مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (37) العدد (3) 2015
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (37) No. (3) 2015

العيوب في الأفلام الرقيقة من النوع ZnO المنماة بطريقة الترسيب الذري الطبقي

الدكتور نبيل متوج*

(تاريخ الإيداع 16 / 11 / 2014. قُبِل للنشر في 25/ 5 / 2015)

□ ملخّص □

نناقش في هذا البحث، تأثير العيوب النقطية على الخصائص الكهربائية والضوئية لأفلام رقيقة من أكسيد الزنك تم تنميتها بطريقة الترسيب الذري الطبقي على ركائز من الزجاج والسيلكون عند درجة حرارة منخفضة (100°C). أنجزت قياسات أطياف التألق الضوئي عند درجة حرارة الغرفة، والأطياف الكتلوية الأيونية الثانوية، وقياسات مفعول هول لطبقات من أكسيد الزنك. أجريت عملية التسخين عند درجة حرارة 400 °C لعينة ZnO المنماة على ركيزة من الزجاج في الهواء وفي جو من الأزوت N_2 لمدة نصف ساعة . إن التسخين الطويل يؤدي إلى اختزال كبير لتركيز الإلكترونات، وفي نفس الوقت، نلاحظ زيادة واضحة في حركية حاملات الشحنة، الذي قد يؤدي إلى انخفاض عدد العيوب الأصلية في طبقات أكسيد الزنك. لوحظ أيضا أن ذرات الهيدروجين في عينات أكسيد الزنك لا تسيطر على الخصائص الكهربائية بازدياد تركيز الإلكترونات.

الكلمات المفتاحية: الترسيب الذري الطبقي، الخصائص الكهربائية، التألق الضوئي.

* مدرس – قسم العلوم الأساسية – كلية الهندسة المعلوماتية –جامعة تشرين–اللاذقية–سورية

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (37) العدد (3) 2015
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (37) No. (3) 2015

Defects in ZnO Thin Films Grown By Atomic Layer Deposition

Dr. Nabil Mutweg *

(Received 16 / 11 / 2014. Accepted 25 / 5 / 2015)

□ ABSTRACT □

In the present paper, we discuss the influence of point defects on electrical and optical characteristics of ZnO thin films grown by the atomic layer deposition (ALD) method on glass and silicon substrates at low temperature (100°C). Room temperature photoluminescence (RT PL) spectra, secondary ion mass spectroscopy (SIMS), and Hall Effect measurements were made for as-grown ZnO layers. The annealing process was performed in air as well as in N_2 atmosphere at 400°C for half an hour. The long annealing resulted in a larger reduction in electron concentration. Simultaneously, an evident increase in carrier's mobility was observed, which may suggest that annealing resulted in a decreased number of native defects in the ZnO layers. Also, it was observed that hydrogen atoms in ZnO samples did not dominate their electrical properties with the increase of electrons concentration.

Keywords: atomic layer deposition (ALD), electrical properties, photoluminescence.

* **Assistant Professor- Department of Essential Science, Faculty of Information Engineering, Tishreen University, Lattakia- Syria.**

مقدمة:

يعتبر أكسيد الزنك (ZnO)، في الوقت الحاضر، وعلى نطاق واسع مادة جذابة بالنسبة للإلكترونيات، والخلايا الضوئية وتطبيقات الالكترونيات الضوئية. وقد تم بالفعل مناقشة بعض الميزات الرئيسية لهذه المواد على نطاق واسع في العديد من الأبحاث والمراجع، مثل فجوة العصابة المحظورة المباشرة والعريضة (3.37 eV عند T=300 K) أو طاقة الارتباط الأكسيتونية المرتفعة (60 meV عند T=300 K) [1–5].

يستخدم أكسيد الزنك في العديد من الأجهزة الإلكترونية (بما في ذلك محولات كهرضغطية، وترانزستورات الأفلام الرقيقة (TFTS))، أو أكاسيد الناقلية الشفافة. يتطلب الأمر اشابات مستقرة يمكن السيطرة عليها في مجال واسع من قيم البارامترات الكهربائية. لا تزال هذه المشكلة إحدى المسائل الحيوية بالنسبة لأكسيد الزنك [1, 2, 5].

يمكن تنظيم تركيز حاملات الشحنة الحرة بسهولة في هذا المركب، فعلى سبيل المثال، زيادة الناقلية من النوع *n* في بلورات وأفلام رقيقة من أكسيد الزنك يكون من خلال إدخال مستويات مانحة تحت عصابة الناقلية. وهذه العيوب تكون إما أصلية (شواغر الأكسجين، أو الزنك البيني [1, 2])، أو كاشابة (مثل ذرات الهيدروجين [5–9]). إن تخفيض تركيز حاملات الشحنة من النوع *n*، مطلوب للعديد من تطبيقات أكسيد الزنك، ويمكن أن يتحقق ذلك بطرق مختلفة من المعالجة بعد التنمية، مثل التسخين (annealing) في درجات حرارة عالية [10, 11].

يتطلب الحصول على متصلات شوتكي أساسها أكسيد الزنك، أن تكون بأن واحد حركية حاملات الشحنة مرتفعة، مع إمكانية وجود سوية منخفضة من النوع *n*. ويمكن تحقيق هذين المطلبين من خلال الحصول على تيار أمامي عالي (بسبب الحركية المرتفعة) وتيار عكسي منخفض (كنتيجة للتركيز المنخفض من النوع *n*). إن قيم الحركية التي تم الحصول عليها في العديد من طرق التنمية متنوعة جدا (أفلام رقيقة من أكسيد الزنك، حيث كانت على الأكثر عند سوية $50\ cm^2/Vs$ أو أقل)، وتعتمد بشدة على الركائز وشروط التنمية. لذلك، بهدف ضمان السيطرة على التركيز والحركية، يجب أن تملك الطبقة المرسبة المكونات الكيميائية المناسبة وبنية ترتيبها البلوري عال ليكون عاملا رئيسيا يحد من حركية هول [10–12].

أهمية البحث وأهدافه

نحاول في هذا البحث أن نظهر إمكانية التحكم بالخصائص الكهربائية لأكسيد الزنك المنمى بطريقة الترسيب الذري الطبقي من خلال اختيار مصادر الزنك، ودرجة حرارة التنمية. كما حاولنا دراسة تأثير شروط التنمية على سلوك العيوب المتعلقة بالتألق والعيوب العميقة المتعلقة بالعصابات، والتي تؤثر بشكل شديد على الخصائص الكهربائية لأفلام من أكسيد الزنك التي تم الحصول عليها عند درجة حرارة منخفضة (100°C).

طرائق البحث ومواده

إن طريقة ترسيب الطبقات الذرية (Atomic Layer Deposition (ALD)) هي طريقة ترسيب كيميائية لطبقات رقيقة من الطور الغازي.وتتميز طريقة ALD بأنها عملية تنمية ذاتية الحد (self–limiting) تعتمد على أساس كيميائي سطحي تسلسلي، تكون فيها المصادر مفصولة عن بعضها من خلال عمليات التنظيف. تتألف عملية التنمية العادية من تكرار لدورات الترسيب الذري الطبقي بالشكل التالي: (أ) إدخال إلى حجرة التنمية أبخرة من المصدر الأول، (ب) تنظيف المفاعل بغاز حيادي (مثل النيتروجين) لإزالة الغاز غير الممتص من المصدر الأول، ج) إدخال إلى

حجرة التنمية أبخرة من المصدر الثاني، الذي يتفاعل مع المصدر الأول الممتص على سطح الفيلم المنمى، و (د) تنظيف المفاعل بغاز حيادي لإزالة الغاز غير الممتص من المصدر الثاني لإزالة التفاعلات من النواتج. هذا يعني أن دورة الترسيب الذري الطبقي للمصادر المتفاعلة تلتقي مع بعضها بعضا فقط على سطح الركيزة، وبالتالي يحصل فيما بينها تفاعل كيميائي وتتشكل الطبقة الذرية الأولى، ويصبح سطح هذه الطبقة مغطى تماما من جزيئات المصادر وكل جرعة إضافية لا تسبب تشكل لطبقة ذرية أخرى، لأن تجانس الطبقة الذرية الواحدة يتعلق بما يسمى "مفعول الإشباع". يؤدي هذا إلى أن معدل النمو (سماكة الفلم الرقيق) يتعلق بعدد مرات إدخال المصادر على التوالي إلى حجرة التنمية. كما أن هناك إمكانية للتنمية في درجات الحرارة المنخفضة.وهذه إحدى الخصائص الرائعة لطريقة الترسيب الذري الطبقي، فقد تم ترسيب أفلام من أكسيد الزنك عند درجة حرارة منخفضة للغاية، أقل بكثير من 200 درجة مئوية [12, 13]. لأن التنمية في درجة حرارة منخفضة جدا يتيح الفرصة لتصميم بنيات هجينة من نوع أكسيد الزنك/المواد العضوية [12].

نميت الأفلام المدروسة عند درجة حرارة 100°C، وأثناء عملية التنمية، تم إدخال المواد المتفاعلة بالتتابع إلى حجرة التنمية حيث تصل إلى سطح الفلم المراد تنميته. يتم في كل دورة من عملية الترسيب الذري الطبقي تطهير حجرة التنمية بغاز محايد وقد اتضح أن أكثر مصادر الزنك فعالية هو ديتيل الزنك (diethyl zinc) أو (DEZn, $ZnO(C_2H_5)_2$)، مع ماء منزوع الأيونات يستخدم كمصدر أكسجين [13–10] وفق المعادلة:

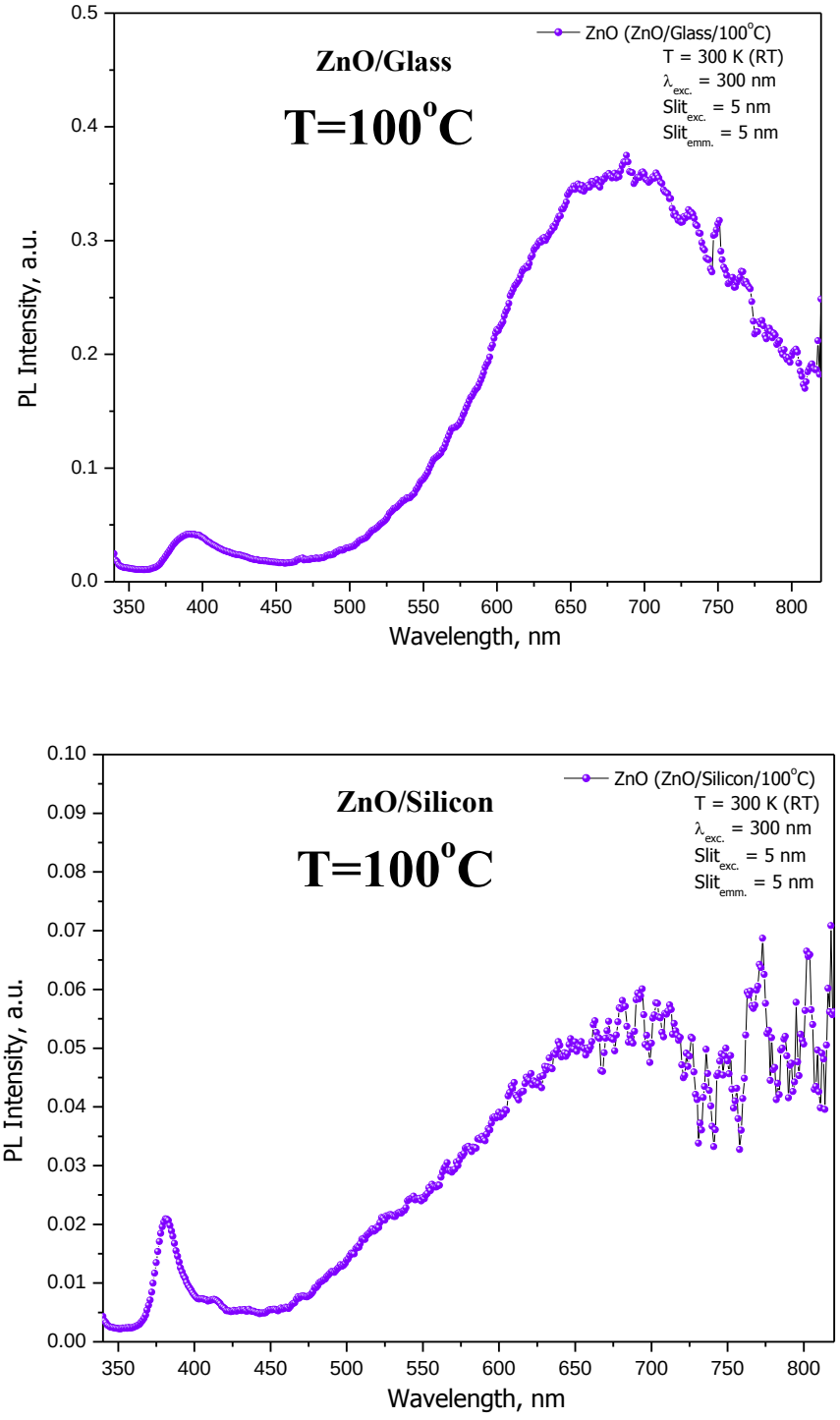
$$ZnO(C_2H_5)_2 + H_2O \rightarrow ZnO + 2C_2H_6$$

تم استخدام البارامترات التالية أثناء عملية التنمية: من أجل H_2O كان زمن جرعة المصدر 15 ميلي ثانية، في حين من أجل ديتيل الزنك – DEZn كان زمن جرعة المصدر 2 ميلي ثانية. ومن أجل الحصول على تركيز منخفض نسبيا للإلكترونات الحرة، يكون زمن تطهير حجرة التنمية طويل: فمن أجل H_2O كان 20 ثانية، بينما من أجل DEZn كان الزمن الضروري هو 8 ثانية. وقد تم الحصول على فيلمين من أكسيد الزنك على ركيزتين من الزجاج والسيلكون عند درجة حرارة 100°C وبسماكة 211.5 nm.

تم الحصول على الوسائط الكهربائية لعينات أكسيد الزنك من قياسات مفعول هول (Hall effect) عند درجة حرارة الغرفة، الذي يتضمن نظام RH2035 Phys Tech GmbH المزود بمغناطيس دائم ينتج حقل مغناطيسي قيمته B=0.426T. وكان تيار DC المتاح في المجال 10^{-3} A – 10^{-8}، الذي يسمح لنا بالكشف عن تركيز حاملات الشحنة بين 10^{14} cm^{-3} و 10^{22} cm^{-3}. لذلك، من أجل طبقات قابلة للقياس لا ينبغي أن تكون مقاومة الاتصال أعلى من $10^8\Omega$ [مزيد من التفاصيل مبين في المرجع 14]. تم الحصول على أطياف التألق الضوئي لأفلام من أكسيد الزنك عند درجة حرارة الغرفة باستخدام مطياف CM2203 مزود بمصباح Xe المستخدم في الإثارة. وكان طول موجة الإثارة 300nm، في حين تم قياس طيف الانبعاث ضمن مجال الطول الموجي 340–820nm [مزيد من التفاصيل مبين في المرجع 15]. أجريت قياسات مكونات العينات بوساطة طريقة المطيافية الكتلوية الأيونية الثانوية باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح (Hitachi SU–70).

النتائج والمناقشة

يبين الشكل (1) أطياف التألق الضوئي لعينات من أكسيد الزنك المرسبة على ركيزتين من الزجاج والسيلكون في شروط تنمية متماثلة عند درجة حرارة 100°C وبسماكة 211.5 nm.



الشكل (1). يبين أطياف التألق الضوئي عند درجة حرارة الغرفة لفيلمين من أكسيد الزنك تم تنميتهما بطريقة الترسيب الذري الطبقي على ركيزتين من الزجاج والسيلكون عند درجة حرارة 100°C.

تعتبر طريقة التألق الضوئي أداة توصيف تستخدم عادة من أجل أفلام نميت بتقنيات مختلفة[1, 2]. ويمكن ملاحظة التألق الضوئي فقط في الأفلام التي بنيتها البلورية جيدة، وأيضا عند تركيز منخفض نسبيا لحاملات الشحنة.

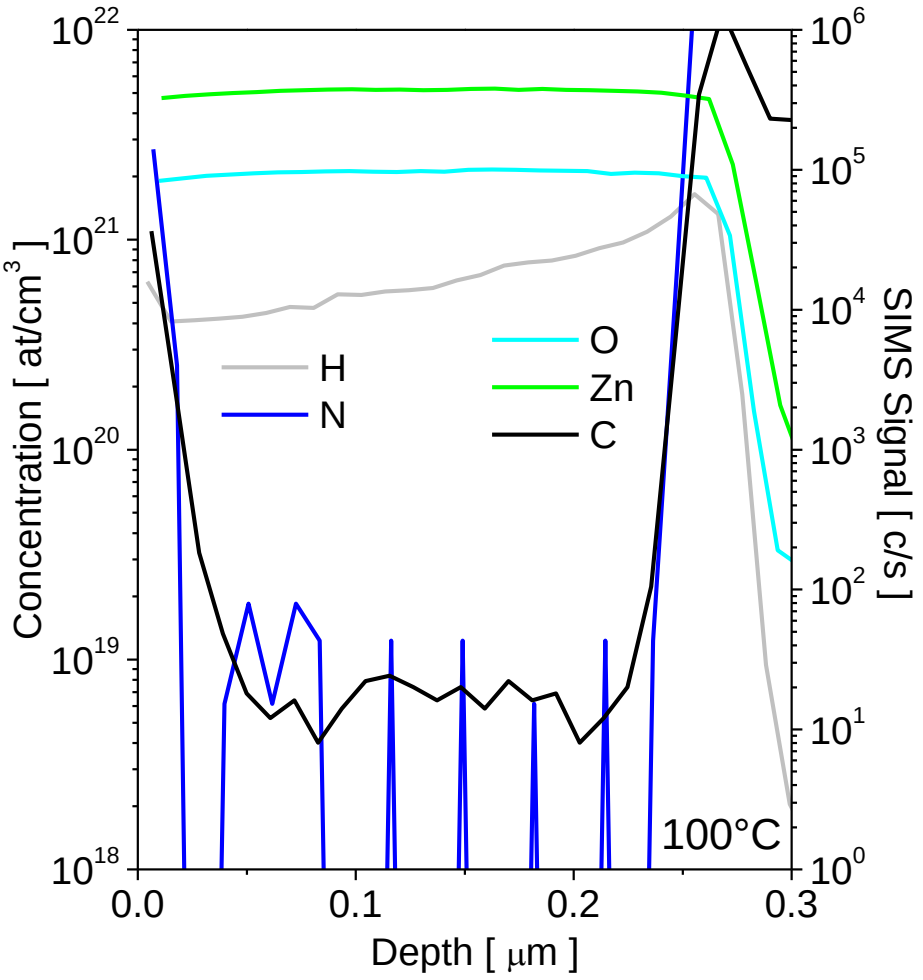
وكما ذكرنا سابقا، أكسيد الزنك يملك قيمة كبيرة غير عادية لطاقة الارتباط الأكسيتونية المرتفعة، التي هي أكبر بمرتين من قيمة kT عند درجة حرارة الغرفة. إذن، يمكن ملاحظة الأكسيتونات الحرة للتألق الضوئي في أكسيد الزنك حتى درجة حرارة الغرفة [10]. وعند درجة حرارة منخفضة ، تتوضع الأكسيتونات عادة، بوساطة المصائد، في سويات الشوائب (في أكسيد الزنك تكون سويات الشوائب، على الأغلب، شوائب مانحة). من جهة أخرى، يؤدي ملاحظة حرف التألق الضوئي إلى الكشف عن الجودة العالية للأفلام المدروسة.

نود أن نذكر هنا أن جميع أفلام أكسيد الزنك التي تم الحصول عليها من مصدر ديتيل الزنك DEZn أظهرت حرف التألق الضوئي الأزرق اكسيتوني المنشأ. وقد لوحظ ذلك عند درجة حرارة الغرفة دون أي معالجة للعينة بعد التنمية، وهو مؤشر على انخفاض كفاءة عمليات أوجيه وبالتالي الحصول على نوعية جيدة لعينات أكسيد الزنك. يمكن ملاحظة أن العصابة العريضة للعيب المرتبط بالتألق (الذروة عند حوالي 382nm على ركيزة من السيلكون و390nm على ركيزة من الزجاج) تتناقص في الشدة، كما هو مبين بالفعل من أجل أفلام رقيقة من أكسيد الزنك نميت بوساطة الترسيب الذري الطبقي عند شروط مختلفة قليلا [11]. إضافة إلى ذلك، يترافق مع هذا الانخفاض في الشدة انزياح للذروة نحو منطقة الانبعاثات العميقة الحمراء. ننسب هذه الحقيقة إلى تركيز منخفض للعيوب الأصلية الأعمق في طبقة أكسيد الزنك. وبغض النظر عن حرف التألق الضوئي، لاحظنا أيضا عيب عميق وعريض في المنطقة الطيفية (600 −750 nm) يرتبط بالعصابة (الشكل 1). وهذه العصابة هي بسبب تداخل اثنين أو ثلاثة من العيوب المتعلقة بالعصابات: تألق ضوئي أصفر، وتألق ضوئي أحمر، وتألق ضوئي أخضر. ومنشأ هذه العصابات لا يزال موضوع قيد البحث. فعلى سبيل المثال، كانت العصابة الخضراء تنسب سابقا إلى شوائب النحاس ولكن الآن ترتبط إلى حد ما بفجوات الأوكسجين [19−16 ,13]. ومع ذلك، هناك بعض المؤشرات التي تربط التألق الضوئي الأخضر مع فجوات الزنك. يمكن دعم هذا الاقتراح من خلال المعطيات الواردة في الجدول 1(تم استنتاج القيم من المنحني مباشرة)، الذي يعطي وجهة نظر حول تحليل مكونات الطبقات المدروسة ويشير إلى أن العينات المنماة تكشف عن فائض واضح من ذرات الأكسجين بالمقارنة مع تلك من ذرات الزنك.

الجدول 1. يبن مكونات تحليل عينة ZnO منماة على ركيزة من الزجاج.

عينة ZnO	ذرات الاكسجين	ذرات الزنك	ذرات الكربون	ذرات الأزوت	ذرات الهيدروجين
درجة حرارة التنمية	O	Zn	C	N	H
100°C	1×10^{22}	3.4×10^{22}	10^{21}	2.7×10^{22}	6.3×10^{21}

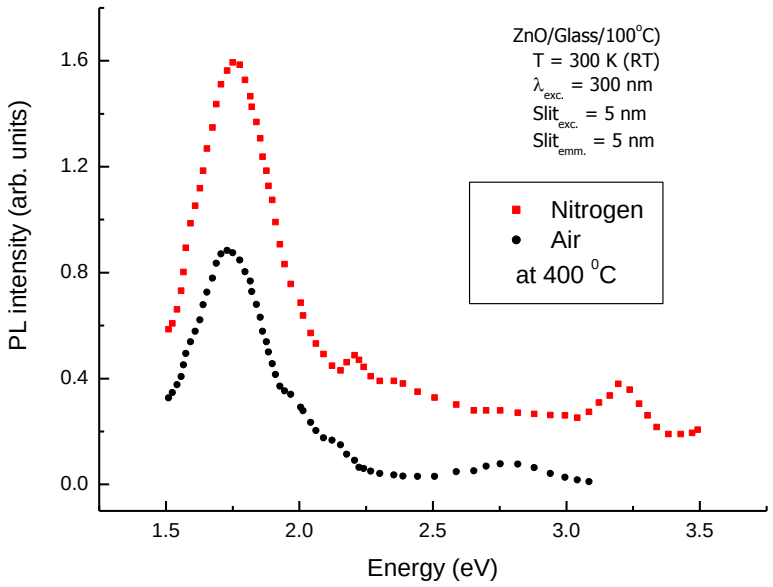
يلاحظ من الجدول (1) أن تركيز الكربون والنيتروجين (من المرجح جزيئات N_2) كبير أثناء عمليات تطهير حجرة التنمية بغاز حيادي لمدة محددة. وتأثيرها على الخواص الكهربائية لأكسيد الزنك لا يزال موضوعا للمناقشة. والعيوب الأصلية الأكثر أهمية، والتي تؤثر على الخواص الكهربائية والضوئية لأكسيد الزنك، هي الزنك والأكسجين البيني وفراغات الزنك والأكسجين. الهيدروجين بدوره هو مانح ضحل في أكسيد الزنك [6 ,5 ,1].



الشكل 2. يبين مقطع طيفي لمساهمات وتراكيز جميع مكونات العناصر المشاركة في عينة ZnO المنماة على ركيزة من الزجاج عند درجة حرارة 100°C بوساطة طريقة المطيافية الكتلوية الأيونية الثانوية ((Secondary Ion Mass Spectroscopy (SIMS)).

نلاحظ أن تركيز الهيدروجين في العينة من مرتبة 6.3×10^{21} cm^{-3} (انظر الشكل (2) و الجدول (1)). ويمكن أن تكون مندمجة في فيلم أكسيد الزنك أثناء عملية التنمية (جذر OH من مجموعة مصادر الماء) أو مباشرة من الهواء. إن الحد من كمية ذرات الهيدروجين في تركيب العينة له أهمية خاصة عندما يكون التركيز المنخفض مطلوب. هذه النتيجة تعني أيضا أن بعض السويات المانحة الضحلة الأخرى، وليس الهيدروجين، تسيطر في العينات المنماة عند درجات حرارة مرتفعة.

أجريت عملية التسخين لعينة ZnO المنماة على ركيزة من الزجاج عند درجة حرارة 400 °C في جو من الأزوت N_2 لمدة نصف ساعة ، مما تسبب في انزياح أكبر للعيوب المتعلقة بذروات التألق الضوئي نحو منطقة الانبعاثات الحمراء العميقة. هذا المفعول مبين في الشكل (3). وفي الوقت نفسه، أصبح التألق الضوئي الأخضر أكثر شدة.



الشكل 3. يبين أطياف التألق الضوئي لعينة ZnO المنماة على ركيزة من الزجاج عند درجة حرارة 400 °C في الهواء وفي جو من الأزوت N_2 لمدة نصف ساعة.

فيما يتعلق بالاقتراحات الواردة في الأبحاث [15–18] ، كثافة ذروة التألق الضوئي الأخضر بعد التسخين في جو N_2 قد تحدث ما يسمى نقص الأكسجين في عينات أكسيد الزنك [16] وتنشأ من شواغر الأكسجين غير المتكافئة: إما منفردة [17, 18]، أو مضاعفة مشحونة [19].

كما هو الأمر في حالة الخصائص الضوئية لاحظنا أيضا تغييرات كبيرة في البارامترات الكهربائية لعينة من أكسيد الزنك بعد تسخينها في جو N_2 . يبين الجدول (2) البارامترات الكهربائية لعينة أكسيد الزنك قبل وبعد التسخين في جو من النيتروجين. كما نلاحظ، فإن التسخين الطويل يؤدي اختزال كبير لتركيز الإلكترونات (لا يظهر هذا التأثير هنا). ثانيا، التسخين في شروط النيتروجين لمدة 30 دقيقة تم تطبيقها من أجل مقارنة تأثير البيئات الأكسجينية والأزوتية على البارامترات الكهربائية لعينات أكسيد الزنك كما هو مبين في الجدول 2، التسخين في N_2 يسبب انخفاضا أصغر للتركيز *n* لنفس العملية التي نفذت في الهواء. في نفس الوقت، نلاحظ زيادة واضحة في حركية حاملات الشحنة، التي قد تشير إلى أن التسخين في جو N_2 يؤدي إلى انخفاض عدد العيوب الأصلية في طبقات أكسيد الزنك.

الجدول 2. يبين نتائج قياسات الوسائط الكهربائية بوساطة مفعول هول لأفلام رقيقة من أكسيد الزنك قبل وبعد التسخين في جو من النيتروجين.

العينة	التركيز n [cm^{-3}]	الحركية μ[cm^2/Vs]	الناقلية [$\Omega^{-1}cm^{-1}$]	المقاومة ρ[Ω.cm]	نوع حاملات الشحنة
	3.7×10^{18}	3.79	2.246732	0.445091	n
التسخين في جو من الأزوت لمدة نصف ساعة عند 400°C	2.63×10^{15}	69.93	0.029467	33.936758	n

من المرجح أن يكون التكافؤ الجيد (نسبة الأكسجين إلى الزنك) واحدا من الأسباب الهامة لزيادة حركية حاملات الشحنة الحرة في العينات بعد المعالجة بالتسخين. فمن أجل بارمترات تنمية معينة، تتلاشى الحركية من أجل تركيز منخفض n ، مما يشير إلى وجود ظاهرة تعويض ذاتية في الأفلام المنماة عند درجات حرارة أقل [10, 15, 20]. وفي مثل هذه الحالة، تناقص الحركية هو نتيجة لزيادة تركيز الإلكترونات والثقوب في وقت واحد. من ناحية أخرى، يمكن ملاحظة ازدياد الحركية مع تناقص تركيز حاملات الشحنة (تناقص عدد العيوب الأصلية في طبقة أكسيد الزنك). الناقلية الكهربائية تكبر بشكل أسرع من تركيز حاملات الشحنة، التي يمكن أن تنظم في مجال واسع من n –10^{15}) ($10^{20}cm^{-3}$ عن طريق ضبط درجة حرارة الترسيب [10, 15]. هذا يجعل لأفلام أكسيد الزنك المدروسة مستقبلا هاما جدا للعديد من التطبيقات، بما في ذلك الأكاسيد الناقلة الشفافة ((transparent conductive oxides (TCOs) [15, 16, 21].

الاستنتاجات والتوصيات:

أظهرنا في هذه البحث، أن الخواص الكهربائية والضوئية لأفلام أكسيد الزنك المنماة في درجات حرارة منخفضة بواسطة الترسيب الذري الطبقي يمكن التحكم بها بالاعتماد على التطبيقات المستقبلية لهذه الأفلام (فقط من خلال تعديل بارامترات النمو الأساسية مثل درجة حرارة الترسيب وجرعات المصادر). كما أن تحليل مكوناتها، جنبا إلى جنب مع الدراسات الكهربائية والضوئية بعد التسخين في جو من الأزوت N_2، أشار إلى احتمال نوع مسيطر من العيوب الأصلية في أفلام أكسيد الزنك المنماة. أهم ثلاثة عيوب تلك هي: فجوات الأكسجين (المسئولة عن إصدار الأخضر)، وذرات الأكسجين في المواقع البينية (إصدار في منطقة البرتقالي– الأحمر) والزنك البيني (إعطاء قمة التألق الضوئي في مجال أحمر عميق).

نتج عن التسخين في جو N_2 تناقص كبير في تركيز الإلكترونات الحرة (وصل إلى حد أربع مراتب) وانزياح إلى طاقة منخفضة للعيب المرتبط بذروة التألق الضوئي، ومع ذلك، تزداد الحركية نتيجة التسخين. ولذلك، فإننا نعتبر أن إما آلية التعويض الذاتي أو عدد أقل من العيوب المسئولة عن تناقص التركيز n.

لاحظنا أيضا أن ذرات الهيدروجين في عينات أكسيد الزنك لا تسيطر على الخصائص الكهربائية بازدياد تركيز الإلكترونات مع تناقص مساهمة الهيدروجين في الطبقات المنماة.

وأخيرا، فإن أفلام أكسيد الزنك التي تم الحصول عليها ببارامترات كهربائية جيدة قد يكون لها العديد من التطبيقات في مجال الالكترونيات الحديثة والإلكترونيات الضوئية، مثل الترانزستورات الرقيقة (TFTS) وغيرها من الأجهزة التي تتطلب مجموعة حرارية منخفضة بشدة (متصلات المواد العضوية PN/ أكسيد الزنك).

المراجع:

[1] CAN, M. MUSA; SHAH, S. ISMAT; DOTY, F.M; HAUGHN, R. C; FIRAT, T. *Electrical and optical properties of point defects in ZnO thin films,* J. Phys. D: Appl. Phys. 45, 2012, pp.1-11.

[2] ÖZGÜR, Ü; ALIVOV, YA. I.; LIU, C; TEKE, A; RESHCHIKOV, M. A; DOGAN, S; AVRUTIN, V; CHO, S.-J; MORKOÇ H. *A comprehensive review of ZnO materials and devices*, Journal of Applied Physics **98**(4), 2005, p. 041301.

[3] KLINGSHIRN C. *ZnO: from basics towards applications*, Physica Status Solidi (b) **244**(9), 2007, pp. 3027–3073.

[4] NORTON D.P; HEO Y.W; IVILL M.P; IP K; PEARTON S.J; CHISHOLM M.F; STEINER T. *ZnO: growth, doping and processing,* Materials Today **7**(6), 2004, pp. 34–40.

[5] PEARTON S.J; NORTON D.P; IP K; HEO Y.W; STEINER T. *Recent progress in processing and properties of ZnO*, Superlattices and Microstructures **34**(1–2), 2003, pp. 3–32.

[6] ALVIN SHI G; SABOKTAKIN M; STAVOLA M; PEARTON S.J. *"Hidden hydrogen" in as-grown ZnO*, Applied Physics Letters **85**(23), 2004, pp. 5601–5603.

[7] SEUNG YEOP MYONG, SANG IL PARK, KOENG SU LIM. *Improvement of electrical stability of polycrystalline ZnO thin films via intentional post-deposition hydrogen doping*, Thin Solid Films **513**(1–2), 2006, pp. 148–151.

[8] VAN DE WALLE C.G. *Hydrogen as a cause of doping in zinc oxide*, Physical Review Letters **85**(5), 2000, pp. 1012–1015.

[9] KRAJEWSKI T; GUZIEWICZ E; GODLEWSKI M; WACHNICKI Ł; KOWALIK I.A; WÓJCIK-GŁODOWSKA A; ŁUKASIEWICZ M; KOPALKO K; OSINNIY V; GUZIEWICZ M. *The influence of growth temperature and precursors' doses on electrical parameters of ZnO thin films grown by atomic layer deposition technique*, Microelectronics Journal **40**(2), 2009, pp. 293–295.

[10] GODLEWSKI M; GUZIEWICZ E; SZADE J; WÓJCIK-GŁODOWSKA A; WACHNICKI Ł; KRAJEWSKI T; KOPALKO K; JAKIEŁA R; YATSUNENKO S; PRZEŹDZIECKA E; KRUSZEWSKI P; HUBY N; TALLARIDA G; FERRARI S. *Vertically stacked non-volatile memory devices – material considerations*, Microelectronic Engineering **85**(12), 2008, pp. 2434–2438.

[11] ŁUKA G; KRAJEWSKI T; WACHNICKI Ł; SZCZEPANIK A; FIDELUS J.D; SZCZERBAKOW A; ŁUSAKOWSKA E; KOPALKO K; GUZIEWICZ E; GODLEWSKI M. *Hybrid organic/ZnO p-n junctions with n-type ZnO grown by atomic layer deposition*, Acta Physica Polonica A **114**(5), 2008, pp. 1229–1234.

[12] TRIBOULET R; PERRIÈRE J. *Epitaxial growth of ZnO films*, Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials **47**(2–3), 2003, pp. 65–138.

[13] SUNTOLA T. *Handbook of Crystal Growth*, Part 3b – Growth Mechanisms and Dynamics, D.T.J Hurle, Elsevier, Amsterdam, Lausanne, New York 1994, pp. 605–663.

[14] VAN DER PAUW L.J. *A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape*, Philips Research Reports **13**(1), 1958, pp. 1–9.

[15] GUZIEWICZ E; KOWALIK I.A; GODLEWSKI M; KOPALKO K; OSINNIY V; WÓJCIK A; YATSUNENKO S; ŁUSAKOWSKA E; PASZKOWICZ W; GUZIEWICZ M. *Extremely low temperature growth of ZnO by atomic layer deposition*, Journal of Applied Physics **103**(3), 2008, p. 033515.

[16] TADATSUGU MINAMI. *Present status of transparent conducting oxide thin-film development for indium-tin oxide (ITO) substitutes*, Thin Solid Films **516**(17), 2008, pp. 5822–5828.

[17] TEKE A; ÖZGÜR Ü; DOGAN S; GU X; MORKOÇ H; NEMETH B; NAUSE J; EVERITT H.O. *Excitonic fine structure and recombination dynamics in single-crystalline ZnO*, Physical Review B **70**(19), 2004, p. 195207.

[18] TAM K.H; CHEUNG C.K; LEUNG Y.H; DJURIŠIĆ A.B; LING C.C; BELING C.D; FUNG S; KWOK W.M; CHAN W.K; PHILLIPS D.L; DING L; GE W.K. *Defects in ZnO nanorods prepared by a hydrothermal method*, Journal of Physical Chemistry B **110**(42), 2006, pp. 20865–20871.

[19] GOMI M; OOHIRA N; OZAKI K; KOYANO M. *Photoluminescent and structural properties of precipitated ZnO fine particles*, Japanese Journal of Applied Physics **42**(2A), 2003, pp. 481–485.

[20] HUBY N; FERRARI S; GUZIEWICZ E; GODLEWSKI M; OSINNIY V. *Electrical behavior of zinc oxide layers grown by low temperature atomic layer deposition*, Applied Physics Letters **92**(2), 2008, p. 023502.

[21] GUZIEWICZ E; GODLEWSKI M; KRAJEWSKI T; WACHNICKI Ł; SZCZEPANIK A; KOPALKO K; WÓJCIK- GŁODOWSKA A; PRZEŹDZIECKA E; PASZKOWICZ W; ŁUSAKOWSKA E; KRUSZEWSKI P; HUBY N; TALLARIDA G; FERRARI S. *ZnO grown by atomic layer deposition – a material for transparent electronics and organic heterojunctions*, Journal of Applied Physics **105**(12), 2009,p. 122413.