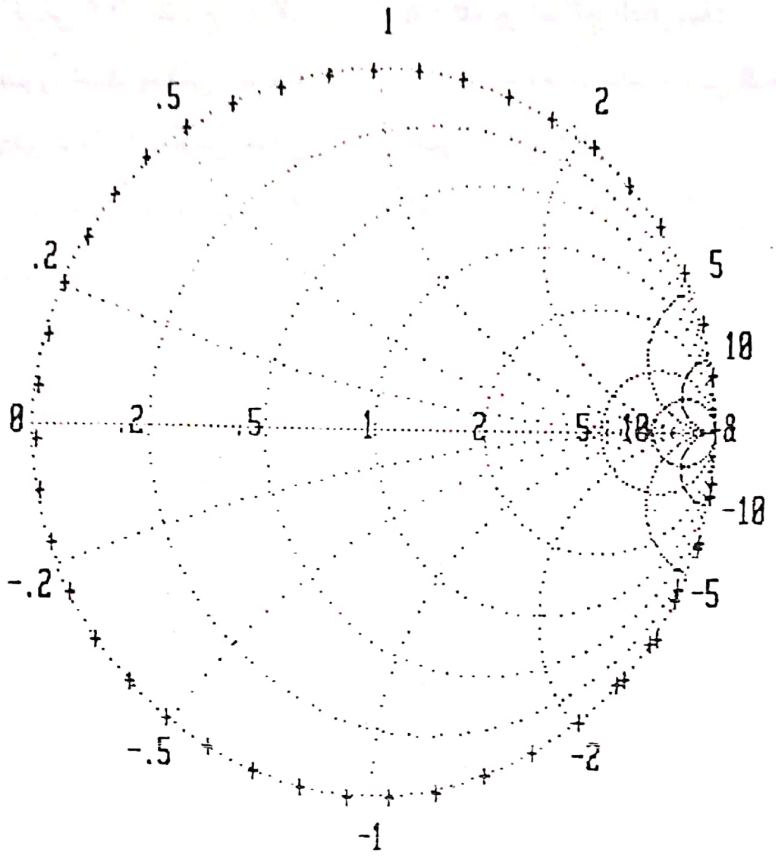
الشكل (5).

إن هذا الخط عبارة عن دارة ذات ستة مسابر ولكن لا تطبق عليه النظرية العامة للدارات ذات الستة منافذ وذلك لأنه من الممكن أن يكون الجهد المتولد عن كل مسبر من المسابر الأربعة معدوماً وذلك بحسب الممانعة المراد قياسها، وبالتالي لا يمكن إعتبار هذا الجهد قاسماً مشتركاً للجهود الثلاثة الأخرى.

4- معايرة خط القياس:

بفرض أنّ الدارة خالية من العيوب، يمكننا تعريف شعاع $\vec{R}$ من أجل كل ثنائي أقطاب موصول في مخرج اللاقط، الذي يتعلق بعامل إنعكاسه ويرتبط خطياً مع شعاع الجهود $\vec{V}$ الموافق لمعطيات المسابر. أشرنا في المرجع {1} بأن الطريقة المفضلة لتحديد الشعاع $\vec{R}$ بالإعتماد على معرفة الشعاع $\vec{V}$، هو تعيين عناصر المصفوفة [Σ] التي تربط عكسياً الشعاع $\vec{V}$ مع الشعاع $\vec{R}$ وذلك بإستخدام طريقة أصغر المربعات ومعايرة خط القياس بوساطة مكبس مقصور متحرك ضمن الدليل خلف مستوى الإرجاع. لقد بيّنا بأنّ عناصر المصفوفة [Σ] تتعين إحصائياً بشكل أفضل إذا تجنبنا إدخال المعطيات الناتجة عن الممانعة الملائمة عالية الجودة في الحساب، وهذا يعود لكون قيمة عامل الإنعكاس للدارات المقصورة تقترب من الواحد بشكل أفضل من إقتراب قيمة عامل الإنعكاس الممانعة الملائمة من الصفر.

يبين الشكل (6) عامل إنعكاس المكبس المقصور المتحرك وذلك بعد الأخذ بعين الإعتبار كل مواضيع المكبس المذكور في تحديد عناصر المصفوفة.



الشكل(6).

5- التقنية المستخدمة في تعيين الخواص الكهرطيسية للشرائح الرقيقة:

يتم وصل الدارة المدروسة في نهاية خط القياس الثابت المذود بأربعة مسابر، بعد معايرته بوساطة مكبس مقصور متغير، يذودنا الحاسوب بقيمة عامل الإنعكاس العقدي *ρ للممانعة المقاسة في مستوي مرجعي محدد بنهاية خط القياس.

تُلصق الشريحة المدروسة على نهاية خط القياس، حيث تستقبل موجة واردة Ei وينعكس عنها موجة *R كما تنقل عبرها موجة *T. يمكننا قياس *R مباشرة وذلك بوضع ممانعة حمولة ملائمة خلف الشريحة والتي تمتص الموجة *T، ندعو العامل

$$\rho_a^* = \frac{R^*}{E_i}$$

بعامل الإنعكاس لمدخل الشريحة بوجود ممانعة الحمولة الملائمة.

من أجل قياس *T، نضع خلف الشريحة مكبساً مقصوراً بحيث يعكس الموجة *T نحو الشريحة. يتغير عامل الإنعكاس المقاس للشريحة في مستوي الشريحة بتابعية المسافة d الفاصلة بين الشريحة والمكبس المقصور، بحيث يرسم دائرة في المستوي العقدي لمخطط سميث، التي يُعرف قطرها عاملي الإنعكاس ρ^*_0 و ρ^*_c المقابلين لحالتين خاصتين للمكبس المقصور.

من أجل ρ^*_c ، يكون المكبس في مستوي الشريحة تماماً حيث يكون الحقل الكهربائي معدوماً في هذا الموضع، ρ^*_c= -1.

بالعكس عندما ρ^*_0 = *ρ، تكون الشريحة في موضع حيث يكون الحقل الكهربائي أعظمياً. ترتبط الأعداد العقدية ρ^*_a , ρ^*_c , ρ^*_0 بمعادلة عقدية، أي بوساطة علاقتين بين أعداد حقيقية.

$$\rho_a^* = \frac{\rho^*_0 + \rho^*_c}{2 - \rho^*_c + \rho^*_0}$$

إذا مثلنا الممانعة المختزلة للشريحة بدارة مكافئة مؤلفة من مقاومة r موصولة على التسلسل مع ممانعة رديئة Jx نحصل من دراسة الدارة على العلاقتين التاليتين:

$$r = \frac{-\cos\psi_a - \rho_a}{2\rho_a}, \quad x = \frac{-\sin\psi_a}{2\rho_a} \qquad (17)$$

حيث $\rho^*_a = \rho_a e^{j\psi_a}$ هو عامل الإنعكاس للشريحة بوجود ممانعة الحمولة الملائمة.

6- تفسير النتائج التجريبية:

تم إجراء سلسلة من التجارب على خمس شرائح مختلفة.

- الشريحة رقم 1: عبارة عن غرافيت نقي متوضع على شريحة من النايلون mylar.
- الشريحة رقم 2: عبارة عن الشريحة رقم 1 نفسها ولكن سماكتها هنا أكبر بعشر مرات.
- الشريحة رقم 3: عبارة عن دهان ممزوج حجمياً بالغرافيت بنسبة أقل من 0.1 %.
- الشريحة رقم 4: عبارة عن الشريحة رقم 3 نفسها ولكن سماكتها هنا أكبر بمرتين على الأقل.
- الشريحة رقم 5: دهان مشحون حجمياً بالغرافيت بنسبة 0.2 %.

تمثل الأشكال من 7 إلى 11 عامل إنعكاس الشريحة بتابعية موضع المكبس المقصور من أجل الشرائح الخمسة السابقة.

بالرجوع للأشكال السابقة، يمكننا التحقق من أنّ جميع الدوائر الممثلة لعامل إنعكاس الشريحة بتابعية إنتقال المكبس المقصور تكون مماسة لدائرة الواحدة لمخطط سميث، كما أن الشرط بين ρ^*_a و ρ^*_c محقق بشكل جيد، لأنّ حساب ρ^*_a بالإعتماد على ρ^*_c يعطي تقريباً ρ^*_a ، ونرمز للقيم المحسوبة لـ ρ^*_a بالإعتماد على ρ^*_0 في الجدولين (1) و(2) بـ $\overline{\rho^*_a}$، وقد وجدنا أن الخواص الكهرطيسية لشرائح الغرافيت النقي

تتغير بتابعية سماكتها، فتتناقص مقاومتها بإزدياد السماكة بينما تبقى قيمة الممانعة الردية صغيرة جداً، تغدو الشريحة ناقلة أكثر بقدر ما تكون سماكتها كبيرة، كما لو كانت الشريحة معدنية، وذلك لأنّ قيمة عامل إنعكاسها قريبة من 1- أي كأنها دارة مقصورة.

بالنسبة لشرائح الدهان الممزوجة بالغرافيت، تملك ممانعة ردية صغيرة،ولكنها غير مهملة، بينما تكون مقاومة الشرائح أكبر من مقاومة شرائح الغرافيت النقي.

نلاحظ بأنه كلما انتشرت كمية الغرافيت القليلة المضافة إلى الدهان حجمياً بشكل أفضل، كلما كانت المقاومة ضعيفة.

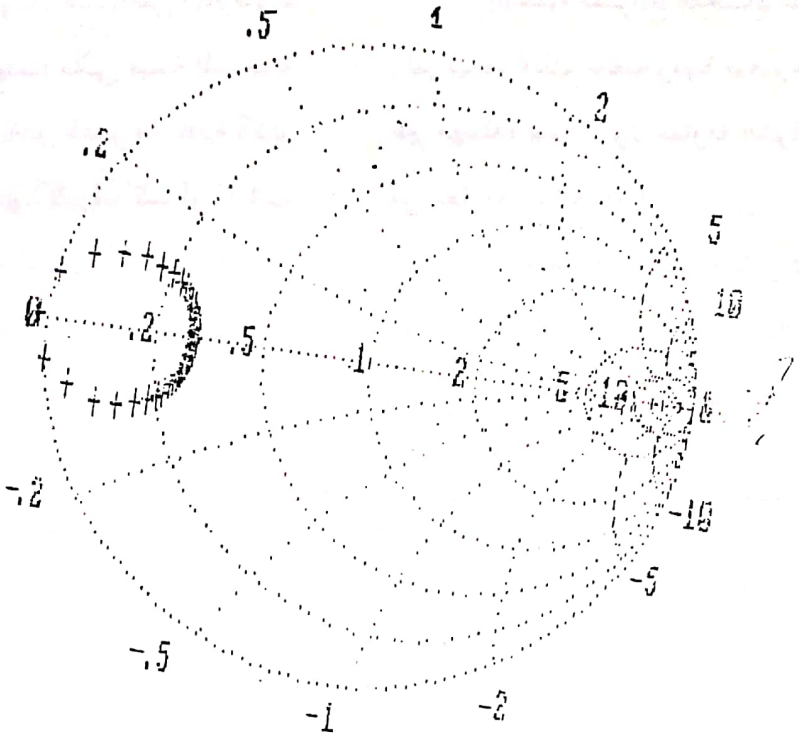
N°du film	ρ_c	Arg ρ_c	ρ_0	Arg ρ_0	ρ_a	Arg ρ_a	$\overline{\rho}_a$	Arg $\overline{\rho}_a$
1	1	3.14	0.55	3.14	0.64	3.16	0.63	3.14
2	1	3.14	0.89	3.14	0.91	3.14	0.9	3.14
3	0.99	3.14	0.91	6.2	0.0963	1.15	0.031	3.84
4	1	3.14	0.89	6.17	0.14	0.99	0.039	3.88
5	0.99	3.14	1	6.21	0.0854	3.68	0.018	4.69
6	1	3.14	1	6.21	0.0848	4.24	0.018	4.69

الجدول (1)

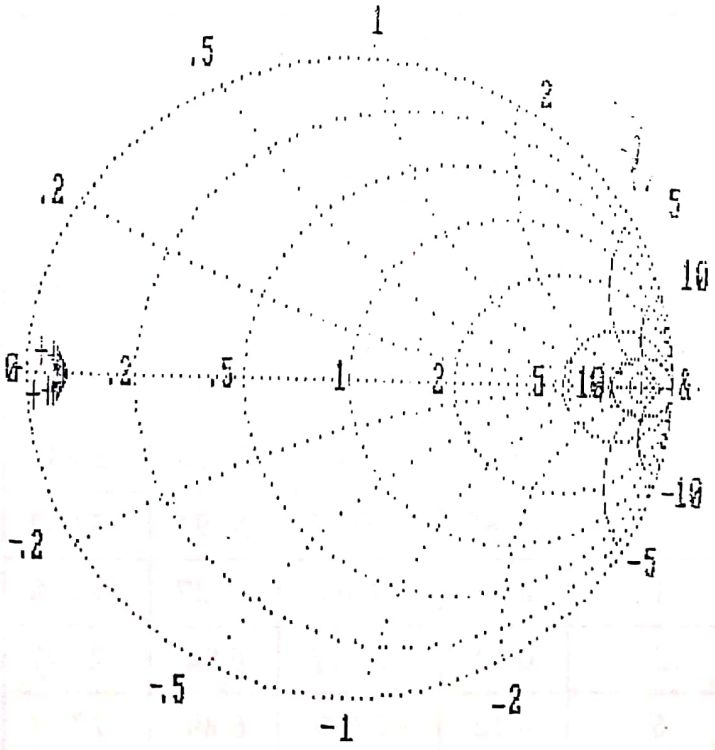
نُلخص في الجدول (2) الخواص الكهرطيسية للشرائح السابقة.

N°du film	$\bar{r}$	$\bar{x}$	$\overline{R}$	$\overline{X}$
1	0.29	0.0013	0.29	68.22
2	0.056	0.00089	0.056	3.48
3	11.85	−10.37	20.93	−23.92
4	8.98	−8.63	17.27	−17.98
5	0.12	−27.77	6.8k	−27.77
6	0.12	−27.77	6.8k	−27.77

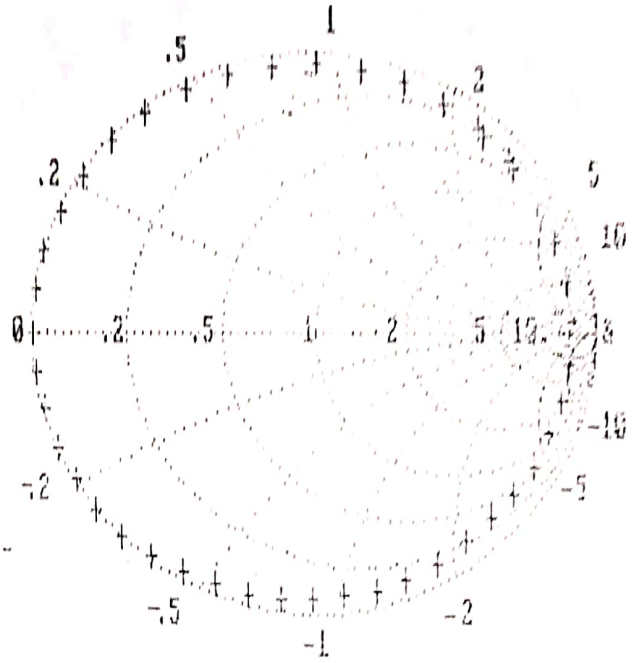
الجدول (2)



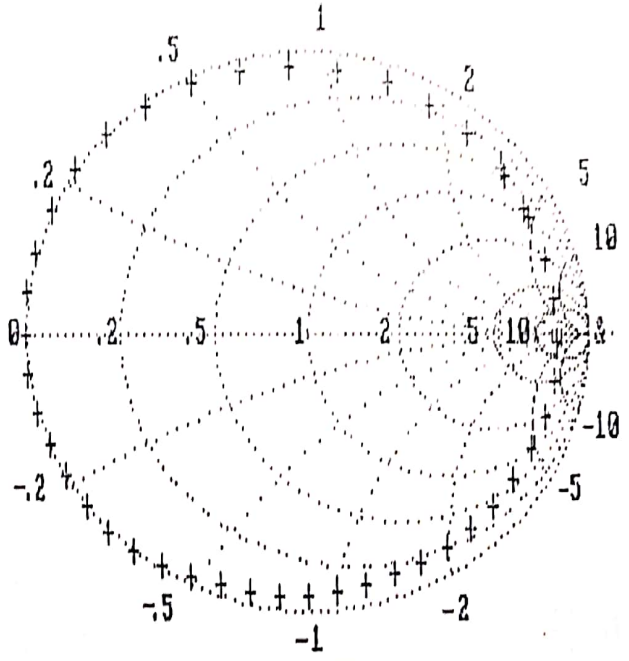
الشكل (7)



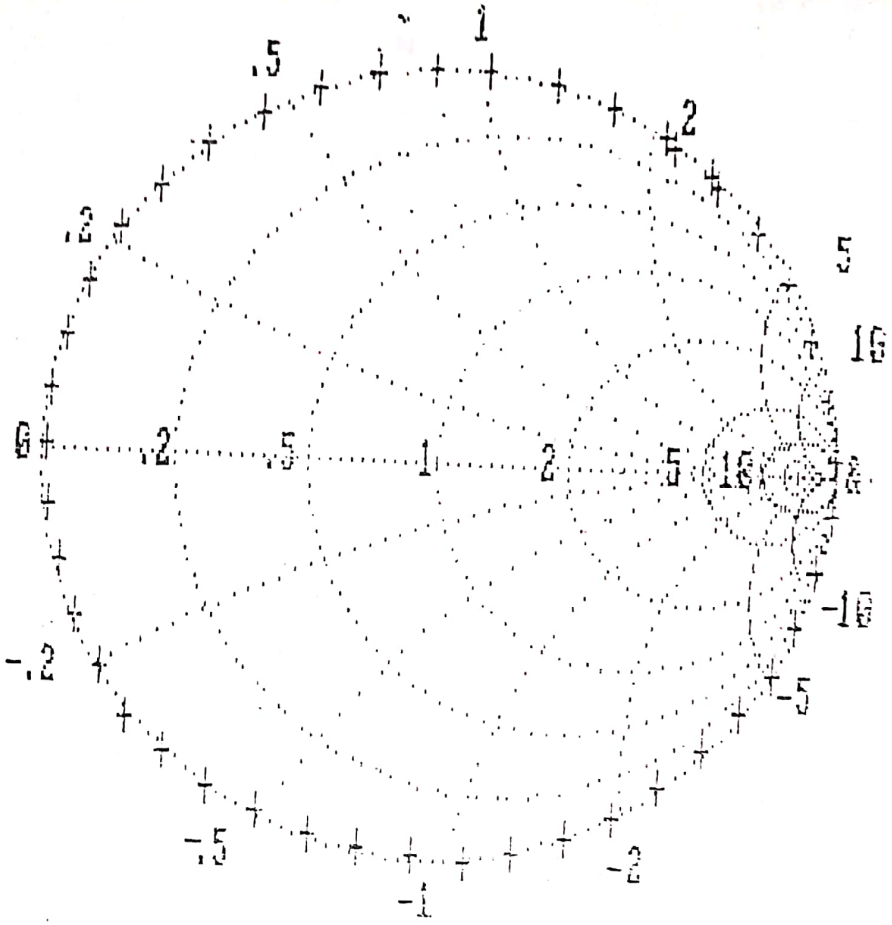
الشكل (8)



الشكل (9)



الشكل (10)



الشكل (11)

RESUME

Cet article concerne des measures d'impe'dances des films obsorbants au grafite dans un guide d'onde a' 245 MHz afin de déterminer leurs caractéristiques électromagnétiques c'est une application importante de la méthod der mesure des impedances {1}, que utilise une ligne de mesure fixe a` quatre sondes.

Apérs étalonnage des infomation delivrées par les sonds au moyen d'un piston de court-circuit variable connecté au plan de reférence. L'ordinateur fournit le coefficient de reflexion complexe du film mince cole sur la bride en déplaçant derriere adaptée, un court-circuit et un circuit ouvert. les trois cofficient de reflexion mesurés percédemment nous permettent de déterminer simplementles caractéristiques électromagnétiques des films.

REFERENCES

{1}- G. ROUSSY, J. M. THEBAUT, H. GHANEM et B. DICHTEL

"measure des impedances en guid d'onde avec une ligne de mesure fixe a quatre sondes", L'onde electrique, vol. 67 (1), pp. 80-86, jan 1988.

{2}- G. GOUDET et CHAVANCE p.

"ondes centimetriques", 1955 edition Chiron-Paris, pp. 67 et 155.

{3}- B. HUYART

"realisation d'un analyseur de reseau 6-ports dans la bande de frequence 2-18 GHZ." These de Doctorat, E. N. S. T. , juin 1986.

{4}- HOER C. A

"Calibring a six port reflectometer with four impedance standards", NBCTECH

Note 1012, march 1979.

{5}- G. F. ENGEN

"Calibration the six port reflectometer by means of soliding terminations ", IEEE Trans., vol. MTT-26, pp. 951-957, dec. 1978.

{6}- AL. CULLIN, S. K. JUDAH and F. NIKRVESH.

"Impedance measurement using a six-port directional coupler", IEEE Trans., vpl. 127, pt. H, n. 2, pp. 92-98, april 1980.