مجلة الدراسات التربوية والعلمية - كلية التربية - الجامعة العراقية
العدد السابع والعشرون - المجلد الحادي عشر - علوم الفيزياء - آيار 2026 م
doi.org/10.52866/esj.2026.11.27.01

دراسة الخواص البصرية لأغشية خماسي أوكسيد الفاناديوم (V_2O_5) المحضرة بطريقة الرش الكيميائي الحراري.

ضحى احمد سالم[1*] ، غزوان غازي علي[2*]
[2g1]. قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة الموصل، العراق
البحث مستل من رسالة الباحث الأول
E-mail[1] : doha.24esp47@student.uomosul.edu.iq
E-mail[2] : dr.ghazwan39@uomosul.edu.iq

مستخلص:

تمت دراسة الخصائص البصرية لأغشية (V_2O_5) النقية وبتراكيز مولارية وهي (0.1,0.3,0.5) مول والمترسبة على قواعد من السلكون المسامي ضمن مدى الأطوال الموجية nm(300–900) باستخدام تقنية الرش الكيميائي الحراري. وأظهرت النتائج زيادة الامتصاصية عند زيادة نسب التركيز بأوكسيد الفاناديوم وارتفاع معامل الامتصاص ولوحظ انخفاض النفاذية مع زيادة التركيز وانخفاض فجوة الطاقة من eV (2.51–2.63) عند زيادة التركيز كذلك زيادة في قيم معامل الخمود والانعكاسية عند زيادة التركيز . وتشير هذه التحسينات في الخصائص البصرية إلى إمكانية استخدام هذه الأغشية في تطبيقات الأجهزة الإلكترونية الضوئية والخلايا الشمسية.

الكلمات المفتاحية: اغشية رقيقة، أوكسيد الفاناديوم ، الخواص البصرية، الرش الكيميائي الحراري .

Study of the Optical Properties of Vanadium Pentoxide (V_2O_5) Thin Films Prepared by the Chemical Spray Pyrolysis Method

Duha Ahmed Salim *[1] , Ghazwan Ghazi Ali*[2]
1,2-Department of Physics, College of Education for Pure Sciences, Mosul University, Iraq.
This paper is extracted from the first author's thesis

Abstract :

The optical properties of pure V_2O_5 films at different concentrations (0.1, 0.3, and 0.5 Mool) deposited on porous silicon substrates were investigated within the 300–900 nm wavelength range using thermochemical spraying. The results showed increased absorbance and a higher absorption coefficient with increasing vanadium oxide concentration. A decrease in transmittance and a reduction in the energy gap (2.51–2.63 eV) were observed with increasing concentration, as were increases in the extinction coefficient and reflectivity. These improvements in optical properties suggest the potential use of these films in optoelectronic devices and solar cells.

Keywords: Thin films, vanadium oxide, optical properties, chemical spray pyrolysis.

1- مقدمة Introduction

ان الأغشية الرقيقة هي طبقات من مواد معينة ذات سُمك نانوي يتراوح ما بين (1–100) nm [1]، تترسب عادةً على قواعد مختلفة مثل الزجاج، السيليكون، الكوارتز ، بهدف تحسين وتطوير الخصائص الفيزيائية لهذه المواد [2]. وان الأغشية الرقيقة يمكن ان تحضر باستخدام عدة طرائق، مثل الترسيب بالليزر النبضي(PLD) والرش الكيميائي الحراري (Chemical Spray Pyrolysis)، والترسيب بالحمام الكيميائي (Chemical Bath Deposition)، وكذلك طريقة السول–جيل (Sol–Gel) [3]. اعتمد هذا البحث على تقنية الترسيب بالرش الكيميائي الحراري وهي تقنية اكتسبت أهمية كبيرة خلال العقود الأخيرة نظرًا لفعاليتها ومرونتها في تصنيع الاغشية الرقيقة استعمل الباحثان (Hottel and Anger) هذه التقنية لأول مرة في عام 1959 عندما حضَّرا غشاء نحاسيّاً أسودَ على قاعدة من الألومنيوم [4]. تعتبر هذه الطريقة من أهم وأشهر طرق الترسيب الكيميائي في تحضير الأغشية الرقيقة بما في ذلك أغشية أوكسيد الفلز لما تتمتع به هذه الطريقة من مزايا [5]. في هذا البحث تم استخدام مادة خماسي اوكسيد الفاناديوم والذي يتميز بكونه من المواد التي تمتلك حالات أكسدة متعددة وبنى بلورية متنوعة، مما يمنحها خصائص كهربائية وبصرية مميزة تؤهلها للاستخدام في طيف واسع من التطبيقات. وخلال العقود الثلاثة الماضية، حظيت هذه المواد باهتمام بحثي كبير لفهم خصائصها الأساسية واستكشاف إمكاناتها التطبيقية في مجالات متعددة، مثل البطاريات، وتحليل الماء، والنوافذ الذكية، والمكثفات الفائقة، وأجهزة الاستشعار وغيرها. يُعد خماسي أوكسيد الفاناديوم (V_2O_5) أكثر أكاسيد الفاناديوم استقرارًا، لكونه يمتلك أعلى نسبة من الأوكسجين ضمن نظام الفاناديوم–الأوكسجين. وتجعله خصائصه الفريدة، مثل البنية الطبقية، وفجوة النطاق المباشرة الواقعة ضمن مدى الضوء المرئي، والاستقرار الكيميائي والحراري العالي، والأمان الكهروكيميائي، فضلًا عن انخفاض كلفته وسهولة تحضيره، مادة واعدة في تطبيقات تحويل وتخزين الطاقة الكهروكيميائية، والعمل التحفيزي، والخلايا الشمسية، ومستشعرات الغاز وغيرها [6]. وفي هذا البحث تم استخدام قواعد من السلكون المسامي بسبب امتلاكه مساحة سطحية عالية، تمنحه قدرة متميزة على امتصاص واحتجاز الجزيئات المختلفة، مما يجعله مادة واعدة في العديد من التطبيقات البيولوجية والكيميائية. كما أن الخصائص الفريدة للسيليكون المسامي، مثل المساحة السطحية الكبيرة، وإمكانية التحكم في أحجام المسام، وكيمياء السطح الفعالة، إلى جانب توافقه العالي مع تقنيات تصنيع السيليكون الدقيقة التقليدية، قد فتحت آفاقًا بحثية واسعة تجاوزت حدود الإلكترونيات الضوئية. ونتيجة لذلك، برزت تطبيقات متعددة في مجالات الاستشعار، والبصريات، والإلكترونيات الطبية الحيوية[7].

2- الجانب النظري Theoretical aspect

تتميز الخصائص البصرية لأي مادة اعتماداً على ما يحدث للضوء عند سقوطه عليها كالأمتصاصية (Absorptin)، والنفاذية (Transmission)، والأنعكاسية (Reflectance)، ومعامل الامتصاص (Absorption coefficient)، فالنفاذية (T) (Trans-

mittance) تعرف بانها النسبة بين الطاقة الضوئية التي تنفذ من السطح الى الطاقة الضوئية الساقطة على السطح، وترتبط بعلاقة مع الامتصاصية كما موضح بالعلاقة ادناه [8،9]:

$$T = e^{-2.303A} \qquad (1)$$

حيث ان : T النفاذية؛ A الامتصاصة.

ويحصل إمتصاص المادة للضوء عند سطح نموذج الاغشية أو في داخله، وتعرف الإمتصاصية (A) بأنها النسبة بين شدة الإشعاع الذي يمتصه الغشاء(I_A) إلى شدة الإشعاع الساقط على الغشاء (I_0)، وهي كمية خالية من وحدات القياس، وتعطى بالعلاقة الآتية [10،11]:

$$A = \frac{I_A}{I_o} \qquad (2)$$

حيث ان: A الامتصاصية؛ I_A شدة الإشعاع الذي يمتصه الغشاء؛ I_0 شدة الإشعاع الساقط على الغشاء.

أما معامل الامتصاص (α) الذي يقاس بوحدة (cm^{-1}) يمكن حسابه بالمعادلة الاتية[10]:

$$\alpha = (2.303)\frac{A}{t} \qquad (3)$$

حيث ان: α معامل الامتصاص؛ A الامتصاصية؛ t سمك الغشاء.

اما معامل الخمود (k) فيحسب من المعادلة الاتية [8]:

$$K = \frac{\alpha\ \lambda}{4\ \pi} \qquad (4)$$

حيث ان: k معامل الخمود؛ α معامل الامتصاص؛ λ الطول الموجي.

كما وقد تم حساب فجوة الطاقة البصرية للانتقالات الالكترونية المباشرة المسموحة للاغشية المحضرة بتطبيق المعادلة (4) والتي عندها تكون قيمة الثابت 1/ 2 =r ويمكن كتابتها بالشكل التالي[12]:

$$(\alpha hv) = B(hv - E_g)^r \qquad (5)$$

حيث ان: α: معامل الامتصاص؛ B: ثابت؛ Eg: فجوة الطاقة البصرية؛ r: ثابت يأخذ القيمتين ½ او 2 ويعتمد على نوع الانتقالات الالكترونية؛ h: ثابت بلانك.

تعرف الانعكاسية (Reflectance) بأنها: شدة الضوء الذي يرتد عن سطح المادة، بالنسبة إلى شدة الضوء؛ وتم الحصول على الانعكاسية خلال قانون حفظ الطاقة، والذي يجمع أيضًا بين النفاذية والامتصاص، حيث تم الحصول على ظاهرة الانعكاس (الداخلي والخارجي) من أسطح المادة عند طول موجة الشعاع، والذي يكون أكبر من البعد البلوري للمادة الساقطة على الشعاع خلال المعادلة التالية [11] :

$$R = 1 - (A + T) \qquad (6)$$

حيث ان: الانعكاسية؛ A الامتصاصية؛ T النفاذية.

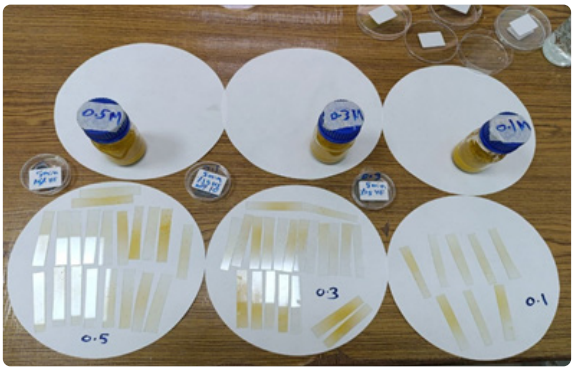
3- الجزء العملي Experimental Work

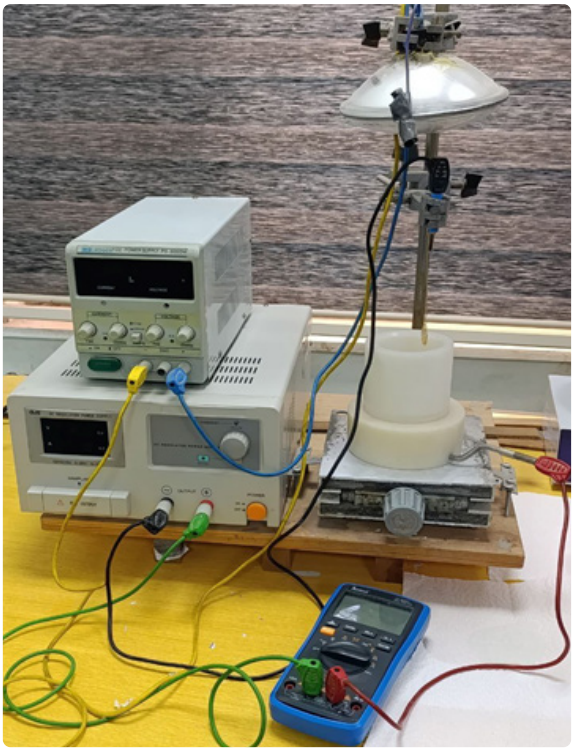
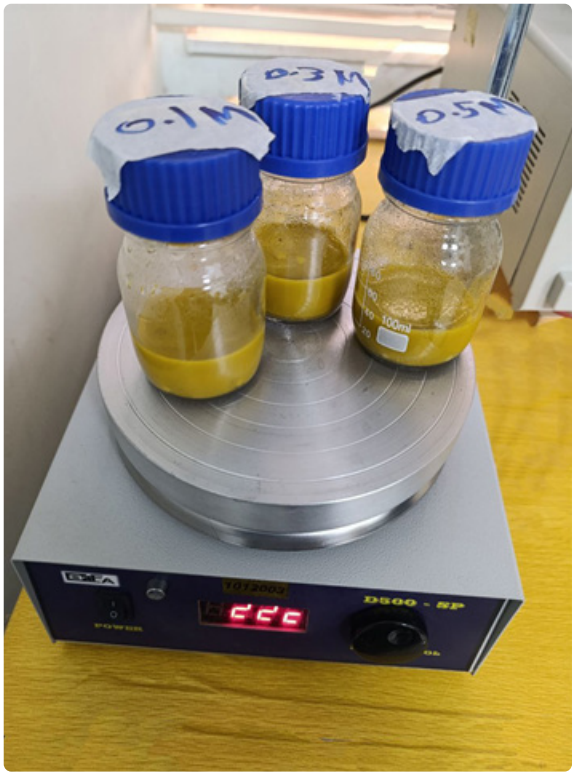
من المهم الانتباه عندما نحضر أغشية رقيقة إلى أهمية تنظيف الركائز والعمل ضمن جو معقم، كما أن اختيار نوعية الركيزة يعد من بين العوامل التي تساهم في نجاح عملية ترسيب المحلول على شكل طبقات رقيقة، حيث اعتمدنا في بحثنا هذا على استخدام – ركائز من السلكون المسامي حيث تم تنظيف القواعد باستخدام الماء المقطّر للتخلص من الشوائب التي تؤثر في خواص الأغشية المحضرة . وبعد الانتهاء من عملية التنضيف. تم

وزن التراكيز من خماسي أوكسيد الفاناديوم (V_2O_5)، بنسب M(0.1,0.3.0.5) ، وسبب اختيار هذه النسب هو لأجل عمل بحث جديد وبنسب جديدة. وتم وضعها بـ (beaker) وتم إضافة ماء لا أيوني بمقدار (200)ml بدرجة حرارة (37)C^o، وتم معالجة المزيج بجهاز (Ultrasonic) لمدة (3)h لضمان عدم تكتل المادة، بعدها رش المحلول بجهاز الرش الحراري على ركائز من السلكون المسامي بعد ضبط جهاز الرش على درجة حرارة (300)C^o، ولزمن رش (5) sec و زمن توقف (5) sec بعدها أجرينا الفحوصات البصرية على العينات. بعد اكتمال عملية التنظيف للقواعد يتم تهيأتها للترسيب وذلك من خلال وضعها على سطح السخان الكهربائي والذي يتم تشغيله حسب شروط التشغيل البيئة ادناه والمبينة في الجدول (1)، للحصول على اغشية رقيقة متجانسة، ومتماسكة مع الركيزة .

الجدول (1): شروط التشغيل الخاصة بمنظومة الرش الكيميائي الحراري.

شروط التشغيل	
درجة الحرارة	300 C^o
الضغط	6 bar
المسافة بين النوزل والقاعدة	25 cm
زمن الرش وزمن التوقف	رش (5sec) / توقف (5 sec)
عدد الرشات	10 رشات



الشكل (1) ملخص صور للجانب العملي .

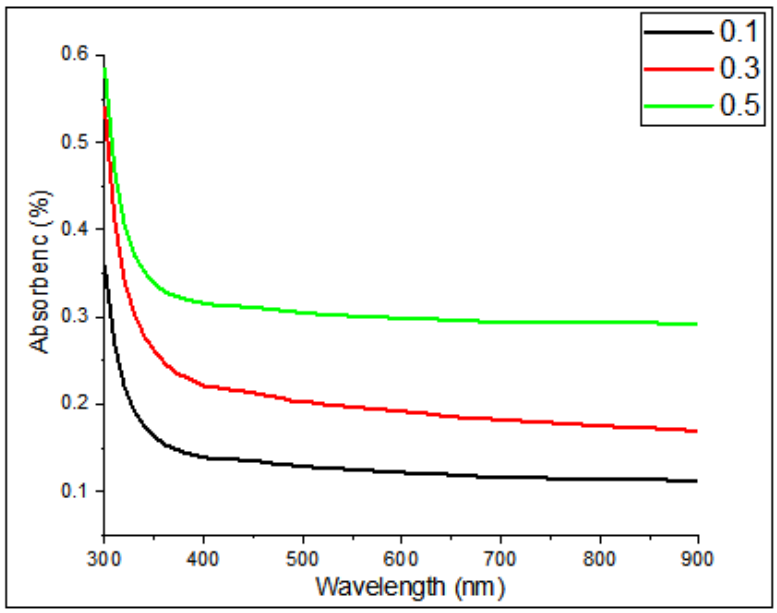
4- النتائج والمناقشة
(Results and discussion)

4-1 الامتصاصية :Absorbance

في هذا البحث تم استخدام جهاز مطياف بصري من نوع (UV-1800) UV- Visible spec-trophotometer المجهز من قبل شركة (Shimadzu) اليابانية. وهو يقيس طيف الامتصاصية وطيف النفاذية، ضمن مدى الأطوال الموجية من nm (200-1100) وهو جهاز من النوع ذو الحزمتين، فهو يحتوي على مصدرين من شمعتين ضوئيتين

من الديتيريوم والتنكستن .

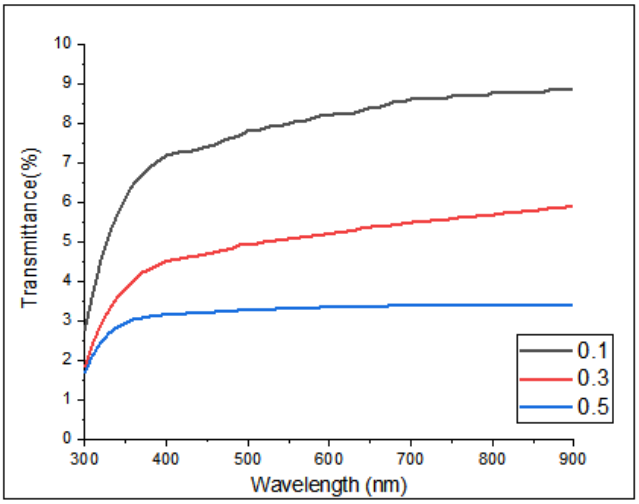
يبين الشكل (2) طيف الأمتصاصية كدالة للطول الموجي، لأغشية (V_2O_5) النقية وبتراكيز مختلفة وهي M(0.1,0.3,0.5) والمرسبة على قواعد من السلكون المسامي والمحضرة بطريقة الرش الكيميائي الحراري . يلاحظ من الشكل زيادة في الامتصاصية عند زيادة نسب التركيز كما يتبين ان الأمتصاصية تقل مع زيادة الطول الموجي، وهذا يعني ان قيمة الامتصاصية تتناسب طردياً مع نسب التركيز وعكسياً مع الطول الموجي، ويعزى ذلك الى المستويات الموضوعة التي تكونت بين حزمتي التكافؤ والتوصيل. وهذا يتفق مع الباحث [13] .



الشكل (2): طيف الأمتصاصية لأغشية (V_2O_5) النقية وبتراكيز مختلفة وهي M(0.1,0.3,0.5).

2-4 النفاذية : Transmittance

تمت دراسة طيف النفاذية لأغشية (V_2O_5) النقية وبتراكيز مختلفة وهي M(0.1,0.3,0.5) والمرسبة على قواعد من السلكون المسامي والمحضرة بطريقة الرش الكيميائي الحراري . ويوضح الشكل (3) مخطط لطيف النفاذية نسبة الى الطول الموجي، حيث تشكل فيها نسبة النفاذية لأغشية (V_2O_5) النقية بتركيز M(0.1) تفوق (9٪) ، وبعدها حصل تناقصاً في طيف النفاذية حيث وصلت قيمة النفاذية لأغشية (V_2O_5) النقية بتركيز M(0.5) الى حوالي (3٪) تقريباً وقد يعود ذلك الى زيادة سمك الغشاء بسبب زيادة نسب التركيز. [14] .

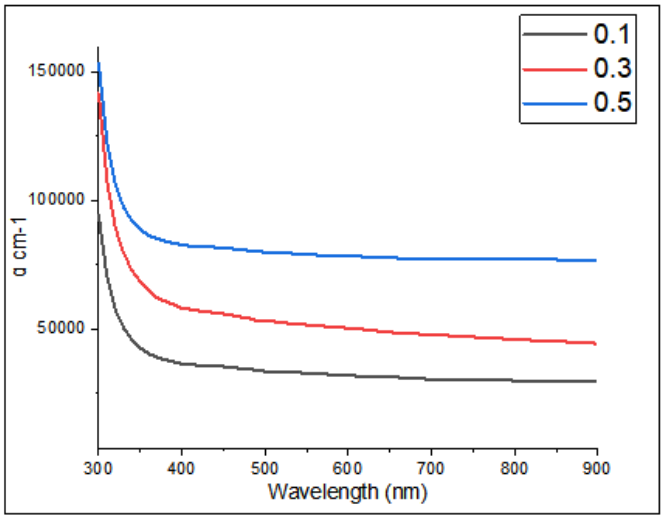


الشكل (3): طيف النفاذية لأغشية (V_2O_5) النقية وبتراكيز مختلفة وهي M(0.1,0.3,0.5).

3-4 معامل الامتصاص:

Absorption coefficient (α)

يبين الشكل (4) تغير معامل الامتصاص (α) مع الطول الموجي لأغشية (V_2O_5) النقية وبتراكيز مختلفة وهي M(0.1,0.3,0.5) والمرسبة على قواعد من السلكون المسامي والمحضرة بطريقة الرش الكيميائي الحراري . يلاحظ من الشكل ان معامل الامتصاص يسلك سلوكاً مشابها لطيف الامتصاصية وهذا يعود الى العلاقة بينهما حسب المعادلة (3)، ان معامل الأمتصاص يزداد عند زيادة نسب التركيز، حيث كانت اعلى قيمة لمعامل الامتصاص عند تركيز M(0.5) ، وتعزى الزيادة في معامل الامتصاص الى النقصان في فجوة الطاقة وحصول الانتقالات المباشرة. وهذا يتفق مع الباحث [15] .



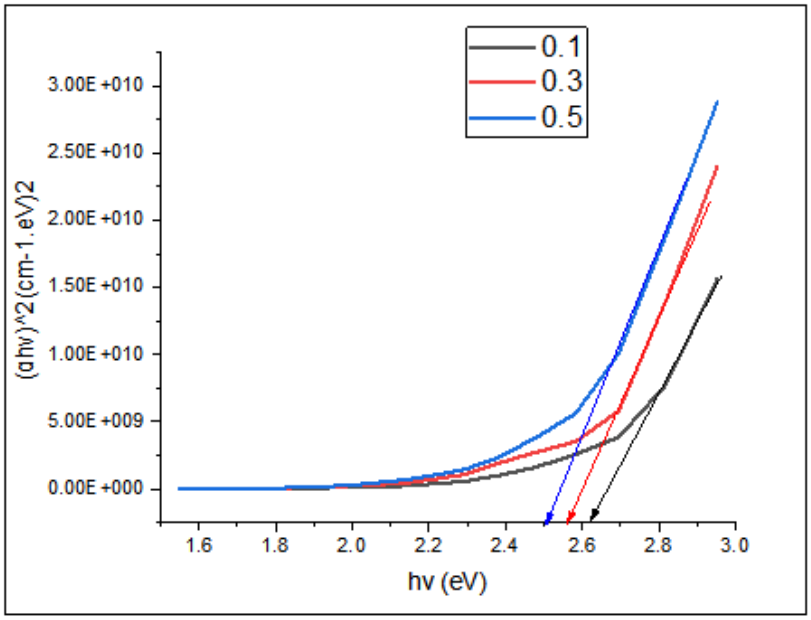
الشكل (4) معامل الامتصاص لأغشية (V_2O_5) النقية وبتراكيز مختلفة وهي M(0.1,0.3,0.5).

4-4 فجوة الطاقة : Energy Gap

حسبت فجوة الطاقة بأستخدام معادلة تاويس (Taus) ، يبين الشكل (5) الرسم البياني بين $(h\nu\alpha)^2$ على المحور العمودي وطاقة الفوتون $h\nu$(eV) على المحور الأفقي لأغشية (V_2O_5) النقية وبتراكيز مختلفة وهي M(0.1,0.3,0.5) والمرسبة على قواعد من السلكون المسامي والمحضرة بطريقة الرش الكيميائي الحراري . حيث لوحظ من خلال الشكل (5) ان فجوة الطاقة تنخفض عند التشويب، وتتراوح قيمها من ev(2.51 الى 2.63). كما موضح في الجدول(2) الذي يبين قيم فجوة الطاقة البصرية المباشرة ، وان سبب انخفاض فجوة الطاقة يعود الى زيادة نسب التركيز التي أدت بدورها الى ظهور مستويات ثانوية بين حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل، حيث مكنت الألكترونات من اشغال هذه المستويات عند انتقالها من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل وهذا يتفق مع الباحث [16] . هناك عدة عوامل تؤثر على قيم فجوة الطاقة ، من هذه العوامل هو نوع مادة الغشاء المحضر وكذلك طريقة التحضير وعملية التشويب، إضافة الى ذلك ان فجوة الطاقة تتأثر بظروف التحضير وكذلك بطبيعة البنية التركيبية للأغشية المحضرة ومدى انتظامها البلوري . وهذا يتفق مع الباحث [17] .

الجدول (2) قيم فجوة الطاقة لأغشية (V_2O_5) النقية وبتراكيز مختلفة وهي M(0.1,0.3,0.5).

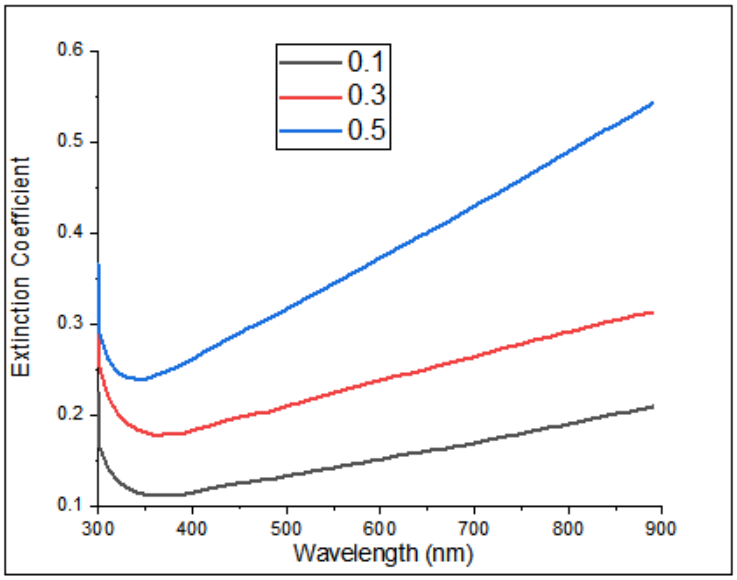
Sample	Energy gap(eV)
V_2O_5 (0.1)M	2.63
V_2O_5 (0.3)M	2.57
V_2O_5 (0.5)M	2.51



الشكل (5): قيم فجوة الطاقة لأغشية (V_2O_5) النقية وبتراكيز مختلفة وهي M(0.1,0.3,0.5).

4-5 **معامل الخمود** : Extinction Coefficient

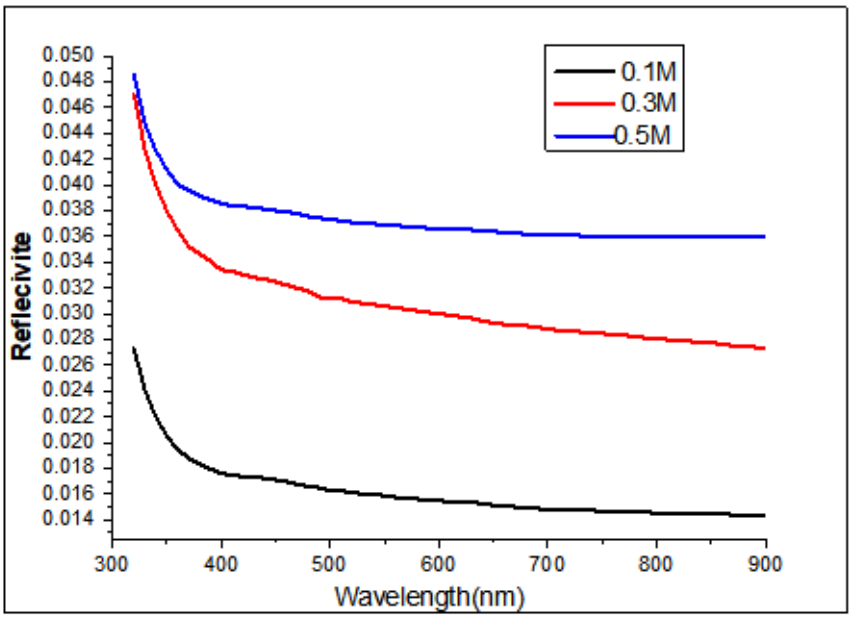
تم حساب معامل الخمود (K) لأغشية (V_2O_5) النقية وبتراكيز مختلفة وهي (0.1,0.3,0.5) M والمرسبة على قواعد من السلكون المسامي والمحضرة بطريقة الرش الكيميائي الحراري . يوضح الشكل (6) ان منحنيات معامل الخمود تتناقص في مدى الاطوال الموجية (300-350)nm ومن ثم تبدا هذه المنحنيات بالتزايد قليلاً نوعاً ما في مدى الاطوال الموجية (350-400)nm وبعدها تبدا هذه المنحنيات بالازدياد كثيرا حيث وصلت اعلى قيمة لمعامل الخمود عند تركيزM(0.5) ، الى اكثر من واحد. وهذا يبين لنا ان معامل الخمود يزداد عند التشويب أي ان التناسب بينهما طرديا وهذا يتفق مع الباحث [18] .



الشكل (6) معامل الخمود لأغشية (V_2O_5) النقية وبتراكيز مختلفة وهي M(0.1,0.3,0.5).

4-6 **الانعكاسية** Reflecivite

يوضح الشكل (7) تغير الإنعكاسية مع الطّول الموجي لأغشية (V_2O_5) النقية وبتراكيز مختلفة وهي M(0.1,0.3,0.5) والمرسبة على قواعد من السلكون المسامي والمحضرة بطريقة الرش الكيميائي الحراري . يظهر الشكل ان الانعكاسية تقل مع زيادة الطول الموجي حيث يظهر مؤشر الإنعكاسية سلوكا معتدلا في المناطق المرئية والقريبة من الأشعة تحت الحمراء بينما تكونعالية في المنطقة فوق البنفسجية (300-400)nm ، ولوحظ ايضا ان الإنعكاسية تزداد بزيادة نسب التركيز أي أنّ هناك تناسب طرديا بين قيم الإنعكاسية ونسب التركيز، وهذا يبين ان الانعكاسية تناسبا عكسيا بين مع الطول الموجي وطرديا مع زيادة نسب التركيز ، بلغت اعلى قيمة للأنعكاسية عند تركيز M(0.5) ، واقل انعكاسية عند عند تركيز M(0.1) وهذا يدل على ان زيادة التركيز أدت الى زيادة في الانعكاسية [19] .



الشكل (7) طيف الانعكاسية لأغشية (V_2O_5) النقية وبتراكيز مختلفة وهي (0.1,0.3,0.5)M.

الاستنتاجات :

1. أظهرت النتائج أن الأغشية المحضرة بينت زيادة في قيم الامتصاصية ومعامل الامتصاص عند زيادة نسب التركيز، مما يشير إلى تحسن في البنية البلورية .

2. على عكس الامتصاصية، انخفضت قيم النفاذية عند التشويب، حيث بلغت حوالي 3٪ للأغشية عند تركيز (0.5)M وهو ما يجعلها مناسبة لتطبيقات الكواشف البصرية.

3. بلغت فجوة الطاقة للغشاء عند تركيز (0.1)M 2.63 eV، بينما انخفضت عند تركيز (0.1)M إلى 2.51 eV.

4. تبينت زيادة في قيم الانعكاسية ومعامل الخمود عند زيادة نسب التركيز وهذا يعني زيادة في امتصاص الفوتونات.

5- المصادر Reference

[1] O. S. Heavens, "Thin Film physics", John Wiley and Sons Inc., New York, (1973).

[2] K. Seshan, Handbook of Thin Film Deposition Processes and Techniques, Norwich, N.Y. : Noyes Publications / William Andrew Pub., 2002.

[3] Wieder, Herman Harry. Intermetallic Semiconducting Films: International Series of Monographs in Semiconductors. Vol. 10. Elsevier, 2014.

[4] W. Bogaerts, A. Vanhaute and M. Pacolet," Absorber Surfaces And Durability of Solar heat Collectors",Luxembourg, Italy, (1 983).

[5] T. Schneller, R. Waser, M. Kosec and

(ZnO:Sn) Thin Films Prepared by Chemical Spray Pyrolysis," M.Sc. thesis, University of Diyala, Iraq. . (2012).

[13] V. Yelsani, N. Pothukanuri, U. B. Sontu, V. Yaraganji, and R. R. Musku Venkata, "Effect of annealing temperature on structural, morphological, optical and electrical properties of spray deposited V_2O_5 thin films," Materials Science (Medžiagotyra), vol. 25, no. 1, pp. 1–6, doi: 10.5755/j01.ms.25.1.18492. 2019,

[14] R. K. Jain and A. Khanna, "Structural, optical and electrical properties of crystalline V_2O_5 films deposited by thermal evaporation and effects of temperature on UV–vis and Raman spectra," Optik, vol. 144, pp. 271–280, , doi: 10.1016/j.ijleo.2017.06.104. 2017.

[15] A. Baltakesmez, C. Aykaç, and B. Güzelidir, "Phase transition and changing properties of nanostructured V_2O_5 thin films deposited by spray pyrolysis technique, as a function of tungsten dopant," Applied Physics A, vol. 125, no. 441, doi: 10.1007/s00339-019-2736-0.2019,.

[16] B. Priya, P. J. Arunima, and T. Kumar, "Structural, morphological and optical properties of V_2O_5 thin films for various device applications". in Growth and Characterization of Semiconductor Nanostructure for Device Applications, vol. 106. Singapore: Springer, pp. 1–18. 2023,

[17] Ravindra, N. M., Preethi Ganapathy, and Jinsoo Choi. "Energy gap–refractive

D. Payne," Chemical Solution Deposition of Functional Oxide Thin Film", Springer, New York,(2013).

[6] Hu, P., Hu, P., Vu, T. D., Li, M., Wang, S., Ke, Y.,. Long, Y. "Vanadium oxide: phase diagrams, structures, synthesis, and applications." Chemical Reviews, 123(8): 4353-4415,.(2023)

[7] Sailor, M. J. "Porous silicon in practice: preparation, characterization and applications", John Wiley & Sons,.(2012).

[8] A. M. H. Al-Alyan, S. J. Mohammed, and W. M. M. Amin. (2022) "Investigation of the structural, optical, and electrical characteristics of $SnO_{2x}(Bi_2O_3)_\gamma$ films and their sensing applications," Ph.D. dissertation, Coll. of Education for Pure Sciences, Tikrit Univ., p. 93. (2022)

[9] Babeva, T "Optical Thin Films and Structures: Design and Advanced Applications". Coatings, 10(11), 1140.2020) .).

[10].Khelladi, N. B., & Sari, N. E. C Optical properties of ZnO thin films prepared by Sol-gel method. In 2014 North African Workshop on Dielectic Materials for Photovoltaic Systems (NAWDMPV) (pp. 1-3). IEEE. . (2014).

[11].Benelmadjat, H.; Boudine, B. and Halimi Fabrication and Characterization of pure and Sn/Sb doped ZnO thin Films deposited by Sol-gel method. Optics & Laser Technology, 167(243). . (2009).

[12] Nour Mohammed Ali Al-Karkhi"-Study of Structural and Optical Properties of

index relations in semiconductors–An overview" Infrared physics & technology, 50.1, pp (21-29), (2007).

[18] A. A. Akl, "Thermal annealing effect on the crystallization and optical dispersion of sprayed V_2O_5 thin films," Journal of Physics and Chemistry of Solids, vol. 71, no. 2, pp. 223–229, 2010, doi: 10.1016/j.jpcs. 11.009. 2009.

[19] K. M. Shafeek, V. P. Athira, C. H. Raj Kishor, and P. M. Aneesh, "Structural and optical properties of V_2O_5 nanostructures grown by thermal decomposition technique". Applied Physics A, vol. 126, no. 586, doi: 10.1007/s00339-020-03770-5. 2020,