

تحضير بودرة وأغشية رقيقة من مادة YIG بتقانة SOL –GEL

شذا مصري⁽¹⁾ و عبد العزيز الزغبى⁽²⁾ و بسام عباس⁽³⁾

تاريخ الإيداع 2013/04/16

قبل للنشر في 2013/10/28

الملخص

هدف هذا البحث إلى تحضير أغشية رقيقة من مادة YIG بطريقة فعالة وذات كلفة منخفضة. حضرت بودرة من مادة YIG بتقانة SOL –GEL ثم عولجت حرارياً عند درجات حرارة مختلفة (800-1000-1100-1200 °C) إذ أظهرت دراسة طيوف الانعراج بالأشعة السينية XRD أن العينات المحضرة عند 1200°C كانت ذات بنية بلورية عالية الجودة، كما بيّنت أن البلورة تنتمي إلى الفئة Ia-3d المكعبة وثابت الشبكة البلورية يبلغ $a=12.3760 \text{ \AA}$ ، وقدرت كثافة المادة بـ 5.171 g/cm^3 بحسب برنامج Crystal Impact Match! 1.11f. كذلك حضرت هذه المادة على شكل أغشية رقيقة على ركازات من الكوارتز عند درجات حرارة مختلفة (700-800-900 °C). أظهرت طيوف الأشعة السينية XRD أن الغشاء الأفضل هو ذلك المحضر عند درجة الحرارة 900 °C ببنية بلورية مماثلة وثابت الشبكة البلورية $a=12.3750 \text{ \AA}$ وكثافة المادة تقدر بـ 5.169 g/cm^3 بحسب برنامج Crystal Impact Match! 1.11f.

الكلمات المفتاحية: أغشية رقيقة، مادة YIG، تقانة SOL –GE.

(1) طالبة ماجستير، (2) الأستاذ المشرف، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق، سورية.

(3) الأستاذ المشرف المشارك، قسم الفيزياء، هيئة الطاقة الذرية، سورية.

Fabricate YIG powder and thin-films via the sol- gel technique

Sh. Masri⁽¹⁾, A. Al-zgbi⁽²⁾ and B. Abbass⁽³⁾

Received 16/04/2013

Accepted 28/10/2013

ABSTRACT

This work aims to prepare YIG thin-films with an effective and low-cost scheme. Yttrium iron garnet powder has been prepared via the sol- gel technique at various annealing temperatures: 800, 1000, 1100, and 1200°C. The best crystal structure was obtained at the annealing temperature of 1200 °C. XRD spectra showed that formed crystals belong to the cubic structure Ia-3d, with a lattice constant of $a=12.3760 \text{ \AA}$ and density 5.17100 g/cm^3 by Crystal Impact Match! 1.11f system. YIG thin films have been spin-coated on quartz substrates then treated at various annealing temperatures: 700, 800, and 900°C. XRD patterns showed that the optimal temperature is 900°C. Crystal structure of the annealed thin-film similar to that of the powder structure with a lattice constant equals to $a=12.3750 \text{ \AA}$ and density 5.16900 g/cm^3 by Crystal Impact Match! 1.11f system.

Keywords: Thin-Films, YIG, Sol- Gel technique, XRD.

⁽¹⁾ MSC., Student, ⁽²⁾ Supervisor, Department of Physics, University of Damascus, Syria.

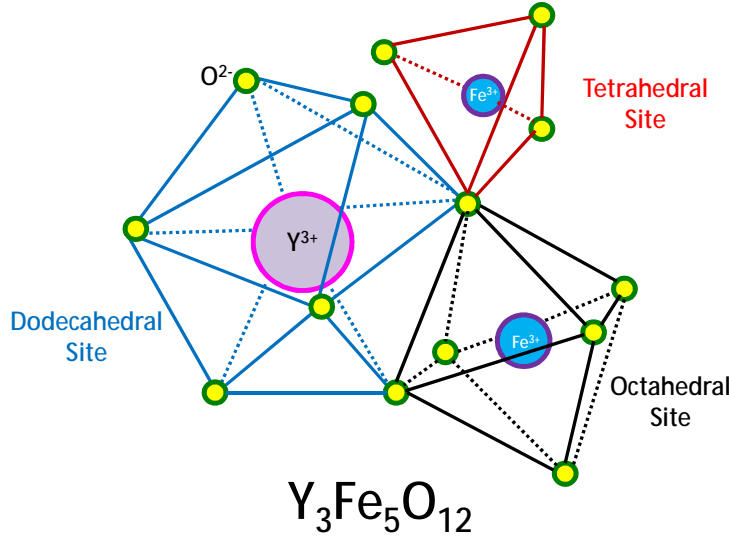
⁽³⁾ Associated Supervisor, Department of Physics, Atomicenergy commission, Syria.

مقدمة

لم يعد خافياً الدور الذي تؤديه الأغشية الرقيقة في حياتنا اليومية المعاصرة، فلم تعد المرأة التطبيق الشائع الوحيد للأغشية الرقيقة بل تعداها إلى الأقراص الصلبة وأنصاف النواقل والسيراميك و الطلاء البصري وغيرها من التطبيقات المهمة.

الأغشية الرقيقة عبارة عن طبقات رقيقة من مواد تراوح أبعادها من النانومتر (طبقة أحادية) إلى عدة ميكرومترات، تضاف على سطح المواد من أجل إضافة خصائص لم تكن موجودة فيها من قبل. تتعلق هذه الخصائص المضافة بالعديد من العوامل، ولعل طريقة تحضير هذه الأغشية تعدُّ من العوامل الرئيسة والمؤثرة بشدة في خصائص الغشاء الناتج وصفاته.

عرفت مؤخراً مادة (إيتيريوم - حديد - غارنت Yttrium-Iron-Garnet, YIG) أنها ذات مغناطيسية حديدية، إذ استخدمت مادة الـ YIG في الأجهزة التي تعمل ضمن مجال الأمواج القصيرة، وأجهزة الاتصال البصرية، والعوازل والدارات، والأجهزة المغناطيسية البصرية، فضلاً عن استخدامها كمرشح ضوئي جيد كونها تعدُّ شفافة بالنسبة إلى موجات الأشعة ذات الطول الموجي تتجاوز 600 نانومتر. كما امتدت تطبيقاتها إلى استخدامها كمادة مضيئة في ليزرات الأجسام الصلبة المعروفة بـ $YVO_4 - YAG$ ، وفي تخزين البيانات، والتطبيقات في مختلف البصريات غير الخطية [1,2].



الشكل (1) البنية البلورية للـ YIG

تملك مادة YIG شبكة بلورية موشورية سداسية معقدة الصيغة الشكل (1)، و يشار إليها بصيغة مجملة هي $Y_3Fe_5O_{12}$ ، إذ تحتل أيونات Y^{3+} غير المغناطيسية الموقع (c) الاثني عشري، في حين تحتل أيونات Fe^{3+} المغناطيسية الموقع (a) ثماني الوجوه، والموقع (d) رباعي الوجوه، وبذلك تنشأ خصائصها المغناطيسية من التوازي والتضاد في الاتجاه بين أيونات Fe^{3+} في الموقع (a) والموقع (d) كنتيجة للتبادل العكسي بين الأيونات [3].

يكسب الموقعان المختلفان لأيونات الحديد في الشبكة البلورية كامل البلورة عزمًا مغناطيسياً مساوياً للعزم المغناطيسي الذي تمتلكه ذرة الحديد فقط، مما يجعلها تمتلك خصائص مغناطيسية وضوئية فريدة تفسر التطبيقات الواسعة التي ذكرت آنفاً. وتنتمي هذه البلورة المكعبة إلى مجموعة $Ia3d(O_h^{10})$ المبنية في الشكل (1)، إذ إن كل خلية من هذه البلورة تحوي ثمانية جزيئات تكتب بالصيغة $O_{12}(Fe_3)(Fe_2)(R_3)$ باعتبار أن: $\{ \} [] ()$ هي اثني عشرية، ثمانية، رباعية الوجوه على الترتيب [4] إذ إن R هو عنصر من عناصر الأرض النادرة وفي دراستنا هو عنصر الايتيريوم Y.

الجدول (1) أهم الخصائص المغناطيسية التي تميز YIG

الخصائص	القيمة
دوار فاراداي	3000-4000 درجة/سم
التشبع المغناطيسي	G 2500 - 1800
درجة كوري	550 كلفن

تتغير الخصائص المغناطيسية للـ YIG بتغير نوع الإشابة المضافة، وتعد هذه الصفة من الصفات النادرة التي تتمتع بها البلورات الأرضية. إذ وجد أن إضافة Al^{3+} كشائبة بدلاً من Fe^{3+} لتصبح الصيغة $Y_3Fe_{5-x}Al_xO_{12}$ ينقص درجة التشبع المغناطيسي والقوة المغناطيسية، في حين إضافة Ce^{3+}, Bi^{3+} بدلاً من Y^{3+} ، وإضافة Co^{2+}, Co^{3+} بدلاً من Fe^{3+} يغير من خصائص البلورة الضوئية والبصرية [5,6]

يمكن تحضير هذه الأغشية بالعديد من التقانات مثل: تقانة التذرية بالليزر النبضي (PLD)، وتقانة التنضيد الجزيئي (Molecular Beam epitaxy (MBE)، وتقانة التريذ بالأموح الراديوية RF-Sputtering، وغير ذلك من التقانات الحديثة. يعتمد البحث الحالي استخدام تقانة السول جيل (Sol-Gel Technique) نظراً إلى ما تتمتع به هذه التقانة من ميزات عديدة، فالمواد المحضرة نقية إذ نقل نسبة تشكل الشوائب غير المرغوب فيها عند التحضير بتلك الطريقة، كما أنها سهلة وغير مكلفة، فهي لا تحتاج إلى تخلية أو درجات حرارة عالية. تستخدم هذه التقانة بشكل واسع في التطبيقات العلمية، كتصنيع المرايا الباردة والساخنة والعدسات ومجزئات الحزمة الضوئية إلى غيرها من التطبيقات بشكل أفضل وبسعة أكبر وتكلفة أقل.

تعتمد تقانة السول-جل على مفهوم كيمياء المحاليل أو ما يسمى بالكيمياء الرطبة، إذ تجري فيها معالجة الطور السائل المعلق (SOL) وتحويله إلى الطور الصلب (Gel). يمكن ترسيب المحلول على سطح الركازة على شكل غشاء رقيق Thin Film باستخدام تقانات طلاء مختلفة، منها - على سبيل المثال لا الحصر - تقانة الطلي بالتدوير (spin coating) أو الطلي بالتغطيس (dip coating) أو التغطيس بالطي (Roll Coating) أو الطلي بالرذاذ (Spray Coating). [8,7].

هدف هذا البحث إلى تحضير الـ YIG كبودرة بطريقة SOL-GEL ثم ترسيبها على شكل أغشية رقيقة، وذلك ضمن شروط بسيطة من درجة حرارة وبعيداً عن شروط التخلية. وبذلك يعد هذا البحث إسهاماً فريداً لتحضير مثل هذه المواد على نطاق الجمهورية العربية السورية.

مواد البحث وطرائقه

1. تحضير YIG بودرة:

تحل 6.2 غ من نترات الإيتريوم (99.8%, Sigma-Aldrich) $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ بـ 50 مل من الايتلين غليكول (99.8%, Sigma-Aldrich) مع التحريك، ثم تحل بـ 50 مل من محلول الايتلين غليكول 9 غ من نترات الحديد $9H_2O$ (98% >, Sigma-Aldrich) مع التحريك [10,9]. يمزج المحلولان مع بعضهما في درجة حرارة الغرفة، ويترك المزيج الناتج مدة ثلاثة أيام مع التحريك بمعزل عن الهواء، إذ يلاحظ تغير لون المحلول إلى لون آجري. يوضع المحلول في فرن تجفيف (Memert) عند درجة الحرارة $110^\circ C$ مدة 24 ساعة فيتحول إلى مادة صلبة. تسحق المادة الصلبة بجرن من البورسلان، ثم تعامل البودرة الناتجة حرارياً عند درجات حرارة مختلفة ($800^\circ C$ ، $1000^\circ C$ ، $1100^\circ C$ ، $1200^\circ C$) مدة 10 ساعات، إذ يكون معدل التسخين والتبريد بمعدل $2^\circ C$ لكل 1 دقيقة.

2. تحضير غشاء الرقيق من (YIG):

تحل 0.4 غ من نترات الإيتريوم في حمض الخل (0.2M) عند درجة الحرارة $65^\circ C$ مع التحريك، ثم تحل 2.5 غ من نترات الحديد في الماء المقطر مع التحريك، يمزج المحلولان معاً عند الدرجة $65^\circ C$ مع التحريك. يترك المحلول حتى يتبخّر ببطء شديد عند تلك الدرجة مع التحريك المستمر مدة شهر. يكون المحلول النهائي ذا لون آجري بني يصبح كثيفاً تدريجياً ثم هلامياً. يرسب المحلول على ركازة نظيفة من الكوارتز (SiO_2 (110) -n type) باستخدام تقانة الطلي بالتدوير (Spin-Coating Technique) عند معدل تدوير 800 دورة/دقيقة. يوضع الغشاء المحضر في الفرن عند درجة الحرارة $200^\circ C$ مدة نصف ساعة لتجفيفه كمرحلة أولية قبل خضوعه للبرنامج الحراري الأساسي. حضرت ثلاثة أغشية رقيقة بهذه الطريقة ثم أدخلت إلى الفرن وفق البرنامج

الحراري التالي حيث أُجريت مرحلة التسخين بمعدل 3°C لكل 1دقيقة، أمّا التبريد فهو بمعدل 2°C لكل 1دقيقة:

- الغشاء (1) سُخِّنَ إلى 700°C مع ثبات مدة 3 ساعة عند تلك الدرجة الحرارية.
- الغشاء (2) سُخِّنَ إلى 800°C مع ثبات مدة 3 ساعة عند تلك الدرجة الحرارية.
- الغشاء (3) سُخِّنَ إلى 900°C مع ثبات مدة 3 ساعة عند تلك الدرجة الحرارية.

3. اختبار المنتجات باستخدام الأشعة السينية:

يهدف دراسة البنية البلورية لكل من البودرة والأغشية الرقيقة ومعرفة تأثير المعالجة الحرارية في بنيتها البلورية، سجلت طيوف الأشعة السينية للبودرة المحضرة قبل خضوعها للبرنامج الحراري وبعد المعالجة الحرارية عند درجات حرارة مختلفة. كذلك سجلت طيوف الأشعة السينية للأغشية الرقيقة المرسبة. وذلك باستخدام جهاز STOE X-Ray Diffractometer عند جهد عالٍ مساوٍ لـ 40kV ، وتيار 50mA ، وطول موجي 1.5405980Å .

4. حساب الحجم البلوري وثابت الشبكة البلورية :

قيس حجم الحبيبات البلورية في العينات المعالجة حرارياً [11] باستخدام معادلة شيرر (Scherrer Equation):

$$t = \frac{K * l}{B * \cos q_B}$$

باعتبار أن: λ طول موجة الأشعة السينية المستخدمة 1.5405980Å ، و $K=0.94$ معامل شيرر، θ_B : زاوية الانعراج وتقدر بالدرجة، و B عرض الطيف في المنتصف (full width at half maximum) للقمم الموافقة للمستويات البلورية في البلورات المتشكلة في البودرة المعالجة حرارياً ويقدر بالراديان. ويشير الدليل B لزاوية الانعراج إلى أن الانعراج يحصل وفقاً لقانون براغ الذي يصف البعد البلوري بين المستويات البلورية في الشبكة البلورية:

$$d = \frac{n l}{2 \sin q}$$

وبمعرفة قرائن ميلر hkl ، يحسب ثابت الشبكة البلورية a من أجل البلورة المكعبة باستخدام العلاقة:

$$a = d \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$$

النتائج والمناقشة

سجلت طيوف الانعراج بالأشعة السينية الشكل (2) وجود بنية لابلورية (amorphous) للبودرة المحضرة وفق تقانة sol-gel قبل المعالجة الحرارية، وبعد معالجة العينات حرارياً بالطريقة المذكورة سابقاً، أظهرت طيوف الانعراج بالأشعة السينية على الازدياد المطرد في البنية البلورية للعينات بازدياد درجة حرارة التلدين المستخدمة. بدأت قمم YIG بالظهور في العينة التي عولجت حرارياً حتى الدرجة $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ عند زاوية 2θ الموافقة للقيم بين 30° - 37° ، وازداد عدد القمم وبدأت أكثر وضوحاً في العينة المحضرة عند الدرجة $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ عند الزاوية 2θ الموافقة للقيم بين 28° - 60° ، وفي العينة المحضرة عند الدرجة $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ فقد ازدادت القمم السابقة شدة، فضلاً عن ظهور قمتين جديدتين عند الزاوية 2θ الموافقة للقيم بين 65° - 89° ، وبذلك كانت عينة البودرة التي حضرت عند $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ الفضلى من الناحية البلورية (الشكل 4) إذ إنه لدى مقارنة النتائج التجريبية التي حصلنا عليها -وفق برنامج الـ Crystal Impact Match! 1.11f- بدراسات سابقة مماثلة [5,12,13]، كان التطابق واضحاً في القمم عند قيم 2θ التي توافقت المستويات البلورية كما في الجدول (2).

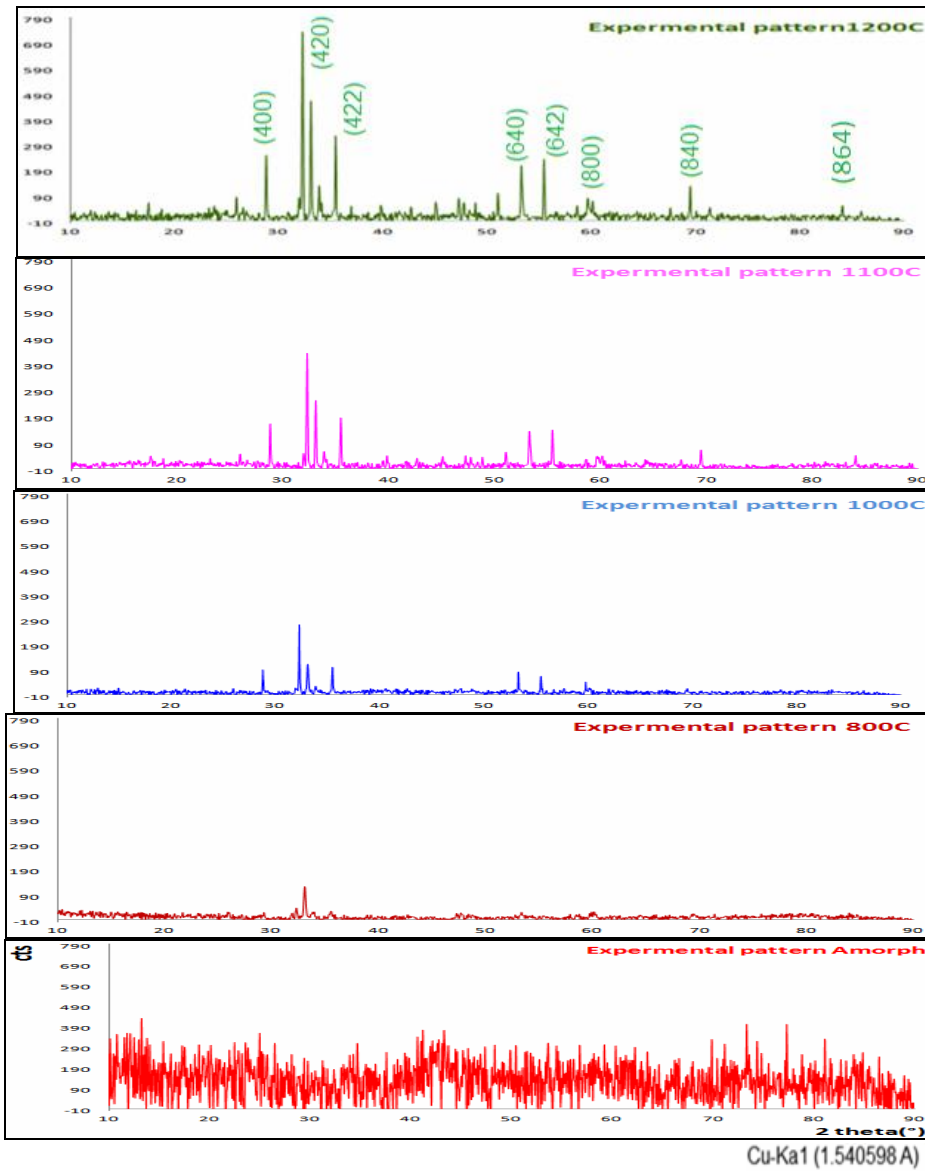
الجدول (2) يوضح حساب ثابت الشبكة البلورية وسماكة البلورة للبودرة المحضرة عند الدرجة 1200 .

T(°A)	a(°A)	hkl	d(°A)	2θ (°)
659.1061	12.370637	400	3.092659	28.86
575.9571	12.3775822	420	2.769034	32.32
580.8783	12.3750782	422	2.526557	35.52
464.3032	12.3767232	640	1.716367	53.36
586.162	12.3710735	642	1.653224	55.57
598.8198	12.3285899	800	1.541074	60.01
439.0215	12.0923661	840	1.352009	69.5
447.0733	10.538712	864	1.149887	84.16

كما أظهر طيف الأشعة السينية وفق برنامج الـ Crystal Impact Match! 1.11f أن البلورة المحضرة هي بلورة مكعبة من النمط (230) Ia-3d وأن كثافة المادة 5.17100g/cm^3 .

وعند إجراء الحسابات نفسها من أجل العينات المحضرة عند الدرجة 1000 - 1100 وجد أن ثابت الشبكة البلورية ينقص بازدياد درجة الحرارة، وأن عرض القمة يتناسب عكساً مع الحجم البلوري.

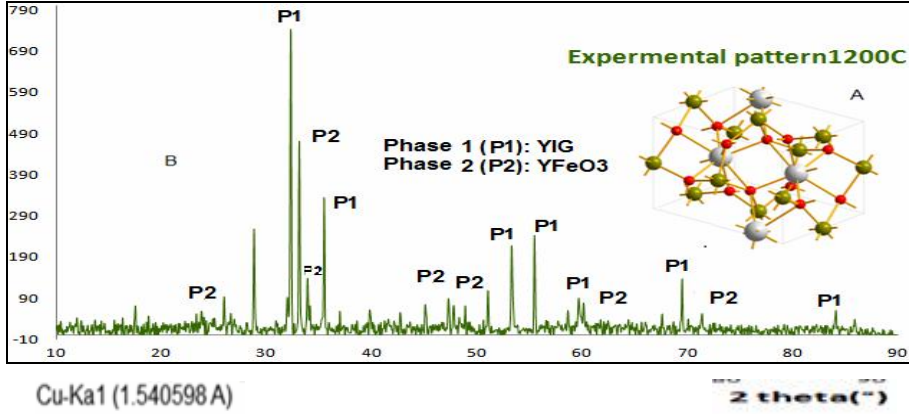
كما لوحظ وجود طور ثانوي مرافق للطور الدال على مادة YIG المتبلورة، وهو الطور الدال على وجود أكسيد الحديد والإيتريوم YFeO_3 (الشكل 3). وأن وجود الطور الثانوي يتضاءل بازدياد درجة حرارة التلدين، كما تزداد في الوقت عينه شدة (كمية) الطور المتبلور لمادة الـ YIG.



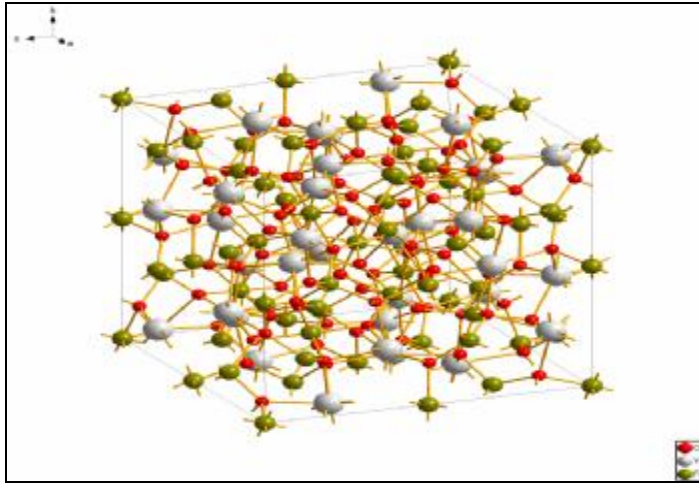
Cu-Kα1 (1.540598 Å)

الشكل (2) أطياف الأشعة السينية للبودرة المحضرة بعد المعالجة عند 1200°C باستخدام جهاز .STOE X-Ray Diffractometer

ومن الجدير بالذكر أن واحدة الخلية لمادة $YFeO_3$ تحوي 16 ذرة في حين واحدة الخلية لـ $Y_3Fe_5O_{12}$ تحوي 160 ذرة، وهذه النتيجة مطابقة لدراسة سابقة قامت بتحضير المادة نفسها بدءاً من Fe_2O_3, Y_2O_3 بطريقة الطحن بالكرات حيث ظهر المركب $YFeO_3$ كطور ثانوي في طيف XRD [5]، كذلك الأمر ظهر المركب نفسه في طيف XRD في دراسة أخرى مماثلة بطريقة الطحن بشروط مختلفة [14]، ومن المتوقع أن يتكون طور وحيد YIG إذا حضرت العينة عند درجة حرارة $1400^\circ C$ ، غير أن ذلك كان غير متاح بسبب عدم وجود فرن يصل إلى تلك الدرجة ضمن الإمكانيات الحالية.

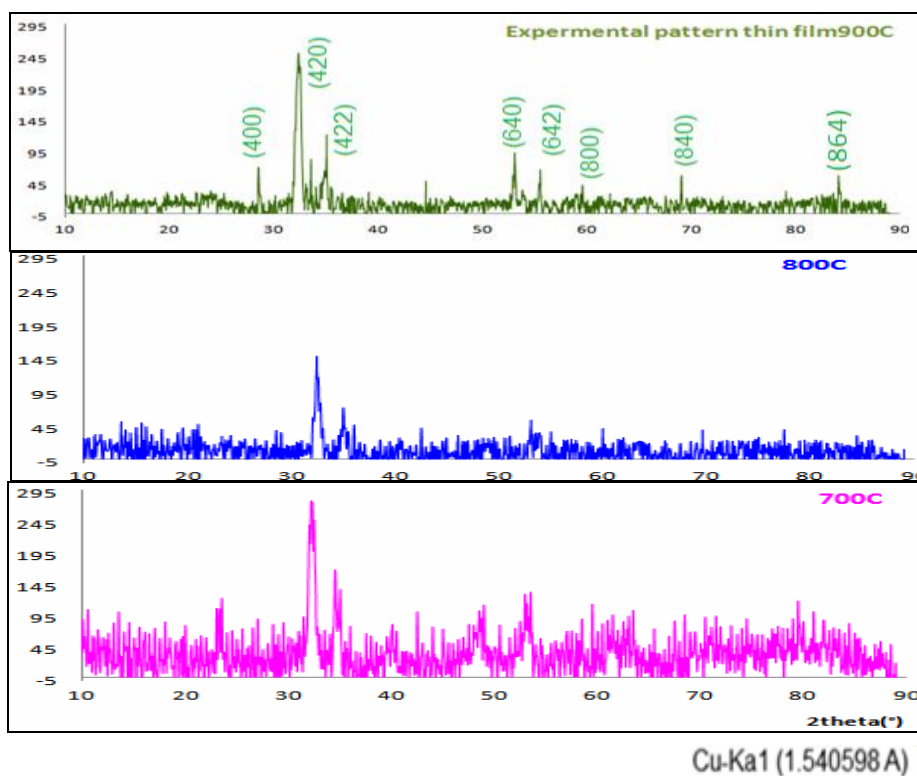


الشكل (3) a - البنية البلورية للـ $YFeO_3$ ، b - طيف XRD الموافق



الشكل (3) C - البنية البلورية للـ $Y_2Fe_3O_{12}$

يبين الشكل (4) نتائج القياسات الطيفية للانعراج بالأشعة السينية على الأغشية المحضرة بطريقة sol-gel والمرسبة على ركازات من الكوارتز، إذ وجد أن شدة التبلور تزداد بازدياد درجة حرارة التلدين، فالغشاء المحضر عند الدرجة $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ كان التشويش فيه كبيراً، أما الغشاء المحضر عند الدرجة $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ فكان التشويش أقل وظهرت قمم عند الزاوية 2θ الموافقة للقيم بين 30° - 37° والزاوية 55° ، وبذلك كان الغشاء المحضر عند $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ذي البنية البلورية الفضلى إذ ظهرت القمم بشكلها المقبول، وعند مقارنة النتائج التي حصلنا عليها تجريبياً بالمراجع السابقة كان التطابق بالقمم عند قيم 2θ ، كما يوضح الجدول (3).



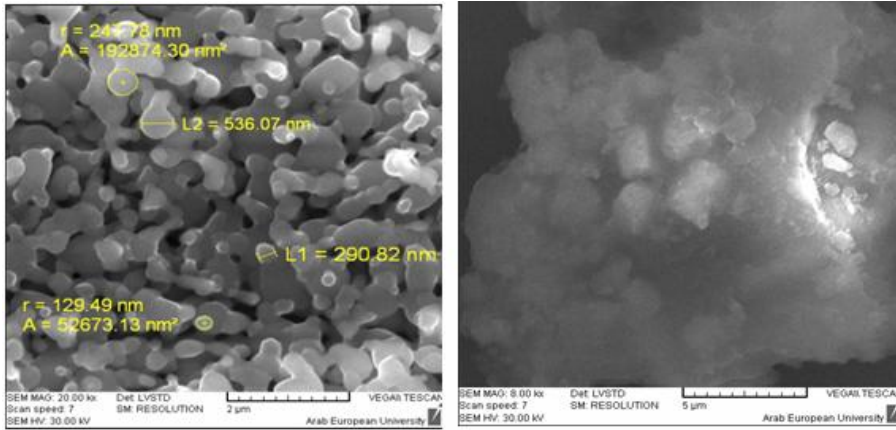
الشكل (4) أطيف الأشعة السينية للأغشية المحضرة بعد المعالجة عند $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ باستخدام جهاز .STOE X-Ray Diffractometer

الجدول (3) يوضح حساب ثابت الشبكة البلورية وسماكة البلورة للفلم المحضر عند الدرجة 900

T(°A)	a(°A)	hkl	d(°A)	2θ (°)
389.4456	12.37843	400	3.094608	28.83
191.9857	12.37278	420	2.767959	32.32
263.9987	12.38715	422	2.529022	35.47
619.4241	12.34406	640	1.711837	53.49
585.759	12.39708	642	1.6567	55.42
434.7414	12.3894	800	1.548675	59.66
529.9771	12.15813	840	1.359362	69.04
587.792	10.54482	864	1.150553	84.06

كما أظهر برنامج Crystal Impact Match! 1.11f أن كثافة مادة الغشاء 5.16900g/cm³ ببنية بلورية مماثلة.

يبين الشكل (5) صورة مجهرية لعينة YIG تحت المجهر الماسح الإلكتروني (SEM) (Scanning Electron Microscopic) (VEGA II XMU) للبودرة المحضرة عند الدرجة 1200°C و YIG الغشاء المحضر عند الدرجة 900°C.



a

b

الشكل (5) - a صورة SEM للبودرة (1200) YIG، b- صورة SEM للغشاء (900) YIG

حيث تظهر الجزيئات مستديرة تميل إلى التجمع على شكل كتل عنقودية تكون عشوائية وغير مرتبة تنتظم بارتفاع درجة حرارة التحضير.

الاستنتاجات و التوصيات

حُضِرَتْ في هذا البحث مادة YIG المتبلورة وفقاً لتقنية sol-gel على شكل بودرة وأغشية رقيقة بنجاح وبتطابق مع النتائج المنشورة في الأدبيات العلمية العالمية، كما حُلَّت ودرست المواد المحضرة باستخدام طيوف الأشعة السينية وفق شروط قياس عالية الدقة، إذ أوضحت أن درجة حرارة التلدين 1200°C كانت الفضلى لتشكيل بلورات كبيرة ذات تركيز كبير في البودرة، ودرجة حرارة التلدين 900°C كانت الفضلى لتشكيل بلورات كبيرة ذات تركيز كبير في الأغشية الرقيقة.

سوف نقوم في بحث لاحق بدراسة الخصائص المغناطيسية والضوئية للبودرة والأغشية الرقيقة، ولأسيما دراسة مفعول فارادي في تدوير مستوي الاستقطاب الضوئي للأشعة الليزرية بوجود الحقل المغناطيسي.

من ناحية أخرى، سوف نقوم في عمل مستقبلي بإضافة بعض المعادن أو المعادن الترابية كالزموث واللانثانيوم كشائبة إلى العينات في أثناء التحضير، ودراسة تأثير تلك الإشابة في درجة حرارة تحضير العينة وفي بنيتها البلورية وخصائصها المغناطيسية والضوئية.

شكر وامتنان

يشكر المؤلفون السيدة الدكتورة ببداء الأشقر رئيس قسم الفيزياء والأستاذ الدكتور ابراهيم عثمان (المدير العام لهيئة الطاقة الذرية) لمساعدته وتشجيعه المستمرين لإنجاز هذا البحث.

المراجع REFERENCES

- 1- Antti Hakola. (2006). Yttrium Iron Garnet, Helsinki University of technology, Advanced Energy system.
- 2- Pati, R. K. Ehman, Sh. H and Takeuchi, I. (2005). Flame synthesis of Yttrium Iron Garnet, Chemical Engineering, University of Maryland.
- 3- Öztürk, Y. Avgin, I. Erol, M. and Çelik, E. (2009). Cerium-doped YIG thin films prepared by Sol-Gel process, Advances in Nanoscale Magnetism, Springer Proceedings in Physics, Volume 122, pp 113-129.
- 4- Niratisairak, S. Amks seminar Uio Norway. (2006). Iron-Substituted Garnet films, University of oslo.
- 5- Sanchez-De Jesus, F. Cortes, C. A and Bolarin-Miro M. A. (2012). Synthesis of YIG assisted by high-energy ball milling, Ceramics International, 5160, p5257-5263.
- 6- Cheng, Z. Yang, H. and Feng, Sh. (2007). Synthesis and magnetic of YDyFeO nanoparticles, Journal of magnetism and magnetic material, 308,p5-9.
- 7- L. C. Klein. (1988). Sol- Gel Technology For Thin Film, fiber, preforms, electronics, and specialty shapes, chapter, 4 p50-79.
- 8- Brinker, C. J. and Scherer, G. W. San Diego. (1990). Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing, Academic Press Inc, ch1 & ch13.
- 9- Kim, Ch. S. R Uhm, Y. and Lee, J. (2000), Magnetic properties of La-YIG thin film grown by a sol-gel method, Journal of magnetism and magnetic material 215-216, p551-553.
- 10-Rehspringer, J-L. Bursik, J. and Klarikova, A. (2000). Characterisation of Bi – doped YIG layers prepared by sol-gel process, Journal of magnetism and magnetic material, 211, p291-295.
- 11-A-Speakman, S. Ph. D. 13-4009A Estimating crystallite size using XRD, center for materials science and engineering.
- 12-Kato, T. Tsunashima, S. and Hayashi, Sh. fujii, M. Hayashi, Sh. (2006). Magneto-Optical Kerreffects of magnetic garnet thinfilms incorporating gold nanoparticles, Physical review letters, 167402, p1-5.
- 13-Yang, Q. Zhang, H. Liu, Y. Wen, Q. and Jia, L. (2008). The magnetic and dielectric properties of microwave sintered YIG, Materials letters, 09287, p2647-2650.
- 14-Mergen, A. Qureshi, a. (2009). Characterization of YIG nanopowders by mechanochemical synthesis, Journal of alloys and compounds, 478, p741-744.