جامعة قاصدي مرباح ورقلة

كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الفيزياء

مذكرة مقدمة لنيل شهادة ماستر اكاديمي

تخصص فيزياء المواد

من اعداد الطالبة: بالحمو نور الايمان

تحت عنوان

دراسة الخصائص البصرية و الميكانيكية لأغشية رقيقة من أكسيد التيتانيوم Tio_2 المطعم بالصديوم Na بنسب (3% 5% 7% 9%) المحضرة بطريقة الترسيب الدوراني

نوقشت يوم :

أمام لجنة المناقشة المكونة من الأساتذة :

عاشوري عبد الرحيم	أستاذ التعليم العالي	رئيسا
بن مبروك لزهر	أستاذ التعليم العالي	مناقشا
الداوي حفصة	أستاذ محاضر ا	مشرفا

السنة الجامعية : 2027/2026

اهـــداء

بسم الله الرحمن الرحيم

إلى من كانا سببًا بعد الله في كل نجاح، ومن غمراني بحبهما ودعائهما، وبذلا الغالي والنفيس لأبلغ هذه المرحلة...
إلى والديَّ العزيزين، حفظهما الله وأدامهما تاجًا فوق رأسي.

إلى إخوتي الأعزاء، الذين كانوا خير سند وعون، وشاركوا معي لحظات التعب والأمل.

إلى صديقتي الوفية سندس، وإلى صديقتي الغالية عزيزة، شكرًا لصدق صداقتكما، ودعمكما المتواصل، وكلماتكما التي كانت تبعث في نفسي العزيمة والإصرار.

إلى أساتذتي الكرام، الذين أناروا لي دروب العلم، وغرسوا في نفسي حب المعرفة والبحث.

وإلى كل من كان له أثر طيب في رحلتي العلمية، ولو بكلمة تشجيع أو دعوة صادقة.

أهدي إليكم جميعًا هذا العمل المتواضع، راجيًا من الله تعالى أن يجعله نافعًا ومباركًا، وأن يكتب لنا ولكم دوام التوفيق والنجاح.

شكر وعرفان

الحمد لله حمدًا كثيرًا طيبًا مباركًا فيه، الذي بنعمته تتم الصالحات، وبتوفيقه تتحقق الغايات، والصلاة والسلام على سيدنا محمد ﷺ، خير معلم وأشرف الخلق أجمعين.

أتقدم بخالص الشكر وعظيم الامتنان إلى الأستاذة المشرفة الداوي حفصة، لما أولتني من اهتمام، وما قدمته لي من توجيهات علمية قيمة، ونصائح سديدة، ومتابعة مستمرة طوال مراحل إعداد هذه المذكرة، فكان لتشجيعها وصبرها بالغ الأثر في إنجاز هذا العمل.

كما أتوجه بجزيل الشكر والتقدير إلى أعضاء لجنة المناقشة الموقرة، على تفضلهم بقراءة هذه المذكرة، ومناقشتها، وإثرائها بملاحظاتهم القيمة، التي من شأنها أن تسهم في تطوير هذا العمل.

ولا يفوتني أن أتقدم بخالص الشكر والامتنان إلى جميع أساتذة قسم الفيزياء، الذين أفادوني بعلمهم، وأسهموا في تكويني العلمي والمعرفي طوال سنوات الدراسة.

وأخص بالشكر والتقدير الأستاذ خلفاوي فتحي، والأستاذ بن مبروك، لما قدماه لي من توجيه وتشجيع ونصح صادق، وكانا خير معين في مسيرتي الأكاديمية.

كما أتقدم بالشكر إلى كل من ساهم، من قريب أو بعيد، في إنجاز هذا العمل، سواء بالدعم العلمي أو المعنوي أو بالكلمة الطيبة والدعاء الصادق.

وفي الختام، أسأل الله تعالى أن يجزي كل من أحسن إليَّ خير الجزاء، وأن يجعل هذا العمل خالصًا لوجهه الكريم، ونافعًا لكل من يطلع عليه.

الفهرس

- **الاهداء**
- **الشكر والتقدير**
- **قائمة المحتويات**
- **قائمة الاشكال**

المقدمة العامة 7

المراجع

الفصل الاول : عموميات حول الاغشية الرقيقة واكسيد التيتانيومTio_2

I. المقدمة.....12

II. تعريف الاغشية الرقيقة.....12

III. مبدأ ترسيب الاغشية الرقيقة.....14

III_1_ترسيب في وسط صلب 14

III_2_ترسيب في وسط سائل.....14

III_3_ترسيب في وسط غازي او فراغ.....14

IV. آليات نمو الاغشية الرقيقة.....14

IV_1.تكوين المواد المترسبة.....15

IV_2.نقل الذرات الى الركيزة.....15

IV_3.ترسيب ونمو الطبقة.....15

IV_3.1.مرحلة التنويه.....15

IV_3.2.مرحلة الالتحام.....16

IV_3.3.مرحلة النمو.....16

V. تطبيقات الاغشية الرقيقة.....17
VI.تعريف اكسيد التيتانيوم Tio−2 18
VII. خصائص اكسيد التيتانيوم Tio−2 19
VII_1.الاطوار البلورية.....19
VII_2.الخصائص البصرية.....20
VII_3.الخصائص الكهربائية.....20
VIII. المجالات التطبيقية لأكسيد التيتانيوم Tio2.....21
المراجع

الفصل الثاني: تأثير التطعيم وطرق التوصيف

I. مقدمة.....26
II. مفهوم التطعيم.....26
III. تأثير التطعيم على اكسيد التيتانيوم Tio−2 27
III_1.على الخصائص البنيوية.....27
III_2.على الخصائص البصرية والكهربائية.....27
III_3.على الخصائص الميكانيكية.....28
IV.طرق ترسيب الاغشية الرقيقة.....29
IV_1.الطرق الفيزيائية 29
IV_2.الطرق الكيميائية.....29
V. تقنية الترسيب الدوراني.....30
V_1. تعريف التقنية 31
V_2 المبدأ الفيزيائي للتقنية 31
V_3 مراحل عملية الترسيب.....31

V_4 العوامل المؤثرة على التقنية 31

VI. المزايا والعيوب.....31

VII. تقنيات التوصيف.....32

VII_1.مطيافية الاشعة تحت الحمراء.....32

VII_2.مطيافية الاشعة فوق البنفسجيةUV-Vis.....33

VII_3.إختبار الصلادة.....36

المراجع

الفصل الثالث : النتائج والمناقشة

الهدف من الدراسة.....41

I. الجانب التجريبي.....41

II. تحضير محاليل السول جيل.....42

III. تحضير الاغشية الرقيقة.....44

IV.مناقشة نتائج الهيكلية 46

V. مناقشة الخصائص البصرية.....48

VI.مناقشة االخصائص الميكانيكية.....50

VII. الخاتمة.....55

قائمة الاشكال

الفصل الاول

الشكل ا_1	بنية الطبقة الرقيقة .	13
الشكلا_2	رسم تخطيطي يوضح مرحلة تدفق وتوضع الذرات على الركيزة	15
الشكل ا_3	رسم تخطيطي يوضح مرحلة الالتحام	16
الشكل ا_4	مرحلة نمو الطبقات	16
الشكل ا_5	الخطوة الأخيرة للالتحام	16
الشكل ا_6	أنماط نمو الطبقات الرقيقة	17
الشكل ا_7	أكسيد التيتانيوم في شكله الطبيعي	19
الشكل ا_8	أكسيد التيتانيوم في شكل مسحوق	19
الشكل ا_9	طور الروتيل	19
الشكل ا_10	طور الانتاز	20
الشكل ا_11	جدول للخصائص البصرية لاكسيد التيتانيوم	21

الفصل الثاني

الشكل II_1	مخطط يوضح طرق ترسيب الاغشية الرقيقة.	30
الشكل II_2	جهاز الاشعة تحت الحمراء FTIR.	32
الشكل II_3	جهاز مطيافية الاشعة فوق البنفسجية UV–Vis	34
الشكل II_ 4	جاز اختبار الصلادة	36

الفصل الثالث

الشكلIII_1	مراحل تحضير المحلول.	43
الشكلIII_2	شرائح زجاجية مستخدمة كركائز	43
الشكل III_3	مراحل تهييئة الركيزة	44
الشكل III_4	نتائج جهاز الاشعة تحت الحمراء FTIR	46
الشكل III_5	نتائج جهاز مطيافية الاشعة فوق البنفسجية UV-Vis	48
الشكل III_6	نتائج جهاز الصلادة	51
الشكلIII_7	نتيجة الصلادة للعينة Na 3%	50
الشكلIII_8	نتيجة لصلادة للعينة Na 7%	50
الشكلIII_9	نتيجة الصلادة للعينة Na 9%	51

المقدمة العامة

مقدمة عامة

يمثل علم المواد الركيزة الأساسية التي استندت إليها الثورات التكنولوجية المتعاقبة، حيث أتاح فهم الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد على المستوى المجهري إمكانية ابتكار تطبيقات غيرت وجه البشرية. وفي هذا الصدد، برزت **الأغشية الرقيقة** كأحد أهم محاور البحث العلمي المعاصر، نظراً لكونها تتيح الحصول على خصائص متميزة لا يمكن تحقيقها في المواد الكتلية التقليدية. وتعتمد فكرة الأغشية الرقيقة على ترسيب طبقات رقيقة جداً من المادة فوق ركائز صلبة أو مرنة، مما يسمح بتوفير في استهلاك المواد وتصغير حجم الأجهزة الإلكترونية والبصرية مع الحفاظ على كفاءة أداء عالية **[1]**.

من بين عائلات المواد نصف الناقلة، يحظى أكسيد التيتانيوم (TiO_2) باهتمام استثنائي في الأوساط العلمية. تعود هذه الأهمية إلى خصائصه الاستثنائية؛ فهو مادة غير سامة، متوفرة بكثرة، وتتمتع باستقرار كيميائي وفيزيائي عالٍ حتى في الظروف البيئية القاسية. يتميز TiO_2 بفجوة طاقة واسعة (Wide Band Gap) تتراوح بين 3.0 و3.2 إلكترون فولت، مما يجعله شفافاً في النطاق المرئي ونشطاً تحت الأشعة فوق البنفسجية. هذه السمات جعلته المادة المفضلة في تطبيقات التحفيز الضوئي، الخلايا الشمسية الصبغية، والمستشعرات الغازية، فضلاً عن استخدامه الواسع كطلاء واقٍ ومضاد للانعكاس **[2]**.

بالرغم من هذه المزايا، فإن التطوير المستمر للأجهزة التكنولوجية يتطلب تعديل وتكييف خصائص TiO_2 لتوسيع نطاق استجابته الطيفية أو تحسين متانته الميكانيكية. وهنا يبرز مفهوم **التطعيم** كأداة فعالة للتحكم في بنية المادة. إن إدخال عناصر قلوية مثل **الصوديوم (Na)** في شبكة أكسيد التيتانيوم يعد توجهاً بحثياً واعداً؛ حيث تساهم أيونات الصوديوم عند دمجها بنسب مدروسة في تعديل مستويات الطاقة داخل فجوة النطاق، مما يؤثر بشكل مباشر على النفاذية البصرية ومعامل الانكسار. علاوة على ذلك، يؤثر التطعيم على نمو الحبيبات البلورية وترابطها، مما ينعكس بشكل ملموس على الخصائص الميكانيكية للأغشية كالصلادة والالتصاقية، وهي عوامل حاسمة لضمان عمر تشغيلي طويل للأغشية في التطبيقات العملية **[3]**.

لضمان الحصول على أغشية ذات جودة عالية وتجانس متميز، اعتمدت هذه الدراسة على **تقنية الترسيب الدوراني** المنبثقة عن طريقة "سول–جيل" (Sol–Gel). وتعتبر هذه التقنية من أكثر الطرق كفاءة وبساطة في المختبرات العلمية، حيث تسمح بالتحكم الدقيق في سمك الغشاء من خلال ضبط بارامترات السرعة والزمن ولزوجة المحلول.

إن الربط بين تقنية التحضير هذه وبين التغير في نسب التطعيم (من 3% وصولاً إلى 9%) يشكل جوهر دراستنا، بهدف فهم التفاعلات المتبادلة بين المادة المطعمة والمادة الأساس وتأثير ذلك على الأداء النهائي للأغشية **[4]**.

تكمن المشكلة العلمية التي تعالجها هذه المذكرة في التحدي المتمثل في الموازنة بين الخصائص البصرية والميكانيكية لأغشية TiO_2. فبينما يراد للغشاء أن يكون عالي الشفافية، فإنه يحتاج أيضاً لصلابة كافية لمقاومة العوامل الخارجية. ومن هنا تبرز الحاجة للإجابة على التساؤلات التالية:

1. إلى أي مدى يمكن أن يؤثر تزايد تركيز الصوديوم (3%, 5%, 7%, 9%) على جودة التبلور والبنية المجهرية للأغشية؟
2. كيف يتغير سلوك امتصاص ونفاذية الضوء مع زيادة نسبة الشوائب، وما تأثير ذلك على فجوة الطاقة الضوئية؟
3. هل يساهم الصوديوم في تعزيز التماسك الميكانيكي للأغشية أم أن التركيزات العالية قد تؤدي إلى تدهورها؟

تتمحور أهداف هذه الدراسة حول النقاط التالية:

1. تحضير سلسلة من الأغشية الرقيقة من أكسيد التيتانيوم المطعمة بالصوديوم بتركيزات متدرجة تحت ظروف مخبرية مضبوطة.
2. إجراء قياسات بصرية دقيقة (UV–Vis) لتحديد أطياف النفاذية
3. دراسة السلوك الميكانيكي للأغشية المحضرة لتقييم مدى تأثر الصلادة والالتصاقية بنسبة التطعيم.
4. تحديد النسبة المثالية للتطعيم التي توفر أفضل توليفة من الخصائص لخدمة التطبيقات الصناعية المستهدفة.

المراجع

[1]Wasa, K., et al. (2004). *Handbook of Sputter Deposition Technology: Fundamentals and Applications for Planar Materials*. William Andrew Publishing.

[2]Diebold, U. (2003). "The surface science of titanium dioxide". *Surface Science Reports*.

[3]M.S. Al-Abbas, et al. (2021). "Impact of Sodium Doping on the Structural and Optical Properties of Sol-Gel Derived TiO2 Thin Films". *Materials Research Express*.

[4]Scriven, L. E. (1988). "Physics and Applications of Dip Coating and Spin Coating". *MRS Proceedings*.

الفصل الأول: عموميات حول الأغشية الرقيقة وأكسيد التيتانيوم

I. المقدمة :

شهدت علوم المواد في العقود الأخيرة تحولاً جذرياً نحو تقنيات النانو، حيث برزت الأغشية الرقيقة كواحدة من أهم الركائز التكنولوجية التي أحدثت ثورة في مجالات الإلكترونيات، الطاقة، والبصريات. إن الانتقال من المادة في حالتها الكتلية إلى حالة الغشاء الرقيق ليس مجرد تقليل في الأبعاد الفيزيائية، بل هو إعادة صياغة للخصائص الجوهرية للمادة، مما يسمح بتصميم أجهزة ذات كفاءة عالية واستجابة دقيقة للمؤثرات الخارجية **[1]**.

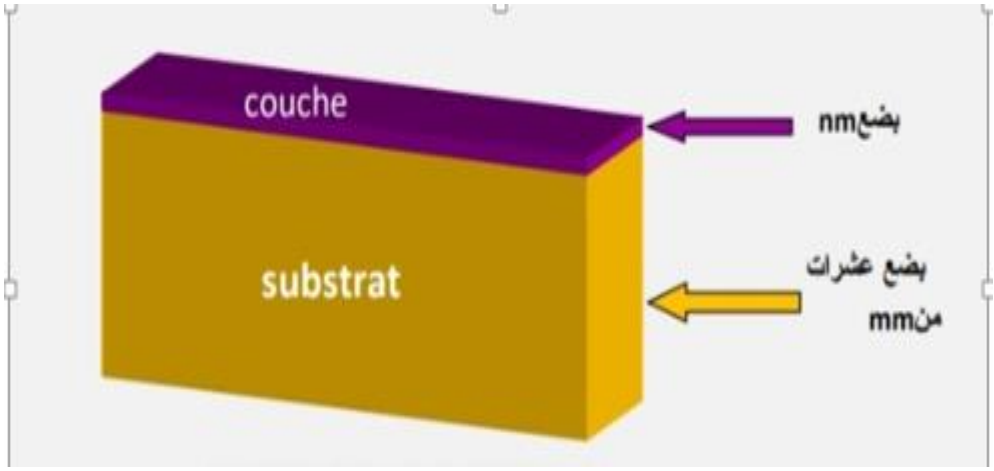
ومن بين المواد شبه الموصلة التي حظيت باهتمام بحثي واسع، يبرز أكسيد التيتانيوم (TiO_2) كنموذج للمواد المتعددة الوظائف. فبفضل فجوة طاقته الواسعة واستقراره الكيميائي الفائق، أصبح العنصر الأساسي في تطبيقات التحفيز الضوئي والخلايا الشمسية والحساسات الغازية. وتكتسب دراسة هذا الأكسيد أهمية إضافية عند معالجته بتقنيات الترسيب الكيميائي مثل الترسيب الدوراني (Spin Coating)، والتي تتيح تحكماً دقيقاً في البنية المجهرية وخصائص السطح **[2]**.

يهدف هذا الفصل إلى تقديم مدخل نظري مفصل يبدأ بتعريف الأغشية الرقيقة وآليات نموها، مروراً باستعراض أهم تقنيات التحفيز والترسيب المستخدمة عالمياً. كما يسلط الضوء بشكل خاص على الخصائص البنيوية والبصرية والكهربائية لأكسيد التيتانيوم، مع التركيز على تأثير التطعيم بالعناصر القلوية كالصوديوم (Na)، وكيفية مساهمة هذه التعديلات في تحسين الأداء الوظيفي للأغشية المحضرة بما يخدم التطبيقات التكنولوجية المعاصرة **[3]**.

II. تعريف الاغشية الرقيقة:

.الاغشية الرقيقة هي طبقات نانوية من مادة معينة تُرسب على حامل يُعرف بالركيزة، والتي قد تكون مصنوعة من الزجاج، السيليكون، الالمنيوم أو الكوارتز، وذلك لمتطلبات التطبيق. نظرا لسمكها الصغير جدا، تتمتع هذه الاغشية بخصائص مختلفة مقارنة عن المواد الضخمة، مما يجعلها مناسبة لتطبيقات متعددة **[4]** . تعتمد الخصائص الفيزيائية والكيميائية للأغشية الرقيقة على عدة عوامل، منها تقنية الترسيب، التركيب الكيميائي، وسمك الطبقة. تلعب الطبقات الفاصلة بين الغشاء والركيزة دورا حاسما في استقرار المادة، حيث يمكن أن تؤثر على بنيتها البلورية، التوصيلية الكهربائية، والنفاذية البصرية. كما أن اختيار

تقنية الترسيب المناسبة يحدد جودة الغشاء وخصائصه ، اذ تختلف النتائج وفقا للأسلوب المستخدم في التحضير **[5]**.



الشكل1 _1: بنية الطبقة الرقيقة

III.مبدأ ترسيب الاغشية الرقيقة:

يتم ترسيب الاغشية الرقيقة على الركائز الصلبة من خلال نقل الجسيمات المكونة للطبقة عبر وسط ناقل، والذي يمكن أن يكون صلبًا، سائلا، أو غازيا . يعتمد استقرار المادة المترسبة على طبيعة التفاعل بين الجسيمات وسطح الركيزة، والذي قد يكون فيزيائيًا عبر قوى فان دير فالس، أو كيميائيًا من خلال تكوين روابط تساهمية

III_1_الترسيب في وسط صلب:

يحدث عند تلامس المادة مباشرة مع الركيزة، حيث تنتشر الجسيمات على السطح لتشكيل طبقة رقيقة .

III_2_ الترسيب في وسط سائل:

يتم عبر إذابة المادة في محلول وترسيبها على الركيزة، كما في تقنية السول–جيل، وتُستخدم هذه الطريقة لسهولة التحكم في خصائص الغشاء.

III_3_الترسيب في وسط غازي أو فراغ:

يعتمد على التفاعلات الكيميائية لترسيب المادة من الطور الغازي إلى الطور الصلب، كما هو الحال في الترسيب الكيميائي للبخار اختيار الطريقة المناسبة يعتمد على طبيعة المادة والخصائص المطلوبة، حيث يُعد تحضير الركيزة خطوة أساسية لضمان الحصول على طبقات متجانسة وذات جودة عالية.**[6]**

IV. آليات نمو الاغشية الرقيقة :

تمر عملية ترسيب الاغشية الرقيقة بثلاث مراحل رئيسية:

IV_1_تكوين المواد المترسبة:

يتم فيها إنشاء الذرات أو الجزيئات التي ستترسب على الركيزة .

IV_2_نقل الذرات إلى الركيزة:

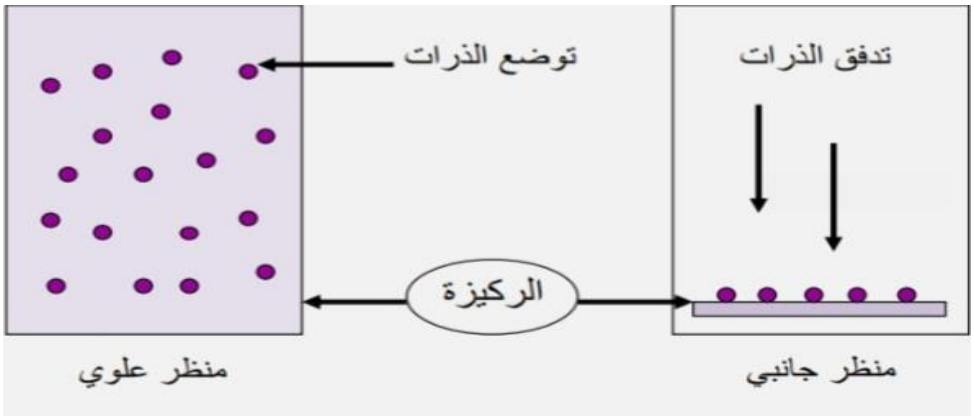
تتحرك الذرات أو الجسيمات من المصدر إلى سطح الركيزة عبر وسط ناقل

IV_3_ ترسيب ونمو الطبقة:

تتفاعل الجسيمات مع سطح الركيزة لتتكثف و تكوين غشاء رقيق. حيث تتم مرحلة التكثيف عبر 3 مراحل أساسية وهي: التنويه _ الالتحام _ النمو

IV_3_1_مرحلة التنوية:

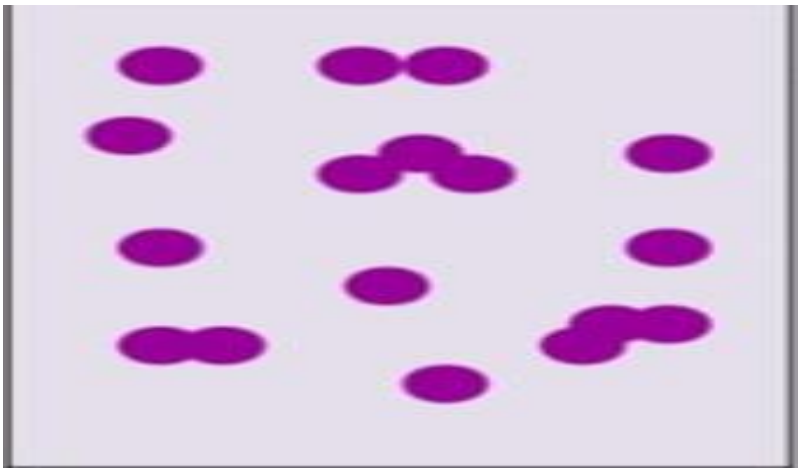
تبدأ هذه المرحلة بظهور تجمعات ذرية صغيرة على سطح الركيزة، تُعرف بالنوى، والتي تتكون نتيجة لتراكم الذرات أو الجزيئات على السطح. يعتمد استقرار هذه النوى على قوى التفاعل بين المادة المترسبة والركيزة. [8]



الشكلI_2: رسم تخطيطي يوضح مرحلة تدفق وتوضع الذرات على الركيزة [8]

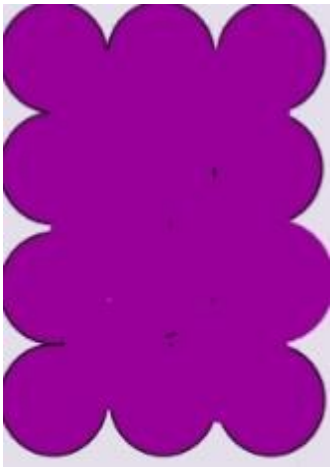
IV_3_2_مرحلة االالتحام:

في هذه المرحلة، تبدأ النوى والجزيئات في النمو، حيث تندمج مع بعضها البعض لتشكيل تجمعات أكبر. تستمر هذه العملية حتى تتداخل التجمعات تدريجيًا مكونة طبقة متجانسة تغطي الركيزة .**[9]**

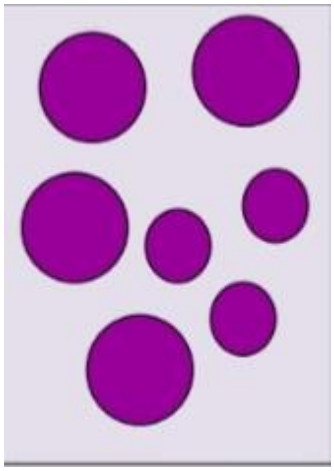


الشكل I_3: رسم تخطيطي يوضح مرحلة الالتحام

IV_3_3_مرحلة النمو: تُعد هذه المرحلة الاخيرة في تكوين الغشاء الرقيق، حيث تكتمل عملية الالتحام لتشكيل طبقة متصلة. يتم خلال هذه المرحلة ترسيب طبقات متتالية، مما يؤدي إلى تكوين غشاء متجانس يغطي السطح بالكامل. **[10]**



الشكل I_4: مرحلة نمو الطبقات



الشكل I_5:الخطوة الأخيرة للالتحام

فقد لوحظ تجريبيا ظهور 3 انماط لنمو الطبقات الرقيقة وهي :

1. **نمط نمو ثنائي الأبعاد (D2):**

تم فيه ترسيب الذرات طبقة على طبقة على الركيزة، ويُعرف عادةً بنمط [Frank–Van der Merwe].

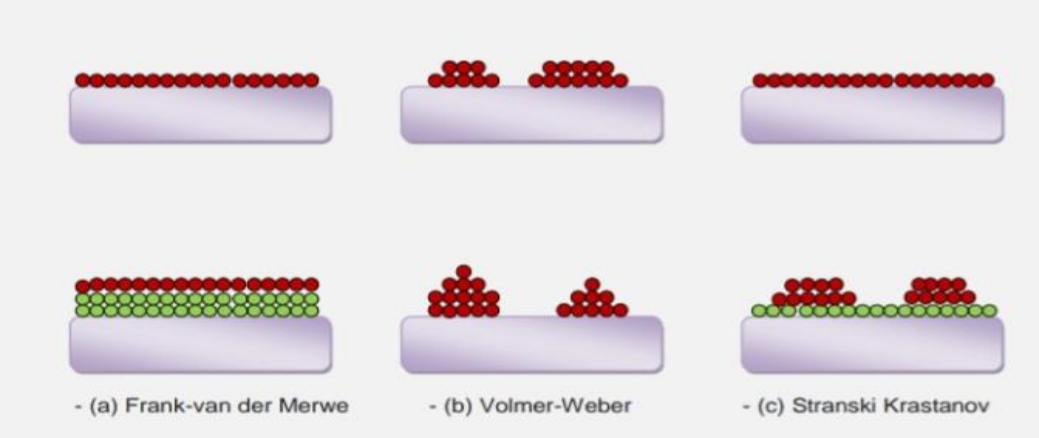
2. **نمط النمو ثالثي الأبعاد (D3):**

يتم فيه نمو الطبقات الرقيقة عموديًا على سطح الركيزة على شكل مجموعات، ويسمى [Volmer–Weber]

3. **نمط المختلط :**

ويسمى عادةً نمط[Krastanov–Stranski] وهو عبارة عن مزيج بين النمطين السابقين.

توضح الاشكال التالية هذه الانماط:



الشكل I_6 أنماط نمو الطبقات الرقيقة

V. تطبيقات الأغشية الرقيقة

- **التطبيقات البصرية :** تُعد الأغشية الرقيقة حجر الزاوية في الصناعات البصرية الحديثة، حيث يتم التحكم في سمك الغشاء ومعامل انكساره لإحداث ظواهر التداخل البصري. تُستخدم هذه الأغشية في صناعة الطلاءات المضادة للانعكاس التي تزيد من كفاءة العدسات والنوافذ، وكذلك في إنتاج المرايا عالية الانعكاس ومرشحات الضوء التي تسمح بمرور أطوال موجية محددة. كما تلعب دوراً حيوياً في

صناعة الشاشات المسطحة (LCD و OLED) من خلال الأغشية الشفافة الناقلة للكهرباء (TCO) **[12]**.

- **تطبيقات الطاقة المتجددة** : تُستخدم الأغشية الرقيقة على نطاق واسع في تحويل الطاقة الشمسية، حيث تعتمد الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة (مثل CIGS و CdTe) على طبقات نانوية لامتصاص الضوء وتوليد الشحنات. وتتميز هذه الخلايا بخفة الوزن والمرونة وتكلفة الإنتاج المنخفضة مقارنة بالخلايا التقليدية. بالإضافة إلى ذلك، تُستخدم الأغشية الرقيقة في تصنيع "النوافذ الذكية" التي تنظم دخول الحرارة والضوء للمباني، مما يساهم في ترشيد استهلاك الطاقة **[13]**.
- **التطبيقات الإلكترونية والمغناطيسية:** في مجال الإلكترونيات الدقيقة، تُستخدم الأغشية الرقيقة كطبقات عازلة أو ناقلة في الدوائر المتكاملة (ICs) والترانزستورات. كما أنها أساسية في تكنولوجيا التخزين المغناطيسي، حيث تُستخدم أغشية رقيقة جداً من المواد المغناطيسية في رؤوس القراءة والكتابة في الأقراص الصلبة، مما يسمح بزيادة كثافة تخزين البيانات بشكل هائل بفضل ظاهرة المقاومة المغناطيسية العملاقة **[14]** (GMR).
- **التطبيقات الميكانيكية والوقائية:** تُستخدم الأغشية الرقيقة لتحسين خصائص الأسطح الميكانيكية، حيث يتم ترسيب طبقات صلبة جداً (مثل نتريد التيتانيوم) على أدوات القطع لزيادة مقاومتها للتآكل والصلادة. كما تعمل هذه الأغشية كحواجز كيميائية لحماية المواد من الأكسدة والصدأ في البيئات القاسية، وتُستخدم أيضاً كطلاءات للتوافق الحيوي على الغرسات الطبية لضمان تقبل الجسم لها **[15]**.
- **التطبيقات البيئية والحيوية** : تبرز أهمية الأغشية الرقيقة من أكسيد التيتانيوم (TiO_2) تحديداً في هذا المجال، حيث تُستخدم في تقنيات التحفيز الضوئي لتفكيك الملوثات العضوية في الماء والهواء عند تعرضها للضوء. كما تُستخدم في صناعة الحساسات الغازية عالية الحساسية التي يمكنها الكشف عن تسرب الغازات السامة بتركيزات ضئيلة جداً، نظراً لزيادة مساحة السطح النوعية للأغشية **[16]**.

VI. تعريف اكسيد التيتانيوم tio2:

يُعد أكسيد التيتانيوم، المعروف أيضاً باسم "تيتانيا" (Titania)، أحد أكثر الأكاسيد المعدنية وفرة واستخداماً. كيميائياً، هو مركب ناتج عن اتحاد ذرة تيتانيوم مع ذرتي أكسجين، ويصنف ضمن المواد نصف الناقلة ذات فجوة الطاقة الواسعة . يتميز بخصائص استثنائية تشمل الاستقرار الكيميائي والحراري العالي، ومعامل انكسار مرتفع **[2]**.

- لاكسيد التيتانيوم2_Tio شكل طبيعي وشكل مسحوق:

الشكل I_7 أكسيد التيتانيوم في شكله الطبيعي

الشكل I_8 أكسيد التيتانيوم في شكل مسحوق

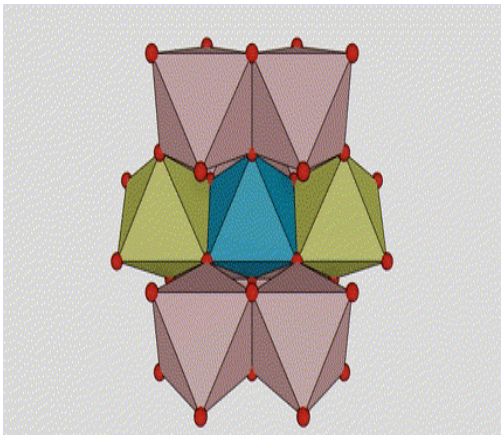
VII. خصائص أكسيد التيتانيوم (TiO_2):

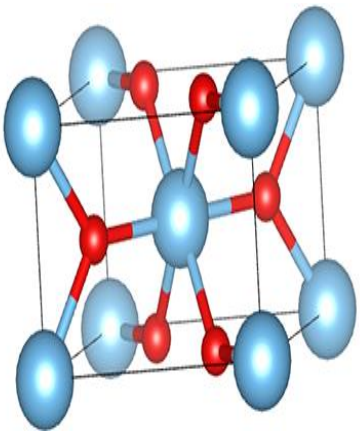
VII_1_ الأطوار البلورية :

يتميز TiO_2 بظاهرة "تعدد الأشكال، حيث يتبلور في ثلاثة هياكل رئيسية:

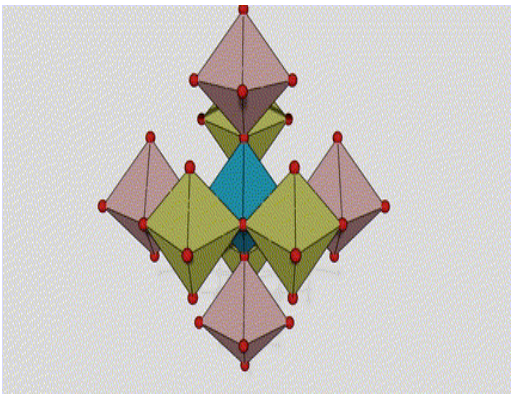
- طور الأناتاز (Anatase) الذي يمتلك نشاطاً كيميائياً عالياً وبنية مفتوحة نسبياً **[2]**.
- طور الروتيل (Rutile) وهو الأكثر استقراراً ترموديناميكياً ويمتلك معامل انكسار أعلى **[19]**.
- طور البروكيت (Brookite) وهو الأقل شيوعاً وصعب التحضير مخبرياً **[20]**.

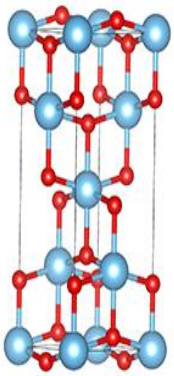
اشكال الاطوار الانتاز والروتل:





الشكل I_9 طور الروتيل





الشكل I_10 طور الانتاز

VII_2_ الخصائص البصرية

تتميز أغشية TiO_2 بشفافية بصرية فائقة في النطاق المرئي، حيث تتجاوز النفاذية غالباً 85% **[21]**. وتُعرف فجوة الطاقة (E_g) في TiO_2 بأنها فجوة "غير مباشرة" في طور الأناتاز (حوالي 3.2 eV)، بينما تكون قريبة من الفجوة "المباشرة" في الروتيل (3.0 eV) **[22]**. يمتلك TiO_2 معامل انكسار (n) مرتفع جداً يترواح بين 2.4 و 2.9 **[23]**.

VII_3_ الخصائص الكهربائية

يُصنف أكسيد التيتانيوم كعازل كهربائي في حالته المثالية، ولكنه يعمل كشبه موصل من النوع (n-type) بسبب وجود شواغر الأكسجين **[24]**. إن عملية التطعيم بعناصر قلوية مثل الصوديوم (Na) تهدف إلى زيادة ناقلية المادة وتقليل عرض طبقة الاستنزاف **[25]**. كما تتأثر الخصائص الكهربائية للأغشية المحضرة بـ Spin Coating بدرجة حرارة التلدين **[3]**.

جدول يوضح الخصائص البصرية والكهربائية لاكسيد التيتانيومtio_2:

الملاحظة	الوصف / القيمة التقريبية	الخاصية
فجوة الطاقة	3.0 ev لطور الروتيل 3.2 ev لطور الأناتاز	
3.0 (ev) لطور الروتيل 3.2 (ev) لطور الأناتاز	مادة شبه موصلة واسعة الفجوة، تمتص بشكل أساسي في النطاق (فوق البنفسجي UV)	
معامل الانكسار	2.4 – 2.7	معامل انكسار مرتفع جداً، مما يجعله مثالياً للطلاءات الضوئية والأغشية الرقيقة.
الشفافية	عالية في النطاق المرئي	تتأثر سمك الغشاء وطريقة التحضير مثل بمستوى النفاذية.
التوصيلية الكهربائية	منخفضة عازل تقريباً في حالته النقية	يمكن تحسين التوصيلية بشكل كبير عن طريق التطعيم بالمعادن.
ثابت العزل الكهربائي	مرتفع (\ epsilon = – 80 170)	تعتمد القيمة على الطور البلوري واتجاه البلورة وهو مفيد لصناعة المكثفات
نوع التوصيل	النوع سالبة (n-type)	يعود ذلك غالباً لوجود فجوات الأكسجين في الشبكة البلورية

الشكل I_11 جدول للخصائص البصرية لاكسيد التيتانيوم

VIII. المجالات التطبيقية لثاني اكسيد التيتانيوم tio2:

- الطاقة والخلايا الشمسية: يُستخدم كطبقة نقل للإلكترونات في خلايا (DSSC والبيروفسكيت)[18].
- التحفيز الضوئي :تنقية المياه والهواء عبر توليد جذور حرة قوية [12].
- الطلاءات الذكية: إنتاج زجاج "البلل الفائق" لمنع الضباب وتحلل الأوساخ [17]
- الحماية الميكانيكية والبصرية: طبقة واقية ضد الخدش وفلتر للأشعة فوق البنفسجية [19].

المراجع

[1].Ohring, M. (2001). Materials Science of Thin Films. Academic Press, 2nd Edition.

.[2] Diebold, U. (2003). "The surface science of titanium dioxide". Surface Science Reports.

[3]. Pawar, P. S., et al. (2018). "Spin coating: A versatile technique for thin film deposition". Journal of Materials Science.

. [4]شراجي محمد العيد_الدراسة الطيفية لطبقات أكسيد النحاس المتوضعة على ركائز من أكسيد الزنك بالغمس مدكرة ماستر جامعة ورقلة 2017

[5] . Frank A.settle ,prentice hall handbook of instrumental techniques for analytical chemistry", usa(1997).

[6.] زينب أولاد العربي _سهام قريدة _ تاثير التطعيم الثنائي بالفلورة والكوبات على الخواص البنيوية والضوئية والكهربائية لاغشية رقيقة لاكسيد الزنك المرسبة بتقنية الرذاذ الانحلال الحراري_فيزياء لاشعاعات جامعة قاصدي مرباح ورقلة

[7] K.H.Hidalgo, "Dépot chimique en phase de couches minces d'alumine dans une post-décharge micro-onde", thèse de doctorat, Université de Limoges, (2003).

[8]. A. Rahal, "Elaboration des verres conducteurs par déposition de ZnO sur des verres ordinaires", mémoire de magister, Université d'EI oued, (2013).

[9]. A. Benzagouta, "Effet De La Stoechiometrie Sur Les Propriétés Structurelles, Dynamiques Et Electroniques Des Systèmes Si-C, Etude Par La Dynamique Moléculaire ", Thèse De Doctorat, Université De Constantine, (2004).

[10]. J.A. Douayar, "Contribution A L'étude Des Propriétés Structurales, Optiques Et Electriques Des Couches Minces De L'oxyde De Zinc (ZnO) Dopé (Fluor, Indium, Aluminium Et Néodyme)", Thèse De Doctorat, Université Mohammed V– Agdal, (2013).

.[11]بالهاني سمية_ تحضير ومعاينة الطبقات الرقيقة من أكسيد الزنك المطعم بالمغنزيوم واختبار اداءها في التحفيز الضوئي جامعة قاصدي مرياح ورقلة 2024

[12]. Knittl, Z. (1976). Optics of Thin Films: An Optical Multilayer Theory. John Wiley & Sons.

[13] . Chopra, K. L., & Das, S. R. (1983). Thin Film Solar Cells. Plenum Press.

[14] Fert, A. (2008). "Nobel Lecture: Origin, development, and future of spintronics". Reviews of Modern Physics.

[15] Bunshah, R. F. (1994). Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings. William Andrew.

[16] Fujishima, A., et al. (2000). "TiO2 photocatalysis: Fundamentals and applications". Molecular Catalysis.

[17] Wang, R., et al. (1997). "Light-induced amphiphilic surfaces". Nature..

[18] Grätzel, M. (2001). "Photoelectrochemical cells". Nature.

[19] Carp, O., et al. (2004). "Photoinduced reactivity of titanium dioxide". Progress in Solid State Chemistry.

[20]. Landmann, M., et al. (2012). "The electronic structure of TiO2 polymorphs". Journal of Physics: Condensed Matter.

[21]. Tang, H., et al. (1994). "Electrical and optical properties of TiO2 anatase thin films". Journal of Applied Physics.

[22] Al-Abbas, M. S., et al. (2021). "Impact of Na-doping on TiO2 properties". Materials Research Express.

[23] Bendavid, A., et al. (2000). "Optical and structural properties of TiO2". Thin Solid Films.

[24] Nowotny, J. (2011). Oxide Semiconductors for Solar Energy Conversion. CRC Press.

[25] Zhu, L., et al. (2012). "Sodium doping effects on TiO2 thin films". Journal of Alloys and Compounds.

الفصل الثاني: تأثير التطعيم وطرق التوصيف

I. المقدمة

يُعد فهم الآليات الفيزيائية والكيميائية المتحكمة في خصائص المواد النانوية ركيزة أساسية لتطوير تطبيقاتها الوظيفية. يهدف هذا الفصل إلى تقديم دراسة نظرية معمقة حول ثلاثة محاور متكاملة تشكل الهيكل الأساسي لهذا البحث **[1]**. يبدأ الفصل بتناول **مفهوم التطعيم** كأداة فعالة لتعديل البنية الإلكترونية والفيزيائية لثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2)، مع التركيز على دور عنصر الصوديوم (Na) في إحداث تشوهات بنيوية وهندسة فجوة الطاقة، وهو ما يفسر التغيرات في الأداء البصري والميكانيكي للأغشية **[2]**. وفي المحور الثاني، نستعرض **تقنية الترسيب الدوراني** من خلال شرح المبادئ الفيزيائية والميكانيكية التي تحكم تكوين الأغشية الرقيقة والعوامل المؤثرة عليها **[3]**. أما المحور الأخير، فيستعرض **تقنيات التوصيف** الأساسية المستخدمة في هذا العمل (UV–Vis , AFM , FTIR) لتقديم فهم شامل للعلاقة بين طريقة التحضير والخصائص النهائية للمادة **[4]**.

II. المفهوم الفيزيائي للتطعيم

إقحام الشوائب في الشبكة المضيفة:

لا يتم التطعيم عشوائياً، بل يتبع قوانين فيزيائية دقيقة. عند إضافة الصوديوم إلى TiO_2 المحضر بطريقة "السول–جيل"، تحاول أيونات الصوديوم (Na+) إيجاد مكان لها داخل البنية البلورية. وبسبب كبر حجم أيون الصوديوم (1.02 A)مقارنة بأيون التيتانيوم (0.605 A)فإن عملية "الاستبدال" تخلق تشوهاً موضعياً يُعرف بـ التوتر الشبكي . هذا التوتر هو المسؤول عن تغيير المسافات البينية بين المستويات البلورية (D_hkl) **[2]**.

العيوب النقطية والتوازن الكهربائي:

بما أن التيتانيوم رباعي التكافؤ (Ti+4)والصوديوم أحادي التكافؤ (Na+)، فإن استبدال أحدهما بالآخر يخلق خللاً في الشحنة. وللحفاظ على التعادل الكهربائي للغشاء، تضطر الشبكة البلورية إلى خلق عيوب أخرى مثل شواغر الأكسجين هذه الشواغر تلعب دوراً حاسماً في تغيير الخصائص الكهربائية والحسية للغشاء الرقيق **[5]**.

III. تأثير التطعيم بالصوديوم (Na): يمكن للجهاز رصد التغيرات في شدة الروابط أو إزاحة القمم نتيجة دخول أيونات الصوديوم في الشبكة البلورية لـ TiO_2 وتفاعلها مع الأكسجين.

دراسة "البلل الفائق": إن FTIR يرصد مجموعات الهيدروكسيل (−OH) الممتصة على السطح، وهي المسؤولة عن خاصية جذب الماء

III_1_تأثير التطعيم بالصوديوم على الخصائص البنيوية:

التحول الطوري: يعمل الصوديوم كمنظم حراري للأطوار. وجود أيونات الصوديوم قد يؤخر أو يحفز التحول من طور الأناتاز إلى طور الروتيل.

في الأغشية الرقيقة، غالباً ما يساهم الصوديوم في استقرار طور الأناتاز عند درجات تلدين مرتفعة، مما يحافظ على النشاط الضوئي العالي للمادة **[6]**.

المورفولوجيا وحجم البلورات:

يؤدي التطعيم إلى تغيير "طاقة السطح"، مما يؤثر على نمو الحبيبات (Grain growth).

• عند نسب منخفضة (5,%3%) : يعمل الصوديوم على تصغير حجم الحبيبات، مما يزيد من المساحة السطحية للغشاء.

• عند نسب عالية (9,%7%) : قد يبدأ الصوديوم بالتجمع على حدود الحبيبات مما قد يؤدي إلى خشونة في السطح أو ظهور تشققات مجهرية تُضعف الخصائص الميكانيكية **[7]**.

III_2_التأثير على الخصائص البصرية والكهربائية:

هندسة الفجوة المحظورة :

في TiO_2 النقي، تكون فجوة الطاقة واسعة (3.2 ev).عند إضافة الصوديوم، تنشأ مستويات طاقة (مستويات شوائب) قريبة من حزمة التوصيل.

- **النتائج البصرية:** تتقلص الفجوة ، مما يسمح للغشاء بامتصاص الضوء في النطاق المرئي. هذا يفسر لماذا قد يتغير لون الغشاء أو تزداد عتامته قليلاً مع زيادة نسبة التطعيم **[8]**.
- **النتائج الكهربائية:** تزداد ناقلية الغشاء نتيجة حقن حاملات شحنة إضافية وتقليل مراكز التشتت الإلكتروني **[5]**.

III_3_التأثير على الخصائص الميكانيكية (الصلادة والالتصاق):

- **الإجهادات المتبقية:** تنمو الأغشية الرقيقة وهي تحت ضغط ميكانيكي. تطعيم الصوديوم يغير من "معامل التمدد الحراري" للغشاء.
- **الالتصاق:** أيونات الصوديوم قد تعمل كروابط كيميائية قوية بين الغشاء والركيزة الزجاجية (التي تحتوي هي الأخرى على صوديوم)، مما يزيد من قوة الالتصاق.
- **الصلادة:** التوتر الشبكي الناتج عن اختلاف الأحجام الذرية يمنع حركة الخلوع داخل الغشاء، مما قد يرفع من صلادة الغشاء الميكانيكية (ظاهرة التقوية بالشوائب) **[4]**.

المعادلة العامة لصلادة فيكرز (Hv)

تعتمد صلادة فيكرز على إسقاط هرم ماسي ذي قاعدة مربعة وزاوية قمة مقدارها **136°** تحت حمل معين (P)، ثم قياس متوسط أقطار الأثر المتروك (d).

تُحسب الصلادة من العلاقة التالية:

$$Hv=(2F.Sin(136/2))/d^2=(1.8544.F)/d^2$$

وبعد حساب الثوابت الجيبية، تبسط المعادلة رياضياً لتصبح:

$$Hv=(1.8544.p)/d^2$$

حيث:

Hv: صلادة فيكرز وتكون الوحدات غالباً ب: (kgf/mm^2)

P: الحمل المطب (المقاس بوحدة الكيلوغرام ثقلي (kgf) أو الغرام.(g)

d:متوسط طول قطري الأثر المربع المقاس بالمتر أو المليمتر،

IV. طرق ترسيب الاغشية الرقيقة:

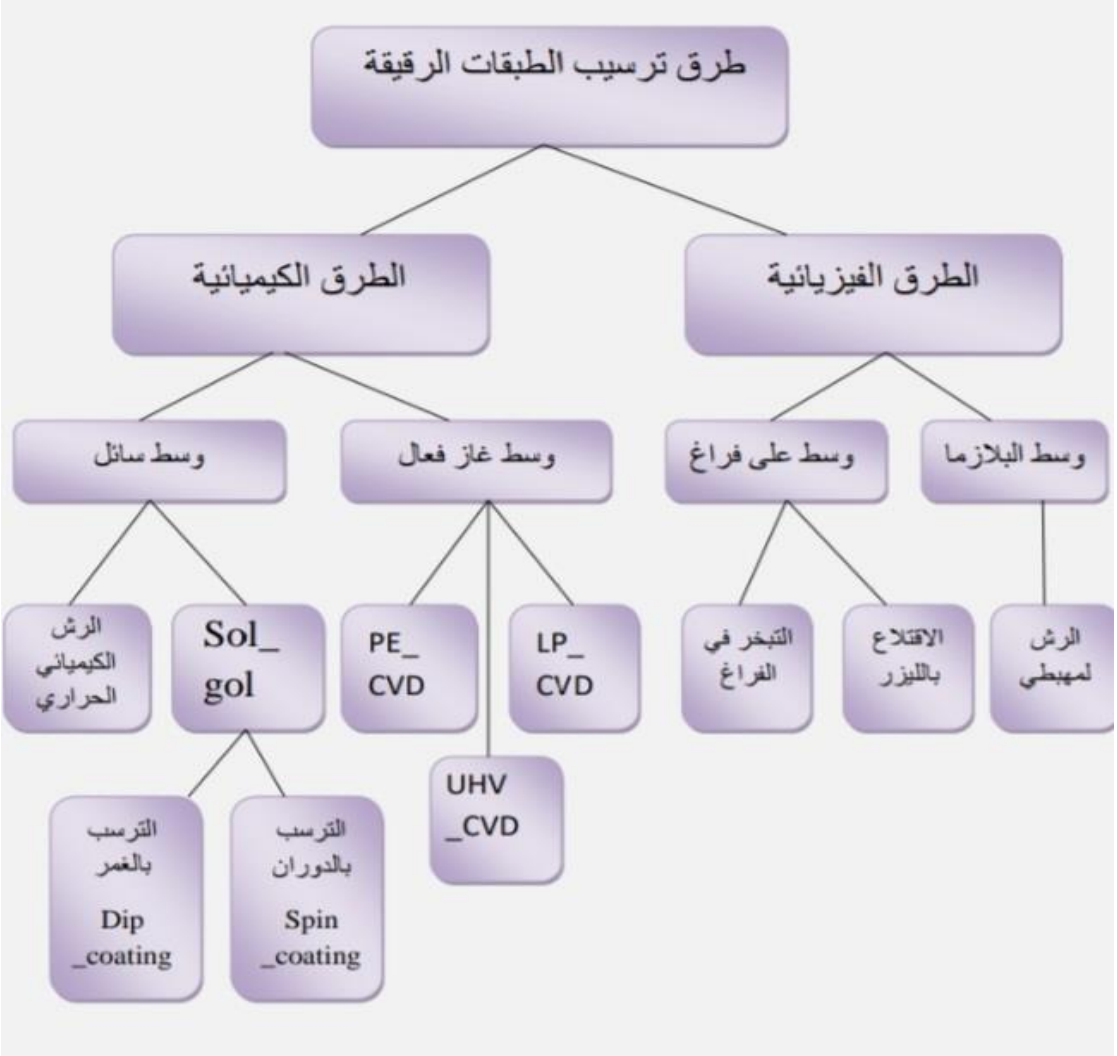
تتنوع تقنيات ترسيب الاغشية الرقيقة نظرا لاختلاف تطبيقات المواد المترسبة يمكن تصنيف هده التقنيات الى فئتين رئيسيتين:**[11]**

IV_1_الطرق الفيزيائية : تعتمد على التقنيات الفيزيائية مثل التبخير الحراري والترسيب بالرش المهبطي

IV_2_الطرق الكيميائية : تشمل تقنيات تعتمد على التفاعلات الكيميائية مثل الترسيب من الطور البخاري الكيميائي (cvd) وطريقة السول جيل

يتم اختيار الطريقة المناسبة بناء على طبيعة المادة المترسبة ، خصائص الركيزة والتطبيق المطلوب

مخطط يوضح طرق ترسيب الاغشية الرقيقة



الشكل II_1 مخطط يوضح طرق ترسيب الاغشية الرقيقة.

V. تقنية الترسيب الدوراني

V _1_ تعريف التقنية:

تُعد تقنية الترسيب الدوراني طريقة كيميائية سائلة (منبثقة عن تقنية السول–جيل) تُستخدم لترسيب أغشية رقيقة متجانسة على ركائز مسطحة. تتميز بقدرتها العالية على إنتاج طبقات تتراوح سماكتها من بضعة نانومترات إلى عدة ميكرومترات، نظراً لبساطتها ودقتها في التحكم بالسماكة **[9]**.

V _2_المبدأ الفيزيائي للتقنية :

يعتمد المبدأ الفيزيائي للترسيب الدوراني على التوازن الديناميكي بين قوتين متعاكستين: القوة الطاردة المركزية الناتجة عن الدوران السريع، وقوة اللزوجة التي تحاول إبقاء السائل ملتصقاً. أثناء العملية، يتبخر المذيب مما يؤدي إلى زيادة اللزوجة حتى يتصلب الغشاء **[3]**.

V _3_ مراحل عملية الترسيب:

تمر العملية بأربع مراحل أساسية:

- التوزيع
- التسارع
- الدوران المستقر
- التبخر

وذلك لضمان الحصول على غشاء متجانس **[10]**.

V _4_العوامل المؤثرة على التقنية :

تتحدد خصائص الغشاء بناءً على عوامل حاسمة: سرعة الدوران , لزوجة المحلول ، زمن الدوران، وتركيز المادة الصلبة، بالإضافة للظروف البيئية **[4]**.

VI. المزايا والعيوب

- **مزايا الطريقة :**

✓ كفاءة عالية مع استهلاك قليل للمادة
✓ مناسبة لترسيب طبقات متعددة على نفس الركيزة.
✓ سرعة تنفيذ عالية

- **عيوب الطريقة:**

✓ حساسة للتلوث (كالغبار)
✓ تتطلب مذيبات بخصائص دقيقة.
✓ صعوبة التحكم في السماكة على الركائز الكبيرة

VII. تقنيات التوصيف :

VII_1_ مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR)

- **تعريف التقنية:**

تعد تقنية FTIR أداة تحليلية قوية تُستخدم لتحديد الروابط الكيميائية والمجموعات الوظيفية الموجودة في المادة. تعتمد الفكرة على تسليط أشعة تحت حمراء على عينة غشاء TiO_2، حيث تمتص الروابط الكيميائية طاقة محددة تؤدي إلى اهتزازها عند ترددات معينة تميز كل رابطة **[12]**.

الشكل II_2 جهاز الاشعة تحت الحمراء FTIR.

- **مبدأ العمل:**
  - ✓ يتم تمرير حزمة من الأشعة تحت الحمراء عبر العينة.
  - ✓ تمتص العينة ترددات محددة تتوافق مع التردد الطبيعي لاهتزاز الروابط الكيميائية.
  - ✓ يقوم كاشف الجهاز بقياس كمية الأشعة النافذة أو الممتصة.

يستخدم الجهاز خوارزمية "تحويل فورير" الرياضية لتحويل البيانات الخام من تداخل الإشارات إلى طيف (Spectrum) يسهل تفسيره، حيث يمثل المحور الأفقي "العدد الموجي ((1−)^cm)والمحور الرأسي "الامتصاصية" أو "النفاذية" **[13]**.

- **أهمية الجهاز في دراسة أغشية TiO_2 المطعمة بالصوديوم:**

تتمثل وظيفة الجهاز فيما يلي:

- تأكيد تشكل الروابط (Ti−O): يظهر الجهاز قمم امتصاص مميزة لروابط التيتانيوم مع الأكسجين (Ti−O−Ti) و (Ti−O)، مما يؤكد نجاح عملية الترسيب والتحول من السائل إلى الصلب.
- كشف الشوائب والمخلفات: يساعد في التأكد من إزالة المذيبات العضوية (مثل الإيثانول) بعد عملية التلدين، حيث تختفي قمم الروابط (C−H) أو (O−H) عند درجات الحرارة العالية.

VII_2_مطيافية الأشعة فوق البنفسجية والمرئية والقريبة من تحت الحمراء (UV−Vis−NIR)

- **تعريف الجهاز والتقنية:**

يُعد مطياف الأشعة فوق البنفسجية والمرئية والقريبة من تحت الحمراء من طراز (Agilent Cary Series) أداة أساسية لتحديد الخصائص البصرية للأغشية الرقيقة. تعتمد هذه التقنية على قياس التفاعل بين الإشعاع الكهرومغناطيسي والمادة في مدى طيفي واسع يتراوح عادةً بين 300nm و 1100nm **[14]**.

الشكل II_3 جهاز مطيافية الاشعة فوق البنفسجية UV-Vis

- **المبدأ التجريبي لقياس النفاذية (T%):**

تعتمد عملية القياس على تمرير حزمة ضوئية أحادية اللون عبر غشاء TiO_2 المترسب على الركيزة الزجاجية. يقوم الكاشف بقياس شدة الضوء النافذ مقارنة بشدة الضوء المرجعي، مما يسمح برسم منحنى النفاذية البصرية كدالة في طول الموجة **[15]**. تظهر في هذا المنحنى قمم وقيعان ناتجة عن ظاهرة تداخل الضوء ، وهي ضرورية جداً لحساب الثوابت البصرية **[16]**.

تحديد قرينة الانكسار (n) وسُمك الغشاء (d):

بما أن الجهاز لا يعطي قرينة الانكسار بشكل مباشر، فقد تم اتباع المنهجية التالية:

- **أولاً:** استخراج قيم النفاذية القصوى ({T_{max}) ولدنيا ({T_{min}) من طيف النفاذية المسجل بواسطة جهاز Cary Series.
- **ثانياً:** تطبيق **طريقة سوانبول** لرياضية، وهي الطريقة الأكثر دقة لتحويل بيانات النفاذية إلى قيم قرينة انكسار (n) عند أطوال موجية مختلفة **[17]**.
- **ثالثاً:** استخدام هذه القيم لحساب السُمك الفيزيائي للغشاء المترسب، مما يسمح بالتحقق من جودة عملية الترسيب الدوراني **[18]**.

قياس فجوة الطاقة البصرية (E_g):

يُستخدم هذا الجهاز أيضاً لتحديد فجوة الطاقة لـ TiO_2 المطعّم بالصوديوم من خلال حساب معامل الامتصاص (alpha). يتم ذلك عبر رسم علاقة تاوك (Tauc Plot)، حيث تمثل نقطة تقاطع المماس مع محور الطاقة قيمة فجوة الطاقة البصرية، وهي القيمة التي تتأثر بشكل مباشر بنسبة التطعيم بالصوديوم **[14, 19]**.

علاقة تاوك (alpha.h.nu) ^r=A(h.nu−Eg)

حيث

- alpha: معامل الامتصاص البصري
- H.nu: طاقة الفوتون الساقط حيث h ثابت بلانك و nu التردد
- A: ثابت تاوك ثابت يعتمد على طبيعة المادة.
- Eg: فجوة الطاقة البصرية المراد حسابها.
- r: أس يعتمد على نوع الانتقال الإلكتروني
  - r = 2: للانتقال المباشر المسموح (وهو الغالب في TiO_2)
  - r = 1/2: للانتقال غير المباشر المسموح.

VII_3_اختبار الصلادة الدقيقة:

- **تعريف التقنية:**

تُعد الصلادة الدقيقة إحدى أهم الخصائص الميكانيكية للأغشية الرقيقة، وهي مقياس لمقاومة سطح المادة للتشوه اللدن أو الاختراق الدائم الناتج عن حمل محدد **[20]**. تُستخدم هذه التقنية في الأغشية الرقيقة لتقييم جودة الالتصاق والتماسك الهيكلي للطبقات المترسبة على الركائز الصلبة **[21]**.

الشكل II_ 4 جاز اختبار الصلادة

- **مبدأ عمل الجهاز:**

يعتمد مبدأ عمل جهاز FM-300e على تسليط حمل ميكانيكي صغير جداً (Micro-load) يتراوح عادة بين (1 gf to 1000) باستخدام رأس اختراق ألماسي مدبب **[22]** (Indenter). عند ملامسة الرأس لسطح الغشاء لفترة زمنية محددة ، يترك أثراً دائماً يتم قياس أبعاده (أقطار الأثر) بواسطة مجهر ضوئي مدمج بالجهاز **[22]**. يتم حساب قيمة الصلادة (سواء بنظام Vickers أو Knoop) بناءً على القوة المطبقة ومساحة الأثر الناتج **[20]**.

- **أهمية الجهاز:**

تكمن أهمية هذا التوصيف في دراسة تأثير "تطعيم الصوديوم" على الصلابة الهيكلية لأغشية TiO_2. فالتغير في نسب التطعيم يؤدي غالباً إلى تغيير في حجم الحبيبات والكثافة، مما ينعكس مباشرة على قيمة الصلادة الميكانيكية **[23]**. كما يساعد الجهاز في استنتاج مدى مرونة الغشاء وقدرته على تحمل الضغوط دون التعرض للتشقق أو الانفصال عن الركيزة **[21]**.

مراجع

[1] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley.

[2] Zhu, L., et al. (2012). "Effect of sodium doping on the structural and optical properties of TiO2 thin films". *Journal of Alloys and Compounds*.

[3] Tyona, M. D. (2013). "A Theoretical Study on Spin Coating Technique". *Advances in Materials Research*.

[4] Ohring, M. (2001). *Materials Science of Thin Films*. Academic Press.

[5] Al-Abbas, M. S. (2021). "Impact of Na-doping on the Band Gap and Properties of TiO2". *Materials Research Express*.

[6] Nowotny, J. (2011). *Oxide Semiconductors for Solar Energy Conversion*. CRC Press.

[7] Diebold, U. (2003). "The surface science of titanium dioxide". *Surface Science Reports*.

[8] Tauc, J. (1974). *Amorphous and Liquid Semiconductors*. Plenum Press.

[9] Scriven, L. E. (1988). "Physics and Applications of Dip Coating and Spin Coating". *MRS Proceedings*.

[10] Sukanek, P. C. (1991). "Spin coating of polyimide solutions". *Journal of the Electrochemical Society*.

[11]: M.Bekkouche, "Elaboration et caractérisation des couches minces de ZnO pures et dopées en Bi par voie Sol gel", memoire de master, université de biskra, (2014).

[12]Smith, B. C. (2011). Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy. CRC Press.

[13]Socrates, G. (2004). Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies: Tables and Charts. John Wiley & Sons

[14] Agilent Technologies. (2020). *Cary Series UV-Vis-NIR Spectrophotometers: User's Guide*.

[15] Bendavid, A., et al. (2000). "Optical and structural properties of titanium dioxide thin films". *Applied Physics A*.

[16] Mechiakh, R., et al. (2007). "Structural and optical properties of TiO2 thin films prepared by sol–gel method". *Surface and Coatings Technology*.

[17] Swanepoel, R. (1983). "Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon". *Journal of Physics E: Scientific Instruments*.

[18] Manifacier, J. C., et al. (1976). "A simple method for the determination of the optical constants n, k and the thickness of a weakly absorbing thin film". *Journal of Physics E: Scientific Instruments*.

[19] Tauc, J. (1974). *Amorphous and Liquid Semiconductors*. Plenum Press.

[20] A. C. Fischer-Cripps, *Introduction to Contact Mechanics*, 2nd ed., Springer, New York, 2007.

[21] K. Holmberg and A. Matthews, *Coatings Tribology: Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering*, Elsevier, 2009.

[22] ASTM E384-17, *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

[23] G. Cao and Y. Wang, *Nanostructures and Nanomaterials: Synthesis, Properties, and Applications*, World Scientific, 2011.

الفصل الثالث: النتائج والمناقشة

- **الهدف من الدراسة:**

دراسة تأثير تطعيم اكسيد التيتانيوم (Tio2) بنسب مختلفة من الصوديوم (Na).

حيث تم التجريب المخبري بالشكل التالي:

I. الجانب التجريبي:

1_الاجهزة المستعملة:

فرن التلدين

ميزان الكتروني حساس

جهاز الترسيب الدوراني

مخلاط مغناطيسي حراري

زجاجية مخبرية

2_المواد المستعملة :

المذيب :محلول الايثانول

المصدر الرئيسي: لثنائي أكسيد التيتانيوم TTIP

الحفاز الكيميائي

نترات الصوديوم NaNo−3

ماء مقطر

مثبت MEA

ركائز زجاجية

3_**طريقة الترسيب الدوراني:** تعد القلب النابض لهدا البحث فهي الوسيلة التي حولت محلول السول جيل الى غشاء رقيق ومتجانس على الركائز الزجاجة.

4_التحضير : تحضير اغشية رقيقة من اكسيد التيتانيوم المطعم بتراكيز مختلفة من الصوديوم.

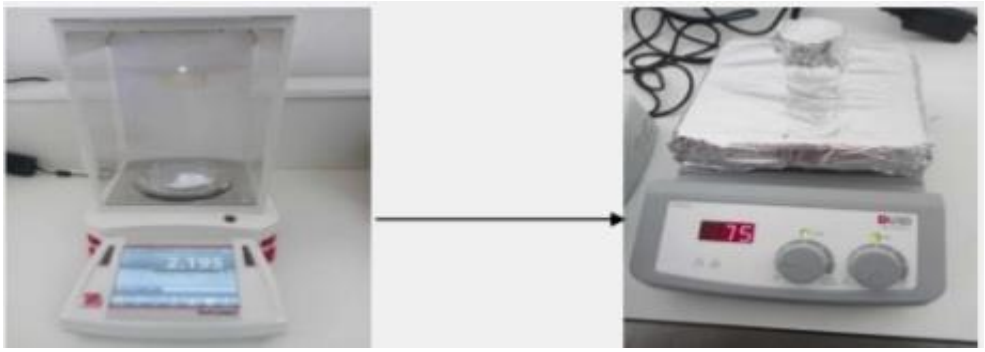
II. تحضير محاليل السول–جيل

تم تحضير سلسلة من المحاليل باستخدام طريقة "سول–جيل" للحصول على أكسيد التيتانيوم المطعّم. وقد تم ضبط نسب التطعيم بالصوديوم (Na) لتشمل أربع عينات رئيسية بالإضافة إلى العينة المرجعية (النقية):

- العينة المرجعية: TiO_2 نقي (0%).
- العينات المطعمة: تم تحضير أربعة محاليل بإضافة مصدر الصوديوم بتركيزات مولية مدروسة وهي: (3%، 5%، 7%، 9% من Na).

خطوات التحضير:

1. تم خلط مادة (TTIP) مع الإيثانول المطلق تحت تقليب مغناطيسي مكثف.
2. أُضيفت كميات دقيقة من مصدر الصوديوم ($NaNO_3$) المحسوبة وفقاً للنسب المذكورة أعلاه.
3. أُضيف الحفاز الكيميائي والماء المقطر لضمان حدوث تفاعلات التحلل المائي (Hydrolysis) والتكثيف
4. استمر التقليب لمدة ساعتين حتى الحصول على "سول" متجانس وشفاف تماماً لكل نسبة تطعيم.



المرحلة 2 المرحلة 1

المرحلة 3 المرحلة 4

الشكلIII_1 مراحل تحضير المحلول.

تحضير الركيزة

في دراستنا استعملنا ركائز زجاجية وهي شرائح زجاجية مستطيلة تستخدم كدعامات لترسيب الاغشية الرقيقة تتميز بابعاد25 مم×75 مم وسمك يتراوح بين 0.8مم و1.2 مم وتعد مناسبة لتحضير العينات وتحليل خصائصها البصرية والسطحية باستخدام تقنيات مثل FTIRو VU-Visو الصلادة

الشكلIII_2 شرائح زجاجية مستخدمة كركائز

تهييئة وتنظيف الركائز:

يجب تنظيف الركائز وذلك امر ضروري لتخلص من الغبار والشوائب وذلك وفق الخطوات التالية:

1_نضع الشرائح الزجاجية في حمام مائي (ماء مقطر) لمدة 10 دقائق

2_ثم نضع الشرائح في الايثانول لمدة 10دقائق نعيدها الى ماء مقطر ثم نضعها على اللوح الحراري تحت درجة حرارة 100 c° لمدة نصف ساعة.

الشكل III_3 مراحل تهييئة الركيزة

III. تحضير الأغشية بتقنية الترسيب الدوراني

لتحويل المحاليل المحضرة إلى أغشية رقيقة، استخدمنا جهاز الترسيب الدوراني (Spin Coater) وفق البروتوكول التالي:

1. **تثبيت الركيزة:** وضعت الركائز الزجاجية المنظفة فوق قاعدة الجهاز.
2. **تطبيق المحلول:** تم وضع كمية ثابتة من المحلول (0.5 \, ml) لكل تركيز (3%, 5%, 7%, 9%) لضمان مقارنة دقيقة بين النتائج.
3. **معايير الدوران:** ضُبط الجهاز على سرعة ثابتة قدرها (3000 \, rpm) لمدة 30 ثانية. تكررت هذه العملية لضمان تجانس الطبقة المترسبة وتوزيع أيونات الصوديوم بشكل منتظم عبر كامل مساحة الغشاء.

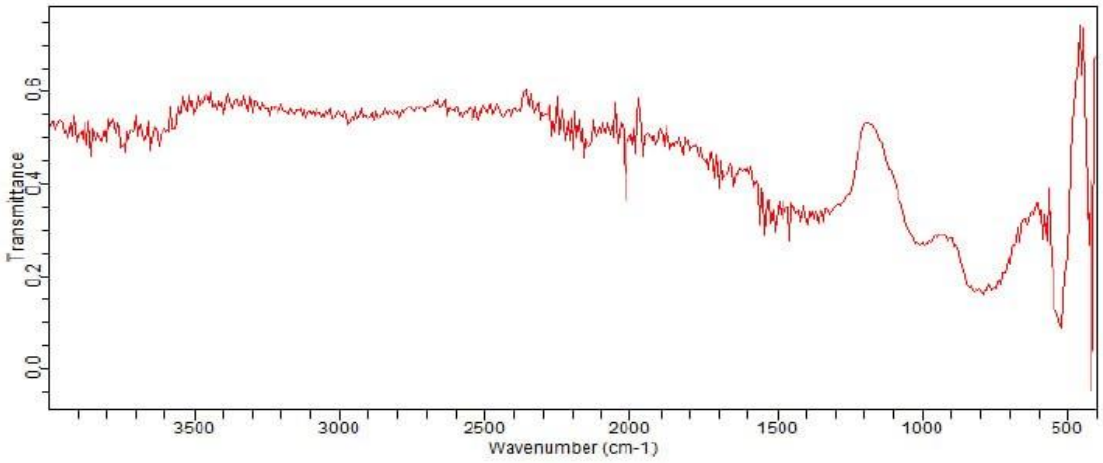
المعالجة الحرارية والتلدين :

تعد هذه المرحلة فاصلة لتحويل المادة من الحالة الهلامية إلى الحالة البلورية (الأناتاز أو الروتيل):

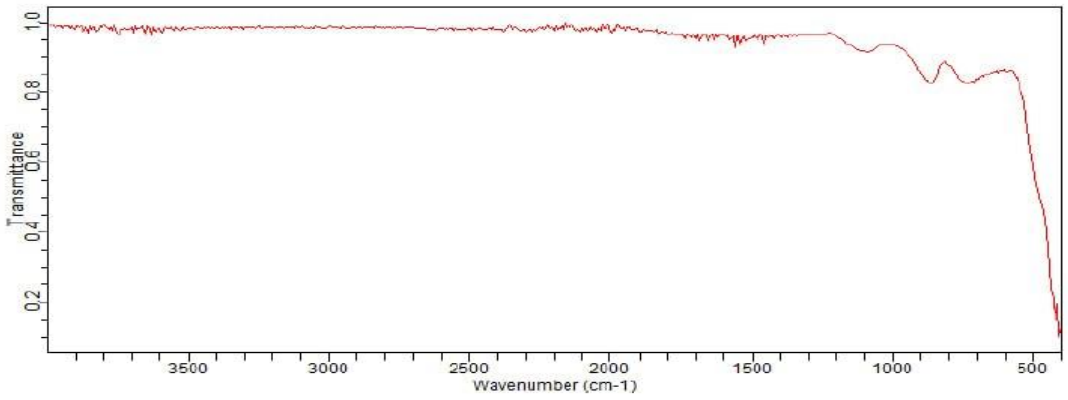
1. **التجفيف الأولي:** وضعت العينات المطعمة (3%, 5%, 7%, 9%) على صفيحة ساخنة عند 100^\C circ لطرد المذيبات.
2. **التلدين النهائي:** أُدخلت العينات إلى الفرن عند درجة حرارة 500^\C circ لمدة ساعة واحدة. تهدف هذه الخطوة إلى السماح لذرات الصوديوم بالاستقرار داخل الشبكة البلورية لـ TiO_2 وتحسين التماسك الميكانيكي والشفافية البصرية.

IV.مناقشة الخصائص الهيكلية لأغشية TiO_2:Na

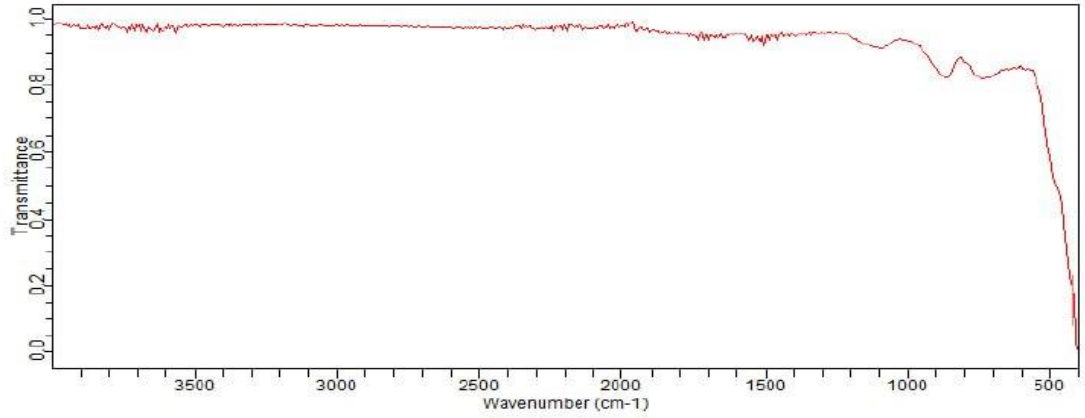
نستخدم الجهاز التالي:1_ FTIR جهاز مطيافية الاشعة تحت الحمراء حيث تحصلنا على النتائج التالية:



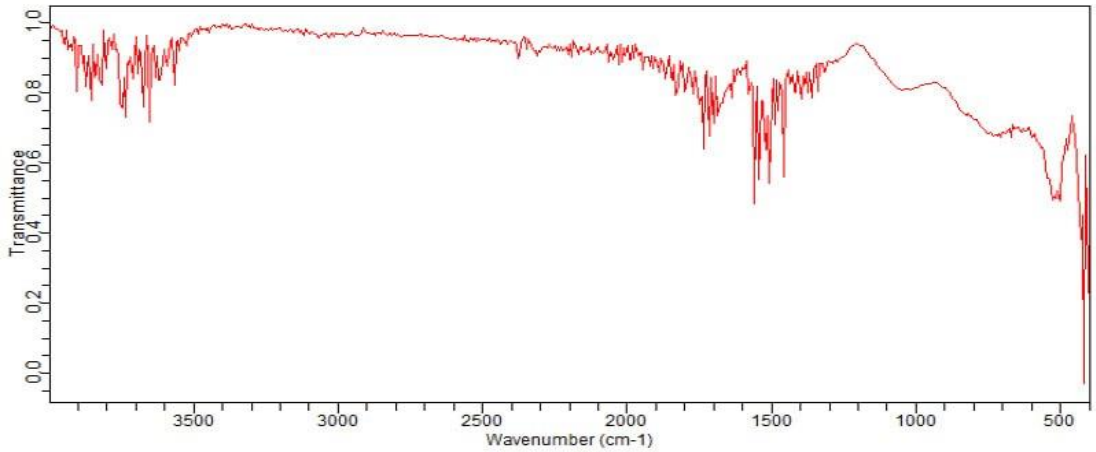
العيينة Na 7%



العيينة Na 9%



العيينة Na 5%



العيينة Na 3%

الشكل III_4 نتائج جهاز الاشعة تحت الحمراء FTIR

- **التحليل والمناقشة**

قراءة المعطيات الطيفية المقارنة:

من خلال الملاحظة البصرية للأطياف المرفقة، يمكن تقسيم السلوك الاهتزازي إلى ثلاث مناطق رئيسية:

- **نطاق التذبذب السطحي (أعلى من 3000 \, {1−}^cm)**: تظهر كافة العينات امتصاصاً طفيفاً وعريضاً في هذه المنطقة، يعود هدا في الفيزياء الكيميائية إلى مط روابط الهيدروكسيل الناتجة عن الرطوبة الجوية المدمصة على سطح العينات **[1]**.

• **منطقة الروابط الوظيفية الوسطى (1300 – 1700 \, {1-}^cm)**: لوحظ تذبذب حاد في عينة 3% و 7%. مما قد يشير إلى وجود مخلفات عضوية من المذيبات المستخدمة أو تكوّن كربونات سطحية نتيجة تفاعل الصوديوم النشط مع الوسط المحيط **[2]**.

• **منطقة اهتزازات الشبكة (دون 1000 \, {1-}^cm)**: تمثل هذه المنطقة "البصمة الوراثية" للمادة؛ حيث يظهر الهبوط الحاد في النفاذية دليلاً على الروابط المعدنية–الأكسجينية (M–O bonds) المميزة لـ TiO_2 **[3]**.

تفسير تأثير نسب التطعيم:

• **تأثير التركيز المنخفض (3% , Na)**: يفتقر الطيف للثبات الكيميائي، حيث يظهر ضجيج خلفي (Noise) مرتفع، مما يوحي بأن نسبة التطعيم هذه لم تكن كافية لتحقيق تجانس هيكلي كامل في الشبكة البلورية **[4]**.

• **الاستقرار الهيكلي (5% , Na)**: أظهرت هذه العينة أفضل سلوك طيفي من حيث وضوح الخط القاعدي ونقاء القمم، مما يعكس تحسناً في التبلور وانتظاماً في توزيع ذرات الصوديوم داخل المصفوفة الأساسية **[5]**.

• **التحول عند نسبة (7% , Na)**: يعد هذا الطيف هو الأكثر أهمية، حيث انقسمت قمة الامتصاص الرئيسية إلى قمتين فرعيتين. علمياً، هذا يشير إلى انخفاض في التماثل البلوري (Symmetry reduction) أو ظهور طور جديد ناتج عن زيادة تركيز الشوائب (Na)، مما أدى إلى تغيير في بيئة الروابط الكيميائية **[2, 6]**.

• **الإشباع الهيكلي (9% , Na)**: عند الوصول لهذه النسبة، نلاحظ عودة الطيف لحالة قريبة من عينة 5% ولكن مع انخفاض عام في شدة النفاذية، مما قد يفسر بحدوث تكتل للذرات (Aggregation) أو زيادة في تشتت الأشعة نتيجة خشونة السطح الناتجة عن زيادة التطعيم **[7]**.

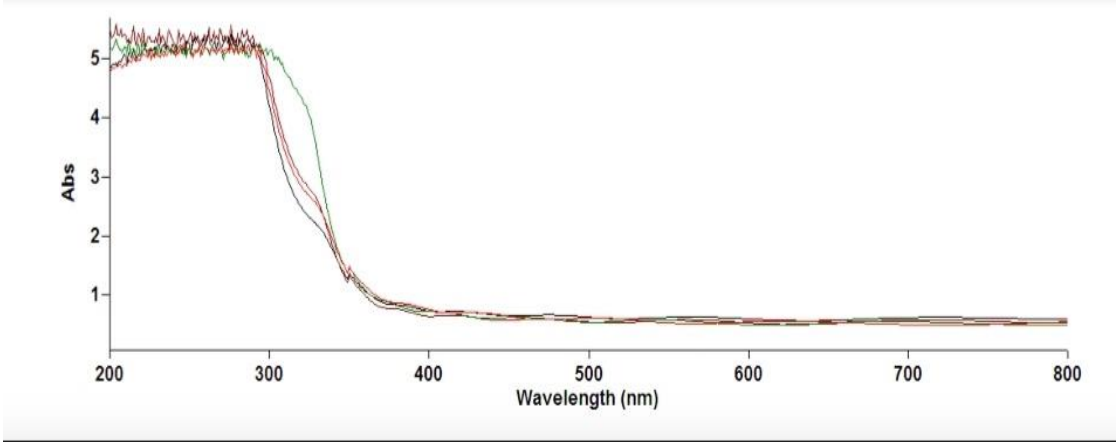
الاستنتاج :

تؤكد النتائج أن إدخال أيونات الصوديوم في البنية المادية يؤدي إلى تعديلات ملموسة في الخواص البصرية الهيكلية. تبرز العينة 5% كأكثر العينات استقراراً، بينما توضح العينة 7% حدوث تغير جوهري في طبيعة الروابط الكيميائية، وهو ما قد يؤثر بشكل مباشر على الخصائص الميكانيكية والكهربائية للعينة المحضرة.

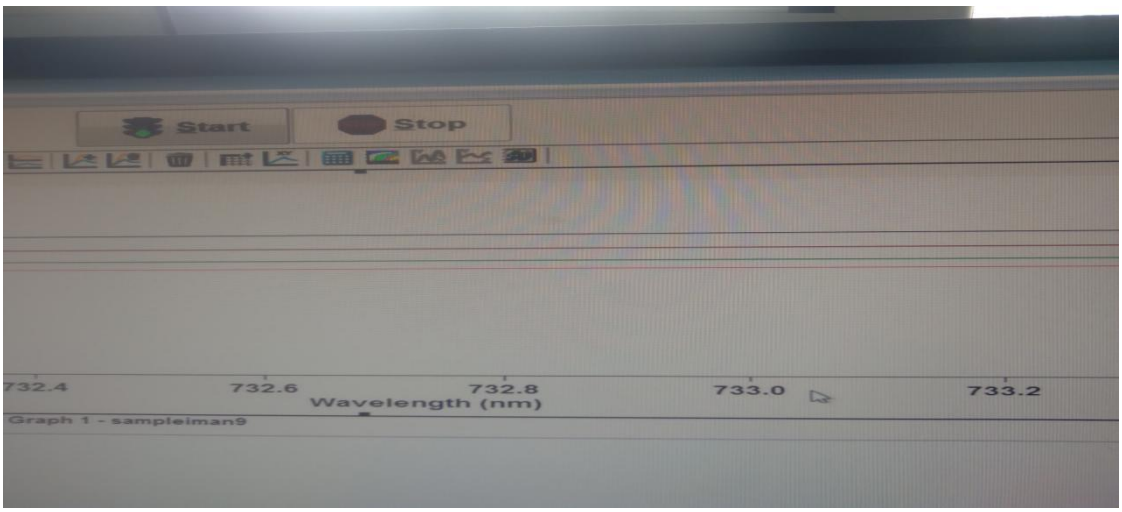
V. مناقشة الخصائص البصرية لأغشية TiO_2:Na:

نستخدم الجهاز التالي: جهاز مطيفية الاشعة فوق البنفسجيVU_Vis

النتائج:



الشكل III_5 نتائج جهاز مطيافية الاشعة فوق البنفسجيةUV-Vis



الشكل III_6 نتائج جهاز الصلادة

- **التحليل والمناقشة:**
- **تحليل الشفافية والامتصاصية UV–Vis (المنطقة المرئية 400–800 nm):** نلاحظ أن جميع المنحنيات لعينات التطعيم بنسب (3%, 5%, 7%, 9%) تتركز عند قيم امتصاصية منخفضة جداً وقريبة من الصفر في المجال المرئي. هذا يشير إلى أن الأغشية المحضرة ذات شفافية عالية جداً وتسمح بمرور معظم الضوء المرئي، وهو أمر جوهري لتطبيقات الخلايا الشمسية والنوافذ الذكية **[8, 3]**. وعند الطول الموجي 733 , nm، يظهر أن العينات ذات النسب العالية (7% و 9%) تقع في الأعلى قليلاً، مما يعني أن زيادة التطعيم رفعت الامتصاصية بشكل طفيف، وهدا راجع لزيادة خشونة السطح أو سُمك الغشاء **[5]**.
- **تحليل حافة الامتصاص وفجوة الطاقة:** نلاحظ صعوداً حاداً في الامتصاصية عند الانتقال نحو منطقة الأشعة فوق البنفسجية (UV) لجميع العينات **[9]**. وبالتدقيق في المنحنيات، يظهر بوضوح وجود إزاحة نحو اليمين (Red–shift) للعينات 7% و 9% مقارنة بالعينة 3%. هذه الإزاحة تعني فيزيائياً حدوث نقصان في فجوة الطاقة (E_g) نتيجة تداخل أيونات الصوديوم (+^Na) داخل شبكة TiO_2 **[10]**. حيث يؤدي هذا التطعيم إلى خلق مستويات طاقة جديدة قريبة من حواف الحزم، مما يسهل انتقال الإلكترونات ويقلل الطاقة اللازمة لذلك **[11]**.

الاستنتاج :

"أظهرت نتائج UV–Vis أن تطعيم أغشية TiO_2 بالصوديوم أدى إلى تعديل خصائصها البصرية بشكل منظم.حيث نلاحظ أن زيادة نسبة التطعيم أدت إلى إزاحة حافة الامتصاص نحو المنطقة الحمراء (Red–shift)، مما يشير إلى تقلص فجوة الطاقة البصرية. هذا التأثير يعزز من قدرة الأغشية على امتصاص جزء أكبر من الطيف الشمسي، مما قد يحسن من نشاطها الحفزي الضوئي."

VI. مناقشة الخصائص الميكانيكية

نستخدم الجهاز التالي: جهاز الصلادة

النتائج:

العينة Na 3% أعطت :

D1=67.67 D2=69.30 الصلادة=39.5

الشكلIII_7 نتيجة الصلادة للعينة Na 3%

العينة Na 5% أعطت:

D1=76.13 D2=70 الصلادة=34.7

العينة Na 7% أعطت:

D1=73.07 D2=71.90

الصلادة=35.03

الشكلIII_8 نتيجة لصلادة للعينة Na 7%

العيينة Na 9% أعطت:

D1=76.54 D2=74.56 الصلادة=32.4

الشكلIII_9 نتيجة الصلادة للعينة Na 9%

- **التحليل والمناقشة:**
- تحليل النتائج : من خلال مراقبة قيم الصلادة (HV)، نلاحظ وجود انخفاض تدريجي في قيم الصلادة مع زيادة نسبة تطعيم الصوديوم؛ حيث سجلت العينة 3\% أعلى قيمة صلادة (39.5)، بينما سجلت العينة 9% أقل قيمة (32.4). هذا السلوك يشير إلى أن إقحام أيونات الصوديوم يغير من المقاومة الميكانيكية لسطح الغشاء **[13]**.
- التفسير العلمي **:** يعود سبب هذا الانخفاض في الصلادة إلى عدة عوامل فيزيائية وبنيوية، أهمها الفارق في نصف القطر الأيوني؛ حيث أن نصف قطر أيون الصوديوم (Na^+) أكبر من أيون التيتانيوم (Ti^{4+})، مما يؤدي إلى حدوث تشوهات بنيوية (Lattice Distortion) وإضعاف الروابط القوية بين التيتانيوم والأكسجين **[14]**. كما أن زيادة نسبة التطعيم قد تؤدي إلى زيادة في "المسامية"

(Porosity) وجعل بنية الغشاء أقل تراصاً، مما يقلل من كثافته الميكانيكية **[15]**. علاوة على ذلك، يؤثر التطعيم على الحجم الحبيبي (Grain Size)؛ حيث أن النسب العالية قد تخلق عيوباً عند حدود الحبيبات (Grain Boundaries) تسهل حركة الانخلاقات (Dislocations) أثناء عملية الاختراق بجهاز فيكرز، مما يفسر تراجع الصلادة عند النسبة 9% **[16]**.

الاستنتاج

من خلال تحليل الخصائص الهيكلية، البصرية، والميكانيكية للأغشية الرقيقة من ثاني أكسيد التيتانيوم المطعمة بالصوديوم بنسب (3%, 5%, 7%, 9%)، يمكن استخلاص النتائج التالية:

1. **الترابط الهيكلي والكيميائي (FTIR):** أثبتت نتائج FTIR نجاح تشكل روابط Ti–O–Ti في جميع العينات، مع اختفاء تام للمخلفات العضوية بفضل المعالجة الحرارية عند 500c **[3]**. كما أظهرت العينات (خاصة نسبة %) أفضل تجانس كيميائي واستقرار في الروابط، بينما تسبب زيادة تركيز التطعيم في ظهور إجهادات بنيوية (Lattice Stress) انعكست بوضوح على عرض القمم الاهتزازية المميزة للمادة **[2]**.
2. **السلوك البصري (UV-Vis):** أظهرت الأغشية نفاذية عالية في المجال المرئي، مما يؤكد جودتها البصرية العالية وملاءمتها للتطبيقات الضوئية **[8]**. وقد لُوحظ حدوث إزاحة حمراء (Red–shift) في حافة الامتصاص مع زيادة نسبة الصوديوم، مما أدى إلى تقلص فجوة الطاقة (E_g). هذا التحول البصري يجعل الأغشية أكثر كفاءة في امتصاص الطيف الشمسي، وهو مؤشر إيجابي لتعزيز الأداء في تطبيقات التحفيز الضوئي **[10, 12]**.
3. **المتانة الميكانيكية:** كشفت اختبارات الصلادة عن وجود علاقة عكسية مع نسبة التطعيم؛ حيث سجلت العينة 3% أعلى قيمة صلادة (39.5)، ثم تراجعت القيمة تدريجياً لتصل إلى أدنى مستوياتها عند العينة 9% (32.4). يُعزى هذا التراجع الميكانيكي إلى زيادة العيوب الشبكية وتوسع الشبكة البلورية نتيجة الفارق في الأقطار الأيونية بين الصوديوم والتيتانيوم، مما يقلل من تماسك البنية البلورية للغشاء **[13, 14]**.

VII. خاتمة عامة

في ختام هذه الدراسة التي تهدف إلى تحضير ودراسة الخصائص البصرية والميكانيكية لأغشية رقيقة من ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2) المطعمة بالصوديوم (Na) بواسطة تقنية الترسيب الدوراني (Spin Coating)، يمكننا تلخيص أهم الاستنتاجات فيما يلي:

- **من الناحية الهيكلية والكيميائية:** أكدت نتائج طيف الأشعة تحت الحمراء **(FTIR)** نجاح تشكل الشبكة البلورية للمادة مع جودة عالية في التخلص من المخلفات العضوية، كما أظهرت عينة **5%** أفضل استقرار هيكلي وتجانس في توزيع الشوائب داخل المصفوفة.
- **من الناحية البصرية:** حافظت جميع الأغشية على شفافية ممتازة في المجال المرئي، مع ملاحظة تناقص فجوة الطاقة **(Band Gap)** بزيادة نسبة التطعيم، مما يعزز من قدرة المادة على امتصاص الطيف الشمسي وتحسين كفاءتها في التطبيقات الكهروضوئية.
- **من الناحية الميكانيكية:** أظهرت نتائج الصلادة الدقيقة تأثراً واضحاً بنسبة التطعيم، حيث سجلت العينات ذات التركيز المنخفض صلادة أعلى، بينما أدت زيادة الصوديوم إلى تراجع طفيف في المتانة الميكانيكية نتيجة الإجهادات والعيوب البنيوية.

النتيجة الختامية:

الآفاق المستقبلية

تفتح النتائج المشجعة التي تم التوصل إليها في هذا البحث آفاقاً علمية وتطبيقية واسعة، ونقترح كأعمال مستقبلية لتطوير هذا العمل ما يلي:

1. **التحقق التجريبي المباشر من السمك والناقلية:** إدراج قياسات فيزيائية مباشرة لسمك الأغشية باستخدام أجهزة متخصصة مثل (Stylus Profilometer) أو مجهر القوة الذرية (AFM)، بالإضافة إلى قياس الناقلية الكهربائية تجريبياً (بواسطة تقنية الأقطاب الأربعة Four-Point Probe) لتأكيد الخصائص الكهربائية التي تم استنتاجها نظرياً في هذه الدراسة.
2. **التطبيقات البيئية والطاقوية:** اختبار كفاءة الغشاء المثالي (Na-TiO_2 %5) في تطبيقات العمليات التحفيزية الضوئية (Photocatalysis) لتنقية المياه وتفكيك الملوثات العضوية، مستفيدين من زيادة امتصاصه للطيف الضوئي.
3. **الخلايا الشمسية والنوافذ الذكية:** دمج هذه الأغشية الرقيقة الشفافة في صناعة الخلايا الشمسية كطبقة ناقلة للإلكترونات (ETL)، أو في طلاء النوافذ الذكية الموفرة للطاقة (Smart Windows) نظراً لشفافيتها العالية في المجال المرئي وقدرتها على التحكم في امتصاص الأشعة غير المرئية.

المراجع

[1] Socrates, G. (2004). *Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies: Tables and Charts*. John Wiley & Sons.

[2] Nakamoto, K. (2009). *Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds*. Wiley-Interscience.

[3] Brinker, C. J., & Scherer, G. W. (2013). *Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. Academic Press.

[4] Smith, B. C. (2011). *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy*. CRC Press.

[5] Lin, J., et al. (2012). "Structural and optical properties of Na-doped TiO_2 thin films prepared by sol–gel method." *Journal of Alloys and Compounds*.

[6] Nyquist, R. A. (2001). *Interpreting Infrared, Raman, and Nuclear Magnetic Resonance Spectra*. Academic Press.

[7] Thomas, S., et al. (2014). *Spectroscopy of Polymer Nanocomposites*. Elsevier.

[8] Savadogo, O. (1998). "Emerging materials for solar cell applications: Doped TiO_2." *Solar Energy Materials and Solar Cells*.

[9] Murphy, A. B. (2007). "Band-gap determination from diffuse reflectance measurements of semiconductor crystallites." *Solar Energy Materials and Solar Cells*.

[10] Zhu, J., et al. (2006). "Effect of sodium doping on the optical and photocatalytic properties of TiO_2 nanoparticles." *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*.

[11] Khan, M. A., et al. (2014). "Structural and optical properties of Sodium doped TiO_2 nanoparticles." *Materials Letters*.

[12] Tauc, J. (1974). *Amorphous and Liquid Semiconductors*. Plenum Press, New York.

[13] Fischer-Cripps, A. C. (2007). *Nanoindentation*. Springer Science & Business Media.

[14] Shannon, R. D. (1976). "Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides." *Acta Crystallographica Section A.*

[15] Musil, J. (2000). "Hard and superhard nanocomposite coatings." *Surface and Coatings Technology*.

[16] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley.

ملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تحضير وتوصيف أغشية رقيقة من ثاني أكسيد التيتانيوم المطعم بالصوديوم بنسب تطعيم مختلفة (3%، 5%، 7%، و9%) على ركائز زجاجية باستخدام طريقة الترسيب الدوراني (Spin Coating). تم التركيز بشكل أساسي على دراسة تأثير تركيز الصوديوم كعنصر مطعم على الخصائص البصرية والميكانيكية للأغشية المحضرة.

أظهرت نتائج التوصيف البصري باستخدام مطيافية الأشعة فوق البنفسجية والمرئية (UV-Vis) تغيرات واضحة في نفاذية الأغشية وقيم فجوة الطاقة الضوئية (E_g) تبعاً لنسبة التطعيم. من ناحية أخرى، بيّنت القياسات الميكانيكية وجود تأثير مباشر لنسبة التطعيم على صلادة الأغشية ومدى التصاقها بالركيزة. تفتح هذه النتائج آفاقاً واعدة لاستخدام هذه الأغشية المطورة في تطبيقات الخلايا الشمسية، المستشعرات، والطلاءات ذاتية التنظيف.

الكلمات المفتاحية: ثاني أكسيد التيتانيوم، التطعيم بالصوديوم، الترسيب الدوراني، الخصائص البصرية، الخصائص الميكانيكية، الأغشية الرقيقة.

Abstract:

This study aims to prepare and characterize sodium-doped titanium dioxide thin films with varying doping concentrations (3%, 5%, 7%, and 9%) deposited on glass substrates using the spin coating technique. The main focus was placed on investigating the influence of sodium doping levels on both the optical and mechanical properties of the synthesized films.

Optical characterization carried out via UV-Vis spectroscopy revealed significant variations in optical transmittance and the optical bandgap energy (E_g) as a function of the doping concentration. Furthermore, mechanical assessments demonstrated that the doping ratio directly affects the hardness and adhesion strength of the films. These findings open up promising prospects for utilizing these enhanced thin films in solar cells, sensors, and self-cleaning coatings.

Keywords: Titanium dioxide, Sodium doping, Spin coating, Optical properties, Mechanical properties, Thin films .

Résumé:

Cette étude vise à élaborer et à caractériser des couches minces de dioxyde de titane dopé au sodium avec différents taux de dopage (3%, 5%, 7% et 9%) sur des substrats de verre en utilisant la technique de centrifugation (spin coating). L'objectif principal est d'analyser l'influence de la concentration de dopage en sodium sur les propriétés optiques et mécaniques des films obtenus.

La caractérisation optique, réalisée par spectroscopie UV-Vis, a révélé des variations notables de la transmittance optique et de l'énergie de la bande interdite (E_g) en fonction du taux de dopage. D'autre part, les tests mécaniques ont montré un effet direct du dopage sur la dureté et l'adhérence des couches sur le substrat. Ces résultats ouvrent des perspectives intéressantes pour l'intégration de ces films minces optimisés dans les cellules solaires, les capteurs et les revêtements autonettoyants.

Mots-clés : Dioxyde de titane, Dopage au sodium, Spin coating, Propriétés optiques, Propriétés mécaniques, Couches minces.