

دراسة العوامل المؤثرة على تحسس الرطوبة لغشاء بوليميري مُرسب على ليف بصري

محمد جاسم المزعل¹ ، عماد أسعد² ، محمد بهاء الصوص³

1. طالب دكتوراه- جامعة دمشق - المعهد العالي لعلوم الليزر.
2. أستاذ مساعد في قسم العلوم الأساسية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة دمشق
3. دكتور في هيئة الطاقة الذرية mbalsous@aec.org.sy

الملخص

جرى تصنيع حساس رطوبة ليفي باستخدام ليف بصري متعدد النمط منزوع اللحاء ومغشى بطبقة بوليميرية من البولي فينيل بيروليديون (PVP) مع بولي إيثيلين غليكول (PEG). دُرس تأثير طول الجزء المنزوع من اللحاء على التغير النسبي للاستطاعة الليزرية النافذة بدلالة الرطوبة. تبين أن التغير النسبي للاستطاعة الليزرية النافذة يزداد بزيادة طول الليف البصري منزوع اللحاء، و كانت القيمة الأفضل عند الطول 5 cm. أيضاً، جرت دراسة تأثير عدد غطسات الليف ضمن المحلول أثناء عملية التعشية على التغير النسبي للاستطاعة. فقد لوحظ نقصان التغير النسبي للاستطاعة مع زيادة عدد غطسات الليف ضمن المحلول، حيث كانت أفضل قيمة عند غطسة واحدة. كما دُرس أثر طول موجة الليزر المستعمل على التغير النسبي للاستطاعة. وتبين أن استخدام ليزر بطول موجة أكبر يعطي نتائج أفضل. كانت أكبر قيمة لحساسية الليف 0.199 $\mu\text{W}/\text{RH}\%$ وبمجال عمل 65-95) RH%. دُرس الاستجابة الخطية للحساس وقدرت بنحو $R^2 = 0.96$ ، وبلغت سرعة الاستجابة 0.073 s/RH%. أظهرت نتائجنا أن الحساس المصنع يملك استجابة خطية وسريعة، وحجم صغير وكلفة منخفضة.

الكلمات المفتاحية: ليف بصري منزوع اللحاء، غشاء، حساس رطوبة.

تاريخ الإيداع: 2022/11/8

تاريخ الموافقة: 2022/11/27



حقوق النشر: جامعة دمشق

سورية، يحتفظ المؤلفون

بحقوق النشر بموجب الترخيص

CC BY-NC-SA 04

study of the affecting factors on the humidity sensitivity of a polymeric film deposited on an optical fiber

Mohammad Jassim Al-Mazal¹, Imad Asaad²,
Mohammad Bahaa Al-Sous³

1. PhD student- Damascus University- Higher Institute of Laser Sciences.

2. Assistant Professor in the Department of Basic Sciences- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering- Damascus University

3. Doctor in the Atomic Energy Commission mbalsous@aec.org.sy

Abstract:

Unclad multimode fiber optic humidity sensor coated with Polyvinylpyrrolidone (PVP) and polyethylene glycol (PEG) has been manufactured. The influence of the length of unclad fiber on relative change of transmission laser power was studied. We found that relative change of laser power as a function of humidity increased when unclad fiber length increases. The best length of unclad fiber was about 5cm. The effect of the number of dipping in the solution, during dip-coating process, on relative change of power has been studied. We noticed that the sensitivity decreased when the number of dipping was increased. The best number of dipping was only one. The impact of laser wavelength on relative change of laser power has been studied. It was observed that bigger wavelengths gave better results. The largest value of the fiber sensitivity was $0.199\mu\text{W}/\text{RH}\%$ and with a work range of RH% (65-95). The linearity of the sensor was studied, the sensor have $R^2 = 0.96$, and a response speed of $0.073 \text{ s}/\text{RH}$. Our results have shown that the manufactured sensor has a linear, fast response, small size and low cost.

Key words: Unclad optical fiber , Film, Humidity sensor.

Received :8/11/2022

Accepted:27/11/2022



Copyright:Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

1- المقدمة

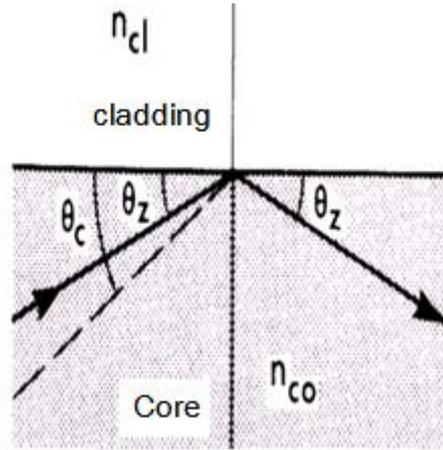
تؤثر الرطوبة بشكل كبير على عمليات تصنيع العناصر الإلكترونية والأطعمة والمواد الصيدلانية وغيرها [1,2]. تحتاج هذه العمليات إلى مراقبة مستمرة ودقيقة لمستوى الرطوبة، و التي يمكن ان تؤثر في جودة منتجات تلك العمليات [1]. يمكن استخدام مواد كأكسيد المعادن أو البوليميرات وخلاتهما لتصنيع حساس بمواصفات مرغوبة كالحساسية العالية وزمن استجابة قصير ومجال عمل واسع. تصنف الحساسات وفقاً لمبدأ القياس الذي تعتمد عليه إلى حساسات سعوية و ناقلية و ضوئية و صوتية و حساسات تعتمد على الممانعة [3]. توجه اهتمام الباحثين لحساسات الرطوبة الليفية البصرية وذلك للمواصفات التي تملكها كمانعتها للضجيج الكهربائي وحساسيتها العالية للتغيرات الخارجية وقابليتها للتحكم عن بعد [4]. فقد أجريت أبحاث كثيرة بهدف تحسين مواصفات الحساسات الليفية الضوئية كالحساسية والخطية وسرعة الاستجابة، وذلك بتغيير مادة الغشاء أو طريقة نزع اللحاء أو بتغيير أحد الوسائط الأخرى المؤثرة في عمل الحساس. صُنِع حساس رطوبة من جسيمات نانوية من الكوبالت Co مع البولي أنيلين، وُدُرُس تأثير سماكة وطول الغشاء الموضع على لب الليف فكان مجل عمل الحساس (20-95RH%)، وحدد الطول والسماكة المثاليين الموافقين لاستخدام الكوبالت مع البولي أنيلين [4]. دُرُس تأثير تغيير المادة الحساسة على مواصفات الحساس وذلك بمقارنة أداء حساس ليفي باستخدام مادتين هما Agarose و Chitosan فكان لهما نفس الحساسية (0.001dB/RH)، ومجال عمل (17-95)RH% عند استخدام Chitosan وبزمن استجابة 2s، وبمجال عمل (40-95 RH %) وبزمن استجابة 3s عند استخدام Agarose [5]. حُضِر حساس رطوبة و دُرُس تأثير نوع مادة الغشاء الحساس وذلك باستخدام Agarose gel، ثم باستخدام خليط مع (HEC/PVDF) على الليف ونزع اللحاء بتقنية tapered fiber. حُصِل على حساسية 0.0228 mv/ RH % وخطية 98.36% عند استخدام agarose gel، و حساسية 0.0231mv/% وخطية 99.65% عند استخدام (HEC/PVDF) [6]. دُرُس تأثير استخدام جسيمات (MoSe₂) على الحساسية وحصل على حساسية 0.321 dB/%RH عند تغير الرطوبة من 32%RH إلى 73%RH وذلك باستخدام ليف منزوع اللحاء بطريقة side-polished [7]. دُرُس استخدام جسيمات TiO₂ النانوية وكانت الحساسية 27.1mV/RH وباستجابة خطية ضمن المجال 24% إلى 95% [8]. دُرُس نظرياً تأثير طريقة ضخ الأشعة ضمن الليف على الحساسية و وجد أن استخدام أشعة Skew Ray يرفع الحساسية [9].

في هذا البحث، سنعرض بناء حساس رطوبة ليفي باستخدام ليف بصري متعدد النمط منزوع اللحاء بحمض فلور الهيدروجين ومغشى بطبقة بوليميرية من مزيج من مادتي بولي فينيل بيروليديون (PVP) polyvinyl pyrrolidone مع بولي إيثيلين غليكول (PEG) polyethylene glycol وباستخدام المحل العضوي البوتانول. سيُدْرُس تأثير طول الجزء منزوع اللحاء، وعدد غطسات الليف في المحلول أثناء عملية التغطية، و تأثير طول موجة الليزر على مقدار تغير الاستطاعة النافذة بدلالة الرطوبة. وستدرس مواصفات الحساس الناتج كالخطية وسرعة الاستجابة.

2- مبدأ عمل الحساس

يُصنَع دليل الموجة من مادة عازلة كهربائياً تستطيع نقل الأمواج الكهرومغناطيسية. يتألف الليف البصري - دليل موجة- من خيط زجاجي بقطر من مرتبة المايكرو متر (من مرتبة قطر شعرة الإنسان) مكون من أسطوانتين متحدتين بالمحور تسمى الداخلية اللب (core) والخارجية اللحاء (cladding). ويمكن تصنيفه إلى ليف وحيد النمط (بدعم انتشار نمط وحيد) وليف متعدد النمط (بدعم انتشار أكثر من نمط) [10].

من المعروف أن ظاهرة الانعكاس الكلي الداخلي تحدث عند ورود شعاع ضوئي بزوايا معينة θ_z من وسط قرينة انكساره أكبر إلى وسط قرينة انكساره أقل. بفرض أن θ_c هي الزاوية الحرجة والمحصورة بين الشعاع الوارد والسطح الفاصل كما في الشكل (1).



الشكل (1) الأشعة المنقادة ضمن دليل موجي [10].

حيث n_{co} قرينة انكسار اللب و n_{cl} قرينة انكسار اللحاء يحدث انعكاس كلي داخلي في ليف ذي قرينة انكسار درجية (step index) إذا كانت زاوية الشعاع الوارد θ_z مع محور الليف أو مع السطح الفاصل تحقق الشرط التالي [10]:

$$0 \leq \theta_z < \theta_c \quad (1)$$

ويعرف ثابت الشعاع β (ray invariant) كما يلي.

$$n_{co} \cos \theta_z = \bar{\beta} \quad (2)$$

ومنه يمكن كتابة شرط حدوث الانعكاس الكلي الداخلي بدلالة الثابت β بالعلاقة التالية [10].

$$n_{cl} < \bar{\beta} < n_{co} \quad (3)$$

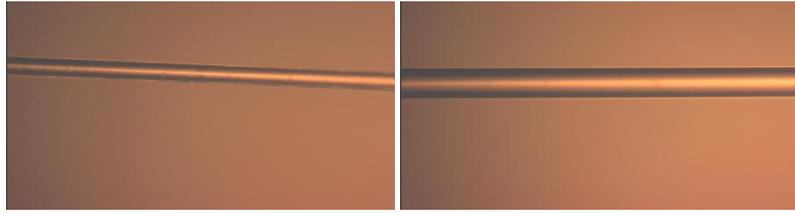
أي يحدث الانعكاس الكلي عندما تكون قرينة انكسار اللب n_{co} أكبر من قرينة انكسار اللحاء n_{cl} . يُلاحظ اعتماد شرط الانقياد بشكل أساسي على قيمة قرينة انكسار اللحاء، ولذلك أي تغير في قيمة قرينة انكسار اللحاء سيؤثر على شرط الانقياد، وبالتالي يؤثر على قيمة الاستطاعة الليزرية النافذة من الليف. ويمكن تعميم النتيجة السابقة على الليف متدرج قرينة الانكسار. فإذا نزع اللحاء عن الليف، ثم رُسبت مادة بدلاً عنه وتغيرت الرطوبة المحيطة بالغشاء فإن قيمة قرينة انكسار الغشاء ستتغير وبالتالي تتغير الاستطاعة الليزرية النافذة من الليف. وهذا هو المبدأ الذي يعتمد عليه الحساس في هذا البحث.

3- مواد البحث وطرائقه

ينقسم العمل التجريبي إلى ثلاث مراحل: إزالة اللحاء عن الليف البصري و تغشية الليف بطبقة من خليط البوليمير (PVP-PEG) و بناء تجربة قياس تغير الاستطاعة الليزرية النافذة من الليف بدلالة الرطوبة و دراسة تأثير بعض العوامل على سلوك الاستطاعة الليزرية النافذة بدلالة الرطوبة.

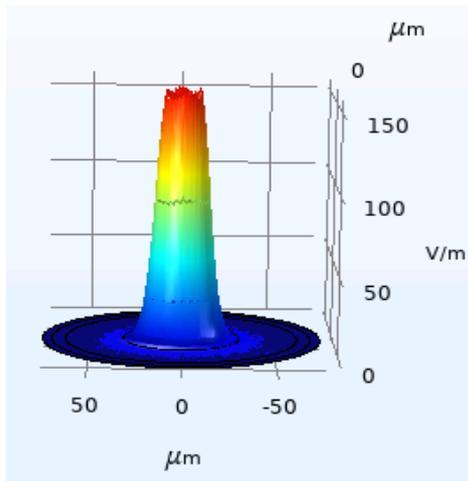
3-1 إزالة اللحاء عن الليف البصري وتغشيته

جرى قطع 30 cm من الليف البصري GIF625 متعدد النمط و متدرج قرينة الانكسار (gradient index) من شركة Thorlabs. أزيل اللحاء وجزء من اللب -3 μm عن 5 cm من الجزء المتوسط منه باستعمال حمض فلور الهيدروجين (تركيز 40%) بعملية الحت الكيميائي (استخدام المجهر الضوئي للتأكد أن اللحاء وجزء من اللب قد أزيل الشكل (2)).

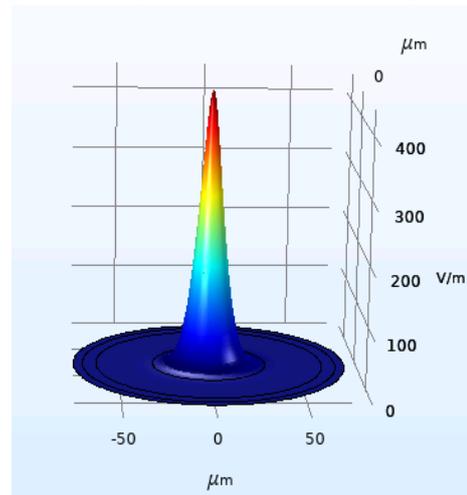


الشكل(2) صورتين بالمجهر الضوئي للليف البصري بعد تغطيته في حمض فلور الهيدروجين لزمانين مختلفين
الصورة على اليمين تقابل الزمن 10min والصورة على اليسار تقابل الزمن 40min.

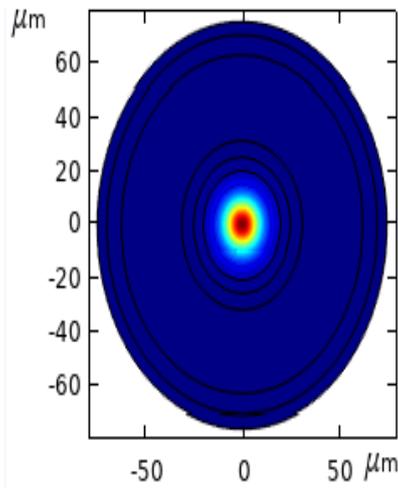
ويعود سبب إزالة جزء من اللب إلى أن الليف المستعمل من النوع متدرج قرينة الانكسار، وانتشار النمط الأساسي للحزمة الضوئية فيه محصورة في اللب. لتوضيح ذلك قمنا بدراسة توزيع الحقل الكهربائي ضمن الليف باستخدام برنامج حاسوبي. يتيح هذا البرنامج إدخال البنية الهندسية للليف و ثوابت الليف وخواص مادة الليف ويقوم البرنامج بحل المعادلات الخاصة بانتشار الحزمة الليزرية داخل الليف المعروف من قبل المستخدم، ويعرض البرنامج النتيجة بشكل ثلاثي و ثنائي الأبعاد . تبين أن النمط الأساسي محصور ضمن اللب وأن عدد من الأنماط الأعلى تتوزع بحيث تبقى ضمن اللب. يبين الشكل (3) توزيع الحقل الكهربائي في حالة النمط الأساسي وحالة وجود 10 أنماط في الليف متدرج قرينة الانكسار.



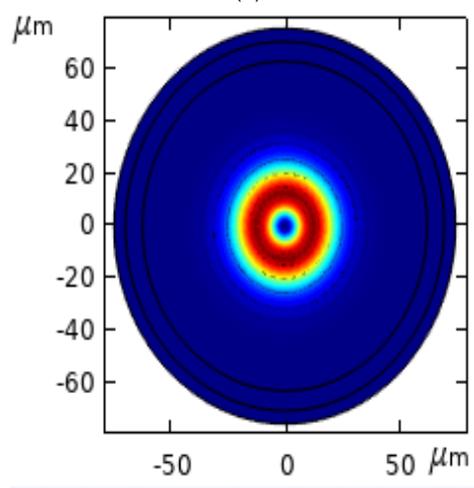
(b)



(a)



(b)



(a)

الشكل (3): (a) النمط الأساسي في الليف، (b) حالة وجود 10 أنماط ضمن الليف .

يتضح من الشكل (2) كيف أن النمط الأساسي والأنماط العشرة التي تليه تتحصر في اللب في حالة الليف متدرج قرينة الانكسار، لذلك قمنا بإزالة اللحاء وجزء من اللب قبل عملية ترسيب الغشاء البوليميري. حُضِر المزيج البوليميري: بتركيز 10% بولي فينيل بيروليدون وتركيز 1% من بولي إيثيلين غليكول في المحل العضوي البوتانول. ورُسب المزيج على الليف البصري بتقنية التغطية بالتغطيس dip coating فوق الوسائط التالية: سرعة دخول الليف وخروجه من المحلول 0.96cm/s، و زمن مكوث الليف في المحلول 5s، وعدد الغطسات في المحلول غطسة واحدة. بعد انتهاء عملية التغطية، جُف الليف المُعشى عند درجة الحرارة 60C° لمدة 45min.

2-3 بناء نموذج أولي لحساس الرطوبة

بُنيت تجربة حساس الرطوبة الليفي وفق ما هو موضح بالشكل (4). حُقنت حزمة الليزر (1550nm) الصادرة عن الديود الليزري LPS-1550-FC استطاعته 1.5mW بعد عبورها عدسة مناسبة في الليف الحساس متعدد النمط والمُعشى بغشاء بوليميري من مزيج من مادتي PVP مع PEG، وفق طريقة التحضير المبينة في الفقرة (3-1) و قيس شدة الحزمة الليزرية النافذة بحساس استطاعة موصول إلى مقياس استطاعة.



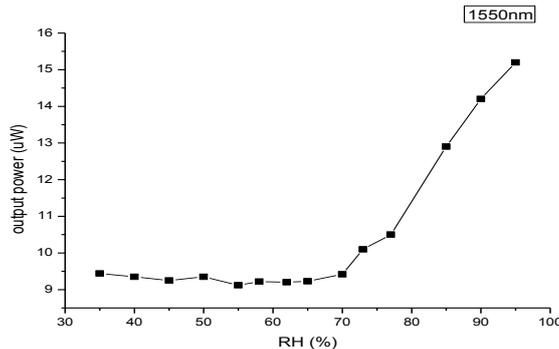
الشكل (4) مخطط التجربة.

جرى تثبيت الليف ضمن حجرة يمكن التحكم بالرطوبة ودرجة الحرارة بداخلها. هذه الحجرة مصنعة محلياً و مزودة بمقياس رطوبة وحرارة إلكتروني من النوع DHT11.

4- النتائج والمناقشة

4-1 تغير الاستطاعة الليزرية النافذة بدلالة نسبة الرطوبة المحيطة

لدراسة سلوك الاستطاعة الليزرية النافذة بدلالة الرطوبة وحساب قيمة حساسية الغشاء المقترح للرطوبة، جرى تغيير قيمة الرطوبة حول الجزء الحساس من الليف في حجرة الرطوبة باستخدام مضخة للهواء الرطب. وقيست الاستطاعة النافذة عند نهاية الليف من أجل كل قيمة للرطوبة، وذلك وفق مخطط التجربة المبين في الشكل (4)، كما هو مبين في الشكل (5).



الشكل (5) تغير الاستطاعة الليزرية النافذة بدلالة الرطوبة المحيطة.

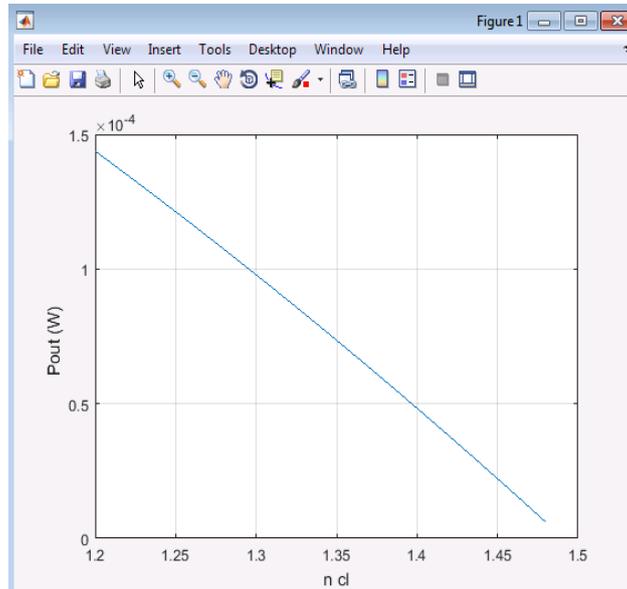
لُوحظ ثبات نسبي للاستطاعة الليزرية النافذة عند قيمة رطوبة أقل من 70%، تزداد قيمة الاستطاعة الليزرية النافذة بزيادة الرطوبة عن 70%. يعزى ثبات الاستطاعة الليزرية النافذة عند قيم رطوبة أقل من 70% إلى مقدار الامتزاز الضعيف للرطوبة من قبل البوليمير. وبالتالي لا تتغير قرينة انكساره بمقدار كافٍ للتأثير على شرط الانقياد وبالتالي على قيمة الاستطاعة النافذة. ويمكن أن يعزى سبب تزايد استطاعة الخرج عند قيم رطوبة أعلى من 70% إلى تغير قرينة انكسار البوليمير بازدياد الرطوبة. وهذا يتوافق مع سلوك البوليمير PVA المستعمل في العمل الذي أجراه Ainhoa Gaston [11].

إن قيمة قرينة انكسار الغشاء هي التي تحدد وتؤثر على قيمة الاستطاعة الليزرية النافذة، ويمكن أن نميز ثلاث حالات لقيمة قرينة انكسار الغشاء بالنسبة لقيمة قرينة انكسار لب الليف.

1. الحالة الأولى: عندما تكون قيمة قرينة انكسار الغشاء أصغر من قيمة قرينة انكسار لب الليف، في هذه الحالة شرط الانقياد محقق، وتعاني الأشعة من ظاهرة الانعكاس الكلي الداخلي. وكلما كانت قرينة انكسار اللحاء (الغشاء) أصغر كلما كانت الاستطاعة الليزرية النافذة أكبر. ويعلل ذلك بأن الأشعة المكونة للحزمة الضوئية تمتلك زوايا ورود مختلفة، فإنه كلما صغرت قيمة قرينة انكسار الغشاء كان شرط الانقياد محقق بالنسبة لعدد أكبر من الأشعة. حيث تعطى الزاوية الحرجة وفق قانون سنيل snell's law العلاقة التالية [12]:

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_{cl}}{n_{co}} \quad (4)$$

حيث n_{cl} قرينة انكسار اللحاء (قرينة انكسار الغشاء) و n_{co} قرينة انكسار اللب. رسمت قيمة الاستطاعة الليزرية النافذة P_{out} (W) بدلالة قرينة انكسار الغشاء n_{cl} باستخدام برنامج الماتلاب و المعادلات الواردة في المرجع [13] وحصلنا على الشكل (5).



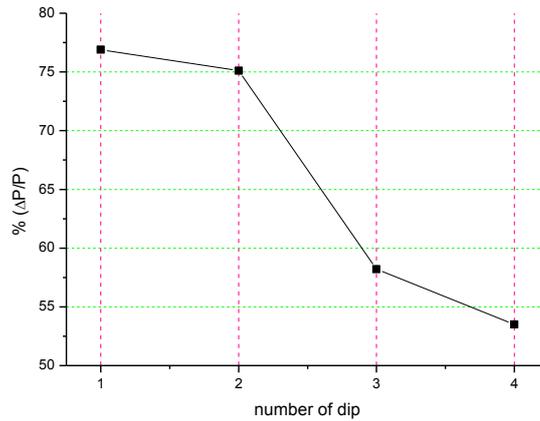
الشكل (6) تغير الاستطاعة الليزرية النافذة P_{out} (W) بدلالة قيمة قرينة انكسار اللحاء n_{cl} وهي أصغر من قرينة انكسار اللب n_{co} .

يُلاحظ من الشكل (6) أن الاستطاعة النافذة تنقص مع زيادة قرينة انكسار الغشاء.

2. الحالة الثانية: عندما تكون قيمة قرينة انكسار الغشاء تساوي قرينة انكسار لب الليف، في هذه الحالة يكون شرط الانقياد غير محقق ولا يحدث انعكاس كلي داخلي، وتكون قيمة الاستطاعة الليزرية النافذة أصغر ما يمكن [14].
3. الحالة الثالثة: عندما تكون قيمة قرينة انكسار الغشاء أكبر من قيمة قرينة انكسار اللب، عندها يكون شرط الانقياد غير محقق ولا يحدث الانعكاس الكلي الداخلي، وتتقاد الأشعة بفضل حادثة الانعكاس الحاصل على السطح الفاصل بين اللب والغشاء [14].
- باستخدام معطيات الشكل (5)، يُلاحظ أن مجال عمل الحساس من قيمة رطوبة نسبية 65% تقريباً إلى قيمة رطوبة نسبية 95، وحُسب مقدار الحساسية الذي يعبر عن نسبة تغير الاستطاعة الليزرية النافذة إلى تغير الرطوبة وبلغت قيمتها بنحو $0.199\mu W/RH\%$ أي أن الاستطاعة الليزرية النافذة تزداد بمقدار $0.199\mu W$ عند ازدياد الرطوبة بمقدار 1%.

4-2 دراسة تأثير عدد غطسات الليف في المحلول

استخدمت أربعة ألياف طول كل منها 30cm (طول الجزء منزوع اللحاء 5cm) ومغشاة بغشاء من PVP&PEG و كان البوتانول هو المحل. غُشيت الألياف الأربعة بتقنية التغطيس عند سرعة 0.96 mm/s وبعدها غطسات مختلفة (غطسة غطستان وثلاث وأربع). جرى قياس الاستطاعة الليزرية النافذة بتغير الرطوبة من أجل كل ليف من الألياف السابقة وفق طريقة القياس المبينة في الفقرة (4-1) وحُسب مقدار التغير النسبي للاستطاعة $(\Delta p/p)$ من أجل كل ليف ورُسم المقدار $(\Delta p/p)$ بدلالة عدد الغطسات كما هو مبين في الشكل (7).

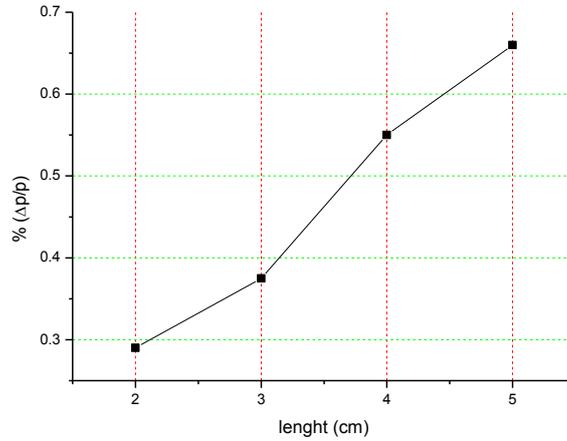


الشكل (7) التغير النسبي للاستطاعة الليزرية النافذة بدلالة عدد غطسات الليف في المحلول.

يُلاحظ أن التغير النسبي في الاستطاعة الليزرية ينقص مع زيادة عدد الغطسات، لأن زيادة عدد غطسات العينة في المحلول أثناء عملية التغطية تؤدي لزيادة سماكة الغشاء [15]، و تؤدي بدورها إلى تشكيل طبقة سميكة بين الحزمة المنتشرة في اللب والرطوبة الممتزة على سطح الغشاء. أي أن التغيرات في الخواص الضوئية التي تطرأ على سطح الغشاء نتيجة الامتزاز ستكون بعيدة عن سطح اللب وبالتالي عن الحزمة الليزرية المنتشرة.

4-3 دراسة تأثير طول الجزء منزوع اللحاء

استعملت أربعة ألياف طول كل منها 30cm تختلف بطول الجزء منزوع اللحاء (2-3-4-5) cm ولم يتمكن من تجريب أطوال أخرى بسبب ظروف التجربة. جرت تغطية الألياف الأربعة بتقنية التغطية بالتغطيس وبعدها غطسات مرة واحدة وعند سرعة 0.96 mm/s . جرى قياس الاستطاعة الليزرية النافذة من الليف بتغير الرطوبة من أجل كل ليف من الألياف السابقة وحُسب مقدار التغير النسبي للاستطاعة لكل منها كما في الشكل (8).



الشكل (8) التغير النسبي للاستطاعة الليزرية النافذة بدلالة طول الجزء المنزوع من اللحاء.

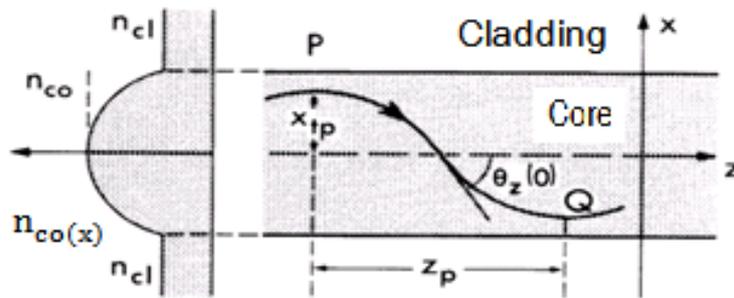
يُلاحظ أن الحساسية تزداد بزيادة طول الجزء المنزوع من اللحاء، ويُعزى ذلك لزيادة مقدار سطح التفاعل عند زيادة طول الجزء المغشى أي يزداد عدد حالات حدوث الانعكاس عن السطح البيني بين اللب و الغشاء المحيط باللب. ويعطى عدد حالات حدوث الانعكاس على السطح البيني بالعلاقة التالية [10]:

$$N = \frac{L}{z_p} \quad (5)$$

حيث L طول دليل الموجة الذي تسير فيه حزمة الليزر (طول الجزء الحساس). و z_p تعطى بالعلاقة التالية [10]:

$$z_p = \beta \int_{-x_{tp}}^{x_{tp}} \frac{dx}{\{n_{co}^2(x) - \beta^2\}^{1/2}} \quad (6)$$

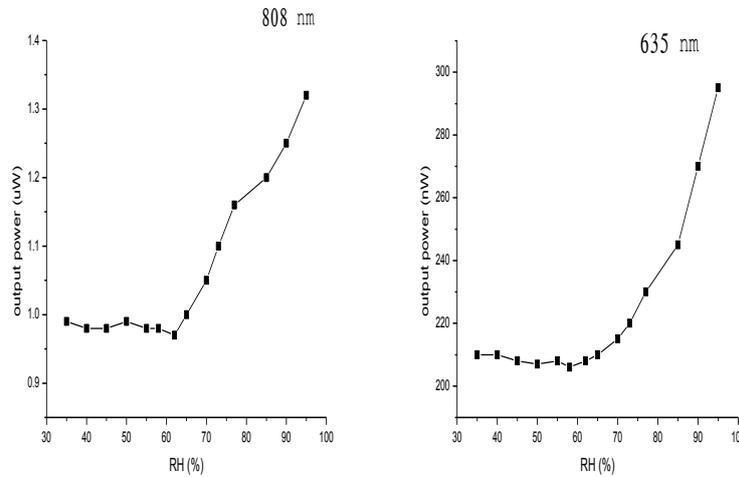
حيث $n_{co}(x)$ قرينة انكسار اللب في النقطة x . وتمثل z_p الطول الفاصل بين المستويين الشاقوليين لانعكاسين متتاليين كما في الشكل (9).



الشكل (9) مسار الأشعة في الليف.

4-4 دراسة تأثير طول الموجة

أعيد قياس الاستطاعة الليزرية النافذة بدلالة قيمة الرطوبة المحيطة وباستعمال الليف الحساس المستخدم في الفقرة 3-1 و وفق المخطط المبين في الشكل (4). جرى استخدام ليزر بطول موجة 635nm استطاعته 1mW ثم استخدام ليزر آخر بطول موجة 808nm استطاعته 4.8W وحصلنا على المنحنيين كما في الشكل (10).



الشكل (10) تغير الاستطاعة النافذة بدلالة الرطوبة المحيطة عند 808nm و 635nm.

يُلاحظ تشابه سلوك الاستطاعة الليزرية بتغير الرطوبة عند استعمال الأطوال الموجية 635nm و 808nm و 1550nm مع ملاحظة وجود اختلاف في قيمة الحساسية. ولتوضيح الفرق، حُسب مقدار التغير النسبي للاستطاعة ($\Delta p/p$) عند تغير الرطوبة من أجل كل طول موجي من الأطوال الموجية السابقة بما فيها الليزر المستخدم في الفقرة الأولى (1550nm) وأدرجت النتيجة في الجدول (1).

الجدول (1) التغير النسبي للاستطاعة الليزرية النافذة بدلالة طول الموجة.

$\Delta p/p * 100\%$	طول الموجة (nm)
38.0%	635
43.4%	808
66.6%	1550

ويُلاحظ أن الحساسية تزداد في حال استخدام ليزر بطول موجة أكبر، لأن عمق اختراق الموجة المتلاشية (evanescent wave) يتناسب طردياً مع طول الموجة وفق العلاقة التالية [16]:

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi n_{co} [\sin^2 \theta - (\frac{n_{cl}}{n_{co}})^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

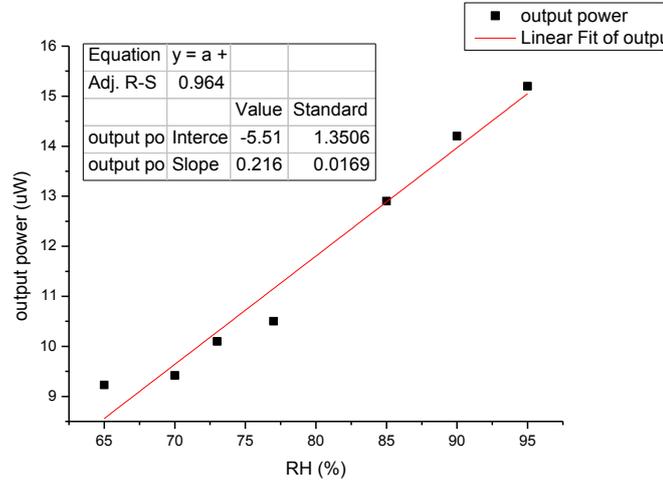
وكما ازداد عمق الاختراق كان مقدار التفاعل أكبر بين الموجة المقادة ومادة الغشاء، وبالتالي تؤدي إلى حساسية أكبر للرطوبة.

4-5 دراسة مواصفات الحساس

جرت العادة في الأدبيات العلمية الخاصة بالحساسات أن تتم دراسة مواصفات الحساس كالخطية وسرعة الاستجابة. لأن السلوك الخطي للاستطاعة بدلالة الرطوبة يساعد لاحقاً في إمكانية تحويل النموذج المقترح للحساس إلى نموذج تجاري قابل للاستعمال في التطبيقات العملية، وبالنسبة لسرعة الاستجابة فإنها وسيط مهم في بعض التطبيقات التي تحدث فيها تغيرات سريعة لقيمة الرطوبة كمرقبة عملية تنفس المرضى. لذلك ستُدرس مواصفات الحساس الوارد في الفقرة 4-1 وسيحدد مقدار الخطية وسرعة الاستجابة.

4-5-1 الخطية

لدراسة السلوك الخطي للحساس جرى رسم تغير الاستطاعة النافذة بدلالة الرطوبة ضمن مجال عمل الحساس 65-95RH% و وفقاً للنتائج الواردة في الشكل (5) وجرى حساب المعامل R^2 كما هو موضح بالشكل (11).

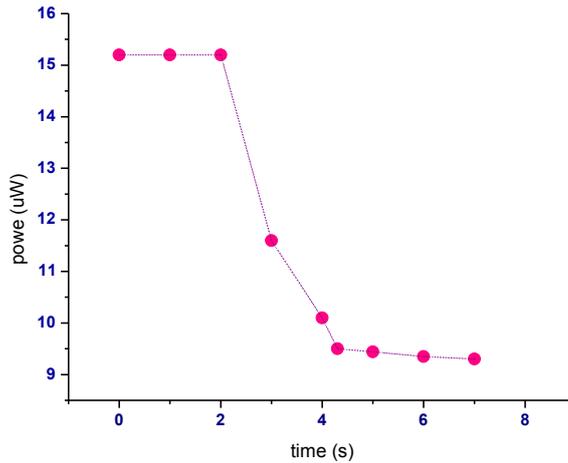


الشكل(11) السلوك الخطي لتغير الاستطاعة الليزرية النافذة بدلالة الرطوبة.

بلغت قيمة $R^2 = 0.96$ وهذا يدل على خطية مناسبة للحساس الليفي ضمن مجال عمله حيث يمكن استخدامه في التطبيقات المختلفة.

4-5-2 سرعة الاستجابة

لتحديد سرعة الاستجابة للحساس المصنع، وُضع الحساس في حجرة مضبوطة الرطوبة وجرى خفض مقدار الرطوبة داخل الحجرة من القيمة 95% RH إلى قيمة الرطوبة في هواء الغرفة 35% RH، و جرى قياس استطاعة الحزمة الضوئية النافذة بدلالة الزمن أثناء هبوط الرطوبة، كما في الشكل (12). حُسبت سرعة الاستجابة من هذا الشكل وبلغت نحو 0.073 s/RH% .



الشكل(12) تغير الاستطاعة الليزرية النافذة عند تغير الرطوبة من قيمتها العظمى إلى قيمتها الدنيا.

5- الاستنتاجات

جرى بناء حساس رطوبة ليفي بصري باستخدام ليف بصري متعدد النمط و مغشى بطبقة (PVP/PEG). يعتمد مبدأ عمل هذا الحساس على تغيير شروط انقياد الموجة الليزرية ضمن الليف بتغيير قرينة انكسار الغشاء التي تتغير بتغير الرطوبة المحيطة. درس تأثير البنية الهندسية للحساس وتبين تجريبياً أن الحساسية للرطوبة النسبية تزداد بزيادة طول الجزء منزوع اللحاء، وكان أفضل طول هو 5 cm. لوحظ أن الحساسية تقل بزيادة عدد مرات التغطيس، وكانت أفضل حساسية عند غطسة واحدة. بدراسة تأثير عدة أطوال موجية على الحساسية، تبين أن الحساسية الأفضل هي عند استخدام ليزر بطول موجة أكبر، وجرى اعتماد طول الموجة 1550nm. عند الشروط المثلى السابقة، كانت أفضل قيمة للحساسية $0.199\mu W/RH\%$ وبمجال عمل $RH\% (65-95)$. تتميز استجابة الحساس بخطية جيدة حيث $R^2 = 0.96$ ، وبلغت سرعة استجابته نحو $0.073 s/RH\%$ ، وهو ذو حجم صغير وكلفة منخفضة و تكرارية جيدة مما يجعل منه نموذجاً قابلاً للتطبيق العملي.

معلومات التمويل :

هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

5- المراجع:

1. Ascorbe, J., Corres, J. M., Arregui, F. J., & Matias, I. R. (2017). Recent developments in fiber optics humidity sensors. *Sensors*, 17(4), 893.
2. Wang, Y., Shen, C., Lou, W., & Shentu, F. (2016). Fiber optic humidity sensor based on the graphene oxide/PVA composite film. *Optics Communications*, 372, 229-234.
3. Leng, X., Luo, D., Xu, Z., & Wang, F. (2018). Modified graphene oxide/Nafion composite humidity sensor and its linear response to the relative humidity. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 257, 372-381.
4. Vijayan, A., Fuke, M., Hawaldar, R., Kulkarni, M., Amalnerkar, D., & Aiyer, R. C. (2008). Optical fibre based humidity sensor using Co-polyaniline clad. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 129(1), 106-112.
5. Jinesh, M., Thomas, K. J., Nampoore, V. P. N., & Radhakrishnan, P. (2007). A comparative study of fiber optic humidity sensors based on chitosan and agarose. IFSA.
6. Batumalay, M., Harun, S. W., Irawati, N., Ahmad, H., & Arof, H. (2014). A study of relative humidity fiber-optic sensors. *IEEE Sensors Journal*, 15(3), 1945-1950.
7. Ouyang, T., Lin, L., Xia, K., Jiang, M., Lang, Y., Guan, H., & Chen, Z. (2017). Enhanced optical sensitivity of molybdenum diselenide (MoSe₂) coated side polished fiber for humidity sensing. *Optics Express*, 25(9), 9823-9833.
8. Aneesh, R., & Khijwania, S. K. (2012). Titanium dioxide nanoparticle based optical fiber humidity sensor with linear response and enhanced sensitivity. *Applied optics*, 51(12), 2164-2171.
9. Chen, G. Y., Wang, J., & Lancaster, D. G. (2020). Fiber-Optic Skew Ray Sensors. *Sensors*, 20(9), 2499.
10. Snyder, A. W., & Love, J. D. (1983). *Optical waveguide theory*. Chapman and Hall.
11. Gaston, A., Lozano, I., Perez, F., Auza, F., & Sevilla, J. (2003). Evanescent wave optical-fiber sensing (temperature, relative humidity, and pH sensors). *IEEE Sensors Journal*, 3(6), 806-811.
12. Senior, J. M., & Jamro, M. Y. (2009). *Optical fiber communications: principles and practice*. Pearson Education.
13. Kumar, A., Subrahmanyam, T. V. B., Sharma, A. D., Thyagarajan, K., Pal, B. P., & Goyal, I. C. (1984). Novel refractometer using a tapered optical fibre. *Electronics Letters*, 13(20), 534-535.
14. Apriyanto, H., Ravet, G., Bernal, O. D., Cattoen, M., Seat, H. C., Chavagnac, V., Surre, F. & Sharp, J. H. (2018). Comprehensive modeling of multimode fiber sensors for refractive index measurement and experimental validation. *Scientific Reports*, 8(1), 1-13.
15. Hewak, D. W., & Lit, J. W. (1988). Standardization and control of a dip-coating procedure for optical thin films prepared from solution. *Canadian journal of physics*, 66(10), 861-867.
16. Sheeba, M., Rajesh, M., Vallabhan, C. P. G., Nampoore, V. P. N., & Radhakrishnan, P. (2005). Fibre optic sensor for the detection of adulterant traces in coconut oil. *Measurement Science and Technology*, 16(11), 2247-2250.