مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية_ سلسلة العلوم الأساسية المجلد (٩) العدد (٣) ٢٠٢٥

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies –Basic Sciences Series Vol. (9) No. (3) 2025

دراسة أثر المعالجة الحرارية على الألياف النانوية من أكسيد النحاس (CuO) المحضرة بطريقة الغزل الكهربائي

أ. د. حسن عبد الكريم سليمان *

أ.د جمال قاسم الشر**

محمود الشيخ***

(تاريخ الإيداع ١٤/١٠/ ٢٠٢٥ – تاريخ النشر ٢٤/١١/ ٢٠٢٥)

□ ملخّص □

في هذا البحث قمنا بتحضير الياف نانوية من أوكسيد النحاس CuO حيث نهدف إلى تحضير ألياف نانوية من أكسيد النحاس تكون فيها نسبة مساحة السطح الى الحجم كبيرة جدا وذلك عن طريق الغزل الكهربائي (electrospinning) وهي تقنية تستخدم لتحضير ألياف نانوية عضوية ولاعضوية بأطوال كبيرة وأقطار موحدة، حيث قمنا بتحضير محلول الغزل من خلال مزج نترات النحاس NO_3Cu مع الماء مع بوليمير PVA (Polyvinyl alcohol). أُنتجت الألياف النانونية من خلال تعريض محلول الغزل لقوى الكهرباء الساكنة وذلك بتطبيق جهود مختلفة 23 k.v وقد تم تجميع هذه الألياف على ورقة من الألمنيوم وشرائح من الزجاج ثم قمنا بتعريض هذه الألياف إلى عملية معالجة حرارية وذلك من خلال وضع ألياف البوليمر النانوية المغزولة في فرن عند درجة حرارة الغرفة (35 °C) ثم عند درجة حرارة (200 °C) للتخلص من البوليمير ثم إلى درجة حرارة (500 °C) للتخلص من جميع الشوائب والمواد الأخرى. وأثناء تنفيذ التجربة تم أخذ معاملات المحلول والتشغيل والبيئة المحيطة بعين الاعتبار، حيث تبين ان الالياف المحضرة تملك فجوة طاقية قدرها (Eg= 3,2 e.v) عند الدرجة (35 °C) وتتناقص الفجوة الطاقية الى (Eg= 1,8 e.v) مع عملية المعالجة الحرارية للدرجة (500°C)، كذلك نلاحظ اختفاء قمم الفلورة مع عملية المعالجة الحرارية، كذلك بنية الاسلاك كانت أكثر اتساقا مع عملية المعالجة الحرارية عند الدرجة (500 °C).

الكلمات المفتاحية: أكسيد النحاس، الغزل الكهربائي، ألياف نانوية، مجهر القوة الذرية (AFM).

---

*أستاذ،قسم الفيزياء،كلية العلوم،جامعة طرطوس.

**أستاذ،قسم الفيزياء،كلية العلوم،جامعة حلب.

***طالب دراسات عليا (ماجستير) ،قسم الفيزياء،كلية العلوم،جامعة طرطوس.

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية_ سلسلة العلوم الأساسية المجلد (٩) العدد (٣) ٢٠٢٥

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies –Basic Sciences Series Vol. (9) No. (3) 2025

Study of the Effect of Heat Treatment on Copper Oxide (CuO) Nanofibers Prepared by Electrospinning

Prof. Dr. Hassan Abd Al Karim Suleiman*
Prof. Dr. Jamal Qassim Al-Sharr **
Mahmoud Al-Sheikh***

(Received 24/10/2025.Accepted 24/11/2025)

□**ABSTRACT** □

In this research, we prepared copper oxide (CuO) nanofibers with a very high surface area-to-volume ratio using electrospinning. This technique is used to prepare organic and inorganic nanofibers with long lengths and uniform diameters. The spinning solution was prepared by mixing copper nitrate (NO3Cu) with water and PVA (polyvinyl alcohol) polymer. The nanofibers were produced by subjecting the spinning solution to static electricity using varying voltages up to 23 kV. These fibers were then assembled onto aluminum foil and glass slides. The nanofibers were then subjected to heat treatment by placing them in an oven at room temperature (35 °C), then at 200 °C to remove the polymer, and finally at 500 °C to remove all impurities and other materials. During the implementation of the experiment, the solution parameters, operation, and surrounding environment were taken into consideration. It was found that the prepared fibers have an energy gap of (e.v Eg= 3.2) at (35 °C) and the energy gap decreases to (e.v Eg= 1.8) with the heat treatment process at (500 °C). We also note the disappearance of the fluorescence peaks with the heat treatment process. Likewise, the structure of the wires was more consistent with the heat treatment process at (500 °C).

Keywords: Copper oxide, electrospinning, nanofibers, atomic force microscopy (AFM).

*Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Tartous University .

**Professor, Department of Physics, Faculty of Science, University of Aleppo .

***Postgraduate Student (Master's), Department of Physics, Faculty of Science, Tartous University.

١ – مقدمة:

في السنوات الأخيرة، اكتسب تخليق المواد غير العضوية ذات الأشكال النادرة والفريدة من نوعها تفانياً كبيراً بسبب التطبيقات المحتملة كمحفزات والطب والإلكترونيات والسيراميك والأصباغ ومستحضرات التجميل، ومن ابرز هذه المواد، المواد ذات الابعاد النانوية وقد تم بالفعل إنشاء العديد من طرق التخليق لإعداد الهياكل النانوية المختلفة ومنها طرق تصنيع الأسلاك النانوية [1].

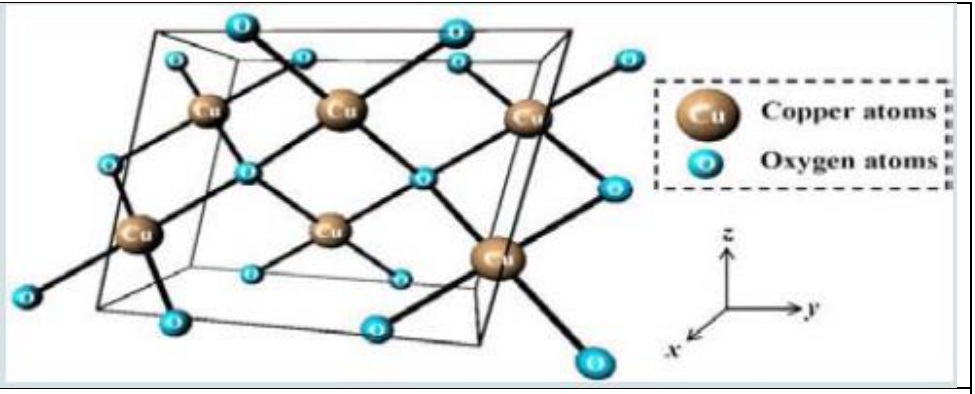
المواد النانوية هي دقائق متناهية في الصغر وتحتوي على بعد واحد على الأقل يتراوح بين (1-100 n.m). ويعزى سبب استخدامها في تطبيقات عملية واسعة وذلك لاكتسابها عدد من الخصائص الفريدة مقارنة مع نظيراتها ذات الأبعاد الأكبر ومن أبرزها أكاسيد المعادن النانوية التي دخلت في مجالات واسعة منها ؛ البصريات، الأجهزة الإلكترونية والكهربائية والمحفزات ومستحضرات التجميل ... الخ [2].

ازداد الاهتمام البحثي بالمواد النانوية وبشكل خاص جسيمات أكاسيد المعادن النانوية كأكسيد النحاس النانوي لما تمتلكه من خصائص مميز كالمقاومة الكهربائية العالية والقوة والصلابة بالإضافة إلى النشاط البيولوجي متعدد الاستخدامات، حيث تستخدم هذه الجسيمات على نطا واسع كمحفزات صناعية، وأجهز استشعار كيميائية، وفي التطبيقات الطبية، وأشباه الموصلات وهي مفيد أيضًا في تطوير الإلكترونيات الدقيقة [3].

إن المادة قيد البحث أوكسيد النحاس هي مادة نصف ناقلة ذات لون اسود مائل للرمادي وهي مادة ذات تركيب بلوري احادي الميل (Monoclinic) وثابت الشبكة البلورية لها يساوي ($4.684A^{\circ}$) ويمتلك أوكسيد النحاس النانوي فجوة طاقة مقدارها (1.2 eV) وهو نصف ناقل من نوع (p-type) أي أن حاملات الشحنة الأغلبية هي الفجوات (holes) [4]. بالمقارنة مع أكسيد النحاس الميكروي، يتميز أكسيد النحاس النانوي بخصائص فيزيائية وكيميائية مميزة، مثل: التأثير السطحي، وتفوق تأثير الحجم الكمي، وتأثير الحجم، وتأثير النفق الكمي العياني في المغناطيسية، والامتصاص الضوئي، والنشاط الكيميائي، والمقاومة الحرارية، والتحفيز، ونقطة الانصهار. يجذب أكسيد النحاس النانوي اهتمامًا متزايدًا، وأصبح من أكثر المواد غير العضوية استخدامًا على نطاق واسع. أصبحت جسيمات أكسيد المعادن النانوية أداة لا غنى عنها في العلوم والتكنولوجيا الحديثة بسبب خصائصها الفريدة ونطاقها الواسع من التطبيقات [5, 6]. يظُهر أكسيد النحاس النانوي أداء ممتازاً مقارنة بنظيره الميكروي. ونتيجة لذلك، تم تصنيع العديد من هياكل أكسيد النحاس النانوية على شكل أسلاك نانوية وقضبان نانوية وإبر نانوية وزهور نانوية وجسيمات نانوية [7].

١-١- البنية البلورية:

تتميز أسلاك أكسيد النحاس النانوية عادةً ببنية بلورية تؤثر بشكل كبير على خصائصها الكهربائية والبصرية والكيميائية. بنيتها يمكن أن يوجد أكسيد النحاس النانوي في مراحل مختلفة، أبرزها أوكسيد النحاس الثنائي (Cu_2O) الذي يتميز ببنية بلورية مكعبة وأوكسيد النحاس الثنائي (CuO) الذي يتميز ببنية أحادية الميل كما هو موضح بالشكل (1).



الشكل (1): التمثيل التخطيطي لخلية وحدة CuO أحادية الميل(monoclinic) [8].

ويمكن تلخيص بنية وخصائص أكسيد النحاس بالنقاط الرئيسية التالية كما هو موضح بالجدول (1).

الجدول (1) يبين الخصائص البنيوية لاوكسيد النحاس

الخاصة	القيمة
البنيوية: بنية بلورية ثابت الشبكة البلورية	أحادي البلورة (a b) a = 4.68 Å, b = 3.42 Å, c = 5.13 Å
كهربائية: القدرة العكسية حركة الثقب	a) 630 mA h g-1 b) 0.1-10 cm^2 / V s
بصري: فجوة النطاق معامل الانكسار	a) 1.2 eV, direct b) 1.4

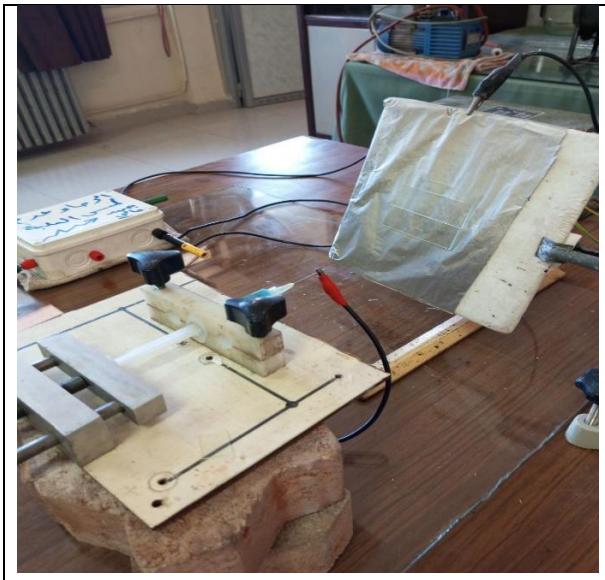
٢- هدف البحث:

البحث عن مادة ذات ناقلية كهربائية عالية ومسامية ويكون فيها مساحة السطح الى الحجم كبيرة جدا ويعتبر أكسيد النحاس النانوي البنية مرشح قوي لتحقيق هذا الهدف.

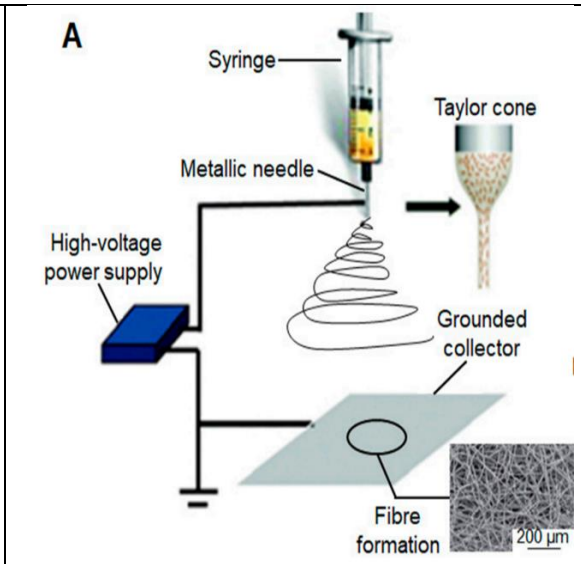
٣- طريقة التحضير:

تم تحضير ألياف النحاس النانوية بتقنية الغزل الكهربائي Electrospinning والتي تعدُ تقنية حديثة ومن أكثر التقنيات شيوعاً لإنتاج ألياف نانوية من مختلف المواد وذلك بسبب بساطتها، وتكلفتها المنخفضة، وإمكانية التحكم في عمليات التصنيع، وتنوعها الوظيفي، وإمكانية التحكم في مواصفات الالياف المغزولة كهربائياً كالتحكم في مرونته، ومساميته، والانتقائية، ونفاذية المسام، وأيضاً إمكانية تطبيقه على عدد كبير من المواد، وهي طريقة كهربائية ميكانيكية بسيطة واقتصادية يمكن من خلالها إنتاج ألياف نانوية دقيقة بأقطار صغيرة من رتبة النانومتر والميكروميتر وذلك باستخدام منبع جهد عالٍ، إذ يتم تحضير المحلول المراد غزله كهربائيّاً ويوضع في سرنغ الإبرة المستخدمة، ثم توصل الإبرة الموضوعة في مضخّة السرنغ بمنبع الجهد العالي بينما يوصل الأرضي بالمجمّع. يطبق جهداً عالياً يؤدي إلى توليد حقل كهربائيّ بين القطبين وذلك باستعمال تيار متواصل أو متناوب مما يؤدي إلى تجميع شحنات كهربائيّة على سطح قطرة المحلول الموجود في رأس الإبرة.

تخضع القطرة الموجودة على رأس الإبرة إلى قوّتين رئيسيتين هما قوّة التنافر الكهربائيّ الساكن وقوّة التوتّر السطحيّ. مع زيادة الجهد المطبق على أبر السرنغ تبدأ قوّة التنافر الكهربائيّ الساكن بالتغلب على قوّة التوتّر السطحيّ للسائل وتبدأ القطرة الموجودة على رأس الإبرة بالتشوّه لتصبح في نهاية الأمر ذات شكل مخروطيّ يعرف باسم مخروط تايلور Taylor cone، يتدفّق السائل المشحون من رأس الإبرة بعد التغلّب على قوى التوتّر السطحيّ متّجهاً نحو المجمّع المؤرّض. يؤدّي إلى امتطاط السائل المتدفّق وخضوعه إلى حركة التفافيّة يتبخر أثنائها قسم من المذيب المستخدم وتتشكل في النهاية ألياف من أوكسيد النحاس المغلفة بالبوليمير وتكون بأبعاد نانوية وميكروية على سطح الركيزة الزجاجية [9]. كما هو موضح بالشكل (2-a-b).



الشكل (2-A)



الشكل (2-B)

الشكل (2): A) : طريقة التحضير المتبعة في تحضير اسلاك نانوية من أوكسيد النحاس المرجعية. B): طريقة التحضير المرجعية [9].

٣-١- خطوات طريقة التحضير:

تم في هذه التجربة تحضير محلول الغزل وإنتاج الألياف كما يلي:

١- في البداية مزج نترات النحاس NO_3Cu مع الماء بواسطة الخلاط المغناطيسي لمدة ساعتين عند درجة حرارة الغرفة للحصول على محلول لزج فيروزي اللون.

٢- تم إضافة البوليمير كحول البولي فينيل (PVA) الى المحلول السابق تحت التحريك المغناطيسي لمدة 24 ساعة عند درجة حرارة الغرفة للحصول على المحلول الجاهز للغزل. هو بوليمر اصطناعي غير سام ومتوافق حيوياً. وهو بوليمر عديم اللون والرائحة وقابل للذوبان في الماء وله خصائص ميكانيكية وحرارية جيدة. إن التنوع الكبير لخصائصه يجعله مناسباً للعديد من التطبيقات. على سبيل المثال، نظراً لتوافقه الحيوي وعدم سميته، فهو بوليمر مناسب للتطبيقات الطبية الحيوية. وقد تم بالفعل استخدامه بنجاح لاستبدال الغضروف والعدسات اللاصقة وتضميد الجروح وما إلى ذلك [10].

٣- تم وضع المحلول المخلوط في محقنة سعة 10 m.L بقطر إبرة يبلغ 0.5 mm وطول إبرة 3 cm سم، ويتم ضخها بسرعة 0.5 مل / ساعة باستخدام مضخة حقنة.

٤- تم استخدام رقائق الألومنيوم وشرائح الزجاج كمجمع، وتم الحفاظ على المسافة بين طرف الإبرة والمجمع عند 15 cm.

٥- وتم تطبيق جهد تيار مستمر قدره 23 كيلو فولت، وبدأ جهاز الغزل بإنتاج الالياف على كل من المجمع وشرائح الزجاج.

٣-٢- العوامل المؤثرة في عملية التحضير:

في عملية الغزل الكهربائية توجد مجموعه من العوامل المؤثرة في عملية الغزل وقد تم تلخيصها في الجدول (2).

الجدول (2): يبين العوامل المؤثرة في عملية الغزل.

العوامل	المتغيرات المؤثرة
العوامل المؤثرة في عملية الغزل الكهربائي	١. معدل التدفق ٢. الجهد المطبق ٣. المسافة بين الإبرة والمجمع ٤. قطر الإبرة وطولها ٥. أشكال المجمع ٦. التوافقية بين المذيب والبوليمير
العوامل المؤثرة في المحلول البوليميري	١. اللزوجة ٢. الناقلية (التوصيل) ٣. التوتر السطحي ٤. التركيز الجزيئي للبوليمر
العوامل الخارجية	١. التيارات الهوائية ٢. الرطوبة ٣. درجة الحرارة

٣-٣- عملية المعالجة الحرارية:

في هذه المرحلة قمنا بتقسيم العينة المحضرة عند الجهد 23 كيلو فولت والمجمعة على شرائح زجاجية الى ثلاث الى ثلاثة اقسام (شرائح)، وتمت عملية المعالجة الحرارية عند درجات حرارة درجة مختلفة 35,200,500)°C) وعند الدرجة (35°C) في درجة حرارة المخبر، وعند الدرجة (200°C) للتخلص من البوليمير وعند الدرجة (500°C) للتخلص من الشوائب والمواد الأخرى، وذلك لمدة زمنية قدرها ساعتين (2H) ولجميع العينات.

٤- الأجهزة والأدوات المستخدمة:

١- أدوات التحضير الكيميائية.

٢- جهاز الغزل الكهربائي شرائح المنيوم وشرائح زجاجية.

٣- كحول البولي فينيل (PVA).

٤- مجهر القوى الذرية AFM (Atomic Force Microscopy).

٥- مطيافية الامتصاص الضوئية (u.v)

٦- مطياف الفلورة الضوئية PL من شركة Hitachi رقم F-2500.

٧- فرن المعالجة الحرارية من شركة Carbolite رقم CWF 1200.

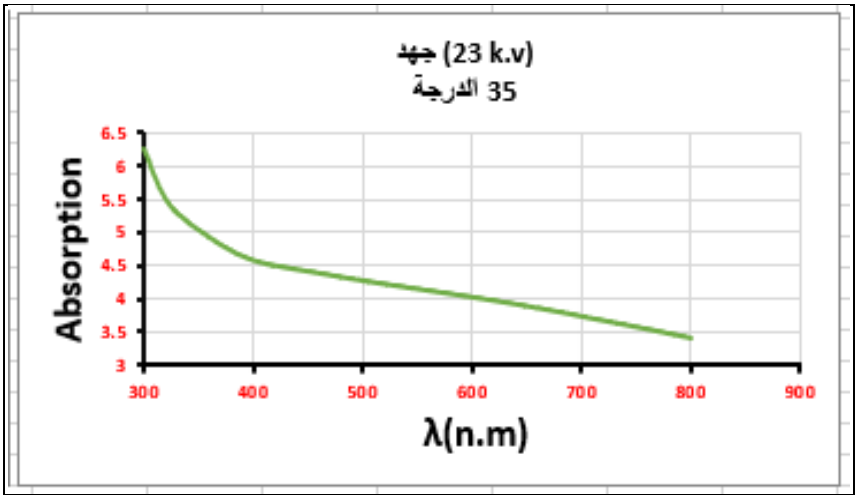
5- الدراسات والنتائج التجريبية:

5-1- الدراسات الضوئية للألياف النانوية المحضرة عند جهد غزل (23 k.v):

تُعد القياسات البصرية لأوكسيد النحاس (CuO) وجسيماته النانوية أساسية لفهم خصائصه الإلكترونية والبصرية حيث يمتلك أوكسيد النحاس فجوة طاقية خاصة به تتراوح (1.2-1.5 إلكترون فولت) ويتمتع CuO بفجوة نطاق أضيق مقارنة مع (Cu_2O) والذي يمتلك فجوة طاقية (2 إلكترون فولت) ويتم استخدامه غالبًا في التطبيقات التحفيزية وأجهزة الاستشعار حيث تعتبر هذه الفجوة الطاقية المباشرة مناسبة للتطبيقات في مجال الطاقة الكهروضوئية والإلكترونيات البصرية وتجعلها مناسبة للاستخدام في الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة، مما يعزز امتصاص الضوء.

5-1-1- طيف الامتصاص (u.v) للألياف النانوية المحضرة عند جهد غزل (23 k.v) والمعالجة عند الدرجة (35°C):

من اجل دراسة الخصائص البصرية والضوئية نستخدم مطيافية الامتصاصية في (UV-Vis) لما تتميز به من أهمية كبيرة من توصيف قابلية الالكترونات الحرة او المرتبطة للانتقال الى سويات طاقية (مدارات) ذات طاقات اعلى وخصوصا عندما يتم توظيف المادة المحضرة في التطبيقات الالكترونية والتطبيقات الضوئية الدقيقة في الخلايا الشمسية، لذا تمت دراسة طيف الامتصاص لأسلاك أوكسيد النحاس (CuO) المحضرة وقمنا بإجراء قياسات الامتصاصية الضوئية للالياف النانوية من أوكسيد النحاس والمجمعة على شرائح زجاجية والمحضرة عند جهد غزل (23 k.v) باستخدام مطياف (U.V) اطواله الموجية تتراوح بين n.m (300-900) كما هو موضح بالشكل (3).

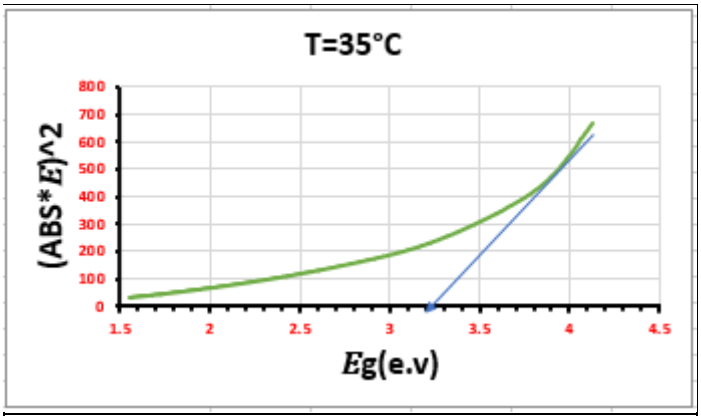


الشكل (3): يبين الإمتصاصية الضوئية لأسلاك أوكسيد النحاس (CuO)، T=35°C

- **دراسة الفجوة الطاقية للالياف المعالجة عند الدرجة (35°C):**

تم تحديد الفجوة الطاقية (Eg) للالياف النانوية المحضرة من أوكسيد النحاس (CuO) والمعالجة حرارياً عند الدرجة (35°C) من أطياف الامتصاص وباستخدام علاقة Tauc، $\alpha h\upsilon = A(h\upsilon - E_{gap})^{\frac{m}{2}}$، حيث تم تقدير قيمة الفجوة الطاقية من استقراء الجزء الخطي من $(\alpha h\upsilon)^2$

علاقة (tauc) مقابل طاقة الفوتون $(h\upsilon)$ حيث α هي معامل الامتصاص،$h\upsilon$ هي طاقة الفوتون، و m = 1 للانتقالات المباشرة يبين الشكل (4) قيمة الفجوة الطاقية Eg أوكسيد النحاس.

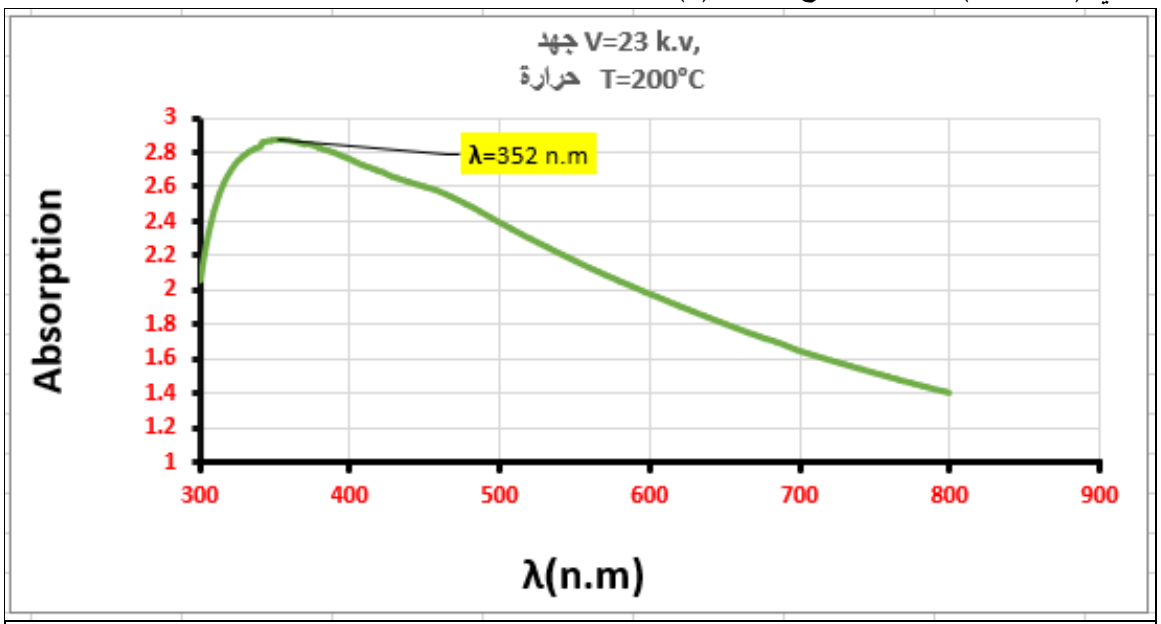


الشكل (4): قيمة الفجوة الطاقية Eg أوكسيد النحاس، T=35°C.

يتبين لدينا من الشكل (4) أن قيمة الفجوة الطاقية الضوئية للالياف النانوية من أوكسيد النحاس تساوي (Eg= 3,2 e.v).

5-1-2- طيف الامتصاص (u.v) للالياف النانوية المحضرة عند جهد غزل (23 k.v) والمعالجة عند الدرجة (200°C):

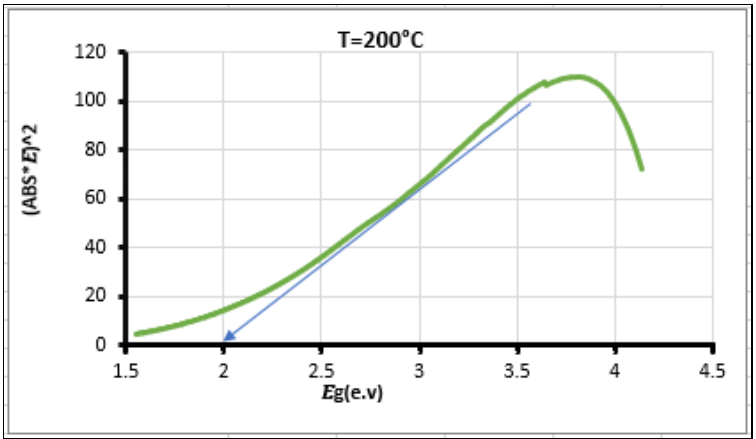
وقمنا بإجراء قياسات الامتصاصية الضوئية للالياف النانوية من أوكسيد النحاس والمجمعة على شرائح زجاجية والمحضرة عند جهد غزل كهربائي (23 k.v) والمعالجة حراريا عند الدرجة (200°C) باستخدام مطياف (U.V) اطواله الموجية تتراوح بين n.m (300-900) حيث يتبين وجود قمة امتصاص موافقة للطول الموجي (352 n.m) كما هو موضح بالشكل (5).



الشكل (5): يبين الإمتصاصية الضوئية لأسلاك أوكسيد النحاس (CuO)، T=200°C

- **دراسة الفجوة الطاقية للالياف المعالجة عند الدرجة (200°C):**

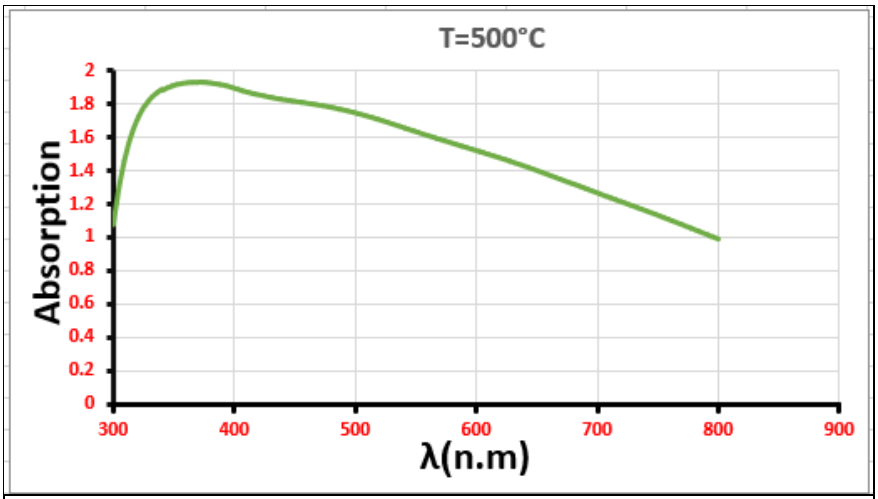
تم تحديد الفجوة الطاقية (Eg) للالياف النانوية المحضرة من أوكسيد النحاس (CuO) والمعالجة عند الدرجة (200°C) من أطياف الامتصاص وتبين انها مساويه الى (Eg=2 e.v) كما هو موضح بالشكل (6).



الشكل (6): قيمة الفجوة الطاقية Eg لأسلاك أوكسيد النحاس، T=200°C.

5-1-3- طيف الامتصاص (u.v) للالياف النانوية المحضرة عند جهد غزل (23 k.v) والمعالجة عند الدرجة (500°C):

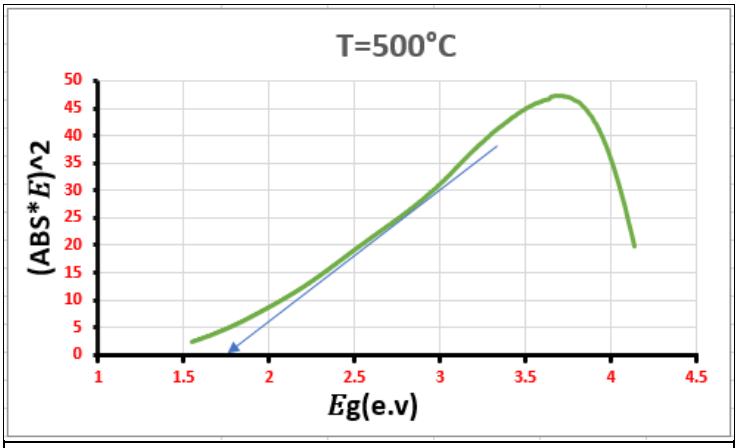
وقمنا بإجراء قياسات الامتصاصية الضوئية للالياف النانوية من أوكسيد النحاس والمجمعة على شرائح زجاجية والمحضرة عند جهد غزل كهربائي (23 k.v) والمعالجة حراريا عند الدرجة (500°C) باستخدام مطياف (U.V) اطواله الموجية تتراوح بين n.m (300-900) حيث يتبين وجود قمة امتصاص موافقة للطول الموجي (351 n.m) كما هو موضح بالشكل (7).



الشكل (7): يبين الإمتصاصية الضوئية لأسلاك أوكسيد النحاس (CuO)، T=500°C

- **دراسة الفجوة الطاقية للالياف المعالجة عند الدرجة (500°C):**

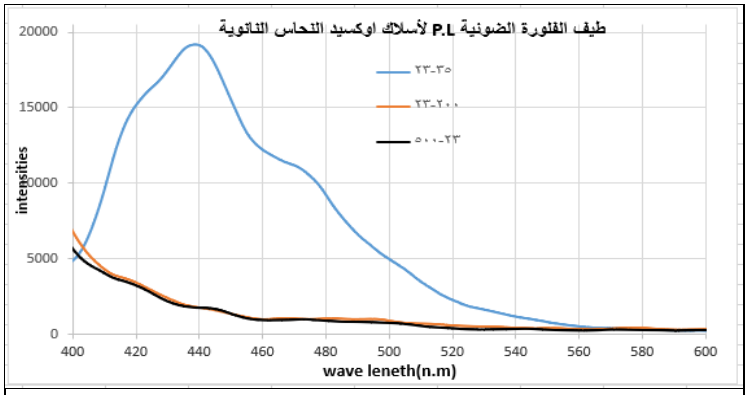
تم تحديد الفجوة الطاقية (Eg) للالياف النانوية المحضرة من أوكسيد النحاس (CuO) والمعالجة (500°C) من أطياف الامتصاص وتبين انها مساويه الى (Eg=1.8 e.v) كما هو موضح بالشكل (8).



الشكل (8): قيمة الفجوة الطاقية Eg لأسلاك أوكسيد النحاس، T=500°C.

2-5- دراسة طيف الفلورة P.L للعينات المحضرة CuO:

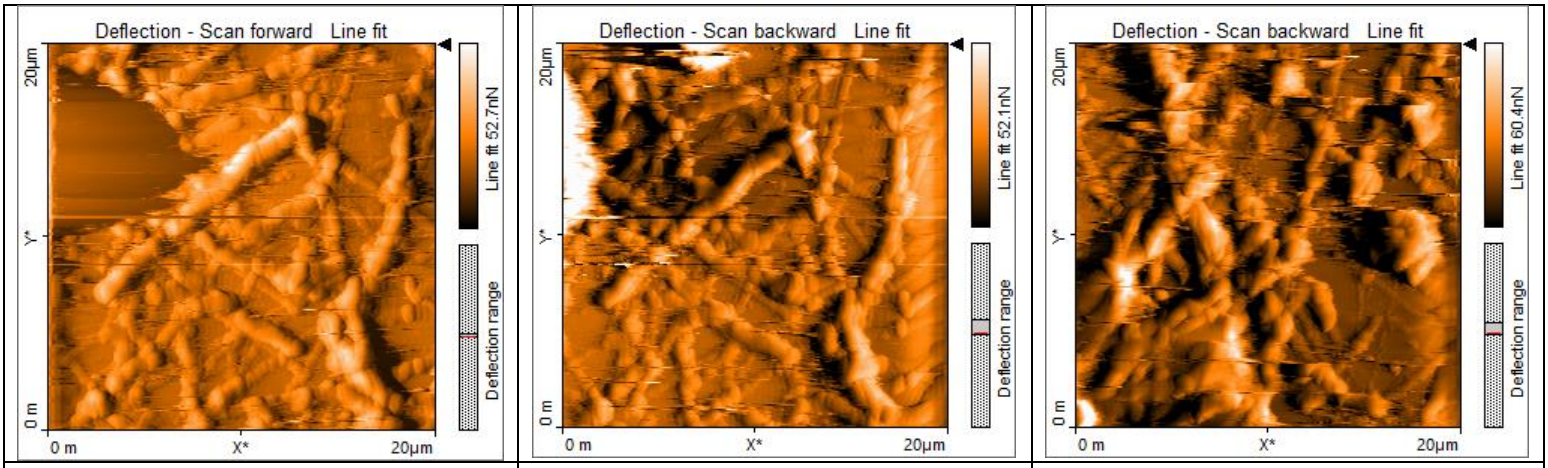
تم استخدام جهاز التألق الضوئي PL FS20 لقياس طيف الفلورة في المجال المرئي و ذلك عبر استخدام مصباح زينون Xenon Lamp (40W) كمنبع اثارة حيث سلطت على العينات حزم ضوئية بأطوال موجية (340-900) nm و تبين من طيف الفلورة الضوئية وجود قمة عند العينة المحضرة من CuO عند الجهد (23 K.V) و ذلك من اجل حرارة الغرفة عند الطول الموجي للاثارة ($\lambda = 438nm$) بينما لوحظ تلاشي قمم الامتصاص عند العينات الأخرى المحضرة من نفس المركب CuO ولكن عند درجة الحرارة 200 °C وعند الدرجة 500 °C كما هو موضح بالشكل (9).



الشكل (9): طيف الفلورة الضوئية لأسلاك أوكسيد النحاس النانوية المحضرة عند جهد غزل كهربائي (23 k.v)

3-5- القياسات السطحية باستخدام مجهر القوى الذرية AFM (Atomic Force Microscopy):

باستخدام مجهر القوى الذرية AFM (Atomic Force Microscopy) تم أخذ صور مجهرية ثنائية وثلاثية البعد للالياف والالياف النانوية المحضرة من أوكسيد النحاس CuO عند جهد غزل كهربائي قدره (23 K.V) على شريحة زجاجية والمعالجة حراريا عند الدرجات (35, 200, 500 °C) ولمدة ساعتين، ولنفس المنطقة من سطح العينة وبمقاس واحد ($20\mu.m \times 20\mu.m$)، أظهرت هذه الصور شكل تجمعات الألياف والأسلاك المغزولة كما هو موضح في الشكل (10-a-b-c).



10-a	10-b	10-c

الشكل (10-a): صور AFM للالياف النانوية المحضرة عند الجهد (23 K.V) والمعالجة عند الدرجة (35°C).

الشكل (10-b): صور AFM للالياف النانوية المحضرة عند الجهد (23 K.V) والمعالجة عند الدرجة (200°C).

الشكل (10-c): صور AFM للالياف النانوية المحضرة عند الجهد (23 K.V) والمعالجة عند الدرجة (500°C).

يبين الشكل (10-a-b-c) تغيرات بنية الاسلاك نتيجة المعالجة الحرارية حيث انها تؤثر على حجم وشكل الاسلاك يمكن أن تؤدي درجات الحرارة المرتفعة إلى نمو أو تلدين الأسلاك النانوية بشكل عام، يمكن القول أن قطر السلك النانوي يزداد مع المعالجة الحرارية حيث يحدث نمو سطحي للسلك النانوي مما يؤدي إلى تغيير أبعادها وشكل سطحها مما يؤدي إلى زيادة قطر الاسلاك النانوية وفي بعض الحالات، قد تؤدي المعالجة الحرارية إلى تقليل قطر الاسلاك النانوية بسبب فقدان مواد البوليمير نتيجة المعالجة الحرارية كما هو موضح بالشكل (10-c)، حيث نلاحظ تناقص قطر الاسلاك النانوية المعالجة عند الدرجة (500 °C).

6- الاستنتاجات:

١. تُسهم المعالجة الحرارية المرتفعة في تعزيز درجة التبلور داخل الألياف النانوية، مما يؤدي إلى تقليل العيوب البنيوي (Structural Defects) وتحسين انتظام البنية البلورية، وهو ما ينعكس إيجابًا على جودة الأسلاك النانوية واستقرارها.

٢. يُلاحظ حدوث تناقص في قطر الأسلاك النانوية بعد المعالجة الحرارية عند(500 °C) ، ويُعزى ذلك إلى تحلُّل أو تبخر المكوّنات البوليمرية المستخدمة في تركيب الألياف، مما يؤدي إلى تقلص البنية وتكثّف المادة الفعّالة كما هو ملاحظ في الشكل (10).

٣. تُساهم المعالجة الحرارية في تحسين الناقلية الكهربائية للألياف النانوية، وذلك من خلال تقليل عدد العيوب المحصورة (Traps) وزيادة حرية حركة حوامل الشحنة، مما يؤدي إلى رفع كفاءة التوصيل الكهربائي وبالتالي تناقص الفجوة الطاقية كما في الشكل (6).

٤. تنخفض الفجوة الطاقية (Band Gap) لأكاسيد النحاس النانوية بشكل ملحوظ عند زيادة درجة حرارة المعالجة؛ إذ تتراجع من حوالي $Eg \approx 3.2$ eV عند 35°C إلى $Eg \approx 1.8$ eV عند 500 °C، ويُعزى هذا الانخفاض إلى إعادة ترتيب البنية البلورية وزيادة التوصيلية الناتجة عن تحسين التبلور وتقليل العيوب.

٥. اختفاء قمم الفلورة الضوئية مع ارتفاع درجة المعالجة الحرارية كما في الشكل (9).

References:

1. Giotto dos Santos, A.; Martins, T.R.*; Krishnamurthy, S.; Assumpção Bertuol, D.; Tanabe, E.H. Production of Nanofibers Composed of CuO for the Removal of Pb(II) from Aqueous Solutions*. Metals (2025), 56. https://doi.org/10.3390/met15010056.

2. Aarcha Appu Mini, Arghya Chakravorty, Sudip Das, Shikha Awasthi, Andrews Nirmala Grac, Sarvesh Kumar Pandey, *Vimala Raghavan, CuO nanoparticles passivated 2D MXene-based voltammetric sensor for detecting environmental hazardous pollutant*, Microchemical Journal Volume 201, June (2024), 110648, https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110648.

3. Qiu, Y., Yu, J., Zhou, X., Tan, C., and Yin, J. (2009). *Synthesis of 362 porous NiO and ZnO submicro and nanofibers from electrospun pol- 363 ymer fiber templates*. Nanoscale Research Letters, 4, 173-177. 364.

4. Rajendran, S. P., and Sengodan, K. (2017*). Synthesis and characteri- 365 zation of zinc Oxide and iron oxide nanoparticles using sesbania 366 grandiflora Leaf extract as reducing agent*. Journal of Nanoscience, 367 (2017), 1-7.

5. Z. M. Jarzebski, "Oxide Semiconductors" , Vol. 4 , (1974).

6. Kelgenbaeva, Z., Khandaker, J. I., Ihara, H., Omurzak, E., Sulaimankulova, S., Mashimo, T. *Thermal and optical properties of In and In2O3 nanoparticles synthesized using pulsed plasma in water*. Phys. Status SolidiA. 215 (11), 1700910 (2018).

7. Phiwdang, K., Suphankij, S., Mekprasart, W., Pecharapa, W. *Synthesis of CuO nanoparticles by precipitation method using different precurso*rs. Energy Procedia 34, 740–745 (2013).

8. Jagpreet Singh, Gurjas Kaur and Mohit Rawat**A Brief Review on Synthesis and Characterization of Copper Oxide Nanoparticles and its Applications*, Published: 27 June, (2016).

9. Huang MH, Mao S, Feick H, Yan H, Wu Y, Kind H, Weber E, *Russo R, Yang P. Room- temperature ultraviolet nanowire nanolasers. S*cience. 292(5523), 1897-1899 (2001). doi:10.1126/science.1060367.

10.Mogo¸sanu, G.D.; Grumezescu, A.M. *Natural and synthetic polymers for wounds and burns dressing. I*nt. J. Pharm. (2014**)**, 463, 127–136.