

Performance Analysis of n-ZnO/p-Si Heterojunction Diode as Function of Zinc Oxide Thin Films Thickness

Hala Nazar Mohammed

Department of Physics, College of Education for Pure Science, University of Mosul, Mosul, IRAQ

E-mail: hala.n.m@uomosul.edu.iq

(Received April 07, 2022; Accepted May 15, 2022; Available online June 01, 2022)

DOI: [10.33899/edusj.2022.133482.1227](https://doi.org/10.33899/edusj.2022.133482.1227), © 2022, College of Education for Pure Science, University of Mosul.
This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ABSTRACT

The n-type Zinc oxide (n-ZnO) nanostructured thin films (TFs) with different thicknesses (211, 325, 433 and 552 nm) were grown onto glass substrates employing the CVD technique at atmospheric pressure. Deposited films were characterized by EDX spectroscopy attached with FE-SEM and XRD techniques to determine the influence of thickness on elemental compositions and crystalline structure of ZnO films, respectively. Also, ZnO TFs were deposited on the p-Si(111) substrates to form different structures of n-ZnO/p-Si heterojunction diodes and then I-V characteristics were studied in the dark. The electrical parameters of the diodes such as rectification ratio (RR), reverse saturation current (I_s), ideality factor (η), barrier height (ϕ_b) and series resistance (R_s) were calculated from the I-V measurements. EDX spectra showed that these films were only made from Zn and O elements. XRD patterns presented that the ZnO films possess hexagonal wurtzite structure with preferred orientation along [002] direction. I-V characteristics of the heterojunction diodes revealed rectification behavior and depend on ZnO TFs thickness. Also, electrical parameters of diodes were affected by the prepared film's thickness. It was found that the crystalline structure of the films and electrical properties of diodes were improved with increasing the thickness of ZnO films. It is noted that the best heterojunction diodes were that prepared with thickness (552 nm), where possess lowest value of ideality factor (3.38) and a series resistance (0.84 k Ω) with a highest rectification ratio (1517), compared with other structures. This study offers a simple model for fabricating diodes from semiconductor films.

Keywords: CVD; Thin films thickness; Structural and electrical properties; Heterojunction.

تحليل أداء الثنائي المتباين n-ZnO/p-Si كدالة لسمك أغشية أكسيد الخارصين الرقيقة

حالا نزار محمد

قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة الموصل، 41002 الموصل، العراق

الملخص

تم إنشاء أغشية رقيقة (TFs) من مادة أكسيد الخارصين (ZnO) ذات البنية النانوية من النوع السالب (n) بسماكات مختلفة (211, 325, 433 and 552 nm) على قواعد زجاجية باستعمال تقنية الترسيب البخاري الكيميائي (CVD) عند الضغط الجوي. وصفت الاغشية المرسبة باستخدام (EDX)، الملحق بـ (FE-SEM) وبتقنية (XRD) لتحديد تأثير السمك على التركيب العنصري والتركيب البلوري لأغشية (ZnO)، على التوالي. كذلك، رسبت أغشية رقيقة من مادة أكسيد الخارصين على ارضيات

سليكونية من النوع الموجب (p) ذات الاتجاهية (111)، لتشكيل تراكيب مختلفة الاسماك من ثنائيات المفرق المتباين (n-ZnO/p-Si) ومن ثم تمت دراسة خصائص (I-V) في حالة الظلام. حسبت المعلمات الكهربائية للثنائيات مثل: نسبة التقويم (RR)، تيار التشبع العكسي (I_s)، عامل المثالية (η)، ارتفاع الحاجز (ϕ_b) والمقاومة المتواليية (R_s) من قياسات I-V. أظهرت أطياف (EDX) أن هذه الأغشية مكونة فقط من عنصري (Zn) و (O). أوضحت أنماط تقنية (XRD) أن أغشية (ZnO) تمتلك بنية من النوع (wurtzite) سداسية باتجاه مفضل على طول الاتجاه [002]. كشفت خصائص (I-V) للثنائيات المتباينة عن سلوك تقويمي ويعتمد على سمك (ZnO TFs). كما تأثرت المعلمات الكهربائية للثنائيات بسماكة الأغشية المحضرة. لقد وجد أن التركيب البلوري للأغشية والخصائص الكهربائية للثنائيات تتحسن مع زيادة السمك لأغشية (ZnO). يلاحظ ان افضل الثنائيات المتباينة كانت تلك المحضرة بسمك (552 nm)، حيث انها تمتلك اقل قيمة لعامل المثالية ($\eta=3.38$)، وللمقاومة المتواليية ($R_s=0.84$ k Ω) مع أعلى نسبة تقويم (RR=1517) مقارنة بالتراكيب الاخرى. تقدم هذه الدراسة نموذجاً بسيطاً لتصنيع الثنائيات من أغشية أشباه الموصلات.

الكلمات المفتاحية: الترسيب البخاري الكيميائي، سمك الأغشية الرقيقة، الخصائص التركيبية والكهربائية، المفرق المتباين.

المقدمة

في السنوات الأخيرة، اجتذبت الثنائيات المتباينة (p-n heterojunction diodes)، المعتمدة على الأكاسيد المعدنية الانتقالية مثل (CuO , ZnO , SnO_2 , Fe_2O_3 , NiO , TiO_2) اهتماماً كبيراً في مختلف المجالات بسبب ملائمة خصائص هذه المواد لمختلف التطبيقات التكنولوجية مثل: الخلايا الشمسية [1]، والثنائيات الباعثة للضوء [2]، وكواشف الأشعة فوق البنفسجية [3]، [4]، ومنتجات الغاز [5]، والثنائيات [6]، والثنائيات الضوئية [7]، بالإضافة الى التطبيقات الالكترونية كترانزستورات [8, 9]. بشكل خاص يتم دراسة اغشية (ZnO) كمادة مرشحة لتطبيقات الطاقة المستدامة، وذلك بسبب امتلاكه توصيل حراري عالي وحركية إلكترونية عالية. كذلك تمتلك هذه المادة أكثر من 90% شفافية (نفاذية) في المنطقة المرئية وانعكاسية جيدة في المنطقة تحت الحمراء القريبة، لذا يدرج ضمن مجموعة الأكاسيد الموصلة الشفافة. بالإضافة الى ذلك، تستخدم أجهزة الكشف عن الأشعة فوق البنفسجية ذات الطول الموجي القصير مادة (ZnO) بشكل خاص بسبب امتلاكه فجوة طاقة مباشرة كبيرة (~ 3.37 eV) وطاقة ربط اكسيتون كبيرة (60 meV) عند درجة حرارة الغرفة. ان المواد شبه الموصلة ذات فجوة الطاقة الكبيرة (ZnO)، لها اهمية خاصة في عمليات تصنيع مختلف الأجهزة الألكترونية بسبب خصائصها البصرية والالكترونية المميزة [10, 11]. إذ تستخدم هذه المادة كطبقة فعالة في عملية تصنيع الثنائيات المتباينة ذات التركيب (p-n or n-n) [6]، وكطبقة مانعة للانعكاس في الخلايا الشمسية [12]، وفي عملية تخزين البيانات [13]. أيضاً، تستخدم مادة (ZnO) في الأجهزة الكهروإجهادية (Piezoelectric) بسبب تأثيرها الضئيل على البيئة [14]. الى جانب ذلك، تمتلك استقراراً كيميائياً عالياً، ومادة غير سامة، ومتوفرة بشكل واسع، يمتلك ثابت عزل كهربائي كبير، وانها مادة ذات تكلفة واطئة بالمقارنة مع اوكسيد القصدير (SnO_2) او اوكسيد القصدير المطعم بعنصر الانديوم (ITO) [15]. ان هذه الخصائص المميزة مكنت من استخدامه بشكل مؤثر في مختلف التطبيقات التكنولوجية.

ان (ZnO)، مادة شبه موصلة مركبة من المجموعتين (II-VI) والتي تتبلور في ثلاثة اشكال معروفة هي: (1) المكعب من النوع (Zinc blende)، (2) الملح الصخري (Rock salt)، (3) السداسي من النوع (Wurtzite). لكن من الناحية الديناميكية الحرارية (thermodynamic)، يكون طور ورتزيت (Wurtzite) السداسي الأكثر استقراراً عند درجة حرارة الغرفة من الاطوار الأخرى [16]. ان اغشية (ZnO)، المثلى الخالية من الشوائب (Defect-Free)، تكون مادة عازلة. عموماً، تمتلك اغشية (ZnO)، توصيلية من النوع السالب (n-type)، بسبب العيوب (defects) العديدة (نقص الاوكسجين ووفرة الخارصين) [17]. ان وجود الشوائب في مادة غشاء (ZnO)، سيجعلها تظهر اطياف تألق ضوئي (Photoluminescence (PL)) خضراء [17]، وان

هذه الشوائب يمكن ان تتأثر بالمطواعة (Strain)، الناتجة عند ترسيب الاغشية على أرضيات تمتلك معلمات شبكية مختلفة. ان تأثير المطواعة على الاغشية يمكن ان يقل عند زيادة سمك الاغشية المحضرة. لتصنيع نماذج متنوعة من ثنائيات المفروق المتباين، يتم ترسيب اغشية (n-ZnO) الرقيقة على شرائح (قواعد) مختلفة من النوع الموجب (مثلاً: السليكون (p-Si) [6]، كالسيوم ارسنيد (p-GaAs)، سليكون كاربيد (p-SiC)، نيكل اوكسيد (p-NiO) [18]، كالسيوم نتريد (p-GaN)، كالسيوم نتريد المطعم بالالمنيوم (p-GaN:Al)، وكالسيوم نتريد المطعم بالمغنسيوم (p-GaN:Mg) [19]). من بين جميع هذه المحاولات يتم اعتماد الجهاز ذي التركيب (metal/n-ZnO/p-Si/metal)، بشكل واسع في تكوين الخلايا الشمسية [20] والكواشف الضوئية [2]، وذلك بسبب التكلفة المنخفضة مقارنة مع التراكيب الاخرى.

توجد عدة تقنيات مثل: تقنية الترنيد المغنيتروني بالتردد الراديوي (RF Magnetron Sputtering) [21]، وتقنية النمو الفوقي بالحزمة الجزيئية (Molecular Beam Epitaxy) [22]، وتقنية الطلاء بالغمس (Dip Coating) [23]، وتقنية التحلل الكيميائي الحراري بالرش (Spray Pyrolysis) [9]، وتقنية الاستئصال بالليزر النبضي (Pulsed Laser Ablation) [24]، وتقنية الترسيب بالحمام الكيميائي (Chemical Bath Deposition) [25]، وتقنية محلول-هلام (Sol-Gel) [26]، وتقنية الترسيب البخاري الكيميائي (CVD) [27]، والتي تم تطويرها واستخدامها بشكل فعال لترسيب اغشية (ZnO)، الرقيقة على انواع متعددة من الأرضيات. تمتاز تقنية (CVD) عند الضغط الجوي [6]، بكونها ذات تكلفة واطئة لأنها لا تحتاج الى اجهزة تبريد مكلفة، يمكن ان تستخدم لترسيب اي عنصر او مركب، الأغشية المحضرة بهذه التقنية تمتاز بكونها ذات نقاوة وكثافة عالية، امكانية تطعيم الأغشية المحضرة بأية مادة اثناء عملية الترسيب، ويمكن تحضير إشباه الموصلات المركبة (ZnO, SnO₂, In₂O₃) عند درجة حرارة اقل من نقطة انصهارها [28, 29]، وامكانية كبيرة في توليف التراكيب النانوية (احادية البعد (1D) وثنائية البعد (2D)) [30]. أن تقنية (CVD) هي عملية ترسيب كيميائي تشكل تفاعلاً في الطور الغازي (Vapor) قرب قاعدة الترسيب الساخنة لتكون غشاء صلب (Solid) [31]، لذا فهي تخضع لآلية نمو بخار-صلب (Vapor-Solid mechanism) [28].

اجريت مجموعة متنوعة من الدراسات المهمة على الأغشية الرقيقة لمادة (ZnO)، لغرض توظيفها بشكل فعال في تطبيقات الاجهزة الألكتروبصرية. على سبيل المثال، حضر (Kumar et al., 2013) أغشية (ZnO) النقية باستعمال تقنية محلول-هلام (Sol-gel) على ارضيات من الزجاج (corning 1737) وبإسماك مختلفة (98-366 nm)، وذلك من خلال زيادة عدد دورات الترسيب. اظهرت الدراسة المورفولوجية زيادة ملحوظة في قيمة الحجم الحبيبي وقيمة معدل خشونة السطح (4.7-5.8 nm) مع زيادة سمك الاغشية المحضرة. باختصار، كشفت الدراسة ان جميع الخصائص الفيزيائية (التركيبية، البصرية والمورفولوجية) لأغشية (ZnO) تعتمد بشكل كبير على سمك الاغشية المحضرة [32]. درس (Mridha and Basak, 2007)، تأثير تغيير سمك الأغشية المحضرة بتقنية الطلاء بالبرم (Spin-coatings)، على الخصائص التركيبية، الكهربائية والضوئية لأغشية (ZnO). كشفت الدراسة المورفولوجية أن الحبيبات النانوية للأغشية المحضرة أصبحت أكثر انتظاماً وأكبر حجماً مع زيادة سمك لهذه الاغشية. اما نتائج تقنية (XRD) فقد أظهرت ان قيمة العرض الكامل عند منتصف قمة الحيود (FWHM) لقمة الحيود (002)، وقيمة المطواعة على طول المحور-c (c-axis)، تتخفض عند زيادة سمك الاغشية المحضرة [33]. قام (Mondal et al., 2013)، باستعمال تقنية الغمس الكيميائي (Chemical dipping technique) للحصول على ثنائي المفروق المتباين ذو التركيب (n-ZnO/p-Si). إذ درس تأثير تغيير سمك اغشية مادة (ZnO, t=0.5-4.5 μm) على الخواص التركيبية، المورفولوجية والكهربائية. إذ بينت الدراسة ان المعلمات التركيبية والمورفولوجية تتأثر بشدة بتغيير سمك الأغشية المحضرة. اما نتائج القياسات الكهربائية (تيار - فولتية) للثنائيات المصنعة اظهرت سلوك تقويمي جيد، وتعتمد بشكل واضح على سمك الأغشية المحضرة [34].

ان النمو السريع في التطبيقات الألكترونية المختلفة، دفع الكثير من المجموعات البحثية الى الاهتمام بتطوير اغشية رقيقة ذات خصائص فيزيائية وكيميائية متميزة [10]. ان دراسة تأثير تغيير سمك الغشاء الرقيق لمادة (ZnO)، على الخواص الفيزيائية للثنائي ذو التركيب (n-ZnO/p-Si) والمصنع بتقنية (CVD) عند الضغط الجوي لم يتم اجراءها بشكل واسع لحد الان حسب

علمنا. لذا فان من الضروري التوجه لدراسة ثنائيات المفروق المتباين والمعتمدة في تركيبها على اغشية مادة (ZnO)، في محاولة لتطوير وتحسين عمل هذه الثنائيات. في هذه الدراسة تم التحقيق في اعتمادية السمات التركيبية والكهربائية على سمك الأغشية المحضرة لمادة (ZnO) بتقنية (CVD). تم تسجيل أطياف ((Energy dispersive X-ray (EDX)، بوساطة مطياف أكسفورد الملحق بالمجهر الإلكتروني الماسح بمجال الانبعاث (FESEM). تمت دراسة السمات التركيبية للأغشية المحضرة باستخدام تقنية حيود الأشعة السينية (X-ray Diffractometer -XRD 6000/7000; Shimadzu). كذلك تم اجراء القياسات الكهربائية على الثنائيات المتباينة (n-ZnO/p-Si) المصنعة، باستخدام دائرة تيار-فولتية المتوالية لتقييم ومقارنة الأداء الكهربائي لهذه الأجهزة.

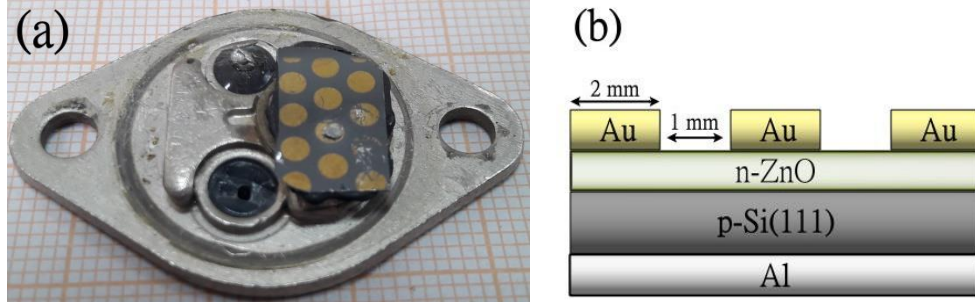
التقنية العملية

في هذه الدراسة حضرت مادة (ZnO) بشكل غشاء رقيق بسماكات مختلفة (211, 325, 433 and 552 nm)، على قواعد من الزجاج ($\sim 2.5 \times 2 \text{ cm}^2$) والسليكون ($\sim 1 \times 1 \text{ cm}^2$) من النوع الموجب (p-type) ذي الاتجاهية (111) بتقنية (CVD)، عند درجة حرارة ترسيب ثابتة (550°C). قبل عملية ترسيب الأغشية الرقيقة تم تنظيف القواعد (الزجاج والسليكون)، باستخدام جهاز التنظيف بالموجات فوق الصوتية (Ultrasonically)، من خلال غمرها بمحلول الاسيتون ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$)، الميثانول (CH_3OH)، والماء المقطر (Distilled water) لمدة (10 min) لكل محلول. بعد ذلك تم تجفيفها باستخدام مصدر للهواء الحار، وذلك لضمان عدم تكون اي عوالق على القواعد النظيفة. بهذه الطريقة تمكنا من الحصول على قواعد نظيفة خالية من اية ملوثات على سطحها. بعدها، يتم غمر ركائز السليكون النظيفة فقط في محلول حامض الهيدروفلوريك المخفف ($\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ (1:10)) لمدة (90 s)، وذلك لأزالة طبقة الاوكسيد الرقيقة (SiO_2) من على سطح السليكون. وأخيراً يتم ايضا شطفها بالماء المقطر ومن ثم تجفف بالهواء الحار، وبهذه العملية يصبح سطح السليكون مقاوم للظروف المحيطة (الايوساخ والاتربة) ويتحول سلوك سطح السليكون الى سطح كاره (نافر) للماء (Hydrophobic).

لتصنيع الثنائيات المتباينة (n-ZnO/p-Si)، المعتمدة على سماكات مختلفة لمادة (ZnO)، تم اتباع مجموعة من الخطوات المتسلسلة: (1) تم ترسيب غشاء رقيق من معدن الالمنيوم (Al) عالي النقاوة بسمك يبلغ تقريباً ($\sim 1000 \text{ \AA}$)، على كامل الجزء الخلفي لركائز السليكون النظيفة بتقنية التبخير الحراري عند درجة حرارة الغرفة وتحت ضغط منخفض ($\sim 10^{-5} \text{ Torr}$). (2) لتكوين اتصال اومي جيد بمقاومة واطئة للنماذج المحضرة (Al/p-Si)، تم اجراء عملية التلدين الحرارية باستخدام فرن كهربائي عند درجة حرارة (580°C) وتحت بيئة مفرغة من الهواء لمدة (5 min). (3) بعدها يتم ادخال نوعين مختلفين من القواعد (الزجاج و (Al/p-Si))، داخل انبوبة الكورانتز (وحدة الترسيب) من خلال وضعهما على حامل القواعد (حامل من مادة الفولاذ المقاوم للصدأ). حامل القواعد تم تثبيته على بعد (10 cm)، من فتحة دخول الغاز (الأوكسجين) خلال عملية الترسيب. (4) لغرض ترسيب غشاء رقيق من مادة (ZnO)، بسماكات مختلفة على الوجه الامامي لهذه القواعد، تم رفع درجة حرارة وحدة الترسيب إلى درجة حرارة النمو المطلوبة (550°C). تم قياس درجة الحرارة بشكل دقيق من خلال استخدام مزدوج حراري (Type-K)، والذي وضع بشكل يدوي بالقرب من حامل العينات. يمكن العثور على مزيد من التفاصيل حول منظومة الترسيب في مكان آخر [6]. واستعمل مسحوق مادة خلات الخارصين المائية $[\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ كمصدر اساسي لمعدن الخارصين. حيث تم تحضير محلول النمو بتركيز مولاري (0.5 mol/L)، من خلال اذابة كمية محددة من خلات الخارصين المائية (5.5 gm) بحجم معلوم من الماء المقطر (50 ml). بعد ذلك تم وضع هذا المحلول في بودقة التبخير وتسخينه الى درجة حرارة التبخر ($\sim 350^\circ \text{C}$). عند حدوث عملية التبخر، يتم إدخال غاز الأوكسجين بمعدل تدفق (0.5 L/min) من خلال مقياس التدفق (Flowmeter) كغاز حامل للبخار إلى وحدة الترسيب وكمتفاعل في عملية الأكسدة داخلها. يمكن التعبير عن التفاعل الكيميائي المسؤول عن تكوين اغشية (ZnO)، بالمعادلة رقم واحد:



(5) أخيراً تم ترسيب عدة نقاط دائرية الشكل من مادة الذهب عالي النقاوة (الشكل 1a) بسمك ($\sim 1000 \text{ \AA}$)، وباقطار (2 mm) على الجزء العلوي للأغشية الرقيقة لمادة (ZnO) وذلك من خلال استخدام قناع معدني بتقنية التبخير الحرارية. باستخدام هذه الأقطاب يتم ربط الثنائيات المصنعة بمنظومة قياس تيار – فولتية. الشكل (1) يظهر رسم تخطيطي للمقطع العرضي للثنائيات المتباينة المصنعة.



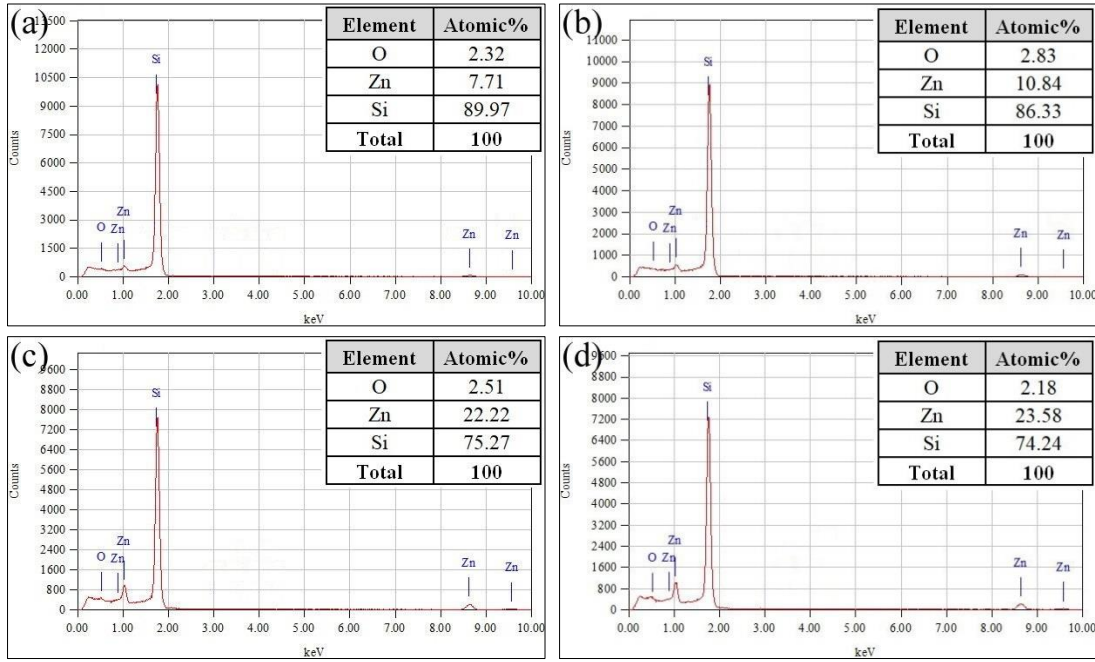
الشكل (1): (a) صورة رقمية للثنائي المتباين، (b) رسم تخطيطي للمقطع العرضي للثنائي المتباين.

تم استخدام الطريقة الوزنية لقياس سمك الاغشية الرقيقة المحضرة وذلك عبر استخدام ميزان رقمي عالي الحساسية (10^{-4} gm). اذ وزنت الأرضية قبل (m_1) وبعد عملية النمو (m_2)، وعن طريق أيجاد فرق الكتلة Δm (gm) وبمعرفة كثافة مادة الغشاء ρ (gm/cm^3) ومساحته A (cm^2) يمكن أيجاد السمك t (cm) وفق المعادلة رقم اثنان [35]:

$$t = \frac{\Delta m}{A \cdot \rho} \quad (2)$$

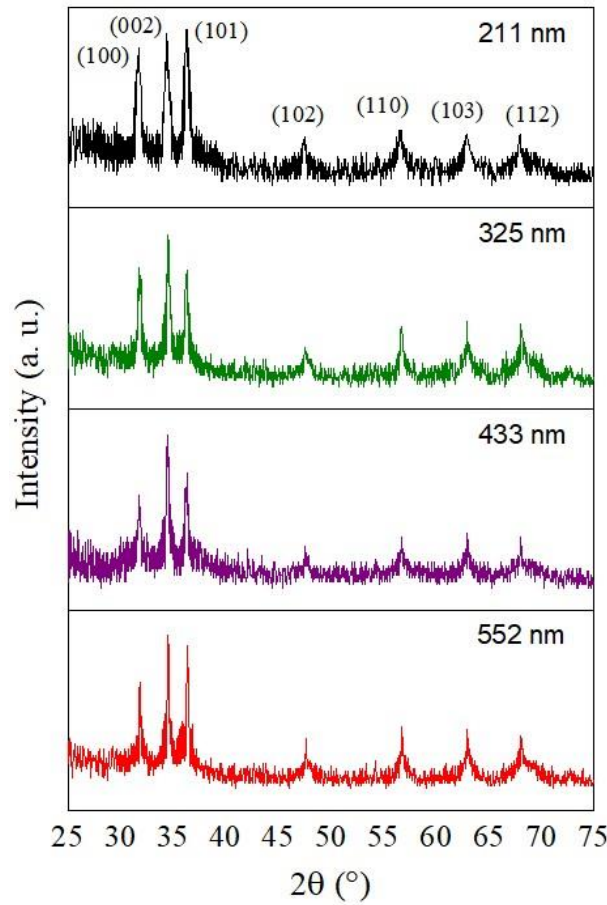
النتائج والمناقشة

يظهر الشكل (2)، تحليلات أطياف تشتت طاقة حيود الأشعة السينية (EDX) لأغشية (ZnO) الرقيقة المحضرة بسماكات مختلفة. بينت الأطياف وبدقة واضحة وجود عنصر الأوكسجين (O) وكانت ذروته عند الطاقة (0.523 keV)، وكذلك وجود عنصر الخارصين (Zn) وذروته عند الطاقة (1.012 keV) مما يدل بشكل واضح على تكوين أغشية (ZnO) على الأرضيات السليكونية. كذلك أظهرت هذه التحليلات وجود عنصر السليكون (Si) حيث كانت ذروته عند الطاقة (1.74 keV) وان ظهور ذروة (Si)، في تحليلات الطيف كان نتيجة لاستخدام قواعد السليكون كقواعد في عملية تصنيع الثنائيات المتباينة. اما ذروة (O)، تنشأ بسبب عملية التأكسد اثناء تكوين أغشية (ZnO). اكدت الأطياف على نقاوة أغشية (ZnO)، المحضرة على القواعد السليكونية. يلاحظ ايضا من الشكل (2) ان هناك زيادة في النسبة الذرية لعنصر الخارصين مما يشير بوضوح الى زيادة سمك الأغشية المحضرة. تم إدراج جدول يضم النسبة المئوية الذرية المقابلة للعناصر لكل سمك في الشكل (2).



الشكل (2): أطيف تشتت الطاقة (EDX) لأغشية (ZnO) الرقيقة والمحضرة بسماكات مختلفة (a) 211 nm، (b) 325 nm، (c) 433 nm و (d) 552 nm.

إن الأطوار البلورية والتبلور لأغشية (ZnO) الرقيقة تم دراستها باستخدام تقنية حيود الأشعة السينية (XRD). الشكل (3) يبين أنماط حيود الأشعة السينية للعينات المحضرة عند سماكات مختلفة. أظهرت قياسات تقنية حيود الأشعة السينية ثلاث قمم بارزة لأغشية (ZnO) والتي تقع عند (2θ) تساوي (31.70°) ، (34.42°) و (36.30°) والتي تتطابق مع المستويات البلورية (100)، (002) و (101) على التوالي، والتي تؤكد ان إغشية (ZnO) تمتلك تركيباً متعدد التبلور وبتجاه سائد هو (002). ان هذا الاتجاه هو الأسرع في النمو لكونه يمثل اتجاه الترسيب عادة [36]. ويلاحظ من الشكل أيضا عدم وجود أي اطوار اضافية لعناصر أخرى، مما يشير الى نقاوة المادة المحضرة بمثل هذا النوع من المنظومات. تتفق نتائج الفحوصات التركيبية بشكل جيد مع نتائج تحليلات (EDX). باجراء عملية المطابقة للقيم العملية (ثوابت الشبيكة، واتجاه الذرات، والمسافة بين المستويات البلورية، وزوايا الحيود) المستخلصة من بيانات تقنية (XRD) للنماذج المحضرة مع البطاقات القياسية العالمية (Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS))، وجد انها تتفق بشكل جيد مع البطاقة القياسية ذات الرقم (JCPDS#036-1451) والعائدة لمادة (ZnO) ذي التركيب السداسي ومن النوع (Wurtzite). الجدول (1) يوضح النتائج العملية المستخلصة من تقنية حيود الأشعة السينية لأغشية (ZnO) المحضرة بسماكات مختلفة. حيث أظهرت النتائج وبوضوح زيادة درجة تبلور أغشية (ZnO) بزيادة سمك المادة المرسبة وذلك من خلال الزيادة في الشدة النسبية للذرات البارزة مع النقصان في قيم العرض الكامل عند منتصف قمة الحيود (Full Width at Half-Maximum (FWHM))، وكما بالشكل (4).



الشكل (3): أنماط حيود الأشعة السينية للعينات المحضرة عند سماكات مختلفة.

ان زيادة السمك ادت الى زيادة معدل حجم البلوريات (الجدول 1) والذي ادى الى زيادة شدة وحدة انماط حيود الاشعة السينية وهذا يتفق مع ما توصل اليه باحثون اخرون [17, 32, 37, 38]. إن المسافة البينية (Interplanar distance (d_{hkl})) بين المستويات البلورية تم تحديدها من خلال قانون براك (Bragg's law) [39] في المعادلة رقم ثلاثة:

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (3)$$

إذ ان (n) عدد صحيح يمثل رتبة الحيود، ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$) الطول الموجي للاشعة السينية الساقطة، (hkl) تمثل معاملات ميلر و (θ) تشير الى زاوية سقوط الأشعة السينية (زاوية حيود براك). كذلك يمكن حساب ثوابت الشبكة (a) و (c) في حالة التركيب السداسي والذي يمثل النمط السائد لتراكيب (ZnO)، باستعمال المعادلة رقم اربعة [40, 41]:

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2+hk+k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (4)$$

بالإضافة الى ذلك حسب معدل حجم البلوريات (Average crystallite size (D)) من خلال علاقة ديبي-شيرر (Debye-Scherrer's) [39] في المعادلة رقم خمسة. إن الجسيمات النانوية غالباً ما تشكل هياكل متماثلة (twinned structures)، وبالتالي قد لا تعطي صيغة شيرر دائماً أحجاماً حقيقية للجسيمات. لذا فإن من المهم أيضاً ملاحظة أن حيود الأشعة السينية تعطي فقط معدل الحجم البلوري [39]. أن الزيادة في معدل حجم البلوريات (الجدول 1 والشكل 4) مع زيادة السمك

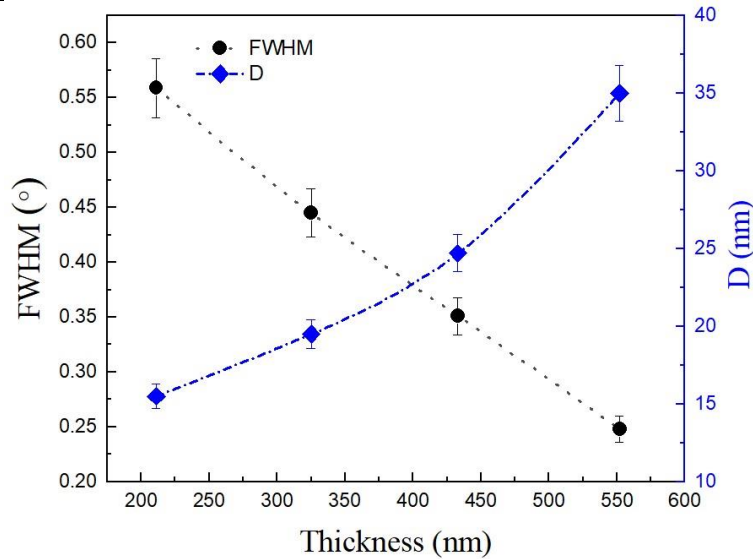
يشير إلى زيادة درجة تبلور هذه الأغشية [38, 42]. ان حجم البلوريات للأغشية المحضرة بسماكات مختلفة تم حسابه اعتماداً على قيم الزاوية للمستوي (002) والتي تساوي تقريباً (34°)، وكانت القيم المحسوبة تقع ضمن المقياس النانوي.

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

إذ إن (K) ثابت شيرر بقيمة قريبة من الواحد (0.9) للبلورات الكروية، (β) العرض الكامل عند منتصف قمة الحيود والمقاسة بالزاوية النصف قطرية. في الجدول (1) تم ادراج قيم العرض الكامل عند منتصف قمة الحيود، معدل الحجم الحبيبي، المسافة البينية بين المستويات البلورية و ثابت الشبكة (a, c) لأغشية الرقيقة والتي تم الحصول عليها من تحليلات بيانات تقنية (XRD).

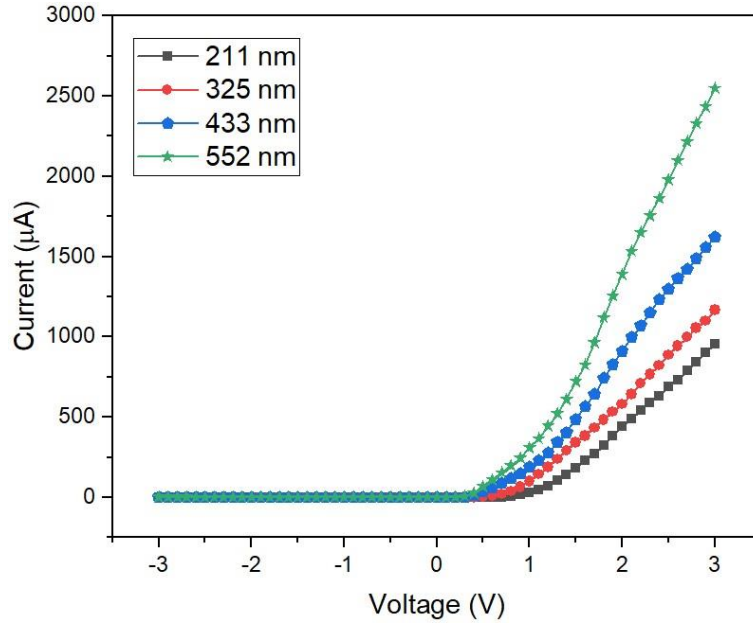
الجدول (1): النتائج العملية المستخلصة من تقنية حيود الأشعة السينية لأغشية (ZnO) المحضرة بسماكات مختلفة.

Thickness (nm)	2Theta (deg)	hkl	FWHM (deg)	D (nm)	d ₍₀₀₂₎ (Å)	Lattice constants	
						a (Å)	c (Å)
211	34.420	002	0.559±0.027	15.5±0.8	2.602	3.255	5.204
325	34.540	002	0.445±0.022	19.5±0.9	2.594	3.244	5.187
433	34.487	002	0.351±0.017	24.7±1.2	2.598	3.248	5.195
552	34.529	002	0.248±0.012	35.0±1.8	2.594	3.239	5.188



الشكل (4): أختلاف قيم (FWHM) و (D) مع سمك الأغشية المحضرة.

لأجل دراسة المعلمات الكهربائية للتنائيات المتباينة ومعرفة مدى تأثير تغيير سمك الأغشية المحضرة على عمل التنائيات المتباينة، تم توظيف دائرة تيار- فولتية المتواليّة لتقييم ومقارنة الأداء الكهربائي لهذه الأجهزة المصنعة في حالة الظلام. الشكل (5) يعرض خصائص تيار- فولتية للتنائيات المتباينة كدالة لسمك اغشية اوكسيد الخارصين. يلاحظ من الشكل (5) أن منحنى تيار- فولتية للتنائيات المتباينة يكون غير خطياً ويظهر سلوكاً غير متماثل، والذي يمكن ان يعزى الى طبقة الأوكسيد والى وجود الحالات السطحية وهذا يتفق مع [43, 44].



الشكل (5): خصائص تيار- فولتية للثنائيات المتباينة المحضرة عند سماكات مختلفة.

فضلا عن ذلك يلاحظ من الشكل (5) أن الثنائيات المحضرة تمتلك تياراً أمامياً ذا قيمة كبيرة مقارنة بقيمة تيار الانحياز العكسي وفي حالة الانحياز الامامي وعند الفولتيات الواطئة كانت قيم التيار ترتفع بشكل أسي وذلك بسبب زيادة عرض منطقة الاستنزاف عند السطح البيني. على النقيض من ذلك نلاحظ ان عند الفولتيات العالية تزداد قيمة التيار بشكل خطي تقريباً ويعزى ذلك الى ان طبقة الاستنزاف تقل عند حدود السطح البيني وهذا يتفق مع [43]. للحصول على فهم اعمق للخصائص الكهربائية، تم حساب نسبة التقويم (Rectification Ratio (RR)) لجميع الثنائيات المحضرة، والتي تعطى بالمعادلة رقم ستة [6, 45]:

$$RR = \frac{I_f}{I_r} \quad (6)$$

إذ إن (I_f) و (I_r) تمثل التيار الامامي والعكسي، على التوالي عند فولتية انحياز (3 V). من الجدول (2) يلاحظ ان القيم المحسوبة لنسبة التقويم تعتمد بشكل واضح على سمك مادة اغشية اوكسيد الخارصين. وان زيادة سمك الأغشية المحضرة يؤدي الى زيادة قيم (RR)، وهذا يمكن ان يرتبط بزيادة حجم البلوريات لأغشية ZnO [43]. أن تحسن اداء الثنائيات المتباينة يرتبط بزيادة قيم (RR) وهذا يتفق مع [42]. للحصول على معلمات خصائص تيار- فولتية للثنائيات المتباينة تم استخدام العلاقة رقم سبعة [45]:

$$I_f = I_s \exp\left(\frac{qV_d}{\eta k_B T}\right) \quad (7)$$

إذ إن I_s ، I_f ، q ، V_d ، η ، k_B ، و T تشير الى تيار الانحياز الامامي بوحدة الامبير، تيار التشبع العكسي، شحنة الالكترون، الفولتية عبر الثنائي، عامل المثالية، ثابت بولتزمان ودرجة الحرارة بالكلفن، على التوالي. لحساب قيمة (I_s) ، للثنائيات المتباينة تم اخذ لوغاريتم المعادلة (7)، والتي تسفر عن المعادلة رقم ثمانية [45]:

$$\ln I_f = \ln I_s + \left(\frac{qV_d}{\eta k_B T}\right) \quad (8)$$

ان قيمة (I_s) تم حسابها من تقاطع الخط المستقيم لرسم $(\ln I_f - V)$ مع المحور (y) عند قيمة فولتية انحياز تساوي صفر. اما الميل لنفس الرسم فيعطي قيمة عامل المثالية. بأخذ المشتقة للمعادلة (8)، قيمة (η) تعطى بالمعادلة رقم تسعة [45]:

$$\eta = \left(\frac{q}{k_B T}\right) \left(\frac{\partial V_d}{\partial \ln I_f}\right), \quad (9)$$

من الجدول (2)، نلاحظ ان قيمة (I_s) ازدادت مع زيادة سمك الاغشية المحضرة. ان قيم (I_s) التي تم حسابها في هذا العمل كانت قريبة من القيم التي تم حسابها من قبل باحثين اخرين [46, 47]، بالنسبة لثنائي المفرق المتباين ذو التركيب (n-ZnO/p-Si). ان تركيز حاملات الشحنة المنخفض في أغشية (ZnO) المنماة عند الاسماك القليلة يؤدي الى تقليل عملية إعادة

الاتحاد الإلكترونيات والفجوات، مما يقلل بدوره من تيار التشبع العكسي [48]. بالإضافة الى ذلك، ان زيادة سمك الاغشية المحضرة يؤدي الى انخفاض قيمة المقاومة النوعية وهذا يتفق مع [38]. ان انخفاض قيمة المقاومة النوعية يمكن ان يعزى الى تحسن التبلور وزيادة الحجم البلوري وهذا بدوره يؤدي الى زيادة عمر حاملات الشحنة، وبالتالي زيادة التحركية للحاملات مع زيادة السمك [38].
الجدول (2): المعلمات الكهربائية المحسوبة عملياً للثنائيات المتباينة.

Thickness (nm)	RR at $\pm 3V$	I_s (nA)	η	ϕ_b (eV)	R_s (k Ω)
211	318	7.50	4.57	0.779	2.07
325	466	12.71	3.48	0.765	1.86
433	747	58.50	3.33	0.726	1.32
552	1517	129.16	3.38	0.705	0.84

كانت القيم المحسوبة ل (η) أكبر من الاثنان وهذا يشير إلى أن الثنائيات المتباينة تظهر سلوكاً غير مثالي بسبب وجود طبقة الاوكسيد العازلة (SiO_2) عند السطح البيئي، وقد يعزى ذلك الى وجود الحالات السطحية (Surface states) التي تتخلف بسبب طريقة التنظيف الغير قياسية للقواعد [46]. اما قيمة ($\eta > 2$)، فانها تشير الى هيمنة الية اعادة الاتحاد [48]. ان قيمة (I_s) تعطى بالمعادلة رقم 10 [45]:

$$I_s = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{k_B T}\right), \quad (10)$$

إذ ان A ، A^* و ϕ_b ، تمثل مساحة الاتصال، ثابت ريتشاردسون الفعال وارتفاع حاجز الجهد، على التوالي. ان قيمة (A^*) لمادة اوكسيد الخارصين تبلغ ($32 A/cm^2 K^2$). باستخدام المعادلة (10) تم ايجاد قيم (ϕ_b) عن طريق تعويض قيم (I_s) المحسوبة من رسم ($\ln I_f - V$). وجد ان قيم (ϕ_b)، تقل مع زيادة سمك الاغشية المحضرة، وان هذه القيم مقاربة للقيم التي تم الحصول عليها من قبل مجاميع بحثية اخرى [46, 47]، بالنسبة لنفس تركيب الثنائي المحضر.

عادة ما يتأثر سلوك خصائص ($I-V$) للثنائي المتباين بالمقاومة المتواليية (R_s) المتعلقة بالسطح البيئي بين مادتين من أشباه الموصلات. وبالتالي، من المهم تحديد قيمة هذه المقاومة حيث يمكن حسابها من ميل الجزء الخطي في منحنى ($I-V$) عند جهد أعلى من جهد العتبة (Knee voltage)، حيث يكون سلوك الثنائي المتباين خطياً. لقد تبين ان قيمة هذه المقاومة تقل مع زيادة سمك الاغشية المحضرة، وان هذا الانخفاض يمكن ان يعزى الى زيادة كثافة حاملات الشحنة في اغشية (ZnO) مع زيادة السمك [48]. الجدول (2) يضم جميع المعلمات الكهربائية المحسوبة عملياً للثنائيات المتباينة. عندما يتم دمج مادة شبه موصلة من النوع السالب (n) مع مادة شبه موصلة من النوع الموجب (p) سينتج عن ذلك عملية إعادة ارتباط الإلكترونات القريبة من الحاجز في طبقة (n) مع الفجوات القريبة من الحاجز في طبقة (p). ان هذه العملية تدعى بعملية اعادة الاتحاد (Recombination Process). لذا سوف ينشأ عن هذه العملية منطقة خالية من الالكترونات الحرة أو الفجوات القريبة من الحاجز والتي تسمى بمنطقة الاستنزاف (Depletion Layer). أن عمق هذه المنطقة يمتد بشكل اكبر باتجاه المنطقة ذات التطعيم (الشوائب) الاقل. بسبب وجود الأيونات في منطقة الاستنزاف فانها ستمتلك قوة اعاقه بالنسبة للإلكترونات الحرة التي تحاول الانتقال من خلال منطقة الاستنزاف من المنطقة (N) الى المنطقة (P). إن قوة الاعاقه هذه تمثل بجهد يدعى بجهد الحاجز (Barrier Potential)، وان قيمة هذا الجهد تساوي ($0.7 V$) بالنسبة للثنائي المصنوع من مادة السليكون و ($0.3 V$) بالنسبة للثنائي المصنوع من مادة الجرمانيوم. في حالة الانحياز الامامي عندما يكون جهد المصدر اقل من جهد الحاجز فإن الإلكترونات التي تعبر الحاجز تكاد تكون معدومة لذلك يعتبر التيار في هذه الحالة قليل جداً. اما عند زيادة جهد المصدر لقيمة تساوي او اكبر من جهد الحاجز ستعبر

الالكترونيات الحاجز بكميات كبيرة وينتج عن ذلك مرور تيار كهربائي كبير. ان جهد المصدر الذي يتغلب على جهد الحاجز ويؤدي الى مرور تيار كهربائي كبير في حالة الانحياز الامامي يسمى بجهد العتبة. في هذا النوع من الدراسات يجب عدم الزيادة في جهد المصدر بشكل كبير بعد قيمة جهد العتبة، وذلك لتلافي مرور تيار كبير خلال الثنائي، مما يؤدي الى تلف الثنائي.

الاستنتاجات

تم في هذا العمل تصنيع الثنائيات المتباينة ذات التركيب (n-ZnO/p-Si) باستخدام طريقة الترسيب البخاري الكيميائي عند الضغط الجوي. اغشية (ZnO) الرقيقة ذات البنية النانوية تم تحضيرها عند درجة حرارة (550 °C) على قواعد من الزجاج والسليكون بسماكات مختلفة (211, 325, 433 and 552 nm) لتحديد تأثيرها على التركيب العنصري، التركيب البلوري والخصائص الكهربائية للثنائيات المتباينة. اكدت أطياف تشتت طاقة حيود الاشعة السينية على نقاوة أغشية (ZnO)، المحضرة على القواعد السليكونية. أظهرت قياسات تقنية (XRD) ان الأغشية المحضرة لـ (ZnO) تمتلك تركيباً متعدد التبلور وبتجاه سائد هو (002). كذلك، بينت النتائج التركيبية زيادة درجة تبلور أغشية (ZnO) بزيادة سمك المادة المرسبة وذلك من خلال الزيادة في معدل حجم البلوريات مع النقصان في قيم العرض الكامل عند منتصف قمة الحيود. فيما اظهرت خصائص تيار-فولتية ان الثنائيات المتباينة تمتلك خصائص تقويمية واضحة، مما يشير بوضوح الى التكوين الصحيح للثنائيات المتباينة. يلاحظ ان افضل الثنائيات المتباينة كانت تلك المحضرة بسمك (552 nm)، إذ انها تمتلك اقل قيمة لعامل المثالية ($\eta=3.38$)، وللمقاومة المتواليّة ($R_s=0.84\text{ k}\Omega$) مع أعلى نسبة تقويم ($RR=1517$) مقارنة بالتركيب الاخرى.

المصادر

- [1] Z. Wei-Ying, Z. Sheng, S. Li-Jie, and F. Zhu-Xi, "Dependence of Photovoltaic Property of ZnO/Si Heterojunction Solar Cell on Thickness of ZnO Films," *Chinese Physics Letters*, vol. 25, pp. 1829-1831, 2008/05 2008.
- [2] A. Baltakesmez, S. Tekmen, P. Köç ,S. Tüzemen, K. Meral, and Y. Onganer, "UV-visible detector and LED based n-ZnO/p-Si heterojunction formed by electrodeposition," *AIP Advances*, vol. 3, p. 032125, 2013.
- [3] A. Echresh, C. O. Chey, M. Zargar Shoushtari, V. Khranovskyy, O. Nur, and M. Willander, "UV photo-detector based on p-NiO thin film/n-ZnO nanorods heterojunction prepared by a simple process," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 632, pp. 165-171, 2015/05/25/ 2015.
- [4] S.-Y. Tsai, M.-H. Hon, and Y.-M. Lu, "Fabrication of transparent p-NiO/n-ZnO heterojunction devices for ultraviolet photodetectors," *Solid-State Electronics*, vol. 63, pp. 37-41, 2011/09/01/ 2011.
- [5] D. Punetha and S. K. Pandey, "Ultrasensitive NH₃ Gas Sensor Based on Au/ZnO/n-Si Heterojunction Schottky Diode," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 66, pp. 3560-3567, 2019.
- [6] Y. H. Mohammed, "Fabrication of n-MgZnO/p-Si heterojunction diode: Role of magnesium doping," *Superlattices and Microstructures*, vol. 131, pp. 104-116, 2019/07/01/ 2019.
- [7] N. H. Al-Hardan ,A. Jalar, M. A. Abdul Hamid, L. K. Keng, N. M. Ahmed, and R. Shamsudin, "A wide-band UV photodiode based on n-ZnO/p-Si heterojunctions," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 207, pp. 61-66, 2014/03/01/ 2014.
- [8] C. Klingshirn, "ZnO: from basics towards applications," *physica status solidi (b)*, vol. 244, pp. 3027-3073, 2007.
- [9] G. Adamopoulos, A. Bashir, P. H. Wöbkenberg, D. D. C. Bradley, and T. D. Anthopoulos, "Electronic properties of ZnO field-effect transistors fabricated by spray pyrolysis in ambient air," *Applied Physics Letters*, vol. 95, p. 133507, 2009.

- [10] Z. Fan and J. G. Lu, "Zinc oxide nanostructures: synthesis and properties," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 5, pp. 1561-1573, // 2005.
- [11] C. Jagadish and S. J. Pearton, *Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures: Processing, Properties and Applications*. New York: Elsevier, 2006.
- [12] B. Hussain, A. Ebong, and I. Ferguson, "Zinc oxide as an active n-layer and antireflection coating for silicon based heterojunction solar cell," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 139, pp. 95-100, 2015/08/01/ 2015.
- [13] A. A. Ahmad, A. M. Alsaad, Q. M. Al-Bataineh, M. A. H. Al-Akhras, Z. Albataineh, K. A. Alizy, *et al.*, "Synthesis and characterization of ZnO NPs-doped PMMA-BDK-MR polymer-coated thin films with UV curing for optical data storage applications," *Polymer Bulletin*, vol. 78, pp. 1189-1211, 2021/03/01 2021.
- [14] W.-T. Chang, Y.-C. Chen, R.-C. Lin, C.-C. Cheng, K.-S. Kao, and Y.-C. Huang, "Wind-power generators based on ZnO piezoelectric thin films on stainless steel substrates," *Current Applied Physics*, vol. 11, pp. S333-S338, 2011/01/01/ 2011.
- [15] Ü. Özgür, Y. I. Alivov, C. Liu, A. Teke, M. A. Reshchikov, S. Doğan, *et al.*, "A comprehensive review of ZnO materials and devices," *Journal of Applied Physics*, vol. 98, p. 041301, 2005.
- [16] T. Srinivasulu, K. Saritha, and K. T. R. Reddy, "Synthesis and characterization of Fe-doped ZnO thin films deposited by chemical spray pyrolysis," *Modern Electronic Materials*, vol. 3, pp. 76-85, 2017/06/01/ 2017.
- [17] E. S. Shim, H. S. Kang, J. S. Kang, J. H. Kim, and S. Y. Lee, "Effect of the variation of film thickness on the structural and optical properties of ZnO thin films deposited on sapphire substrate using PLD," *Applied Surface Science*, vol. 186, pp. 474-476, 2002/01/28/ 2002.
- [18] A. Echresh, M. Ali Abbasi, M. Zargar Shoushtari, M. Farbod, O. Nur, and M. Willander, "Optimization and characterization of NiO thin film and the influence of thickness on the electrical properties of n-ZnO nanorods/p-NiO heterojunction," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 29, p. 115009, 2014/09/03 2014.
- [19] T. Chen, S.-Y. Liu, Q. Xie, C. Detavernier, R. L. Van Meirhaeghe, and X.-P. Qu, "The effects of deposition temperature and ambient on the physical and electrical performance of DC-sputtered n-ZnO/p-Si heterojunction," *Applied Physics A*, vol. 98, p. 357, September 01 2009.
- [20] C. Li, C. Xinliang, L. Yiming, Z. Ying, and Z. Xiaodan, "Research on ZnO/Si heterojunction solar cells," *Journal of Semiconductors*, vol. 38, p. 054005, 2017.
- [21] X.-Y. Li, H.-J. Li, Z.-J. Wang, H. Xia, Z.-Y. Xiong, J.-X. Wang, *et al.*, "Effect of substrate temperature on the structural and optical properties of ZnO and Al-doped ZnO thin films prepared by dc magnetron sputtering," *Optics Communications*, vol. 282, pp. 247-252, 2009/01/15/ 2009.
- [22] Y. W. Heo, D. P. Norton, and S. J. Pearton, "Origin of green luminescence in ZnO thin film grown by molecular-beam epitaxy," *Journal of Applied Physics*, vol. 98, p. 07.2005, 3502
- [23] J. Ramesh, G. Pasupathi, R. Mariappan, V. S. Kumar, and V. Ponnuswamy, "Structural and optical properties of Ni doped ZnO thin films using sol-gel dip coating technique," *Optik*, vol. 124, pp. 2023-2027, 2013/08/01/ 2013.
- [24] S. J. Henley, M. N. R. Ashfold, and D. Cherns, "The growth of transparent conducting ZnO films by pulsed laser ablation," *Surface and Coatings Technology*, vol. 177-178, pp. 271-276, 2004/01/30/ 2004.

- [25] R. Chandramohan, T. A. Vijayan, S. Arumugam, H. B. Ramalingam, V. Dhanasekaran, K. Sundaram, *et al.*, "Effect of heat treatment on microstructural and optical properties of CBD grown Al-doped ZnO thin films," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 176, pp. 152-156, 2011/02/15/ 2011.
- [26] A. J. Hashim, M. S. Jaafar, A. J. Ghazai, and N. M. Ahmed, "Fabrication and characterization of ZnO thin film using sol-gel method," *Optik*, vol. 124, pp. 491-492, 2013/03/01/ 2013.
- [27] C. Zhuo, K. Shum, T. Salagaj, Z. Wei, and K. Strobl, "ZnO thin films synthesized by chemical vapor deposition," in *2010 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference*, 2010, pp. 1-6.
- [28] S. Sakrani, N. Jamaludin, R. Muhammad, Y. Wahab, A. K. Ismail, S. Suhaimi, *et al.*, "Effect of gas flow rate on structural properties of zinc oxide nanowires grown by vapor-solid mechanism," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1733, p. 020040, 2016.
- [29] Y. H. Mohammed, "Effect of Deposition Temperature on the Physical Performance of n-ZnO/p-Si Heterojunction," *JOURNAL OF EDUCATION AND SCIENCE*, vol. 29, pp. 118-132, 2020.
- [30] B. Xiang, P. Wang, X. Zhang, S. A. Dayeh, D. P. R. Aplin, C. Soci, *et al.*, "Rational synthesis of p-type zinc oxide nanowire arrays using simple chemical vapor deposition," *Nano Letters*, vol. 7, pp. 323-328, 2007/02/01 2007.
- [31] H. O. Pierson, *Handbook of Chemical Vapor Deposition: Principles, Technology and Applications*. New Jersey: NOYES PUBLICATIONS, 1999.
- [32] V. Kumar, N. Singh, R. M. Mehra, A. Kapoor, L. P. Purohit, and H. C. Swart, "Role of film thickness on the properties of ZnO thin films grown by sol-gel method," *Thin Solid Films*, vol. 539, pp. 161-165, 2013/07/31/ 2013.
- [33] S. Mridha and D. Basak, "Effect of thickness on the structural, electrical and optical properties of ZnO films," *Materials Research Bulletin*, vol. 42, pp. 875-882, 2007/05/03/ 2007.
- [34] S. Mondal, K. P. Kanta, and P. Mitra, "Preparation of ZnO film on p-Si and IV characteristics of p-Si/n-ZnO," *Materials Research*, vol. 16, pp. 94-99, 2013.
- [35] L. Eckertová, *Physics of Thin Films*. New York: Springer US, 1977.
- [36] M. Öztas and M. Bedir, "Thickness dependence of structural, electrical and optical properties of sprayed ZnO:Cu films," *Thin Solid Films*, vol. 516, pp. 1703-1709, 2008/02/29/ 2008.
- [37] S. Rahmane, M. S. Aida, M. A. Djouadi, and N. Barreau, "Effects of thickness variation on properties of ZnO:Al thin films grown by RF magnetron sputtering deposition," *Superlattices and Microstructures*, vol. 79, pp. 148-155, 2015/03/01/ 2015.
- [38] X. Hao, J. Ma, D. Zhang, T. Yang, H. Ma, Y. Yang, *et al.*, "Thickness dependence of structural, optical and electrical properties of ZnO:Al films prepared on flexible substrates," *Applied Surface Science*, vol. 183, pp. 137-142, 2001/11/12/ 2001.
- [39] B. S. Murty, P. Shankar, B. Raj, B. B. Rath, and J. Murday, *Textbook of Nanoscience and Nanotechnology*: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [40] S. K. Chatterjee, *Crystallography and the World of Symmetry*: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [41] Y. Waseda, E. Matsubara, and K. Shinoda, *X-Ray Diffraction Crystallography: Introduction, Examples and Solved Problems*. Heidelberg: Springer Science and Business Media, 2011.

- [42] L. Chabane, N. Zebbar, M. L. Zeggar, M. S. Aida, M. Kechouane, and M. Trari, "Effects of CuO film thickness on electrical properties of CuO/ZnO and CuO/ZnS hetero-junctions," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 40, pp. 840-847, 2015/12/01/ 2015.
- [43] S. K. Singh and P. Hazra, "Performance analysis of undoped and Mg-doped ZnO/p-Si heterojunction diodes grown by sol–gel technique," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 29, pp. 5213-5223, 2018/03/01 2018.
- [44] F. Yakuphanoglu, Y. Caglar, M. Caglar, and S. Ilican, "ZnO/p-Si heterojunction photodiode by sol–gel deposition of nanostructure n-ZnO film on p-Si substrate," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 13, pp. 137-140, 2010/09/01/ 2010.
- [45] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*: John Wiley and Sons, 1981.
- [46] P. Klason, M. M. Rahman, Q. H. Hu, O. Nur, R. Turan, and M. Willander, "Fabrication and characterization of p-Si/n-ZnO heterostructured junctions," *Microelectronics Journal*, vol. 40, pp. 706-710, 2009/04/01/ 2009.
- [47] N. Zebbar, Y. Kheireddine, K. Mokeddem, A. Hafdallah, M. Kechouane, and M. S. Aida, "Structural, optical and electrical properties of n-ZnO/p-Si heterojunction prepared by ultrasonic spray," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 14, pp. 229-234, 2011/09/01/ 2011.
- [48] V. K. Sahu, P. Misra, R. S. Ajimsha, A. K. Das, and B. Singh, "Effect of growth temperature on diode parameters of n-ZnO/p-Si heterojunction diodes grown by atomic layer deposition," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 54, pp. 1-5, 2016/11/01/ 2016.