

دراسة توزيع كثافة التيار الكلية للفرايت - Co Zn في المجال الترددي (1kHz - 1GHz)

الدكتور بدر الأعرج*
الدكتور ناصر إسماعيل**
الدكتور إبراهيم علي***

(تاريخ الإيداع 8 / 5 / 2014. قُبِلَ للنشر في 13 / 7 / 2014)

□ ملخص □

درس في هذا العمل توزيع كثافة التيار الكلي لقرص مُحضَّر من الفرايت $\text{Co}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ حيث $(x = 0.4)$ بالطريقة السيراميكية التقليدية بتابعية نصف قطره، وذلك في المجال الترددي (1kHz - 1GHz) بعد إدخال نصف قطر القرص، والناقلية الكهربائية والنفاذية المغناطيسية النسبية في الحسابات عند درجة حرارة الغرفة. وتبين أن كثافة التيار تتركز على السطح الجانبي للقرص عند التردد 1GHz بينما تبقى ثابتة تقريبا عند الترددات الأخرى.

الكلمات المفتاحية: فرايت - CoZn، كثافة التيار الكلية، توابع بسل

* أستاذ - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
** مدرس - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
*** مدرس - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Study the total current density of Co Zn-Ferrite in the frequency range (1kHz – 1GHz)

Dr. Badr Al-Araj*
Dr. Nasser Ismael**
Dr. Ibrahim Ali***

(Received 8 / 5 / 2014. Accepted 13 / 7 / 2014)

□ ABSTRACT □

In this work the study of the total current density distribution for $\text{Co}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite disc where ($x=0.4$) prepared by using traditional ceramic method as a function of disc radius in the frequency range (1kHz – 1GHz). For achievement of this investigation the disc radius and thickness, electrical conductivity and relative magnetic permeability have been used at room temperature. It is noticed that the total current density becomes concentrated on the outer lateral surface of the disc at 1GHz frequency while it almost stays constant and nearly equals one at other frequencies of the range.

Keywords: CoZn-ferrite; total current density; Bessel functions.

*Professor , Department of Physics – Faculty of science – Tishreen University-Lattakia – Syria

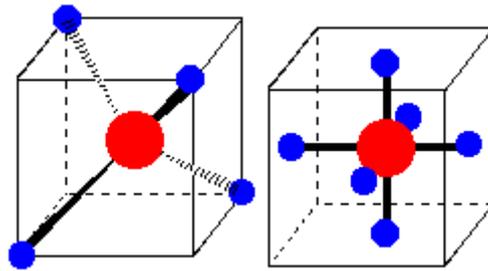
** Assistant Professor, Department of Physics – Faculty of science – Tishreen University -Lattakia- Syria

*** Assistant Professor, Department of Physics – Faculty of science – Tishreen University -Lattakia- Syria

مقدمة:

(a) الفرايت

إن المركب الناتج عن خليط من أكاسيد المعادن MO مع أكسيد الحديد Fe_2O_3 كمكون أساسي يعرف ما يسمى بالفرايت وله الصيغة العامة $MOFe_2O_3$. ويتبلور الفرايت في ثلاثة أنواع (مكعبي - جانت - سداسي). وأبسط أنواعهم هو المكعبي الترتيب (سبيل). إن بنية السبيل أخذت اسمها من اسم الفلز $MgAl_2O_4$ الذي يتبلور بنظام مكعبي. تحتوي أصغر خلية من شبكة السبيل على ثماني جزيئات من $MeFe_2O_4$. تشكل أيونات الأوكسجين 32 الكبيرة نسبياً شبكة متمركزة الوجوه FCC. في هذه البنية المكعبية يوجد نوعان من المواقع: المواقع الرباعية Tetrahedral-A والمواقع الثمانية Octahedral-B التي تحاط بـ 4 و 6 أيونات أوكسجين على الترتيب الشكل (1). وتحتوي وحدة الخلية المكعبة على 64 موقعاً رباعياً و 32 موقعاً ثمانية مشغولاً منها على الترتيب 8 و 16 أيوناً معدنياً. لفهم توزع الأيونات في وحدة الخلية يقسم المكعب الأساسي ذو طول الحرف a إلى ثمانية مكعبات جزئية (octants) بطول حرف $a/2$ الشكل (1). تتوزع أيونات الأوكسجين على كافة المكعبات الجزئية بالطريقة نفسها ويحتوي كل مكعب جزئي على 4 أيونات أوكسجين التي تشكل زوايا رباعي الوجوه [1]. تكون مواضع أيونات المعادن مختلفة في مكعبين جزيئين متجاورين متشاركين في الوجه، ومتشابهة في مكعبين جزيئين متجاورين متشاركين في الحرف. إن المواقع الرباعية المشغولة في مكعب جزئي واحد هي المركز وأربع زوايا من الزوايا الثمانية لكل مكعب جزئي لكن في المكعب الجزئي المجاور يكون المركز غير مشغول بأيون معدني لكن طبقاً للتماثل الانتقالي المكعبي فإن نصف مواقع الزوايا تكون مشغولة. وتشكل المواقع الرباعية شبكتين من النوع FCC متداخلتين بطول حرف a ومزاحة عن بعضهما البعض بمسافة $\frac{1}{4}a\sqrt{3}$ في الاتجاه القطري للمكعب. تتوضع جميع الأيونات الثمانية معاً على أربع شبكات من نوع FCC متداخلة بطول حرف a ومزاحة عن بعضها البعض بمسافة $\frac{1}{4}a\sqrt{2}$ في اتجاهات أقطار وجوه المكعب لكن مواقع هذه الأيونات لا تشكل مكعباً كما هو الحال في أيونات الرباعية. يحتوي كل مكعب على أربع أيونات ثمانية متوضعة في أماكن مناظرة لمواقع ذرات الأوكسجين أي على بعد ربع الاتجاه القطري من الركن الآخر للشكل المكعبي. كل أيون ثماني محاط بست أيونات رباعية المواقع، وكل أيون أوكسجين محاط بأيون رباعي وثلاث أيونات ثمانية المواقع [2].



شكل(1): يبين الخلية الأساسية، المواقع الرباعية والمواقع الثمانية داخل المكعب الجزئي.

(b) كثافة التيار الكلية

يتميز الفرايت بكثافة تيار كلية \vec{J}_t بالمقارنة مع النواقل. ونحصل على الحدود التي تسهم في هذه الكثافة من معادلات مكسويل التفاضلية والمعادلات المادية، وذلك بعد تطبيق إشارات كهربية توافقية \vec{F} على هذه العينة يقع ترددها في المجال (1kHz - 1GHz):

$$\vec{F} = \vec{F}_0 \exp(i\omega t) ; \vec{F} = \vec{E} \text{ or } \vec{H} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (4)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M} \quad (5)$$

$$\vec{J}_t = \sigma_t \vec{E} \quad (6)$$

حيث \vec{E} ، \vec{D} ، \vec{H} ، \vec{B} ، \vec{P} ، \vec{M} ، ϵ_0 ، μ_0 ، σ_t ، \vec{J}_c ، \vec{J}_t الحقل الكهربائي و تحريضه، الحقل المغناطيسي و تحريضه، منجهتي الاستقطاب الكهربائي و التمغنط، السماحية الكهربائية و النفاذية المغناطيسية في الخلاء، الناقلية الكهربائية للفرايت و كثافة تيار الناقلية و كثافة التيار الكلية على الترتيب. بتبديل المعادلتين (4) ، (5) في المعادلة (3) نجد:

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= \vec{J}_t = \vec{J}_c + \vec{J}_d + \vec{J}_p + \vec{J}_m \\ \vec{J}_p &= -\frac{\partial \vec{P}}{\partial t} \\ \vec{J}_m &= \text{rot} \vec{M} \end{aligned} \quad (7)$$

يشير الطرف الأيمن من المعادلة (7) إلى أن كثافة التيار تولد حقلاً مغناطيسياً دوّاراً. يسود الحد الأول من كثافة التيار الكلية في النواقل بينما ينتج الحد الثاني والثالث عن سرعة تغيّر الحقل الكهربائي، ومعدل سرعة تغيّر الاستقطاب والحد الأخير ناتج عن دوّار متجهة التمغنط.

ونحصل من المعادلات (2)، (6)، (7) مع الأخذ بالحسبان $\frac{\partial}{\partial t} \equiv i\omega$ حيث $i^2 = -1$ العدد التخيلي على

المعادلة التفاضلية لكثافة التيار الكلية:

$$\nabla^2 \vec{J}_t + K^2 \vec{J}_t = 0 \quad (8)$$

$$K^2 = -i\omega \mu \sigma_t \quad (9)$$

يمثل القرص المحضر أسطوانة مضغوطة نصف قطرها $\rho_{\max} = a$ وسماكتها d متوضع في المستوى $Z=0$

حيث إنّ المركبة Z لكثافة التيار الكلية مستقلة عن الإحداثي Z ، Φ في النظام الأسطواني (ρ, Φ, Z) :

$$\nabla_{\rho}^2 \vec{J}_{t,z} + K^2 \vec{J}_{t,z} = 0 \quad (10)$$

$$\rho^2 \frac{d^2 J_{t,z}}{d\rho^2} + \rho \frac{dJ_{t,z}}{d\rho} + (K\rho)^2 J_{t,z} = 0 \quad (11)$$

تعبّر العلاقة (11) عن معادلة بسل التفاضلية من الرتبة الصفرية حلها العام [3,4]:

$$J_{t,z} = C_1 J_0(K\rho) + C_2 Y_0(K\rho) \quad (12)$$

يدعى الحل $J_0(K\rho)$ بتابع بسل من النوع الأول ذي الرتبة الصفرية وله نهاية محدودة عندما تقترب ρ من الصفر. ويسمى الحل $Y_0(K\rho)$ بتابع بسل أو نيومان من النوع الثاني ذي الرتبة الصفرية وليس له نهاية محدودة عندما تقترب ρ من الصفر [5].

(c) تأثير الترددات على اهتزاز مواقع الفرايت:

عندما نطبق مجالاً ترددياً على مادة عازلة نحصل على الأنواع المختلفة لمساهمات الاستقطاب (الالكتروني، أيوني، اتجاهي و حيزي). وكل نوع من الاستقطاب لا يعمل إلا إذا وصل التردد إلى قيمة معينة، وبعد هذه القيمة يضمحل الاستقطاب لأن الأيونات لا يمكن لها متابعة التغير السريع للمجال المطبق [7]. وبما أن الروابط الأيونية القوية (قوى الجذب بين الأيونات الموجبة والسالبة شديدة) حيث تحبس الذرات إلكتروناتها في أماكنها بصورة محكمة، وبالتالي لا تستطيع الإلكترونات أن تتحرك داخل البلورة إلا بصعوبة. يبدأ الاستقطاب الأيوني بالاضمحلال عندما يزيد التردد على 10^{15}Hz ، وبالتالي يبقى الاستقطاب الاتجاهي التلقائي والمحتث (ثنائيات أقطاب كهربائية) الذي يظهر في المجال (1mHz – 1GHz)، حيث الاستقطاب الاتجاهي المحتث يتولد عن عدم تطابق مراكز الشحنات الموجبة والسالبة لـ Fe^{3+} و O^{2-} في الشبكات الجزئية للفرايت. يولد المعدل الزمني لتغير الاستقطاب في هذه المواد كثافة تيار استقطابي العلاقة (7)، هذا من ناحية تأثير الإشارة الكهربائية أما من ناحية تأثير الإشارة المغناطيسية فإن التفاعل المتبادل بين التمعط الناتج عن العزوم السبينية والحقل المغناطيسي للإشارة المطبقة يولد كثافة تيار مغناطيسية العلاقة (7)، حيث سبينات أيونات الحديد الثنائي والثلاثي كما يلي :

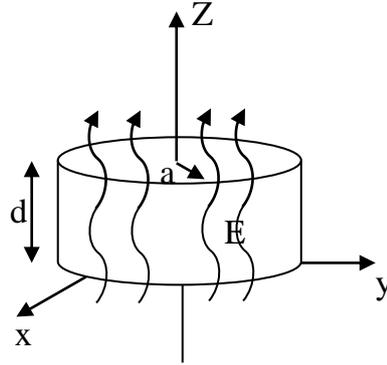
$\text{Fe}^{3+}(3d^5)$	~	↑	↑	↑	↑	↑
$\text{Fe}^{2+}(3d^6)$	~	↑↓	↑	↑	↑	↑

أهمية البحث وأهدافه:

تكمّن أهمية هذا العمل في تحديد توزع كثافة التيار الكلية للفرايت المحضّر بالطريقة السيراميكية التقليدية ، والتردد الذي يستجيب عنده الفرايت في المجال المقترح للدراسة النظرية بعد إدخال ميزات الفرايت التجريبية. وتعود أهمية دراسة هذا النوع من الفرايت إلى استخدامه الواسع في المحولات والمحركات الكهربائية والمولدات.

طرائق البحث ومواده:

حُضِرَ الفرايت $\text{Co}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ حيث $x=0.4$ وذلك باستخدام الطريقة السيراميكية من مساحيق أكاسيد عالية النقاوة تصل إلى 99.99% من شركة Merck الألمانية حيث خلطت الأكاسيد CoO , ZnO , Fe_2O_3 بعد وزن الكميات المطلوبة بناء على معرفة الأوزان الجزيئية في وعاء من العقيق ثم طحنت يدوياً بواسطة هاون agate mortar حتى الوصول إلى حجم حبيبة 20 nm وفق اختبار أشعة X في الحبيود . أخذ ثلاثة غرامات من البودرة المحضرة ثم وضعت في مكبس هيدروليكي وكبست العينة تحت ضغط 7000kg/cm^2 لمدة 10 s عند درجة حرارة الغرفة للحصول على القرص المطلوب. من أجل التلبيد وضع القرص على شبكة من البلاطين مثبتة على قاعدة خزفية من الألومينا وأدخلت في المرمدة غلافها من معدن stainless steel المقاوم للعوامل الجوية مكوّن من جدارين لضمان استقرار درجة الحرارة، وعدم انتشارها، ومزوّدة أيضاً بشاشة رقمية لقراءة درجة الحرارة وفق نوع thermocouple بدقة $\pm 2^\circ\text{C}$ ثم رفعت درجة حرارة الفرن إلى الدرجة 600°C بمعدل $5^\circ\text{C}/\text{min}$ وثبتت عند هذه الدرجة لمدة 3h في الهواء ، ثم رفعت درجة الحرارة إلى 1250°C وبقيت عند هذه الدرجة مدة 6h في الهواء. بعد ذلك خفضت درجة الحرارة بمعدل ارتفاعها نفسه حتى وصلت إلى درجة حرارة الغرفة حيث تداخلت الحبيبات وتجمعت وتماسكت، وتم الحصول على قرص كما في الشكل (2)، [6]. وتمت الدراسة النظرية والتحليلية حاسوبياً انطلاقاً من المعادلتين (11,13) لإيجاد توزيع كثافة التيار الكلية على سطح قرص الفرايت في المجال الترددي المقترح للتطبيق في قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين.



شكل (2) : قرص من فرايت - CoZn نصف قطره a وسماكته d.

النتائج والمناقشة:

تم إيجاد بعض النتائج بواسطة تابع بسل من النوع الأول ذي الرتبة الصفرية بعد إيجاد الثابت C_1 في المعادلة (12) من الشرط الحدي التالي:

$$J_{t,z}(\rho = a) = J_{t,s} = C_1 J_0(K.a)$$

$$J_{t,z}(\rho) = J_{t,s} \frac{J_0(K.\rho)}{J_0(K.a)} \quad (13)$$

حيث $J_{t,s}$ كثافة التيار السطحية على السطح الجانبي للقرص.

وتم إيجاد النسبة $\frac{J_0(K.\rho)}{J_0(K.a)}$ وفق ميزات الفرايت التجريبية المدوّنة في الجدول (1,a,b).

جدول (1,a,b): يتضمن بارامترات القرص (الناقلية الكهربائية التجريبية، نصف قطر القرص وسماكته)، وقيم المجال الترددي، قيم K المحسوبة من العلاقة (9).

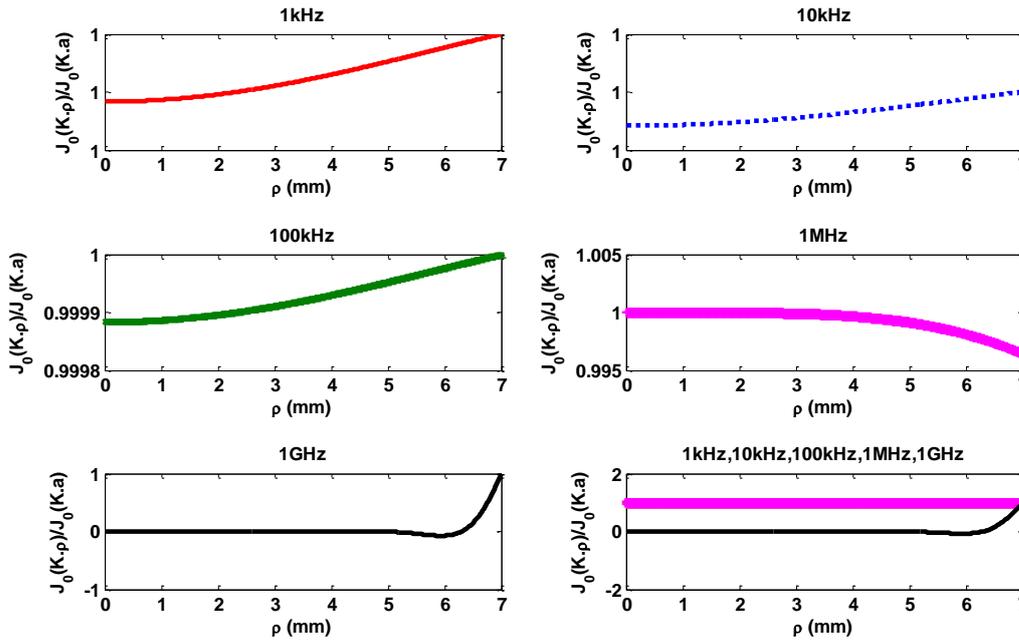
جدول (1,a):

$\sigma(\Omega.m)^{-1}$	a (mm)	d (mm)
0.43×10^{-5}	7	5

جدول (1,b):

f(kHz)	1	10	10^2	10^3	10^6
K (Np/mm) x $i^{3/2}$	0.00319	0.01008	0.03189	0.10087	3.18978

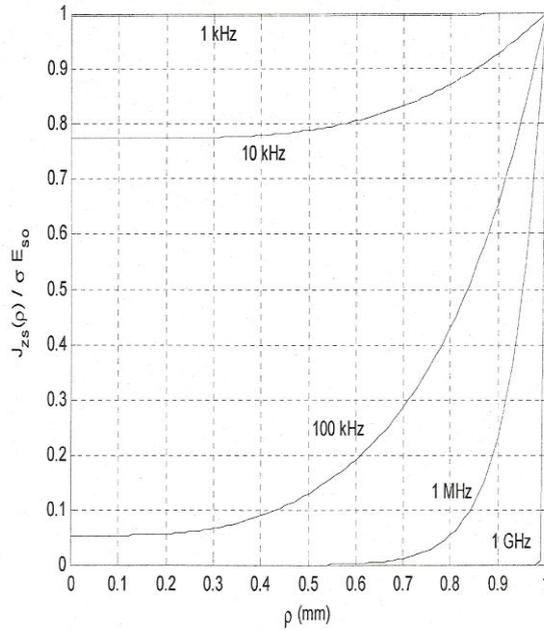
ولإيجاد النسبة $\frac{J_0(K.\rho)}{J_0(K.a)}$ كتب برنامج بلغة Matlab ثم رسمت بيانيا هذه القيم بتابعة نصف قطر القرص $\rho = (0 - 7)$ mm كما في الشكل (3).



شكل (3): النسبة $\frac{J_0(K.\rho)}{J_0(K.a)}$ بتابعة نصف قطر القرص ρ .

نلاحظ من الشكل (3) أن كثافة التيار الكلية تتركز على السطح الجانبي للقرص عند التردد 1GHz بينما في المجال الترددي (1 - 1000)kHz تبقى ثابتة تقريباً عند النسبة $\frac{J_0(K.\rho)}{J_0(K.a)}$ المساوية الواحد تقريباً. من المعروف أن

الحدود التي تسهم في استقطاب الوسط حسب المجال الترددي المطبق هي: الاستقطاب الإلكتروني - الأيوني - ثنائيات الأقطاب - السطوح الحدودية الفاصلة بين حبيبات المادة [7,8,9]. وفي حالتنا هذه تقع المساهمة الإلكترونية والأيونية في الاستقطاب خارج المجال الترددي المطبق، أي في منطقة الرنين التي ترددها 10^{12}Hz ، بينما المساهمة البينية تعتمد على درجة العيوب والفراغات. ونعتقد أنها مساهمة صغيرة لأن العينة ملبدة إلى الدرجة 1250°C . عموماً، فإن المساهمة الأيونية الاتجاهية هي السائدة عند الترددات (1MHz - 1GHz) لأن مادة الفرايت مكونة من أيونات معدنية محاطة بأيونات من الأوكسجين، وبالتالي تلعب كثافة تيار الاستقطاب والتمغنط دوراً أساسياً في توليد حقل مغناطيسي دوار. من جهة أخرى، تكون كثافة تيار الناقلية مهملة في الفرايت لأنه يتميز بمقاومة كهربائية عالية. للمقارنة بين هذه النسبة عند النواقل والفرايت يبين الشكل (4) توزيع كثافة تيار الناقلية لسلك من النحاس نصف قطره $r=1\text{mm}$ عند قيم الترددات المطبقة نفسها.



شكل (4): تابعة النسبة $\frac{J_0(K.\rho)}{J_0(K.a)}$ لنصف قطر سلك من النحاس [10,11,12].

نلاحظ من الشكلين (4,3) أن كثافة تيار الناقلية تتركز على طول السلك النحاسي بينما يبدأ هذا التركيز عند الفرايت عند تردد أكبر من 1MHz. ويعود الفرق بين النواقل والفرايت إلى أن كثافة تيار الناقلية تسيطر في النواقل وكثافة تيار الاستقطاب تسود عند الفرايت، بالإضافة إلى أن كثافة تيار النقل في الفرايت تنتج عن ظاهرة النقل بالقفز ما بين أيون الحديد الثنائي Fe^{2+} والأيون الثلاثي Fe^{3+} .

الاستنتاجات والتوصيات:

نستنتج من هذا العمل النقاط الآتية :

1- تتركز كثافة التيار الكلية على السطح الجانبي للقرص عند التردد 1GHz مما يشير إلى استجابة الفرايت المحضّر لهذا التردد .

2- تبقى النسبة $\frac{J_0(K.\rho)}{J_0(K.a)}$ في المجال الترددي (1 - 1000) kHz ثابتة وتساوي تقريبا الواحد.

3- تلعب كثافة تيار الاستقطاب الاتجاهي والمغناطيسي دورا مهما في توليد حقل مغناطيسي دوار في العينة المدروسة.

4- تعبر القيمة المطلقة لكثافة التيار عن شدة الحقل المغناطيسي المماسي لسطح مادة الفرايتية $\vec{J} = \vec{n} \times \vec{H}$ حيث \vec{n} متجهة الواحدة الناظمية على السطح الجانبي للقرص.

5- يعد هذا العمل ذو أهمية لدراسة عينات مختلفة في الخصائص الكهربائية والمغناطيسية.

المراجع:

- [1] SMIT J., WIJN H. P. J., *Physical Properties of Ferromagnetic Oxides in Relation to Their Technical Applications*, Philips Technical Library, 1959,p.137.
- [2] PILKINGTON M. *principles of inorganic chemistry*, 2011, net – 2p32
- [3] БРОНШТЕЙН , И. Н. СЕМЕНДЯЕВ, К. А. *Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов*, М.:Наука, 1986 .стр.305 -322.
- [4] КОРН, Г. И КОРН, Т. *Справочник по математике для научных работников и инженеров* , М.:Наука , 1970 .Стр. 665-672.
- [5] موراى ر. شبيحل . سلسلة ملخصات شوم – نظريات ومسائل في الرياضيات المتقدمة للمهندسين والعلميين، دار ماجروهيل للنشر، دار الرائد العربي، ص 291 – 295، 1980.
- [6] ابراهيم علي، بدر الأعرج، سمير غالية، تحديد الثوابت الضوئية للفرايت – $CoZn$ باستخدام مطيافية IR. مجلة بحوث جامعة حلب، 2012.
- [7] عادل أحمد سعود الشعيبي. رسالة ماجستير ، تأثير إضافة القصدير على خواص أشباه موصلات تيتانات الباريوم. قسم الفيزياء والفلك- كلية العلوم – جامعة الملك سعود – الرياض – المملكة العربية السعودية، 2008.
- [8] ЕРОФЕЕВ, Л. Я. ВАХРОМЕЕВ, Г.С ЗИНАЧЕНКО, В.С. НОМОКОНОВА, Г.Г. *Физико горных пород*.Томск, 2006, Стр. 118-122
- [9] نوية محمادي. ارتباط السماحية الكهربائية بالحقول الكهرومغناطيسية وتردداتها في الأوساط العازلة. رسالة ماستر، جامعة قاصدي مرياح ورقلة – قسم علوم المادة، الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية، 2011، 18-15.
- [10] www.ece.msstate.edu/~donohoe/ece3324notes10.pdf
- [11] Liyong Wang, *Modeling of High Speed Metal-Insulator – Semiconductor Inter connections: The effect ILD on slow – wave attenuation*, A thesis submitted to the Graduate Master of Science, Rensselaer polytechnic Institute, Troy, New York,1998.
- [12] PARDEEP A.,CHANDRASEKARAN G.,*FTIR study of Ni, Cu and Zn substituted nanoparticles of MgFe₂O₄*, Mater.Letters,vol.60,2006,p.371-374.