

دراسة تأثير ثخانة كاشفي ZnO و ZnS(Ag) على استجابتهما في الكشف عن جسيمات ألفا

محمد مصعب العطري¹ د. رياض محمد سعيد شويكاني² د. عصام فواز الجفامي³

¹ قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق، سورية. mohamad.alotri@damascusuniversity.edu.sy

² قسم الوقاية والأمان، هيئة الطاقة الذرية السورية. riad.shweikani@damascusuniversity.edu.sy

³ قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق، سورية. issam.aljghami@damascusuniversity.edu.sy

الملخص

يهدف هذا البحث بشكلٍ أساسيٍّ إلى دراسة العلاقة بين تغيُّر ثخانة كلٍّ من كاشف ZnO وكاشف ZnS(Ag) وبين الومضان الإشعاعيِّ الصادر عن كلٍّ منهما عند تعريضهما لجسيمات ألفا. جرى تحضير كواشف ومّاضة من مركّب ZnO بثخانات تتراوح بين (1 to 14.5) μm ، وكواشف من مركّب ZnS(Ag) بثخانات تتراوح بين (0.3 to 38) μm ، وذلك بطلي كلٍّ من مركّب على شرائح بلاستيكية شفافة نفوذة للفوتونات الضوئية. جرى تعريض هذه الكواشف المختلفة لجسيمات ألفا الصادرة عن نظير ^{241}Am ، ثمّ جرت دراسة الومضان الإشعاعيِّ الصادر عن كلٍّ من الكاشفين الومّاضين باستخدام نظام العدّ النوويّ (AB5) المصنّع من قبل شركة Pylon Electronics Inc. بيّنت النتائج أنّ كاشف ZnS(Ag) يبدي ثباتية في الكفاءة والاستجابة لجسيمات ألفا وذلك من أجل مجال واسع من الثخانات يتراوح بين (4 to 38) μm على عكس كاشف ZnO الذي تكون أعلى استجابة وكفاءة له ضمن مجال صغير ومحدود من الثخانات يتراوح بين (2.5 to 5.5) μm أما خارج هذا المجال فتصبح استجابته منخفضة بشكل ملحوظ.

الكلمات المفتاحية: أكسيد الزنك، كبريت الزنك المشاب بالفضة، كاشف جسيمات ألفا، لومضان الإشعاعيّ.

تاريخ الإيداع: 2022/10/21

تاريخ الموافقة: 2022/11/20



حقوق النشر: جامعة دمشق -

سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق

النشر بموجب الترخيص

CC BY-NC-SA 04

Study the thickness effect of ZnO and ZnS(Ag) detectors on their response in the detection of alpha particles

Mohamad Mosab Alotri¹ Dr. Riad Mohammad Said Shweikani²
Dr. Issam Fawaz Aljghami³

¹ Department of Physics, Faculty of Sciences, Damascus University, Syria.

mohamad.alotri@damascusuniversity.edu.sy

² Department of Protection and Safety, Atomic Energy Commission of Syria.

riad.shweikani@damascusuniversity.edu.sy

³ Department of Physics, Faculty of Sciences, Damascus University, Syria.

issam.aljghami@damascusuniversity.edu.sy

Abstract

This research aims to study the relationship between the thickness of each ZnO and ZnS(Ag) and the radioluminescence from each of them when they are exposed to alpha particles. Scintillation detectors were prepared from ZnO with thicknesses ranging between (1 to 14.5) μm and ZnS(Ag) with thicknesses ranging between (0.3 to 38) μm by depositing each compound on a transparent plastic sheet. These different detectors were exposed to the alpha particles source ²⁴¹Am, the radioluminescence emitted by each of the two scintillations was studied using the nuclear counting system (AB5) manufactured by Pylon Electronics Inc. The results showed that ZnS(Ag) gives stability in response and high efficiency for a wide range of thicknesses (4 to 38) μm , unlike ZnO, which has the highest response and efficiency within a small and limited range of thicknesses located in a range (2.5 to 5.5) μm , but outside this range its response becomes significantly low.

Keywords: ZnO, ZnS(Ag), Alpha particles detection, Radioluminescence.

2022/10/21: Received
2022/11/20 Accepted:



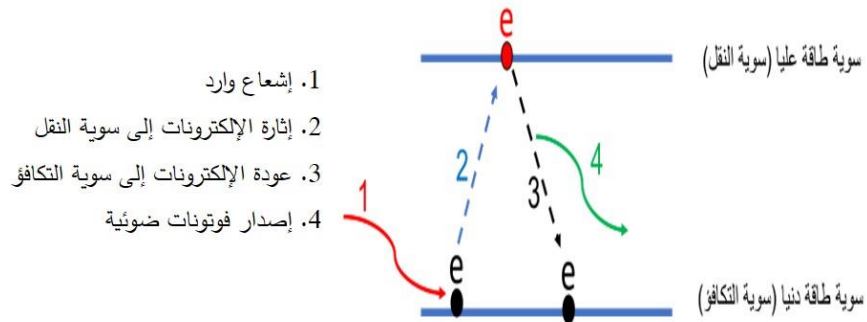
Copyright:Damascus
University- Syria, The
authors retain the
copyright under a CC
BY- NC-SA

1. مقدمة

منذ اكتشاف الأشعة المؤينة ومع ازدياد استخدام الإشعاع المؤين في ميادين مختلفة ظهرت الحاجة لتصميم الأدوات المناسبة لكشف وقياس الإشعاع المؤين وتطويرها [1,2]. من المعروف أنه لا يمكن لأجسادنا أن نتحسس أو تكشف الإشعاع، لذلك فإنه لكشف الإشعاع لا بد من الاعتماد على ما يحدثه الإشعاع من آثار عند تفاعله مع المواد المختلفة، تسمى هذه المواد بـ كواشف الإشعاع [3]. وهي تعمل بالاعتماد على ملاحظة التغير أو الأثر الذي يحدثه الإشعاع في الوسط الماص نتيجة لانتقال الطاقة من الإشعاع المؤين إلى الوسط [3]. تنتج عدة آثار عن تفاعل الإشعاع المؤين مع المادة تمكنا من كشفه وقياسه، قد تكون هذه الآثار على شكل: تأين، ومضان، تألق حراري، تغيرات كيميائية، إنتاج حرارة، تغيرات بيولوجية وغيرها [1].

يعتبر الومضان من آليات الكشف المهمة جداً لأنظمة مراقبة الإشعاع وتسمى الكواشف التي تعتمد في عملها على هذه الآلية بالكواشف الومضات، والتي تتكون من مادة وماضة ومضاعف ضوئي ومنبع تغذية [3].

تعتمد الكواشف الومضات في عملها على أن بعض المواد (المعروفة بالمواد المتفلورة) تصدر ضوء مرئي نتيجة لانتقال الإلكترون من المستويات الطاقية العليا (سوية النقل) للذرات إلى مستويات الطاقة الأخفض (سوية التكافؤ) ضمن المادة، يمكن للإشعاع المؤين أن يعطي الإلكترونات طاقة كافية لإثارتها إلى سوية طاقية أعلى [4]، وبما أن هذه الإلكترونات لن تبق في مستوى الطاقة الأعلى لمدة طويلة، فإنها ستعود إلى سوياتها الأصلية مصدرة فوتونات ضوئية [2] (الشكل 1)، يمكن تحويل هذا الضوء الصادر إلى إشارة كهربائية تتعلق بعدد وشدة الفوتونات الضوئية الصادرة والتي تتناسب بدورها مع عدد الإلكترونات المنتقلة إلى المستويات الطاقية العليا والذي يتعلق بدوره بكمية وطاقة الإشعاع المسببة للومضان [3,5]. يمكن استخدام الكواشف الومضات في كشف الإشعاع والتمييز ما بين الطاقات أي يمكن أن تستخدم لأغراض المطيافية [2,3].



الشكل 1 آلية إصدار الفوتونات الضوئية نتيجة إثارة الإلكترونات.

لكي يصلح استخدام المادة كمادة وماضة يجب أن تمتلك بعض الصفات الضرورية والتي نذكر بعض منها:

- أن تحوّل الجزء الأكبر من الطاقة الممنصة إلى طاقة ضوئية، وأن تتناسب كمية الفوتونات الصادرة عن الومضات مع طاقة الإشعاع الممتص [3].

- أن يكون الزمن بين إثارة الإلكترون وإصدار الفوتون الضوئي قصير للحصول على إشارات سريعة [2].

- أن تكون إمكانية تحويل الضوء المنبعث إلى إشارة كهربائية سهلة وتتم بكفاءة عالية [2].

- أن تكون المادة الومضات ذات ثخانة تحقق المطلوبين التاليين:

- تسمح بامتصاص أغلب الجسيمات النووية الواردة إليها وبالتالي حدوث تفاعل بين الجسيمات والمواد [6] وهذا يتطلب أن تكون ثخانة المادة الموضوعة مكافئة لمدى الجسيمات النووية في المواد [7,8].
- تسمح بمرور الفوتونات الضوئية المنتجة من خلالها دون أن تتعرض هذه الفوتونات للامتصاص الذاتي من المادة نفسها [6,9,10]، فكلما زاد تجميع الضوء (عدد الفوتونات الواردة إلى جهاز الكشف الضوئي بالنسبة للعدد الإجمالي للفوتونات المتولدة في داخل المواد) زادت كفاءة الكشف [11].

لهذا تلعب ثخانة المادة الموضوعة عاملاً مهماً في تحديد مقدار كفاءة واستجابة المواد في قياس وكشف الجسيمات النووية [7]. من أمثلة المواد الموضوعة: مواد ZnS(Ag)، إذ يعتبر من أشهر المواد وأكثرها استخداماً للكشف عن جسيمات ألفا [10]، وكذلك مواد ZnO الذي ازداد استخدامه في مجال الإلكترونيات الضوئية وفي مجال قياس الجرعة الإشعاعية نظراً لما يتمتع به من خصائص ضوئية وإلكترونية جيدة [7,12].

1.1 كبريت الزنك المشاب بالفضة ZnS(Ag)

كبريت الزنك (ZnS) هو من أنصاف النواقل وله تطبيقات عديدة في تصنيع الأجهزة البصرية والإلكترونية وفي تصنيع ترانزستورات ذات المفعول الحثي، بالإضافة إلى مجموعة متنوعة من التطبيقات في الأجهزة الشمسية وغيرها [13]. يمكن تحضير كبريت الزنك بعدة طرق منها: تمرير غاز كبريت الهيدروجين على محلول من أملاح الزنك أو بتفاعل كلور الزنك مع كبريت النروجين [14,15] لأجل استخدام كبريت الزنك كمادة موضوعة وفعالة في الكشف عن الأشعة المؤينة يتم في الأغلب إشابة كبريت الزنك بالفضة وذلك للتحكم بالتيه عودة الإلكترونات إلى السويات الطاقية الأدنى [7]. حيث تعمل الشوائب على جعل طاقة الفوتونات المنبعثة في مجال طاقة الفوتونات الضوئية المرئية [5,7]، ويُعرف هذا النوع من الكواشف بكواشف ZnS(Ag). لـ ZnS(Ag) فجوة طاقة قدرها 2.76 eV أي بطول موجة للفوتون الصادر حوالي 450 nm [16,17]، يتمتع بمعدل توليد فوتونات ضوئية عال يبلغ 38000 photon/MeV [18].

تتمتع بصعوبة استخدام كاشف كبريت الزنك المشاب بالفضة تحديداً في عملية إشابة كبريت الزنك بعنصر الفضة. يجري تصنيع كاشف ZnS(Ag) عادةً بأحد الطرق التالية [16,19]: طريقة التبخير الحراري في الخلاء Heat-Melting أو طريقة The Epoxy Mixing Spread أو بطريقة الانتشار الحراري Thermal Diffusion. وكل هذه الطرق معقدة تكنولوجياً وتحتاج إلى زمن تحضير طويل وشروط خاصة إضافة لأنها تتطلب تقانات متطورة ومهارات عالية [12,16].

2.1 أكسيد الزنك ZnO

أكسيد الزنك من أنصاف النواقل وله فجوة طاقية مباشرة قدرها 3.2 eV ويبلغ طول موجة الفوتون الضوئي الصادر 387 nm [6,20]. لأكسيد الزنك تطبيقات كثيرة في شتى المجالات كالإلكترونات الضوئية مثل الديودات المصدرة للضوء فوق البنفسجي والديودات الليزرية وفي المجالات الطبية كاستخدامه لحشوات الأسنان [5]. يمكن الحصول على ZnO بطرق سهلة وكثيرة منها: تفاعل الزنك المعدني مع الأكسجين بالتسخين أو طريقة السول-جل باستخدام محلول يحوي شوارد الزنك كخالات الزنك [21,22]. يصدر أكسيد الزنك ومضاداً دون الحاجة لوجود إشابة [23] حيث يتمتع أكسيد الزنك بمعدل توليد فوتونات ضوئية يبلغ 9000 photon/MeV [24]. ولتحسين خصائصه الضوئية يتم إشابة أكسيد الزنك بشائبة مثل الغاليوم كما في [24] حيث يصبح معدل توليد الفوتونات الضوئية لأكسيد الزنك المشاب بالغاليوم 15000 photon/MeV [25,26].

2. الدراسات المرجعية

1. أكدت مجموعة من الدراسات كما في [27,19,10,9] أنّ ثخانة كاشف ZnS(Ag) يجب ألا تتجاوز $60 \mu\text{m}$ أي بما يعادل $25 \sim \text{mg/cm}^2$ ، فمن أجل ثخانة أكبر تتعرض الفوتونات الضوئية الصادرة عن ZnS(Ag) للامتصاص الذاتي من مادة الكاشف نفسه.
2. قام Kurudirek وزملاؤه [7] بتحضير كواشف ومأضة من ZnO. وجد الباحثون أنّ ثخانة ZnO المناسبة للكشف عن جسيمات ألفا تتعلق بشكل أساسي بطاقة جسيمات ألفا الواردة إلى الوماض، فكلما انخفضت طاقتها نقصت الثخانة المطلوبة. وجد الباحثون أنّ أفضل ثخانة لثمنص كافة جسيمات ألفا ذات الطاقة 5.48 MeV هي $15 \sim \mu\text{m}$.
3. قام إسماعيل وزملاؤه [6] بدراسة أثر التعديل الكيميائي على أكسيد الزنك في الكشف عن جسيمات ألفا وتحسين خصائص التألق الإشعاعي للأكسيد. تمّ تحسين نتائج الومضان الإشعاعي RL لأكسيد الزنك المعالج من خلال المعالجة الكيميائية للأكسيد الأساسي. أظهرت النتائج الأولية ارتفاعاً في استجابة التألق الضوئي PL والومضان الإشعاعي RL مع انخفاض متوسط نصف قطر المسام.
4. قامت السوقي [28] بتحضير عينات من مركب كبريت الزنك النقي بغرض استخدامها ككواشف ومضائفة، إلا أنها لم تُبدِ أية استجابة عند تشيعها بجسيمات ألفا، ثم جرى إشابة مركب كبريت الزنك بعنصر الفضة بطريقتين، الأولى: هي الخط الفيزيائي لبودرة نقيّة من ZnS مع بودرة نقيّة من Ag، حيث لم تعط هذه الطريقة تجانسا للشائبة ضمن المادة المشابة، والطريقة الثانية: هي الترسيب الكيميائي المشترك، حيث بلغت نسبة الفضة وفق هذه الطريقة 0.7% . عند اختبار هذه المادة كمادة ومأضة أبدت استجابة ضعيفة في معدّل العدّ، وأشارت الباحثة إلى أنّ كمّيّة المادة الناتجة قليلة جداً بالمقارنة مع ما يتمّ استهلاكه من موادّ أوليّة وبالتالي هي طريقة غير اقتصادية.

اعتماداً على ما سبق يهدف هذا البحث إلى تصنيع كواشف ومأضة من ZnS(Ag) و ZnO بثخانات مختلفة، لدراسة استجابة كلّ منها عند تعريضها لجسيمات ألفا. وتحديد الثخانة المناسبة التي يعطي عندها الوماض أفضل استجابة وكفاءة.

3. المواد والأجهزة المستخدمة في البحث

1. ZnS(Ag): جرى الحصول على عدّة غرامات من ZnS(Ag) حيث تمّ استخلاصها من خلايا ومأضة (خلايا لوكس) تالفة وهي من صنع شركة Pylon Electronics Inc موجودة في هيئة الطاقة الذرية السورية.
2. ZnO: تمّ الحصول على 100 غرام من أكسيد الزنك من إنتاج شركة APHAMEA السورية للصناعات الدوائية.
3. حمض الأزوت HNO_3 بتركيز 30% .
4. إيثانول ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) بنقاوة 99.8% .
5. ماء ثنائي التقطير.
6. شرائح شفافة بلاستيكية نفوذة للفوتونات الضوئية، تبلغ ثخانتها $125 \mu\text{m}$ يمكن قصّها إلى مساحات مختلفة، مصنوعة من مادة PVC¹.
7. ورق ميليمتري.
8. مجقّف هواء كهربائي.

¹ Poly Vinyl Chloride ($\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$)

9. جهاز انعراج الأشعة السينية XRD طراز (Stoe StadiP Transmission) وباستخدام أشعة من نمط CuK_{α} بطول موجة $\lambda = 0.15406 \text{ nm}$ بالإضافة إلى جهاز محدد حزمة (germanium monochromatic) الذي يعمل ضمن الشروط التشغيلية بكمون 40 kV وتيار 30 mA.

10. عداد نووي طراز AB5 المصنوع من قبل شركة Pylon Electronics Inc، وهو يتألف بشكل رئيسي من: عداد إلكتروني وأنبوب مضاعف ضوئي. وظيفة العداد النووي: كشف الفوتونات الناتجة عن تفاعل الجسيمات النووية مع المادة الوماضة، وتضخيمها وتحويلها إلى نبضة كهربائية بواسطة الأنبوب المضاعف الضوئي [3]. تُسجل هذه النبضة رقمياً على شاشة العداد. تبلغ كفاءة هذا العداد نحو 85%.

11. نظير ^{241}Am المصدر لجسيمات ألفا، يبلغ قطره 1.2 cm، جرت معايرته عند إجراء البحث في مطيافية ألفا في هيئة الطاقة الذرية السورية، وبلغ نشاطه الإشعاعي $(2545 \pm 6) \text{ Bq}$.

12. محدد حزمة اشعاعية بقطر يبلغ 4 mm.

13. جهاز للترسيب بالغمس.

14. ميزان إلكتروني حساس بدقة تصل إلى 10^{-4} g من طراز Sartorius.

15. جهاز تنظيف بواسطة الأمواج فوق الصوتية.

16. مطحنة يدوية.

17. هزاز مناخل كهربائي، يبلغ نصف قطر مسام النخل $180 \mu\text{m}$.

18. قفازات، ملقط، أوعية.

4. مراحل وطرائق العمل:

جرى العمل على أربع مراحل، الأولى تنظيف الشرائح الشفافة والثانية مرحلة الطلي (الترسيب) والثالثة إجراء التحليل الطوري والرابعة دراسة تأثير الثخانة على العد الإشعاعي للكاشف.

1.4 تنظيف الشرائح الشفافة البلاستيكية

يعد تنظيف الشرائح من الأوساخ والدهون والغبار والشوائب العالقة خطوة مهمة تساعد في تجانس الطلاء وحدوث الالتصاق الجيد على سطحها [29].

جرى تنظيف الشرائح وفق ما يلي: وُضعت الشرائح بالوعاء الحاوي على الماء المقطر، وُوضِع الوعاء في جهاز الأمواج فوق الصوتية لمدة 20 دقيقة عند درجة حرارة الغرفة. ثم جرى غسلهم بالإيثانول [30]. جرى التجفيف بشكل مباشر باستخدام مجفف الهواء [29] عند درجة حرارة لا تتجاوز 55°C لتجنب تلف الشرائح البلاستيكية، مع تجنب اللمس المباشر للشرائح لتجنب حصول تلوث.

2.4 مرحلة الطلي

أولاً: طلاء ZnS(Ag)

جرى وبشكل يدوي طحن عينة ZnS(Ag) التي حصلنا عليها من الخلايا التالفة. جرى حل كمية من هذه العينة بوضع قطرة من محلول حمض الأزوت الممدد عليها [31,32]، جرى طلي وتوزيع هذه الكمية على الشرائح الشفافة النظيفة. جرى التجفيف بمجفف الهواء عند درجة حرارة 55°C . كُررت العملية عدة مرات للحصول على ثخانات مختلفة. عُسلت الشرائح بالماء المقطر، وجُففت بمجفف الهواء عند الدرجة 55°C .

ثانياً: طلاء ZnO

جرى نخل عينة من ZnO مرتين، ولمدة 30 دقيقة في كل مرة، وذلك بواسطة هزاز المناخل الكهربائي. جرى حل كمية من ZnO في وعاء بحوي 50 mL من الإيثانول النقي، جونس المحلول باستخدام جهاز الأمواج فوق الصوتية لمدة 20 دقيقة [30] عند درجة حرارة الغرفة. جرى غمس عدد من الشرائح البلاستيكية الشفافة داخل الوعاء وذلك لمدة (20 ± 1) s وبسرعة غمس تساوي (10 ± 0.5) cm/s باستخدام جهاز الترسيب بالغمس. جرى التجفيف باستعمال مجفف هواء بدرجة حرارة 55°C . كُرِّزَت العملية عدّة مرات للحصول على ثخانات مختلفة. رُشَّ محلول عضوي على الشرائح لتثبيت أكسيد الزنك عليها. عُسِلَت الشرائح بالماء المقطر وجُفِّفَت بمجفف الهواء عند الدرجة 55°C .

3.4 التحليل الطوري بالأشعة السينية

جرى تسجيل طيف انعراج الأشعة السينية XRD لعينة من ZnS(Ag) وأخرى من ZnO بعد حلهم بالمحل والتثبيت على الشرائح الشفافة البلاستيكية، وذلك عند درجة حرارة الغرفة في المجال الزاوي $(5^\circ \text{ to } 90^\circ)$ $2\theta = (2\theta)$: الزاوية بين الشعاع الوارد والمنعرج). جرى إدراج الزوايا والتوجه البلوري (hkl) الموافق لكل قمة من الطيف، وفورنت مع قيم مرجعية، ثم حُدِّدَت البنية البلورية للعينات. جرى حساب مقياس التبلور D_p (crystalline size) لكل قمة من الطيف باستخدام علاقة شيرر [33]:

$$D_p = \frac{k \times \lambda}{FWHM \times \cos(\theta)} \quad (\text{المعادلة 1})$$

حيث FWHM: عرض القمة عند منتصف الارتفاع بوحدة الراديان، θ : زاوية الانعراج بوحدة الدرجة، λ : طول موجة منبع الأشعة السينية المستخدم، k : ثابت شيرر، لا واحدة له، قيمته تتراوح عادةً بين (0.89 to 0.94) [34–37]، وهو يعتمد بشكل أساسي على شكل وتوزيع الحبيبات النانوية بالإضافة على FWHM [38,39]، جرى اعتماد القيمة $k = 0.94$ لكل من العينتين بعد أن حُدِّدَت بنيتهما البلورية، بما يوافق [40–44] من أجل عينة ZnO، و [45,46] من أجل عينة ZnS(Ag).

4.4 دراسة تأثير ثخانة المادة الوماضة على الاستجابة

دُرِسَت تأثير ثخانة المادة الوماضة على العد الإشعاعي (الفوتونات الصوتية). جرى حساب ثخانة المادة الوماضة سواء كانت ZnO أم ZnS(Ag) في كل شريحة (كاشف) باستخدام الطريقة الوزنية [47]، ثم جرت دراسة العد الصادر عن الكاشف الوماض بدلالة الثخانة. أولاً: حساب ثخانة المادة الوماضة

حُسِبَت ثخانة المادة الوماضة d باستخدام العلاقة التالية [47–50]:

$$d \text{ (cm)} = \frac{m \text{ (g)}}{\rho \text{ (g} \cdot \text{cm}^{-3}) \times A \text{ (cm}^2\text{)}} \quad (\text{المعادلة 2})$$

حيث:

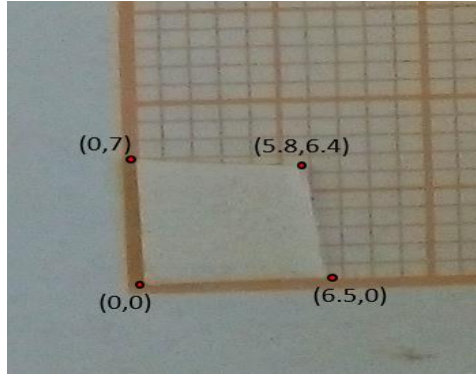
• ρ : الكتلة الحجمية للمادة الوماضة على الشريحة وتساوي 5.606 g/cm^3 لأجل ZnO [51–53] وتساوي 4.090 g/cm^3 لأجل ZnS(Ag) [13,16,54].

• A : مساحة الشريحة الوماضة. وبما أن الشرائح لكل منها شكل مضلع غير منتظم، حُسِبَت مساحة الشريحة من العلاقة التالية [55,56]:

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i y_{i-1} - x_{i+1} y_i) \quad (\text{المعادلة 3})$$

$$= \frac{1}{2} \left[\begin{vmatrix} x_0 & x_1 \\ y_0 & y_1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x_1 & x_2 \\ y_1 & y_2 \end{vmatrix} + \dots + \begin{vmatrix} x_{n-1} & x_0 \\ y_{n-1} & y_0 \end{vmatrix} \right]$$

حيث: x, y هي إحداثيات كل زاوية، جرى تحديد هذه الإحداثيات بوضع الشريحة على الورقة المليمترية وتسجيل x, y الموافق لكل زاوية كما في (الشكل 2).



الشكل 2 تحديد إحداثيات x, y لكل زاوية من إحدى شرائح ZnO.

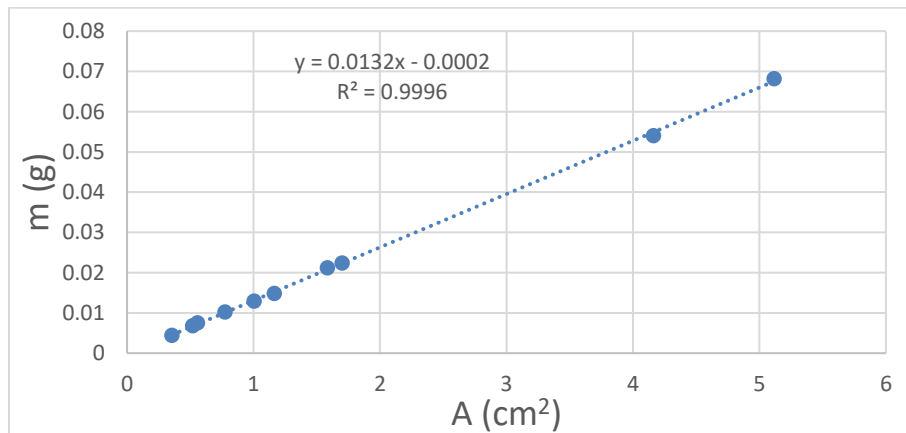
• m : كتلة المادة الوماضة في الشريحة، وتُقدَّر من العلاقة التالية:

$$m = m_2 - m_1 \quad (\text{المعادلة 4})$$

حيث: m_2 كتلة الشريحة المطلية بالمادة الوماضة، m_1 كتلة الشريحة قبل طلائها (الشريحة الفارغة).

قيست m_2 باستخدام الميزان الإلكتروني الحساس.

أما m_1 فجرى حسابها وفق منحنى معايرة تمَّ إعداده في هذا البحث لتغيرات كتلة الشريحة الفارغة (دون وماض) بدلالة مساحة الشريحة كما يظهر في (الشكل 3).



الشكل 3 تغيرات كتلة الشرائح الفارغة (دون وماض) بدلالة مساحة الشريحة.

يُبيّن (الشكل 3) أنّ تغيّرات كتلة الشريحة الفارغة بدلالة مساحتها تتم وفق علاقة خطيّة. باستخدام معادلة منحنى المعايرة الخطيّة (المعادلة 5) نقوم بتعويض قيمة مساحة الشريحة (A) بوحدة cm^2 فنتج كتلة الشريحة وهي فارغة (m_1):

$$m_1 = 0.0132A - 0.0002 \quad (\text{المعادلة 5})$$

بعد أن تمّ تحديد كلاً من: ρ , A, m نقوم بالتعويض في (المعادلة 2) وذلك لحساب الثخانة لأجل كل شريحة مطلية بالمادة الوماضة. بيّنت النتائج أنّ ثخانة كواشف ZnO المحضّرة في المجال $(1 \text{ to } 14.5) \mu\text{m}$ ، بينما كانت ثخانة كواشف ZnS(Ag) في المجال $(0.3 \text{ to } 38) \mu\text{m}$.

ثانياً: دراسة العدّ الصادر عن الكاشف الوماض

بعد أن حُسبت ثخانة المادة الوماضة، جرى قياس العدّ الصادر عن كواشف ZnS(Ag) وكواشف ZnO كلاً على حدى مستخدمين منبع ^{241}Am . تبلغ طاقة جسيمات ألفا الصادرة عن المنبع $5.5 \text{ MeV} \sim [7]$ ، لكن جزء من هذه الطاقة سيتمّ فقده نتيجة عبور الجسيمات خلال وسط الهواء الفاصل بين المنبع وسطح الوماض، في حال كان وسط الهواء يساوي 20 mm فستصبح طاقة جسيمات ألفا نحو $3.5 \text{ MeV} [8]$.

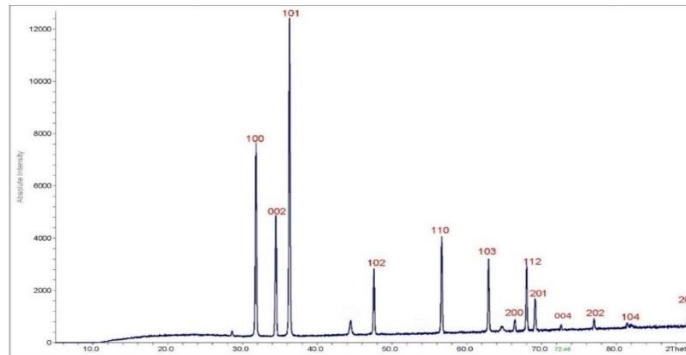
لتلافي عدم التجانس في ثخانة أجزاء الكاشف نفسه جرى استخدام كواشف ذو مساحات صغيرة تقع في المجال $(17 \text{ to } 70) \text{ mm}^2$ ليكون الارتياح في الثخانة أقلّ ما يمكن. هذه الكواشف بمساحاتها الصغيرة لا تغطّي كامل مساحة المنبع المستخدم، لهذا ولضمان تلقي الكواشف القدر نفسه من الإشعاع الصادر عن المنبع، جرى تثبيت محدّد الحزمة الإشعاعيّة مباشرة بالمنبع، ووضّع الكاشف الوماض تحت المحدّد.

5. النتائج والمناقشة

1.5 نتائج التحليل الطوري لطيف انعراج الأشعة السينيّة

يُبيّن (الشكل 4) و(الجدول 1) نتائج تحليل XRD لعينة ZnO، كما يُبيّن (الشكل 5) و(الجدول 2) نتائج التحليل لعينة ZnS(Ag). تظهر النتائج أنّ البنية البلوريّة لعينة ZnO هي بنية سداسية مترابطة (Hexagonal wurtzite)، وفق توجّه بلوريّ سائد 101 عند الزاوية 36.29° ، وهو ما يتوافق مع قاعدة بيانات (JCPDS Card No. 36-1451) [58,57]، وعند هذه الزاوية بلغ مقياس التبلور 54.57 nm ، أما FWHM فكانت 0.16° .

كما تظهر النتائج أنّ البنية البلوريّة لعينة ZnS(Ag) هي بنية مكعبية (Cubic)، وفق توجّه بلوريّ سائد 111 عند الزاوية 28.55° ، وهو ما يتوافق مع قاعدة بيانات (JCPDF Card No. 65-1691) [59,13]، وبلغ عند هذه الزاوية مقياس التبلور 53.51 nm ، أما FWHM فكانت 0.16° .

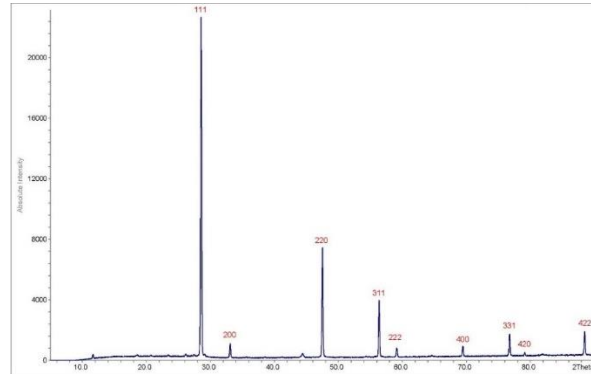


الشكل 4 طيف XRD لعينة ZnO بعد طلاؤها على الشريحة الشفافة¹

¹ تُعزى بعض القمم التي لا تنتمي إلى طور ZnO إلى الشريحة البلاستيكية أو حامل العينة في جهاز الـXRD.

الجدول 1 نتائج تحليل XRD لعينة ZnO بعد طلائها على الشريحة الشفافة

2θ (degree)	FWHM (degree)	hkl	D _p (nm)	2θ (degree)	FWHM (degree)	hkl	D _p (nm)
31.80	0.16	100	53.92	68.00	0.16	112	62.55
34.47	0.16	002	54.30	69.14	0.16	201	62.98
36.29	0.16	101	54.57	72.63	0.14	004	73.55
47.59	0.16	102	56.68	77.02	0.14	202	75.74
56.64	0.16	110	58.91	81.41	0.14	104	78.18
62.91	0.18	103	54.04	89.55	0.14	203	83.49
66.43	0.18	200	55.10				



الشكل 5 طيف XRD لعينة ZnS(Ag) بعد طلائها على الشريحة الشفافة¹

الجدول 2 نتائج تحليل XRD لعينة ZnS(Ag) بعد طلائها على الشريحة الشفافة

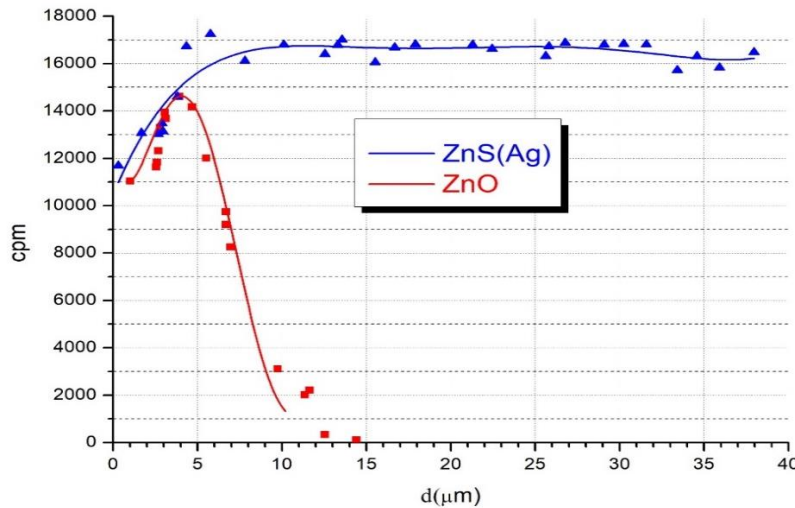
2θ (degree)	FWHM (degree)	hkl	D _p (nm)	2θ (degree)	FWHM (degree)	hkl	D _p (nm)
28.55	0.16	111	53.51	69.46	0.16	400	63.10
33.09	0.18	200	48.09	76.76	0.16	331	66.15
47.51	0.14	220	64.75	79.14	0.14	420	76.88
56.38	0.16	311	58.84	88.49	0.16	422	72.39
59.12	0.16	222	59.62				

2.5 اختبار استجابة الوماضين لجسيمات ألفا بتغير ثخانة كل منهما

حُسِبَت ثخانة جميع كواشف ZnO و ZnS(Ag) المستخدمة ورُسِمَت تغيّرات العدّ في الدّقيقة بدلالة ثخانة كلّ كاشف كما هو مبين في (الشكل 6).

¹ تُعزى بعض القمم الّتي لا تنتمي إلى طور ZnS(Ag) إلى الشريحة البلاستيكية أو حامل العينة في جهاز الـXRD.

نلاحظ من (الشكل 6) أن ZnO و ZnS(Ag) تزداد استجابتهما بازدياد ثخانة كل منهما، وذلك لزيادة عدد جسيمات ألفا الممتصة ضمن الوماض، وبالتالي زيادة تفاعل جسيمات ألفا مع الوماض. تستمر هذه الزيادة حتى تبلغ الاستجابة أعلى قيمة عند الثخانة $4 \mu\text{m}$ لأجل ZnO، والثخانة $6 \mu\text{m}$ لأجل ZnS(Ag)، حيث تتناسب الثخانتين مع مدى جسيمات ألفا في كل من الوماضين [6-8]. يُحافظ ZnO على استجابة عالية ضمن مجال محدود وصغير من الثخانات يتراوح بين $(2.5 \text{ to } 6.5) \mu\text{m}$ ، لتتخفف الاستجابة بشكل ملحوظ بعد هذا المجال بسبب الامتصاص الذاتي للفوتونات الناتجة ضمن الوماض نفسه [10]، حيث انخفضت استجابة ZnO إلى نصف مقدار استجابته العظمى وذلك عند ثخانة تبلغ نحو $7.5 \mu\text{m}$. بينما يحافظ ZnS(Ag) على استجابته العالية لأجل مجال واسع من الثخانات. إذ حافظ على استجابته العالية بدءاً من الثخانة $4 \mu\text{m}$ وصولاً لأكبر ثخانة مستخدمة في البحث وهي $38 \mu\text{m}$. نستنتج مما سبق أن أكسيد الزنك يبدي تغييراً كبيراً في استجابته لجسيمات ألفا بتغير ثخانته وهذا يتوافق مع [6,7]، على عكس كبريت الزنك المشاب بالفضة الذي يحافظ على ثباتية في الاستجابة لأجل مجال واسع من الثخانات وهذا يتوافق مع [9,16,19].



الشكل 6 تغيرات العد بدلالة ثخانة المادة الوماضة

6. الخلاصة

جرى في هذا البحث تصنيع كواشف ومأضة بثخانات متعددة من ZnO ومن ZnS(Ag)، وذلك على شرائح بلاستيكية شفافة نفوذة للضوء بعد تنظيفها جيداً. أُجريت التحليل الطوري بالأشعة السينية للكواشف المحضرة، أظهرت النتائج أن لكاشف ZnO البنية البلورية السداسية المترصّة، أما كاشف ZnS(Ag) فله البنية المكعبية. جرى تحديد مقياس التبلور للعينات المدروسة وكذلك تحديد FWHM. حُسبت ثخانة كل كاشف باستخدام الطريقة الوزنية. استُخدمت كواشف ذات مساحات صغيرة تقع في مجال $17 \text{ to } 70 \text{ mm}^2$ ليكون الارتياح في الثخانة أقل ما يمكن. جرى تعريض كل كاشف إلى جسيمات ألفا الصادرة عن نظير ^{241}Am ، سُجّل العد الصادر عن كل كاشف بواسطة العداد النووي (AB5). دُرست تغيرات العد بالدقيقة بدلالة الثخانة لأجل كل كاشف. وُجد أن استجابة ZnS(Ag) تكون عالية لأجل مجال واسع من الثخانات يمتدّ خلال $(4 \text{ to } 38) \mu\text{m}$ ، على عكس ZnO الذي تكون أعلى استجابة وكفاءة له ضمن مجال صغير ومحدود من الثخانات تتراوح بين $(2.5 \text{ to } 5.5) \mu\text{m}$ ، أما خارج هذا المجال فتصبح استجابته منخفضة بشكل ملحوظ. رغم أن ZnS(Ag) أبدى استجابة عالية ضمن مجال واسع من الثخانات، لكن تبقى كلفة إنتاجه وصعوبة إشابته بالفضة عاملاً يحدّ من استخدامه بأريحية. أما أكسيد الزنك فلا يحتاج إشابة ويتوفّر وينتج بسهولة، لكن عند التعامل مع ZnO يتوجّب إيجاد الطرق المناسبة

لضبط ثخانتة بدقة. وهذا يقودنا للبحث عن الطرق التي توفر الدقة والضبط العالي في ثخانة ZnO، مع الاستغناء عن طرق قد تحوي ارتيابا كثيرا في الثخانة كطريقة الغمس.

إن أحد الفروق الأساسية بين ZnO و ZnS(Ag) فيما يتعلق بدورهما كمواد مضيئة أن ZnO متوفر وسهل التصنيع، لكن الصعوبة تكمن في طريقة ضبط ثخانتة، وبالتالي عملية طلائه تحتاج إلى ضبط دقيق، أما ZnS(Ag) على العكس تماماً، فهو صعب التصنيع. لكن في حال توفره فإنه يعطي أريحية في اختيار الثخانة وبالتالي لا يحتاج دقة عالية في طريقة الطلاء.

7. المراجع:

1. Benedict, S.H. (2004) Review of Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students. *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, **5** (3), 91–92.
2. Milbrath, B.D., Peurrung, A.J., Bliss, M., and Weber, W.J. (2008) Radiation detector materials: An overview. *J. Mater. Res.*, **23** (10), 2561–2581.
3. محاضرات الدورة التدريبية الإقليمية حول البرنامج المهني الأساسي للوقاية من الإشعاع. (1997). الجزء الأول. ص 310.
4. Jagtap, S., Chopade, P., Tadepalli, S., Bhalerao, A., and Gosavi, S. (2019) A review on the progress of ZnSe as inorganic scintillator. *Opto-Electronics Rev.*, **27** (1), 90–103.
5. Ahmed, S.N. (2007) *Physics and engineering of radiation detection*, Academic Press.
6. Ismail, A., Al-Abdullah, J., Shweikani, R., and Jerby, B. (2017) Radioluminescence in ZnO: Effect of chemical modification. *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, **19** (5–6), 389–394.
7. Kurudirek, S. V., Hertel, N.E., Klein, B.D.B., Biber, M., and Summers, C.J. (2016) Development of ZnO Nanorod-Based Scintillators Grown under a Low-Temperature Hydrothermal Method for Use in Alpha-Particle and Thermal Neutron Detectors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **63** (6), 2842–2848.
8. Rodnyi, P.A., Chernenko, K.A., Gorokhova, E.I., Kozlovskii, S.S., Khanin, V.M., and Khodyuk, I. V. (2012) Novel scintillation material ZnO transparent ceramics. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **59** (5 PART 2), 2152–2155.
9. Foster, J. (2006) A comparison of the ZnS (Ag) scintillation detector to the silicon semiconductor detector for quantification of alpha radioactivity in aqueous solutions. (December).
10. Knoll, G.F. (2000) *Radiation Detection and Measurement, Third Edition*.
11. Danevich, F.A., Kobychyev, V. V., Kobychyev, R. V., Kraus, H., Mikhailik, V.B., Mokina, V.M., and Solsky, I.M. (2014) Impact of geometry on light collection efficiency of scintillation detectors for cryogenic rare event searches. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, **336**, 26–30.
12. Shweikani, R., Ismail, A., and Alabdullah, J. (2018) Studying the response of Zinc Oxide and Gallium Nitride for alpha particles and trying to manufacturing an alternative scintillation detector. *Aalam Al-Zarra*, **150**, 50.
13. Zhang, W., Zeng, X., Liu, H., and Lu, J. (2013) Synthesis and investigation of blue and green emissions of ZnS ceramics. *J. Lumin.*, **134**, 498–503.
14. Maruyama, T., and Kawaguchi, T. (1990) ZnS thin films prepared by thermal decomposition of a coordination compound. *Thin Solid Films*, **188** (2), 323–327.
15. Abbas, N.K., Al-Rasoul, K.T., and Shanan, Z.J. (2013) New method of preparation ZnS nano size at low Ph. *Int. J. Electrochem. Sci.*, **8** (2), 3049–3056.
16. LEE, S.K., KANG, S.Y., JANG, D.Y., LEE, C.H., KANG, S.M., KANG, B.H., LEE, W.G., and KIM, Y.K. (2011) Comparison of New Simple Methods in Fabricating ZnS(Ag) Scintillators for Detecting Alpha Particles. *Prog. Nucl. Sci. Technol.*, **1** (0), 194–197.
17. Yang, P., Lü, M., Xü, D., Yuan, D., and Zhou, G. (2001) Synthesis and photoluminescence characteristics of doped ZnS nanoparticles. *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, **73** (4), 455–458.
18. Morishita, Y., Yamamoto, S., Izaki, K., Kaneko, J.H., Toui, K., Tsubota, Y., and Higuchi, M. (2014) Performance comparison of scintillators for alpha particle detectors. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, **764**, 383–386.
19. Sohrabi, M., Saheli, F., and Mohammadi, K. (2018) Synthesis of silver-activated Zinc Sulfide (ZnS:Ag) powder by thermal diffusion method for production of thin film alpha scintillators. *J. Nucl. Energy Sci. Power Gener. Technol.*, **7** (2), 2.
20. Özgür, Ü., Alivov, Y.I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M.A., Doğan, S., Avrutin, V., Cho, S.J., and Morkoç, H. (2005) A comprehensive review of ZnO materials and devices. *J. Appl. Phys.*, **98** (4), 1–103.
21. Kolodziejczak-Radzimska, A., and Jesionowski, T. (2014) Zinc oxide—from synthesis to application: A review. *Materials (Basel)*, **7** (4), 2833–2881.
22. Ardyanian, M., and Sedigh, N. (2014) Heavy lithium-doped ZnO thin films prepared by spray pyrolysis method. *Bull. Mater. Sci.*, **37** (6), 1309–1314.
23. Willander, M., Nur, O., Sadaf, J.R., Qadir, M.I., Zaman, S., Zainelabdin, A., Bano, N., and Hussain, I. (2010) Luminescence from zinc oxide nanostructures and polymers and their hybrid devices. *Materials (Basel)*, **3** (4), 2643–2667.

24. Gorokhova, E.I., Anan'eva, G. V., Demidenko, V.A., Rodnyĭ, P.A., Khodyuk, I. V., and Bourret-Courchesne, E.D. (2008) Optical, luminescence, and scintillation properties of ZnO and ZnO:Ga ceramics. *J. Opt. Technol.*, **75** (11), 741–746.
25. Al-Jalali, M., Abd El-Raheem, M., Abdallah, S., AL-Baradi, A., and Merazga, A. (2014) Growth and characterization of Gallium doped zinc oxide thin films deposited by dc- sputtering technique. *Bothalia J.*, **44** (4), 240–262.
26. Tiras, E. (2020) Radiation Hard & High Light Yield Scintillator Search for CMS Phase II Upgrade. *Proc. Div. Part. Fields 2015, DPF 2015*.
27. Shweikani, P.R., Ismail, A., and Jerby, B. (2017) Preliminary study on the properties of zinc oxide (ZnO) for alpha particles detection. *Int. J. Radiat. Res.*, **15** (3), 301–306.
28. السوقي، اسعاف. (2012). دراسة إمكانية تصنيع كواشف كبريت التوتياء الومضانية ودراسة خواصها. دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في الوقاية الإشعاعية، جامعة دمشق.
29. نور الإيمان، قمو، وميموني، إيمان. (2020). دراسة وتحضير أغشية رقيقة لأكسيد الزنك النقي (ZnO) بتقنية الرذاذ الانحلال الحراري. دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في الفيزياء. جامعة قاصدي مرياح ورقلة الجزائر.
30. عويشات، سميحة. (2020) دراسة تأثير المذيبات على الخصائص الفيزيائية للطبقات الرقيقة لأكسيد الزنك. دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في الفيزياء. جامعة قاصدي مرياح ورقلة الجزائر.
31. Gull, S., Akhtar, M.S., Riaz, S., and Naseem, S. (2012) ZnS Dendrites – Optical , Electrical and Structural Properties. (Hirabayashi 1987).
32. Lide, D.R., Data, S.R., Board, E.A., Baysinger, G., Chemistry, S., Library, C.E., Berger, L.I., Goldberg, R.N., Division, B., Kehiaian, H. V, Kuchitsu, K., Rosenblatt, G., Roth, D.L., and Zwillinger, D. (2004) CRC Handbook of Chemistry and Physics. **85**, 2660.
33. Scherrer, P. (1912) Bestimmung der inneren Struktur und der Größe von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen, in *Kolloidchemie Ein Lehrbuch*, vol. 277, Springer, pp. 387–409.
34. Lim, D.J., Marks, N.A., and Rowles, M.R. (2020) Universal Scherrer equation for graphene fragments. *Carbon N. Y.*, **162**, 475–480.
35. Obaid, A.S., Mahdi, M.A., and Hassan, Z. (2013) Growth of nanocrystalline PbS thin films by solid-vapor deposition. *Adv. Mater. Res.*, **620** (December 2016), 1–6.
36. Xing, M., and Zhang, F.S. (2011) Nano-lead particle synthesis from waste cathode ray-tube funnel glass. *J. Hazard. Mater.*, **194**, 407–413.
37. Abd Elraady, A.A., Ahmed, G.H.G., and Assaf, F.H. (2018) Synthesis and characterization of ZnO nanoparticles for photocatalytic removal of phenol from water. *Rev. Roum. Chim.*, **63** (4), 287–292.
38. Langford, J.I., and Wilson, A.J.C. (1978) Scherrer after sixty years: A survey and some new results in the determination of crystallite size. *J. Appl. Crystallogr.*, **11** (2), 102–113.
39. Hargreaves, J.S.J. (2016) Some considerations related to the use of the Scherrer equation in powder X-ray diffraction as applied to heterogeneous catalysts. *Catal. Struct. React.*, **2** (1–4), 33–37.
40. Ismail, A., Alahmad, M., Alsabagh, M., and Abdallah, B. (2020) Effect of low dose-rate industrial Co-60 gamma irradiation on ZnO thin films: Structural and optical study. *Microelectron. Reliab.*, **104** (November 2019), 113556.
41. Abdallah, B., and Ismail, A. (2019) Optical and structural study of low dose alpha irradiated zinc oxide (ZnO) thin film. *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, **21** (5–6), 401–406.
42. Raghavendra, P. V., Bhat, J.S., and Deshpande, N.G. (2017) Enhancement of photoluminescence in Sr doped ZnO thin films prepared by spray pyrolysis. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **68** (February), 262–269.
43. Goel, S., Sinha, N., Yadav, H., Joseph, A.J., and Kumar, B. (2017) Experimental investigation on the structural, dielectric, ferroelectric and piezoelectric properties of La doped ZnO nanoparticles and their application in dye-sensitized solar cells. *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures*, **91**, 72–81.
44. Al Abdullah, K., Awad, S., Zaraket, J., and Salame, C. (2017) Synthesis of ZnO nanopowders by using sol-gel and

- studying their structural and electrical properties at different temperature. *Energy Procedia*, **119**, 565–570.
45. Wu, Y., Shao, Y., and Jacobsohn, L.G. (2020) Luminescence of ZnS:Ag scintillator prepared by the hydrothermal reaction method: Effects of reaction temperature and time, Ag concentration, and co-doping with Al. *Opt. Mater. (Amst)*, **107** (June).
 46. Vishwakarma, R. (2017) Thickness-dependent structural, electrical, and optical properties of ZnS thin films deposited by thermal evaporation. *Український фізичний журнал*, (62, № 5), 419–428.
 47. Kalid Mohammed, B. (2012) Study of some optical Properties of PbS thin films deposited by Chemical Spray Pyrolysis Method. *Eng. Technol. J.*, **30** (6), 135–145.
 48. Bisi, O., Ossicini, S., and Pavesi, L. (2000) Porous silicon: A quantum sponge structure for silicon based optoelectronics. *Surf. Sci. Rep.*, **38** (1), 1–126.
 49. Alfeel, F., Awad, F., Alghoraibi, I., and Qamar, F. (2012) Using AFM to Determine the Porosity in Porous Silicon. *J. Mater. Sci. Eng. A*, **2** (9), 579–583.
 50. Jennett, N.M., Aldrich-Smith, G., and Maxwell, A.S. (2004) Validated measurement of Young's modulus, Poisson ratio, and thickness for thin coatings by combining instrumented nanoindentation and acoustical measurements. *J. Mater. Res.*, **19** (1), 143–148.
 51. Esfandi, F., Saramad, S., and Shahmirzadi, M.R. (2017) Characterizing and simulation the scintillation properties of zinc oxide nanowires in AAO membrane for medical imaging applications. *J. Instrum.*, **12** (07), P07004.
 52. John, R., and Rajakumari, R. (2012) Synthesis and characterization of rare earth ion doped nano ZnO. *Nano-Micro Lett.*, **4** (2), 65–72.
 53. Hjiri, M., Dhahri, R., El Mir, L., Bonavita, A., Donato, N., Leonardi, S.G., and Neri, G. (2015) CO sensing properties of Ga-doped ZnO prepared by sol-gel route. *J. Alloys Compd.*, **634**, 187–192.
 54. Khudair, G.H., and Mohmood, K.H. (2021) Study of the effect of annealing during and after deposition on (crystal growth and some physical properties) of zinc sulfide (ZnS) nanoparticles prepared by vacuum thermal evaporation method (PVD). *Turkish J. Comput. Math. Educ.*, **12** (14), 2013–2029.
 55. Lee, Y., and Lim, W. (2017) Shoelace Formula: Connecting the Area of a Polygon and the Vector Cross Product. *Math. Teach.*, **110** (8), 631–636.
 56. Braden, B. (1986) The Surveyor's Area Formula. *Coll. Math. J.*, **17** (4), 326–337.
 57. Sangeetha, A., Jaya Seeli, S., Bhuvana, K.P., Kader, M.A., and Nayak, S.K. (2019) Correlation between calcination temperature and optical parameter of zinc oxide (ZnO) nanoparticles. *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **91** (2), 261–272.
 58. Zhang, J., Sun, L., Liao, C., and Yan, C. (2002) A simple route towards tubular ZnO. *Chem. Commun.*, **2** (3), 262–263.
 59. Raleaooa, P. V., Roodt, A., Mhlongo, G.G., Motaung, D.E., and Ntwaeaborwa, O.M. (2018) Analysis of the structure, particle morphology and photoluminescent properties of ZnS: Mn²⁺ nanoparticulate phosphors. *Opt. J. Light Electron Opt.*, **153**, 31–42.