

تطور أيونات النحاس في الأغشية الرقيقة عالية السيليكا

EVOLUTION OF COPPER IONS IN HIGH-SILICA THIN FILMS

مروان فرحان سيف الكمالي^{1*}، اندريه بويكا^{1†}، ديمتري ليونيدوفيتش كوفالينكا²،
يحيى طه عبده الاديمي³، نتاليا دروبيشفسكايا¹، يوري اليكسينكا¹.

1معمل السيراميك التقني والمواد النانوية ، قسم علوم المواد في الهندسة الميكانيكية ، جامعة سوخوي التقنية الحكومية في غوميل ، غوميل ، بيلاروسيا.

2 قسم البصريات ، كلية الفيزياء وتكنولوجيا المعلومات ، جامعة ولاية فرانسيك سكورينا جوميل ، غوميل ، بيلاروسيا.

3 قسم هندسة المعدات الطبية ، دكتوراه ومساعد باحث ، كلابويجيز زوم ، بيركلن رودنريجس، BD2652. هولندا.
*المؤلف المراسل : مروان فرحان سيف الكمالي ، بريد الكتروني :

marwan.ye2@gmail.com marwan_ye@gstu.by ، تلفون : +375 44 450 73 17

†المؤلف المراسل : أندريه بويكا ، بريد الكتروني : boika.andej@gmail.com boika@gstu.by ،

تلفون : +375232295934

EVOLUTION OF COPPER IONS IN HIGH-SILICA THIN FILMS.

Marwan F. S. Al-Kamali , Andei A. Boika , Dmitry L. Kovalenko , Yahya
T.A. AL-Ademi , Natallia E. Drabysheuskaya , Yury A. Alexeenko .



تطور أيونات النحاس في الأغشية الرقيقة عالية السيليكا

الملخص:

تدرس هذه الورقة البحثية الأغشية الرقيقة القائمة على السيليكا المخدرة بأيونات النحاس (SiO₂:CuO) بنسبة مولارية تبلغ (1:0.20, 1:0.30, 1:0.40) مترسبة على ركائز الكوارتز والسيليكون. تم الحصول على الأفلام (الأغشية الرقيقة) عن طريق رش الأيونات في وسط غازي (الأرجون / الأكسجين) من أهداف عالية السيليكا التي تم الحصول عليها بطريقة السول-جل. تمت دراسة شكل وبنية الأغشية باستخدام المجهر الإلكتروني وتحليل الطور بالأشعة السينية. كشف تحليل طور الأشعة السينية للأغشية أن بنية الأغشية متعددة البلورات ولها هيكل سداسي. لقد ثبت أن اختزال Cu²⁺ إلى Cu⁺ يحدث أثناء تحضير الفيلم (الغشاء الرقيق) في جو من غاز الأرجون، وهو ما يؤكد تحليل أطياف الامتصاص وبيانات تحليل طيف الانعراج بالأشعة السينية. تبعيات التردد التي تم الحصول عليها من سماحية العزل الكهربائي للأغشية الرقيقة لـ (SiO₂:CuO) أظهرت انخفاضاً في سماحية العزل الكهربائي وظل فقدان العزل البلازمي.

الكهربائي في نطاق (103 إلى 106) هرتز. لقد وجد أنه عندما يكون سمك غشاء (SiO₂:CuO) أقل من 100 نانومتر لا يتم تكوين مكثف رقيق دائماً. يُظهر حساب فجوة الطاقة للأغشية الرقيقة المترسبة وجود نطاقات طاقة يتوافقان مع تركيبات (SiO₂:CuO) و (SiO₂:Cu₂O). يتغير نطاق فجوة الطاقة للأغشية للتركيب (SiO₂:CuO) بزيادة التركيز من 3.564 إلى 2.598 إلكترون فولت. بينما للتركيب (SiO₂:Cu₂O) مع زيادة التركيز بتغير نطاق فجوة الطاقة من 5.299 إلى 3.586 إلكترون فولت. في المقابل لوحظ انخفاض في أطياف الإرسال في منطقة 600-650 نانومتر والذي يتوافق مع التأثير البلازمي.

الكلمات المفتاحية: الرش الأيوني، السول-جل، أيونات النحاس، فجوة الطاقة ، SiO₂:CuO، المرفولوجيا (التشكيل السطحي)، أغشية رقيقة من السيليكا العالية، طيف الأشعة السينية، مجهر المسح الإلكتروني.

EVOLUTION OF COPPER IONS IN HIGH-SILICA THIN FILMS

Marwan F. S. Al-Kamali^{1*}, Andei A. Boika^{1,†}, Dmitry L. Kovalenko^{2,},
Yahya T.A. AL-Ademi^{3,}, Natallia E. Drabysheuskaya^{1,}, Yury A. Alexeenko¹

¹Laboratory of Technical Ceramics and Nanomaterials, Department of Materials Science in Mechanical Engineering, Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Belarus.

²Department of optics, Faculty of physics and information technology, Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Belarus.

³Department of medical equipment engineering, Ph.D & Junior research assistant, Klapwijse zoom, 2652BD Berkelen Rodenrijs. Netherlands.

*Corresponding author: Marwan F. S. Al-Kamali; E-mail: marwan.ye2@gmail.com, ; marwan_ye@gstu.by Contact No.: +375 44 450 73 17.

†Corresponding author: Andrei A. Boika; E-mail: boika.andej@gmail.com, boika@gstu.by; Contact No.: +375232295934

Abstract:

The paper studies Thin Films based on Silica which doped with Copper Ions (SiO₂:CuO) at A Molar Ratio of (1:0.20; 1:0.30; 1:0.40) Deposited on Quartz and Silicon Substrates. The films were obtained by ion sputtering in a gaseous medium (argon/oxygen) from High-Silica targets obtained by the Sol-Gel method. The morphology and structure of the films were studied using scanning electron microscopy and X-ray phase analysis. X-ray phase analysis of the films revealed that the structure of the films is polycrystalline and has a hexagonal structure. It has been established that the reduction of Cu⁺² to Cu⁺ occurs during film preparation in argon, which is confirmed by the analysis of absorption spectra and XRD data. The obtained frequency dependences of the dielectric permittivity of SiO₂:CuO films showed

a decrease in the dielectric permittivity and dielectric loss tangent in the range of (10³ to 10⁶) Hz. It has been found that when the SiO₂:CuO film thickness is less than 100 nm, a thin-film capacitor is not always formed. The calculation of the film band gap shows the presence of two energy bands corresponding to the SiO₂:CuO and SiO₂:Cu₂O compositions. The band gap of Eg(CuO) changes with increasing concentration from 3.564 to 2.598 eV, and Eg(Cu₂O) changes with increasing concentration from 5.299 to 3.586 eV. A dip corresponding to the plasmon effect is observed in the transmission spectra in the region of 600–650 nm.

KEYWORDS: Ion Beam Sprayer; Sol-gel; Copper ions; Band gap; SiO₂:CuO; Morphology; high-silica thin films; XRD, SEM.

Introduction: مقدمة

أحد المتطلبات الرئيسية للحصول على طلاءات مع التوحيد الأمثل بطرق الترسيب بالفراغ هو درجة عالية من التجانس للتركيب الحبيبي والكيميائي للهدف الأولي. كما هو موضح في [2،1] ، يتم الحصول على طلاءات ذات جودة بصرية وقياسات متكافئة موحدة فقط في نظام "التسمم" القوي للمادة المستهدفة بمعدل رشاش منخفض (أي عندما تكون طبقة عازلة رقيقة على السطح المستهدف). في بحثنا باستخدام مكوناتها ذات النقاوة الكيميائية التي لا تقل عن درجة "النقاء العالي" ، وكذلك ايروسيل (كمصفوفة حاملة للمنشطات) ، يصبح من الممكن توزيع إضافات صناعة السبائك بتوحيد على المستوى الجزيئي و امتصاصها على سطح كريات ايروسيل (السيليكا البيروجينية) في شكل طبقة رقيقة بسماكة نانومتر.

في الحالة العامة تتاح الفرص لإيداع الطلاءات المتجانسة في شكل أغشية رقيقة تعتمد على مصفوفة SiO₂ تحتوي على أكاسيد انتقالية أو معادن نبيلة بتركيز معين وتكوين طور. ستسمح المعالجة الإضافية لمثل هذه الأغشية في وسط غازي مضبوط (الأرجون أو الهيدروجين) ليس فقط بالتحكم في معلمات الالتصاق للطبقة الانتقالية بين الركيزة والغشاء المترسب (ربما طبقة متعددة الطبقات) ، ولكن أيضاً "نمو" الجسيمات النانوية لهذه المعادن في الطلاء المشكل على أساس أكاسيد المعادن ، مما يخلق هياكل بلازمونيك محلية ذات شكل هندسي معين وتشقت الحجم [3-5].

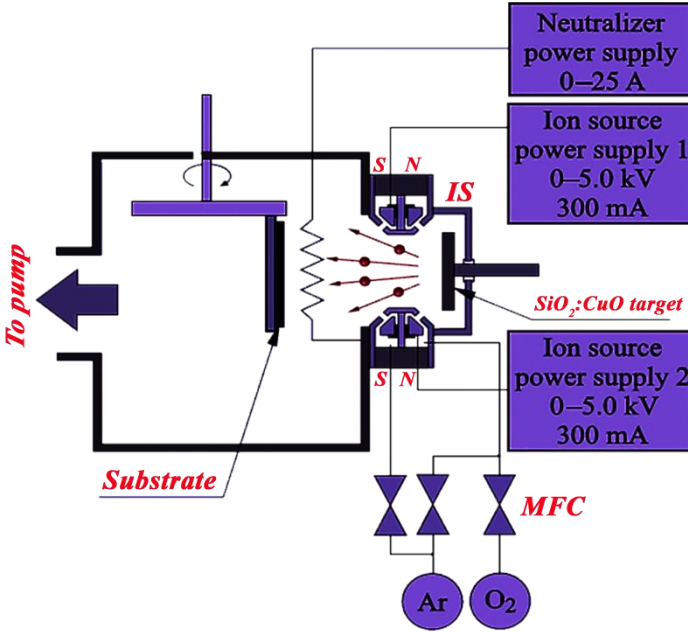
تمت دراسة التحولات الهيكلية والطورية للحصول على أهداف تعتمد على المواد المركبة SiO₂:CuO وتشكيل أغشية رقيقة عن طريق رش شعاع أيوني لهدف SiO₂:CuO في خليط غاز Ar/O₂ نظراً لأن السيليكا مادة محايدة كيميائياً ويمكن استخدامها بنجاح كبير في إعداد مصفوفات حاملة خاملة لعدد من المواد (في حالتنا ، كانت نترات النحاس بمثابة المادة المشبعة الأولية). تتيح المعالجة الحرارية اللاحقة لهذه المواد (الأكسروجيل التي تحتوي على نترات النحاس (II)) في وسط غازي مضبوط إمكانية إجراء تفاعلات التحويل الكيميائي للملح النحاس إلى أكسيده أو الحالة المختزلة إلى معدن دون تفاعل مع مصفوفة SiO₂ . تم وصف طرق مماثلة للاختزال المباشر للأملاح المعدنية في الهيدروجين إلى حالة الجسيمات النانوية في [6]. في الواقع ، في بنية نظام المسام المفتوحة والمغلقة من الأكسروجيل ، كما هو الحال في المفاعلات النانوية ، تم إجراء تفاعلات للحصول على أكسيد أو نحاس معدني ، يليها توطين المرحلة الناشئة في شكل تكتلات من الجسيمات الدقيقة والنانوية من المركبات المعدنية المقابلة. على وجه الخصوص ، تم تنفيذ تركيب جسيمات الحديد النانوية (في مسام SBA-15) بشكل فعال للغاية على أساس مادة مسامية من نوع السيليكا SBA-15 ، والتي تحتوي على مجموعة سداسية من المسام الأسطوانية (d=6-27 nm) ، باستخدام تقنية سول-جل المعدلة (في مسام SBA-15) - عن طريق تحويل كلوريد الحديد (III) إلى أكسيده والاختزال إلى معدن في تيار من الهيدروجين عند 600 درجة مئوية. [7].

في هذا العمل ، يتم دراسة تكوين الطور والتشكل لأغشية $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ الرقيقة التي تم الحصول عليها عن طريق رش شعاع الأيونات لهدف $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ (الذي تم تحضيره بطريقة السول-جل مسبقاً) على ركائز السليكون والزجاج ويتم قياس ثابت العزل وفقدان العزل الكهربائي $\text{tg}\delta$ للمكثف في التردد نطاق (10^3 إلى 10^6) هرتز ، اعتماداً على التغيير في جهد التحيز حتى 10 فولت كما يتم دراسة الخصائص البصرية للركائز التي تم الحصول عليها والتي من خلالها يتم حساب فجوة الطاقة.

2- الجانب العملي (طرق التحضير والقياس) :

1-2: تحضير الأغشية الرقيقة من $\text{SiO}_2:\text{CuO}$

تم في هذا البحث تحضير أغشية ($\text{SiO}_2:\text{CuO}$) الرقيقة في غرفة مفرغة باستخدام مصدر أيوني ثنائي الشعاع لرش شعاع الأيونات من إنتاج "مصنع أدوات الآلات البصرية Smorgon" حيث تم ترسيب الفلم (الأغشية الرقيقة) عن طريق تسليط مصدر أيوني على الهدف المحضر مسبقاً بطريقة المحلول الغرواني (سول-جل) حيث تم تحضير الهدف باستخدام السيليكا شديدة النشتت (العلامة التجارية A-380)[8]، حيث تم إدخال أيونات النحاس على شكل ملح قابل للذوبان في الماء (تم استخدام نترات النحاس المائية $(\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \times 3\text{H}_2\text{O})$ وبتراكيزات مختلفة في المحلول المائي الغرواني ثم بعدها تم الحصول على الأكسروجيل (هلام جافة) من التركيب المحضر عن طريق تسخين المحلول في درجة حرارة 80 درجة مئوية لمدة أسبوع ومن ثم تم معالجة الأكسروجيل (الهلام الجافة) التي تم الحصول عليها في حرارة 800 درجة مئوية في الهواء لمدة ساعة [6-8]. وخلال هذه المرحلة تم انتقال نترات النحاس إلى أكسيد النحاس ولتشكيل الهدف الذي سيتم استخدامه في عملية الرش تم طحن المركب الناتج (الأكسروجيل) بعد المعالجة الحرارية إلى مساحيق دقيقة شديدة النشتت (بودر) ومن خلال ذلك تم تحضير محلول مائي من كحول بولي فينيل بتركيز وزني بنسبة 1.5 – 3 % ليعمل كمادة رابطة مؤقتة لتشكيل الهدف النهائي الذي سيتم رش الفلم منه وإضافته إلى المسحوق (البودر) الذي تم الحصول عليه و تمت معالجة الهدف النهائي (بعد ضغطه بقلب ذو قطر 80 ملم وسمك 7 ملم بطريقة الضغط أحادي المحور) عند درجة حرارة 800 درجة مئوية لمدة ساعة. يوضح الشكل 1 الرسم التخطيطي لنظام الترسيب عن طريق الرش بشعاع الأيونات حيث تم تجهيز غرفة الإعداد بمصدر أيوني ثنائي الشعاع يعتمد على مسرع طبقة الأنود DBIS-001 ، والذي تم استخدامها للتطهير الأيوني الأولي لسطح الركيزة ورشاش المادة المستهدفة وحيث يعتمد التثبيت على محطة تفريغ الهواء UV-2 ، تم استخدام المعوض المتوهج لتحييد الحزم الأيونية والتعويض عن الشحنة السطحية الناشئة أثناء رش الأهداف العازلة للكهرباء.



شكل 1. مخطط الإعداد التجريبي المستخدم لإيداع أفلام $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ بواسطة رش شعاع الأيونات: مصدر الطاقة المجمع - وحدة تزويد الطاقة للمعوض المتوهج، BPII - مصدر طاقة أيوني MFC، - منظم تدفق الغاز الأوتوماتيكي [4]

تم استخدام الركائز من السيليكون أحادي البلورة عالي التقييط (100) EKES 0.01 وزجاج بصري BK7 بسلك 2 مم كركائز. تم تركيب الركائز على حامل ركيذة دوار من نوع الأسطوانة ، مما جعل من الممكن إحضار الركائز بالتناوب إلى منطقة الترسيب. قبل ترسيب الطبقات (الأغشية الرقيقة) ، تم تفريغ حجرة وحدة التفريغ إلى ضغط متبقي قدره 10^{-3} باسكال وتم إجراء التنظيف الأيوني الأولي للركائز ، لهذا الغرض ، ومن ثم تم تزويد غاز الأرجون الخامل إلى المرحلة المساعدة لمصدر الأيونات حيث بلغ الضغط في حجرة التفريغ 2.0×10^{-2} باسكال وفي هذه الأثناء كان وقت التنظيف وطاقة الأيونات وتيار التفريغ ثابتاً في جميع المراحل وبلغ 5 دقائق (وضع دوران حامل الركيذة) ، 500 فولت ، 70 ملي أمبير ، على التوالي. بعد ذلك ، تم تنظيف السطح المستهدف من الملوثات والغازات الممتصة وللقيام بذلك تمت إزالة الركائز من منطقة الترسيب وفيما بعد تم رش الهدف $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ (الذي تم تحضيره مسبقاً بتقنية السول - جل) بأيونات Ar^+ وبجهد 1300 فولت والتي تم توليدها أثناء مرحلة الرش لمصدر أيوني ثنائي

الحزمة موديل (DBIS-001) في هذه الأثناء كان تيار التفريغ في جميع التجارب ثابتاً وبلغ 200 مللي أمبير (كان التيار المستهدف 110 مللي أمبير). وقت التنظيف المستهدف 10 دقائق.

بعد تنظيف الهدف ، قمنا بترسيب طبقة $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ وذلك من خلال جلب الركائز إلى منطقة الترسيب حيث توفر جو غازي من الأرجون والأكسجين وخليط بينهم كذلك أثناء عملية الرش لمصدر الأيونات حيث تتنوع محتوى الأكسجين في خليط غاز Ar/O_2 في ثلاثة أنظمة (0% ، 50% ، و 100%) بمعدل إجمالي لتدفق الغاز من 20 إلى 32 مل / دقيقة (كان الضغط في الحجرة حوالي 0.02 باسكال). تم التحكم في معدل تدفق غازات العمل Ar/O_2 إلى مصدر أيونات الرش بواسطة منظمات تدفق الغاز RRG-1. حيث أن استخدام منظمات تدفق الغاز الأوتوماتيكية جعل من الممكن الحفاظ بدقة على نسبة الضغط الجزئي لغازات العمل أثناء عملية الرش لترسيب طبقات $\text{SiO}_2:\text{CuO}$.

أثناء عملية الرش الأيوني لترسيب الطبقات تم استخدام أوضاع الرش التالية: جهد التفريغ (U_d) = 5 كيلو فولت، تيار التفريغ (I_d) = 200 مللي أمبير؛ الملف اللولبي الحالي (I_c) = 3.4 أمبير؛ المسافة من الهدف إلى الركيزة 23.5 سم ، الجدول رقم 1 يبين زمن الرش للأغشية المترسبة وكمية الغاز المتدفق أثناء عملية الرش وسمك الطبقة المترسبة [9] .

الجدول (1): زمن الرش لأغشية $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ وكمية الغاز المتدفق أثناء عملية الرش وسمك الأغشية المترسبة بطريقة الرش الأيوني للهدف المستهدف .

$\text{SiO}_2:\text{CuO}$ (1 Si: 0,40 Cu)			$\text{SiO}_2:\text{CuO}$ (1 Si: 0,30 Cu)			$\text{SiO}_2:\text{CuO}$ (1 Si: 0,20 Cu)			تركيبة الهدف وتركيته بالكتلة الذرية
100% O_2	50% Ar/O_2	100% Ar	100% O_2	50% Ar/O_2	100% Ar	100% O_2	50% Ar/O_2	100% Ar	نسبة الغاز داخل منطقة الرش
32	Ar=11 O ₂ =14	1	29	Ar=10 O ₂ =13	23	24	Ar=11 O ₂ =12	20	كمية الغاز (مل/دقيقة)
32	18	5	32	18	5	32	18	5	زمن الرش (دقيقة)
101	96.2	89	119	116	112	109	106	103	سمك الطبقة المترسبة (نانومتر)

2-2: أساليب التوصيف

1-2-1: تحديد سمك الطبقة المترسبة :

لتحديد سمك الطبقة المترسبة من الأغشية الرقيقة قيد الدراسة تم استخدام طريقتين لذلك حيث أنه تم تحديد سمك الطبقات المترسبة باستخدام مقياس التداخل البصري POI-08. أما الطريقة الثانية

تمت بمساعدة الميكروسكوب الإلكتروني في دراسة المرفلوجيا (التشكيل السطحي) للأغشية المترسبة حيث تم تحديد سمك الطبقة المترسبة .

2-2-2: دراسة الخصائص البصرية :

تم الحصول على أطياف الإرسال في المدى 200-900 نانومتر باستخدام مقياس الطيف الضوئي (Proscan MS-121) حيث تم عن طريق الجهاز قياس الامتصاصية والنفاذية للأغشية التي ترسبت على شرائح الزجاج .

تم تحديد فجوة النطاق من حافة الامتصاص الجوهرية للأغشية [10-11]. بالنسبة لحالة انتقالات النطاق المباشر ، فإن العلاقة بين معامل الامتصاص α وطاقة الفوتون E موصوفة بالمعادلات التالية:

$$k = \frac{\lambda \cdot \alpha}{4\pi} \dots\dots\dots(1)$$

حيث k : القيمة المتوسطة لمؤشر الامتصاص عند طول موجي معين (معامل الخمود). يظهر في الشكل السلوك الطيفي لمعامل الامتصاص (α) مقابل طاقة الفوتون (hv) و $(\alpha hv)^2$ كدالة له لأفلام المودعة.

وبمعرفة سمك الطبقة المترسبة وقيمة الامتصاصية ومن خلال هذه العلاقة يتم احتساب معامل الامتصاص (α) للأغشية الرقيقة المودعة:

$$\alpha = 2.303 \frac{A}{d} \dots\dots\dots(2)$$

حيث A الامتصاصية ، d سمك الغشاء الرقيق (الفلم) المترسب.

$$\alpha hv = A(hv - E_g)^r \dots\dots\dots(3)$$

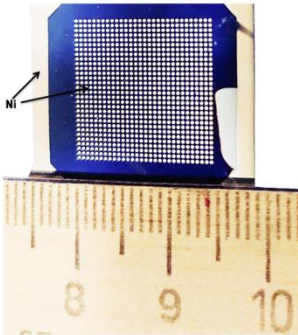
E_g فجوة الطاقة البصرية تقاس بالالكترون فولت، hv طاقة الفوتون الممتص تقاس بالالكترون فولت، A ثابت يعتمد على طبيعة المادة ، r معامل اسي يعتمد على طبيعة الانتقالات ، فيساوي 0.5 للانتقال المباشر المسموح وتساوي 3/2 للانتقال غير المسموح. وعند رسم العلاقة بين $\ln(\alpha)$ كدالة لـ $\ln(hv - E_g)$ كما موضح في الشكل (8).

3-2-2: قياس العازلة للأغشية

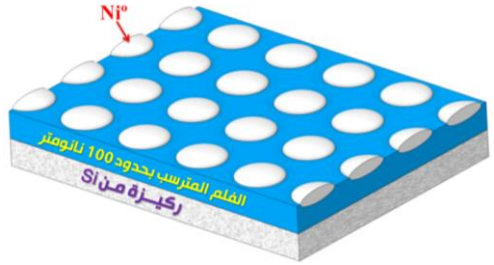
لقياس الخصائص العازلة للأغشية المترسبة، تم تشكيل هياكل MOS (فلز(معدن) - أكسيد- شبه موصل) و للقيام بذلك، تم ترسيب القطب الكهربائي العلوي من النيكل على الفلم المترسب عن طريق شعاع أيوني يتدفق عبر قناع (الشكل 2)، كانت مساحة بطانة المكثف 0.096 مم²، تم قياس ظل السعة وفقدان العزل الكهربائي باستخدام مقياس (Immittance E7-20, MNIPI, Belarus) بنطاق تردد من 25 إلى 106 هرتز. وأيضا تم حساب قيم سماحية العزل الكهربائي بناءً على سمك الطبقة العازلة وسعة الهيكل المكثف باستخدام الصيغة التالية:

$$\varepsilon = \frac{Cd}{\varepsilon_0 S} \dots\dots\dots(4)$$

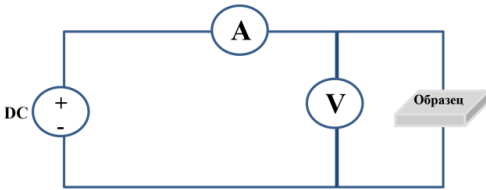
حيث (C) هي سعة المكثف، (d) سماكة الطبقة الفيروكهربائية، $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ فاراد/متر، (S) هي مساحة المكثف... تم الحصول على خصائص السعة والجهد باستخدام مقياس (IMMITTANCE E7-20, MNIPI, Belarus).



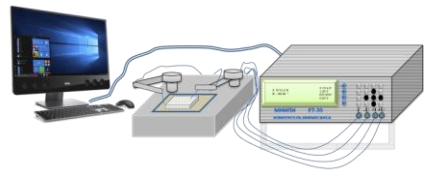
(ب)



(أ)



(د)



(ج)

الشكل (2) : تمثيل تخطيطي لهيكل $\text{Si} / \text{SiO}_2 : \text{CuO} / \text{Ni}$: أ- التمثيل التخطيطي لهيكل ب- المظهر النموذجي لهيكل ج- مخطط الدائرة لأداة إجراء القياس لخصائص I-V للعينات د- الرسم التخطيطي الرئيسي لمقياس خصائص I-V للعينات

4-2-2: حساب معدل الحجم البلوري وكثافة الخلع:

لدراسة التركيب البلوري للأغشية المترسبة في البداية تم تحليل طيف الأشعة السينية باستخدام مقياس حيود الأشعة السينية متعدد الوظائف GNR APD 2000 PRO (معهد ميكانيكا أنظمة المعادن البوليمر- جومل بيلاروسيا) حيث تم دراسة الطيف للمساحيق المحضرة وكذلك للأغشية المترسبة ، ومن خلال معادلة شيرر تم حساب معدل الحجم البلوري للحبيبات

$$D = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta} \quad \dots \dots \dots (5)$$

حيث λ الطول الموجي للأشعة السينية المستخدمة والذي يتراوح 1.5405980 \AA و K معامل شيرر ويساوي 0.94 ، β عرض المنحني عند منتصف الشدة العظمى FWHM بالوحدات النصف قطرية راديان.

وعند حساب كثافة الخلع تم استخدام العلاقة التالية:

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad \dots \dots \dots (6)$$

5-2-2: دراسة مرفولوجيا (التشكل السطحي) الأغشية المترسبة :

لدراسة التشكل السطحي للأغشية المترسبة على الركيزة تم استخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) موديل S-4800 (شركة انتجرال – بيلاروسيا) .

3- النتائج والمناقشة:**1-3: التحليل الهيكلي**

تم تسجيل طيف الأشعة السينية باستخدام الجهاز المشار إليه في الوصف حيث سُجلت طيوف الإنعراج بالأشعة السينية شكل(2) للبودر المحضر وجود بنية لابلورية (amorphous) للبودر المحضرة وفق تقانة المحلول الغرواني(سول-جل) بالنسبة لأكسيد السليكون (SiO_2) في المركب ($\text{SiO}_2:\text{CuO}$) المحضر والذي تمت معالجته عند درجة حرارة 800 درجة مئوية وكذلك سُجلت الطيوف وجود بنية بلورية احادية الميل لأكسيد النحاس (CuO) ويلاحظ أن القمم تزداد وضوحاً مع زيادة تركيز النحاس في المركب حيث أثبتت مقارنة القمم بقاعدة بيانات PDF(48-1548 JCPDS-1996) أن المرحلة الرئيسية للعينة هي CuO مع هيكل بلوري أحادي. كان التطابق واضحاً في القمم عند قيم 2θ التي تقابل المستويات البلورية الذرية كما في الجدول(2).

جدول (2): طيوف الإنعراج بالأشعة السينية للمسحوق المحضّر منه الهدف عند درجة حرارة 800

درجة مئوية بالإضافة لحجم البلوري وكثافة الخلع

التركيب البلوري المقابل في قاعدة البيانات المحفوظه	كثافة الخلع $4-10 \times \delta$ نانومتر ²	الحجم البلوري نانومتر (D)	FWHM (°) β	hkl	2 θ (°)
CuO	21,09	21,78	0,39668	1 0 0	32,30
CuO	36,96	16,45	0,52946	0 0 2	35,39
CuO	47,38	14,53	0,60513	1 1 1	38,58
CuO	29,53	18,40	0,49487	0 2 $\bar{2}$	48,66
CuO	30,92	17,98	0,51628	1 1 2	53,34
CuO	38,13	16,19	0,58602	0 2 0	58,06
CuO	25,88	19,66	0,49103	1 3 $\bar{1}$	61,44
CuO	76,86	11,41	0,86693	1 1 & 1 1 $\bar{3}$	65,91
CuO	32,49	17,54	0,56992	2 2 0	67,83
CuO	34,79	16,95	0,60558	2 2 1	72,16
CuO	41,61	15,50	0,67447	0 0 4	74,95

لا ترتبط أي من القمم المرصودة بـ SiO₂ والتي يمكن أن تُعزى إلى البنية غير المتبلورة لهذه المرحلة

عند درجة حرارة التكلّيس لـ SiO₂

أما في الشكل (2ب) سجلت طيوف الإنعراج بالأشعة السينية أن الطبقة التي ترسبت من الهدف (SiO₂:CuO) على الركيزة مع وجود وسط غازي وجود قمم لـ CuO وكذلك لـ Cu₂O وذلك بمقارنة النتائج مع [12] وقاعدة البيانات (PDF(48-1548 JCPDS-1996))، ونلاحظ أيضاً أن CuO ، بغض النظر عن تكوين الوسط الغازي ، يحتفظ بنظام بلوري أحادي الميل، وأيضاً كشف تحليل طوار الأَشعة السينية للأغشية أن بنية الأغشية متعددة البلورات ولها هيكل سداسي.

EVOLUTION OF COPPER IONS IN HIGH-SILICA THIN FILMS.

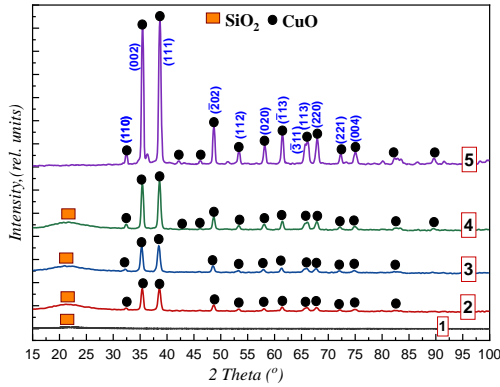
Marwan F. S. Al-Kamali , Andei A. Boika , Dmitry L. Kovalenko , Yahya

T.A. AL-Ademi , Natalia E. Drabysheuskaya , Yury A. Alexeenko .

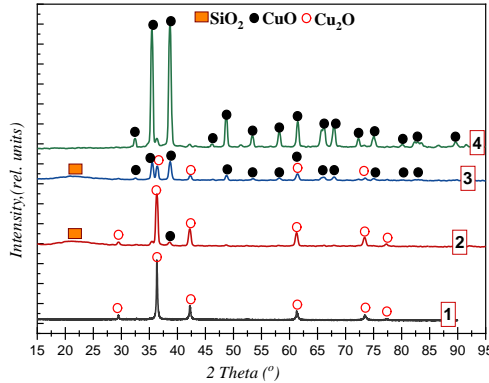
جدول(3): طيوف الانعراج بالأشعة السينية للأغشية المترسبة منه الهدف عند درجة حرارة 800 درجة مئوية بالإضافة لحجم البلوري وكثافة الخلع والتركيب البلوري المتوافق مع قاعدة البيانات

الأغشية الرقيقة المترسبة عند وسط غازي 100% أرجون					
التركيب البلوري	كثافة الخلع $\delta \times 10^{-4}$ نانومتر ²	الحجم البلوري نانومتر (D)	FWHM ($^{\circ}$) β	hkl	2 θ ($^{\circ}$)
Cu ₂ O	27,57	19,05	0,45048	1 1 0	29,49
Cu ₂ O	26,32	19,49	0,448	1 1 1	36,33
CuO	37,11	16,42	0,53557	1 1 1	38,60
Cu ₂ O	30,69	18,05	0,49273	2 0 0	42,21
Cu ₂ O	29,30	18,47	0,52196	2 2 0	61,27
Cu ₂ O	30,30	18,17	0,5696	3 1 1	73,39
Cu ₂ O	21,83	21,40	0,49636	2 2 2	77,27
الأغشية الرقيقة المترسبة عند وسط غازي 50% أرجون و 50% أوكسجين					
التركيب البلوري	كثافة الخلع $\delta \times 10^{-4}$ نانومتر ²	الحجم البلوري نانومتر (D)	FWHM ($^{\circ}$) β	hkl	2 θ ($^{\circ}$)
CuO	27,21	19,17	0,4508	1 0 0	32,51
CuO	29,64	18,37	0,4743	0 0 2	35,51
Cu ₂ O	25,86	19,67	0,44414	1 1 1	36,41
CuO	34,88	16,93	0,51937	1 1 1	38,71
Cu ₂ O	30,06	18,24	0,48781	2 0 0	42,30
Cu ₂ O/ CuO	19,86	22,44	0,40215	2 0 0, 2 0 2	46,30
CuO	27,25	19,16	0,47557	0 2 2	48,77
CuO	42,87	15,27	0,60834	1 1 2	53,48
CuO	42,54	15,33	0,61926	0 2 0	58,18
Cu ₂ O/ CuO	34,55	17,01	0,56726	1 3 1	61,42
CuO	90,45	10,51	0,9409	1 1 & 1 1 3	66,00
CuO	40,97	15,62	0,64041	2 2 0	67,95
Cu ₂ O	33,46	17,29	0,599	3 1 1	73,49
CuO	31,91	17,70	0,59092	0 0 4	75,04

من خلال النتائج التي تم الحصول عليها من طيوف الانعراج بالأشعة السينية ومقارنتها مع قاعدة البيانات نلاحظ أنه تم اختزال CuO إلى Cu وربما Cu^0 وكذلك إلى Cu_2O وذلك يلاحظ مع الزيادة في غاز الأوكسجين أثناء عملية الرش والترسيب حيث نلاحظ أن CuO ، بغض النظر عن تكوين الوسط الغازي يحتفظ بنظامه البلوري وأن بنية الأغشية متعددة البلورات ولها هيكل سداسي. ويمكن ملاحظة أنه في حالة الحصول على الأغشية الرقيقة عند جو من الأرجون أن انخفاض Cu^+ إلى Cu^{+2} ، وهذا ما تؤكد القياسات الطيفية بالشكل (3) للأغشية الرقيقة عند جو من الأرجون وكذلك أرجون وأوكسجين ومقارنتهم بالطيف لكل من CuO وكذلك Cu_2O في قاعدة البيانات وهذا ما يشير إلى أن تركيزاً عالياً من CuO كروي الشكل يتشكل في الأغشية الرقيقة في وسط خامل (أرجون) ، وأنه يمكن اختزال أكسيد النحاس إلى Cu وربما Cu^0 .



(أ)

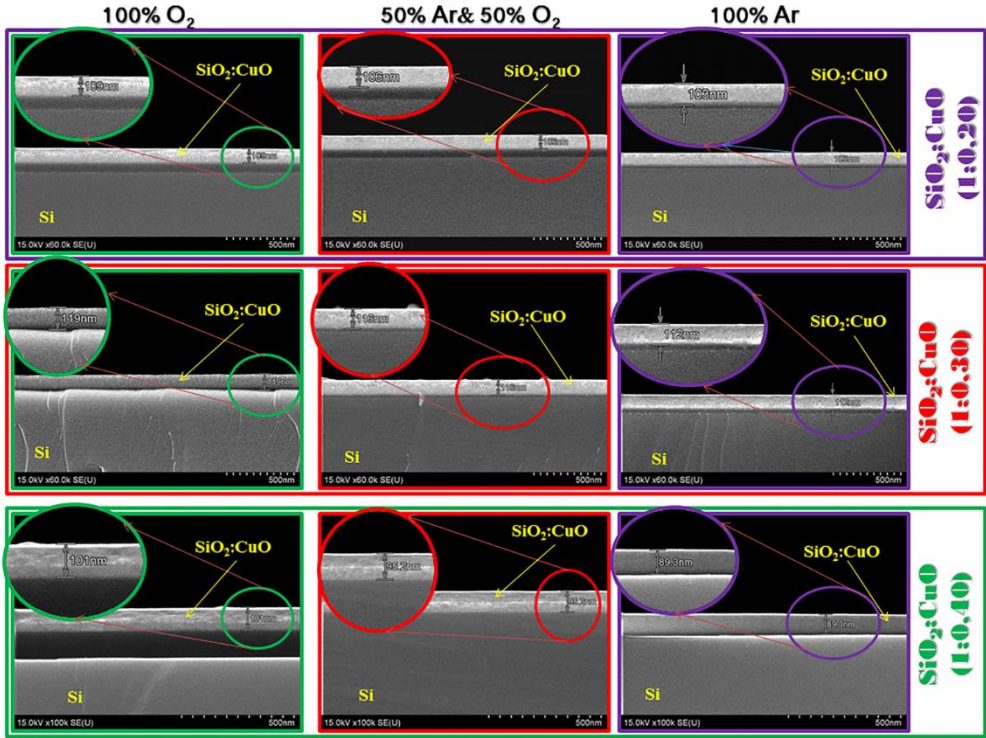


(ب)

شكل (3) طيف الأشعة السينية (أ) للمساحيق التي تشكل منها الهدف 1- أكسيد السليكون النقي عند 800 درجة، 2- 4 المركب $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ عند التركيز لا يونات النحاس في أكسيد السليكون على التوالي (1Si:0,2; 0,3; 0,4 Cu) عند درجة حرارة 800 مئوية، 5- أكسيد النحاس الثنائي النقي.

(ب) للأغشية المترسبة بطريقة الرش الأيوني للهدف $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ بتركيز (1Si:0,4 Cu) عند جو من الأرجون بنسبة 100% النقي، 2- الأغشية الرقيقة لـ $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ بتركيز (1Si:0,4 Cu) عند جو من الأرجون بنسبة 100% أثناء الترسيب، 3- الأغشية الرقيقة لـ $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ بتركيز (1Si:0,4 Cu) عند جو من الأرجون والأكسجين بنسبة 50% لكل منها أثناء الترسيب، 4- أكسيد النحاس الثنائي التكافؤ النقي.

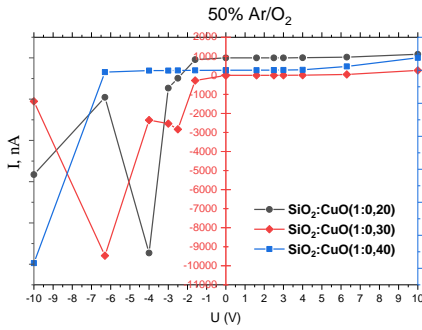
في الشكل (4) صور لـ SEM المرفولوجيا لسطح الأغشية الرقيقة من $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ على ركيزة Si حيث تظهر الصور التشكيل السطحي للأغشية المترسبة وسمك طبقة $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ المترسبة على سطح الركيزة حيث يمكننا من خلال الصور ملاحظة أن الفيلم (الأغشية الرقيقة المترسبة) تتكون بشكل كثيف وموحد وتظهر الصور أيضا هيكل طلاء(غشاء) $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ حيث يتراوح سمك أغشية $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ من 89.3 إلى 119 نانومتر.



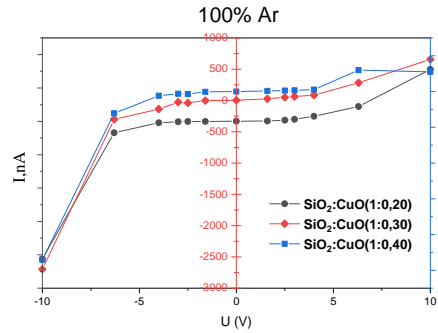
الشكل (4)- صور لـ SEM المرفولوجيا لسطح الأغشية الرقيقة من $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ على ركيزة Si مصقولة التي تم ترسيبها بواسطة الرش بالبلازما لهدف من $\text{SiO}_2:\text{CuO}$

2-3: التوصيف الكهربائي لأغشية $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ الرقيقة (Current-voltage characteristic)

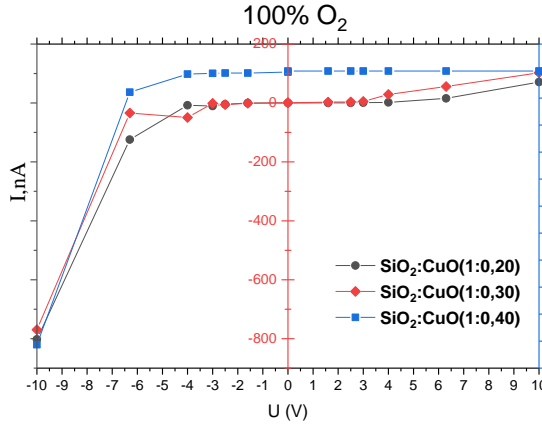
أظهرت دراسات خصائص الجهد الحالي (CVC) أنه بالنسبة للطلاءات التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة ، هناك تغيير كبير في الاعتماد المباشر والعكسي لـ CVC (الشكل 5). هذا السلوك من CVC هو سمة لجميع الطلاءات التي تم الحصول عليها ($\text{SiO}_2:\text{CuO}$) ؛ في هذه الحالة ، لوحظ اعتماد سلوك CVC على تركيز النحاس في الطلاء (الأغشية الرقيقة) مما يدل على انخفاض في توصيل الفيلم (الغشاء الرقيق). مع زيادة التركيز. قد يكون هذا بسبب تجمع النحاس وزيادة الطبقة العازلة (ثاني أكسيد السيليكون) بينهما.



(أ)



(ب)



(ج)

الشكل (5): CVC للأغشية الرقيقة من ($\text{SiO}_2:\text{CuO}$) المترسبة بوسط غازي (أرجون/أوكسجين)

في الشكل (6) أجريت دراسات حول اعتماد التردد على الخواص الكهربائية للطلاء (الأغشية الرقيقة) عند ترددات 10 ، 20 ، 50 ، 100 ، 200 ، 500 ، 1000 كيلو هرتز ، تم الحصول على قيم السعة وفقدان العازل $tg\delta$ ، كما تم حساب قيم السماحية ويمكن ملاحظة أنه مع زيادة التردد ، تقل سعة طلاء (الغشاء الرقيق) من $SiO_2:CuO$ وفي الجدول (4) معلمات لهيكل مكثف تم تشكيله بطريقة الرش الأيوني للبلازما للأهداف من $SiO_2:CuO$ عند تركيزات مختلفة لكل من الغاز في حجرة الترسيب واستخدام تركيزات مختلفة من النحاس للأهداف المستخدمة.

الجدول 4. معلمات هيكل المكثف الناتج بنسب مختلفة من غازات الأرجون والأكسجين

ثابت العزل (ε)			ظل زاوية خسائر العزل ($tg\delta$)			سعة المكثف (بيكوفاراد)			كيلو هرتز التردد
تركيز الغاز أثناء عملية الرش الأيوني			تركيز الغاز أثناء عملية الرش الأيوني			تركيز الغاز أثناء عملية الرش الأيوني			
100 % O ₂	50% &Ar 50% O ₂	100 % Ar	100 % O ₂	50% &Ar 50% O ₂	100 % Ar	100 % O ₂	50% &Ar 50% O ₂	100 % Ar	
5,31	6,06	5,62	0,249	0,444	0,051	42,2	49,5	47,3	10
4,90	6,79	5,55	0,115	0,278	0,037	38,9	55,5	46,6	20
5,03	6,29	5,47	0,039	0,091	0,029	40	51,4	45,9	50
4,89	6,08	5,40	0,042	0,087	0,029	38,9	49,6	45,4	100
4,92	6,09	5,34	0,012	0,035	0,019	39,1	49,7	44,9	200
5,05	6,21	5,42	0,010	0,019	0,016	40,1	50,7	45,5	500
5,37	6,61	5,78	0,037	0,039	0,037	42,7	54	48,5	1000

تتغير قيم ثابت العزل الكهربائي (ε) وظل الخسارة العازلة ($tg\delta$) المقاسة في نطاق من 10^3 إلى 10^6 هرتز على النحو التالي:

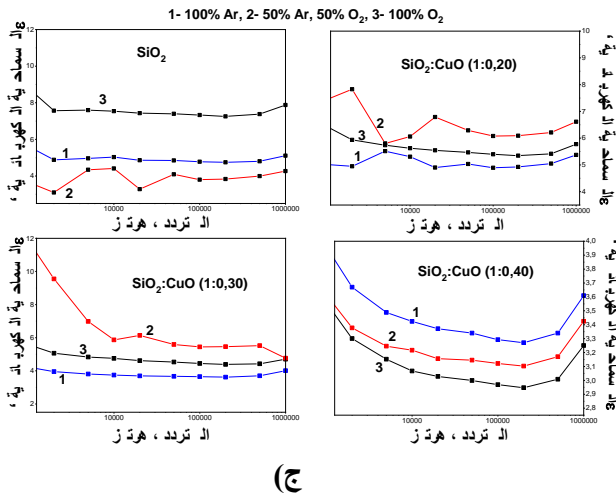
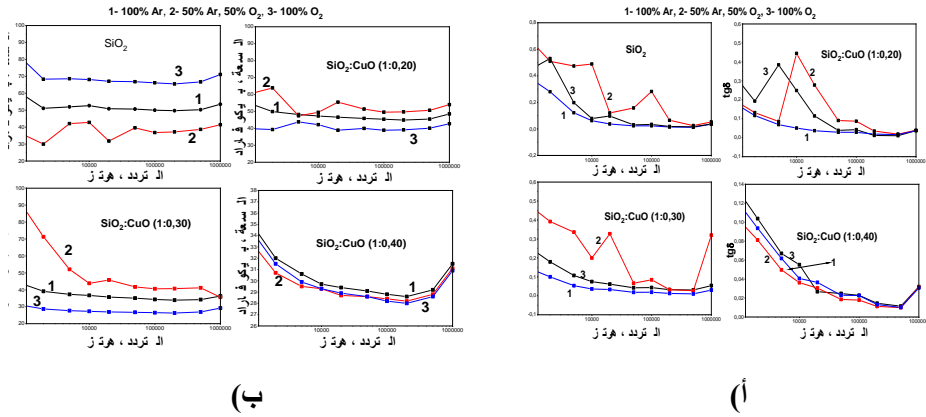
- عند الرش بتركيز غاز الحجرة (الأرجون بنسبة 100%) يتغير ثابت العزل (ε) من 5.34 إلى 5.78 وظل زاوية خسائر العزل ($tg\delta$) من 0.051 حتى 0.016 .
- عند الرش بتركيز غاز الحجرة (الأرجون 50% والأكسجين 50%) يحدث التغيير في ثابت العزل في النطاق 6.06-6.79 ، وظل زاوية خسائر العزل ($tg\delta$) من 0.444 إلى 0.019 .

EVOLUTION OF COPPER IONS IN HIGH-SILICA THIN FILMS.

Marwan F. S. Al-Kamali , Andei A. Boika , Dmitry L. Kovalenko , Yahya T.A. AL-Ademi , Natallia E. Drabysheuskaya , Yury A. Alexeenko .

○ عند الرش بتركيز غاز الحجره (الأوكسجين 100%) يتغير ثابت العزل (ε) من 4.89 إلى 5.37 وظل زاوية خسائر العزل (tgδ) من 0.249 إلى 0.010 .

وتظهر أفلام (الأغشية الرقيقة) لـ $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ التي تم الحصول عليها انخفاضاً في سماحية العزل الكهربائي في نطاق تردد من (10^3 إلى 10^6) هرتز حيث وجد أنه عندما يكون سمك غشاء $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ أقل من 100 نانومتر لا يتشكل مكثف دائماً لهذه الأغشية المترسبة والذي يُفترض أنه ناتج عن تحويل الهيكل. في هذه الحالة ، يتم الوصول إلى الحد الأقصى عند ترسيب الأغشية في خليط من الغازات (50% O_2 و 50% Ar).

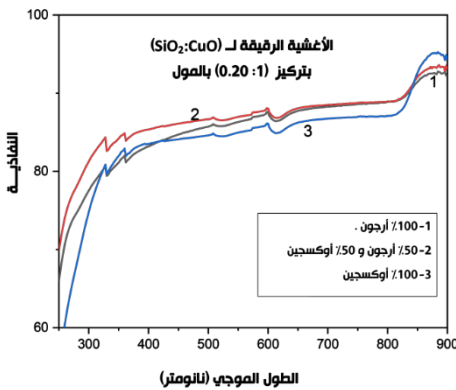


الشكل (6): FVC للأغشية الرقيقة من ($\text{SiO}_2:\text{CuO}$) المترسبة بوسط غازي

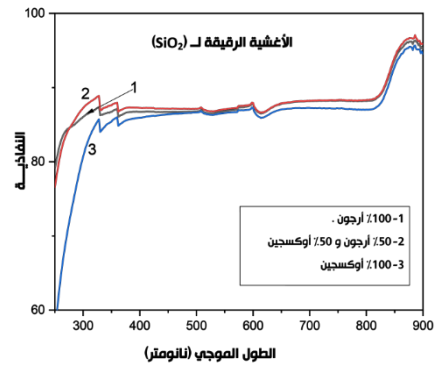
(أرجون/أوكسجين)

3-3: الخواص البصرية

- توضح دراسة الخصائص البصرية للأغشية التي تم الحصول عليها (الشكل 6) أن الكثافة الضوئية تعتمد على ظروف تكوين الفيلم (الأغشية الرقيقة)
- عند وسط رش بتركيز غاز الحجرة (الأرجون 50٪ والأكسجين 50٪) يتوافق الحد الأقصى للإرسال في المنطقة من 350-450 نانومتر مع الأفلام (الأغشية الرقيقة) التي تم الحصول عليها في هذه الظروف.
 - عند وسط رش بتركيز غاز الحجرة (الأرجون 100٪) يتوافق الحد الأقصى للامتصاص في المنطقة من 550-650 نانومتر مع الأفلام (الأغشية الرقيقة) التي تم الحصول عليها في هذه الظروف وقد يشير هذا إلى أن تركيزاً عالياً من CuO كروي الشكل يتشكل في الفيلم (الغشاء الرقيق) في وسط خامل ، وأنه يمكن اختزال أكسيد النحاس إلى Cu^+ وربما Cu^0 ، كما يتضح من التغيير في ثابت العزل (ϵ) و ظل زاوية خسائر العزل ($tg\delta$).
 - عند وسط رش بتركيز غاز الحجرة (100% أوكسجين) ومع زيادة تركيز الأكسجين في المنطقة من 550-650 نانومتر ، ينخفض الامتصاص بشكل كبير وبعدها يتسطح المنحنى ، مما يشير إلى الطبيعة "الملطخة" لتوزيع أكسيد النحاس على سطح كريات مصفوفة SiO_2 حيث يتم تشكيل بنية غشاء أكثر كثافة بصرياً عند الترسيب في وسط غاز الأوكسجين ، وهو ما يؤكد الاعتماد الطيفي لمعامل الامتصاص التريبيعي لأغشية $SiO_2:CuO$ المودعة في محتويات غاز أوكسجين مختلفة في خليط الغاز Ar / O_2 (الشكل 7).



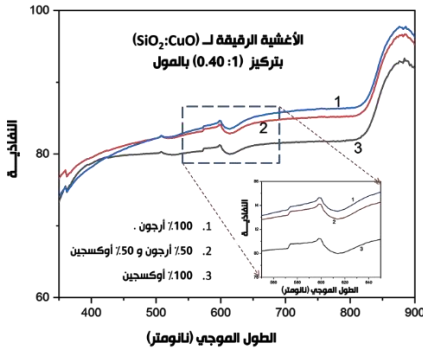
(ب)



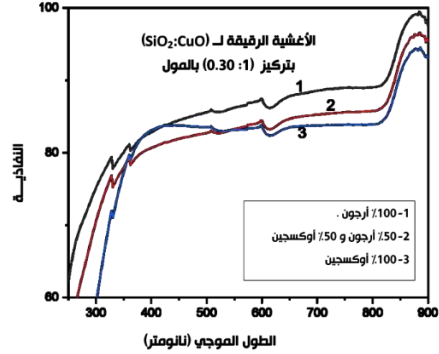
(أ)

EVOLUTION OF COPPER IONS IN HIGH-SILICA THIN FILMS.

Marwan F. S. Al-Kamali , Andei A. Boika , Dmitry L. Kovalenko , Yahya T.A. AL-Ademi , Natalia E. Drabysheuskaya , Yury A. Alexeenko .



(د)



(ج)

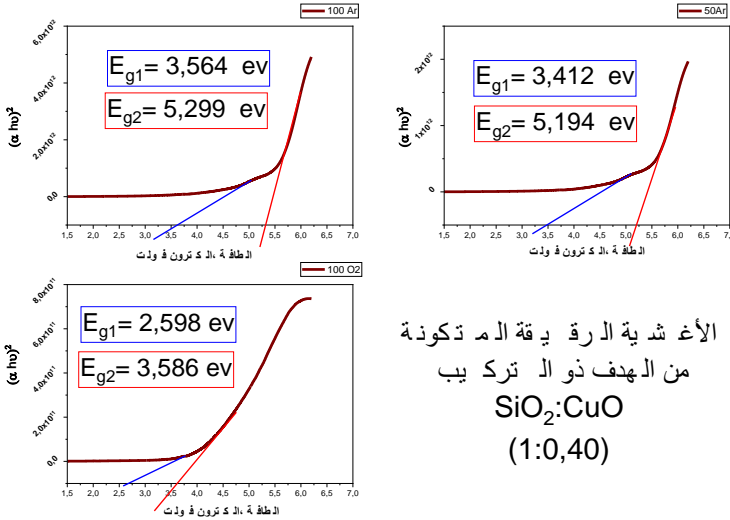
الشكل 7. منحنيات النفاذية (أ) أغشية SiO_2 الرقيقة المتجانسة. (ب) أغشية المركب

$\text{SiO}_2:\text{CuO}$ الرقيقة المتجانسة عند تركيز (1:0.20). (ج) أغشية المركب $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ الرقيقة المتجانسة عند تركيز (1:0.30). (د) أغشية المركب $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ الرقيقة المتجانسة عند تركيز (1:0.40).

وعند دراسة فجوة الطاقة من خلال إيجاد معامل الامتصاص α حسب المعادلات في الوصف ورسم العلاقة بين طاقة الفوتون و $(\alpha h\nu)^2$ وأخذ الميل نلاحظ وجود منطقتين لفجوة الطاقة وتم تفسير ذلك على أن أكسيد النحاس يتحول من Cu^{2+} إلى Cu^+ في وسط من الأرجون ولكن عند وسط من الأكسجين نلاحظ أن أكسيد النحاس يعود إلى حالة أكسيد النحاس الثنائي وتتوافق هذه مع نتائج الأشعة السينية. ونلاحظ رغم هذا أن الانتقالات انتقالات مباشرة مسموح فيها $E_g=5.409$ to 2.598 eV. الجدول (5) فجوة الطاقة للأغشية المترسبة.

EVOLUTION OF COPPER IONS IN HIGH-SILICA THIN FILMS.

Marwan F. S. Al-Kamali , Andei A. Boika , Dmitry L. Kovalenko , Yahya T.A. AL-Ademi , Natallia E. Drabysheuskaya , Yury A. Alexeenko .



الأغشية الرقيقة المكونة
من الهدف ذو التركيب
 $\text{SiO}_2:\text{CuO}$
(1:0,40)

الشكل 8. العلاقة بين $(\alpha h\nu)^2$ وطاقة الفوتون لأفلام $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ عند تركيز (1:0.40) في المول.

جدول (5) يوضح توزيع طاقة الفجوة للأغشية الرقيقة التي تم الحصول عليها بواسطة عملية

الرش الأيوني لهدف $\text{SiO}_2:\text{CuO}$

$\text{SiO}_2:\text{CuO}(1:0.40)$			$\text{SiO}_2:\text{CuO}(1:0.30)$			$\text{SiO}_2:\text{CuO}(1:0.20)$			التركيب
100 % O_2	50% Ar/O 2	100 % Ar	100 % O_2	50% Ar/O 2	100 % Ar	100 % O_2	50% Ar/O 2	100 % Ar	الوسط الغازي
2,598	3,412	3,564	3,016	3,522	3,768	3,608	3,843	3,946	$E_{g1}(\text{CuO})$
3,586	5,194	5,299	4,426	4,928	5.141	5,326	5,335	5,409	$E_{g2}(\text{Cu}_2\text{O})$
3,092	4,303	4,432	3,721	4,225	4,455	4,467	4,589	4,678	متوسط طاقة الفجوة E_g

من الشكل (8) والجدول (5) يمكن ملاحظة أنه عندما يتم الحصول على الأفلام (الأغشية الرقيقة) في جو الأرجون انه يتم انخفاض Cu^{2+} إلى Cu^+ وهذا الانخفاض يعزوا إلى أن الإلكترونات من النحاس ثنائي التكافؤ الأيوني أثناء عملية الترسيب والرش تتحرر وبالتالي ينخفض النحاس و عند إضافة الأكسجين يصبح الغلاف الجوي مؤكسداً مما يؤدي إلى تعويض النقص في الإلكترونات ولا يمكن عملياً تكوين أيونات النحاس ، وهو ما يتوافق مع بيانات قياسات طيف الانعراج بالأشعة السينية.

الخاتمة

1. تم الحصول على أغشية رقيقة من $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ بتركيز مولاري لايونات النحاس (1:0.20 , 1:0.30) بواسطة رش الايونات (البلازما) من الأهداف المحضرة مسبقاً بطريقة السول-جل في وسط غازي في حجرة الرش والترسيب الأرجون/ الأكسجين.
2. أظهر تحليل طور الأشعة السينية للأغشية أن البنية الأغشية متعددة البلورات ولها هيكل سداسي الأضلاع.
3. لقد ثبت أن اختزال Cu^{+2} إلى Cu^{+} يحدث عندما يتم الحصول على الأغشية في جو الأرجون ، وهو ما يؤكد تحليل أطياف الامتصاص وبيانات تحليل طور الأشعة السينية.
4. أظهر تحليل الخواص الكهربائية انخفاضاً في ثابت العزل الكهربائي وظل زاوية فقدان العزل الكهربائي في حدود (10^3 إلى 10^6) هرتز.
5. من خلال حساب فجوة الطاقة للأغشية المترسبة وجود نطاقين لفجوة الطاقة يتوافقان مع التركيبات التالية ($\text{SiO}_2:\text{CuO}$) و ($\text{SiO}_2:\text{Cu}_2\text{O}$) حيث تتغير فجوة الطاقة لـ ($\text{SiO}_2:\text{CuO}$) بزيادة التركيز من 3.564 إلى 2.598 إلكترون فولت بينما تتغير فجوة الطاقة لـ ($\text{SiO}_2:\text{Cu}_2\text{O}$) بزيادة التركيز من 5.299 إلى 3.586 إلكترون فولت. في المقابل لوحظ انخفاض في أطياف الإرسال في منطقة 600-650 نانومتر والذي يتوافق مع التأثير البلازمي.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of task 2.2.6 of the state research program “Convergence-2025” (subprogram “Microcosm, plasma and the Universe”), funded from the republican budget for state research programs for 2021–2025 in the Republic of Belarus.

All experiments were prepared in the Laboratory of Technical Ceramics and Nanomaterials, Sukhoi State Technical University in Gomel, Gomel, Belarus.

شكر وتقدير. تم تنفيذ العمل في إطار المهمة 2.2.6 من البرنامج البحثي الحكومي "التقارب 2025"

(البرنامج الفرعي "العالم المُصغر والبلازما والكون") ، الممول من الميزانية الجمهورية لبرامج البحوث الحكومية للفترة 2021-2025 في جمهورية بيلاروسيا.

جميع التجارب تم تحضيرها في معمل السيراميك التقني والمواد النانوية، جامعة سوخوي التقنية

الحكومية في غوميل ، غوميل ، بيلاروسيا.

المراجع والمصادر

- [1] Tenkyong T., Bachan N., Raja J., Naveen Rumar P., Merline Shyla J. Investigation of sol-gel processed CuO/SiO₂ nanocomposite as a potential photoanode material // Materials Science-Poland. - 2015. - V. 33 (4). - P.826-834.
- [2] Ping Z., Yurong Z., Qingbo Y., Fengzhen L., Jingwen L., Gangqiang D.A. Combined experimental-computational study on nitrogen doped Cu₂O as the wide-spectrum absorption material // J. Semicond. – 2014 – V. 35 – P. 103001 (5 pages).
- [3] Pshenova A., Klyukin D., Sidorov A., Andreeva O. Porous glasses with silver nanoparticles as the sensitive material for sensors to measure the index of refraction of analytes // Journal of Optical technology. - 2016. - Vol. 83, Iss. 7. - P. 438- 440.
- [4] Villa N., Golosov D.A., Nguyen T.D. Formation of titanium oxide thin films by reactive magnetron sputtering // Doklady BGUIR. - 2019. - №5. - P.87-93. (In Russ.).
- [5] Olenin A. Yu., Nizamov T.R., Lisichkin G.V. Chemical modification of silver nanoparticles. Janus particle production // Russian Nanotechnologies. – 2014 – volume.9. - №9-10. – P. 19-24. (In Russ.).
- [6] Alekseenko A.A., AL–Kamali M.F.S.H., Titenkov O.A. Synthesis and properties of xerogels of composition SiO₂:Cu^o, intended for application In biomedical research // Bulletin of Sukhoi State Technical University of Gomel: scientific and practical journal. - 2020. - No. (3-4). – C.40-47. (In Russ.).
- [7] AL-Kamali M.F.S.H. Alekseenko A.A., Titenkov O.A. Structure formation of SiO₂-xerogels containing copper compounds of different phase composition // Scientific and technical journal «problems of physics, mathematics and technics». - 2020. - № 3 (44). – P.7-12. (In Russ.).
- [8] Marwan F. S. H. Al-Kamali¹, Andrei A. Boika¹, Hamdan A. S. Al-Shamiri. SiO₂:CuO(Cu^o) targets for depositing thin films of ion-beam spraying obtained by sol-gel method//Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 348–355(In Russ.).
- [9] Dostanko A.P., Ageev O.A., Golosov D.A., Zavatskiy S.M., Zamburg E.G., Vakulov D.E., Vakulov Z.E. Electrical and optical properties of zinc oxide films deposited by ion-beam sputtering of an oxide target // Physics and technology of semiconductors - 2014. - V. 48, no. 9 - P. 1274-1279. (In Russ.).

- [10] Al-Kamali M. F. S. H., Boika A. A., Al-Shamiri H. A. S. SiO₂: CuO (Cu⁰) targets for depositing thin films of ion-beam spraying obtained by sol-gel method. Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 348–355 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-348-355>
- [11] Abdulmajed E. Ibrahim., Neraan F. Abd-Aljabaar., Kasim H. Mahmood. Study the Effect of Irradiation by Gamma-Ray on the Optical Properties of the Thin Films// Journal of Kirkuk University– 2010 – Scientific Studies – Volume (5),№1–P. 54-64. (In arabic.).
- [12] <https://rruff.info/chem=Cu/display=default/R140763> .