

تحليل تأثير بلازمونات السطح على أداء الليف الضوئي البلوري الفوتوني

د.م. السموعل صالح*

د.م. هديل عيسى**

م.رالدا جعفر***

(تاريخ الإيداع 2022/11/17 . قُبِلَ للنشر في 2023/1/29)

□ ملخص □

تطورت الأبحاث في مجال المواد ذات قرينة الانكسار السالبة (Metamaterials) ومن ضمنها المواد البلازمونية التي تعتمد على بلازمونات السطح (Surface Plasmon (SP)، وتملك هذه المواد عازلية نسبية سالبة عند أطوال موجية محددة، وحديثاً تم استخدام الليف الضوئي الفوتوني كوسط تنتشر فيه هذه الأمواج البلازمونية. إن وجود بلازمونات السطح في بنى الألياف الضوئية الفوتونية تحسن الخواص الضوئية بشكل كبير نظراً لميزاتها العديدة مثل العازلية النسبية السالبة الناتجة عن الإلكترونات الحرة الموجودة في المواد البلازمونية كالمعادن، مما يؤدي إلى إيجاد تطبيقات جديدة، كمرشحات الاستقطاب، والعدسات الفائقة، والحساسات الضوئية وغيرها. تم في هذه الدراسة اقتراح بنية ليف بلوري فوتوني بلازموني (Plasmonic Photonic Crystal Fiber (PPCF) ذو ترتيب سداسي لتقريب الهواء، وأربعة تقوب إهليلجية الشكل، أضيفت فيها المواد البلازمونية (الذهب والفضة)، وتم تغيير قيم سماكة طبقات المواد البلازمونية، واستخدام برنامجي (Comsol Multiphysics) و (Matlab) لتحديد خواص التوجيه وحساب قرينة الانكسار الفعالة وخسارة الحصر. الكلمات المفتاحية: الليف الضوئي الفوتوني، المواد البلازمونية، بلازمونات السطح، طول موجة الرنين، ضياع الحصر.

* أستاذ- قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين- اللاذقية -سورية.

** مدرسة- قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة تشرين- اللاذقية-سورية.

*** طالبة دكتوراه- قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين- اللاذقية-سورية.

Analyzing the Effect of the Surface Plasmons on Photonic Crystal Fiber

Dr. Eng. Alsamawal Saleh^{*}
Dr. Eng. Hadeel Issa^{**}
Eng. Ralda Jaafar^{***}

(Received 17/11/2022 . Accepted 29/1/2023)

□ ABSTRACT

Researches in the field of materials that have negative refractive index (Metamaterials); including Plasmonic material that uses Surface Plasmons (SP) have developed. These materials have a negative effective permittivity in a specific range of wavelength. Recently The Photonic Crystal Fiber (PCF) based on (SP) had been used due to its interesting features. The (SP) improves the optical properties due to the negative real permittivity, which the free electrons in the Plasmonic material provides. This leads to many new applications like optical filters, super lenses, optical sensors and many others. The proposed structure in this study is a hexagonal Plasmonic Photonic Crystal Fiber (PPCF) with four elliptical air holes, coated by Plasmonic material (gold or silver). We studied the confinement loss and effective refractive index, by varying the thickness of the Plasmonic material. The (Comsol Multiphysics) and (Matlab) have been used to calculate the refractive index, confinement loss and optical properties .

Key Words: Photonic Crystal Fiber, Plasmonic Materials, Surface Plasmon, Resonance Wavelength, Confinement Loss.

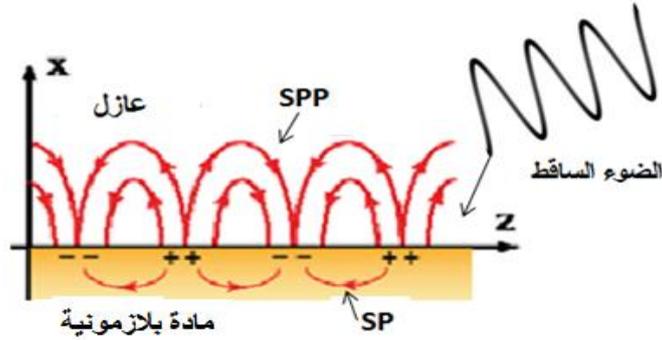
^{*}Professor, Department of communication Engineering- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering- Tishreen University- Lattakia-Syria.

^{**}Associate Professor-Department of communication Engineering- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering-Tishreen University –Lattakia-Syria.

^{***}Phd Student- Department of communication Engineering- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering- Tishreen University ,Lattakia- Syria.

-1 المقدمة:

يعد الليف البلوري الفوتوني الشكل المطور عن الليف الضوئي التقليدي وهو القسم الأساسي في نظم الاتصالات بالألياف الضوئية، ويتكون من غلاف يملك تقوياً تنتشر على طولها، وله نوعان أساسيان بحسب المادة التي تملأ القلب وهما المصمت (solid core) والمجوف (hollow core) [1]، ويختلفان في آلية قيادة الضوء ففي حالة القلب المصمت هي الانعكاس الكلي الداخلي المتغيرة، وفي حالة القلب المجوف فتكون بتأثير الفجوة الحزمية، ويمتلك بارامترات عديدة مثل قطر الثقوب وأبعادها وترتيبها وغيرها. من ناحية أخرى تطورت الدراسات في مجال علم المواد كالمواد ذات قرينة الانكسار السالبة (Metamaterials) ومن ضمنها المواد البلازمونية التي تملك عازلية نسبية سالبة (مثل المعادن) عند أطوال موجية محددة. وبلازمونات السطح (Surface Plasmons) هي أمواج تنتشر على الحد الفاصل بين المعدن والعازل، وتعتمد على التفاعل بين الإشعاع الكهرومغناطيسي الوارد والكترونات التوصيل عند هذا الحد، كما هو موضح بالشكل (1):



الشكل(1): البلازمونات (SP) و (SPP) التي تنتشر بين العازل والمادة البلازمونية .

وتنتشر هذه الأمواج أو الأنماط البلازمونية عند ورود ضوء بترددات ضوئية مرئية على حد الفاصل بين المعدن والعازل بشروط معينة أهمها تطابق رقم الموجة لكل من الموجة الكهرومغناطيسية الواردة والموجة البلازمونية، ولتحقيق هذا الشرط استخدمت الدراسات السابقة موشوراً من أجل عملية الاقتران والتطابق، إلا أن هذه الآلية تتطلب تجهيزات معقدة، وقد تم تحقيق هذا الشرط عند استخدام الليف البلوري الفوتوني، كما أن وجود بلازمونات السطح في بنى الألياف الضوئية الفوتونية تحسن الخواص الضوئية بشكل كبير، إضافة إلى إيجاد تطبيقات جديدة لأنها تجمع بين مزايا الألياف البلورية الفوتونية ومزايا المواد البلازمونية ومنها العازلية النسبية السالبة الناتجة عن الإلكترونات الحرة الموجودة في المعادن، إمكانية التحكم بالخواص الضوئية بسهولة ومرشحات الاستقطاب والعدسات الفائقة والحساسات الضوئية وإمكانية حصر الأنماط البلازمونية على مقياس أطوال موجية فرعية وغيرها [1-5].

أجريت محاكاة لليف بلوري فوتوني بلازموني سداسي الترتيب لثقوب الهواء الدائرية، وتعد هذه البنية هي الأكثر استخداماً، يستخدم الذهب كمادة بلازمونية ويعمل كمرشح استقطاب ضوئي، ودرس تأثير تغيير أقطار ثقوب الهواء عند وجود البلازمونات على خسارة الحصر (Confinement Loss)، حيث تبين أن طول موجة الرنين كانت عند $(1.31\mu m)$ ، وقيمة الخسارة كانت $(1200 dB/cm)$ ، أهمل هذا البحث تأثير دراسة مادة أخرى وأشكال أخرى من الثقوب [6].

اقترحت إحدى الدراسات استخدام مادة بلازمونية وهي الذهب ووضعها على الغلاف الخارجي لليف بشكل مستقيم واستخدام الليف المقترح كحساس ضوئي، وذلك لزيادة إمكانية استشعار التغيير في قرائن الانكسار، حيث درس البحث [7] تأثير تغيير سماكة المادة البلازمونية على خسارة الحصر وقرينة الانكسار الفعالة، حيث تبين أن طول موجة الرنين كانت عند $(1.541\mu m)$ ، وقيمة الخسارة كانت $(250 dB/cm)$ ، وبالرغم من هذه النتائج إلا أن الليف المدروس صعب التصميم.

تضمن البحث [8] دراسة التشتت اللوني والتخميد لليف بلوري فوتوني وإمكانية استخدامه لنقل المعلومات لمسافات بعيدة، واستخدمت مادة الذهب فقط كمادة بلازمونية، لكن لوحظ أنه تم ملئ النقب بالمادة البلازمونية بالكامل مما يزيد من كلفة التصنيع بشكل كبير. كما قدم البحث [9] دراسة عن تصميم ليف بلوري فوتوني بلازموني يعمل كحساس أو مستقطب ضوئي على شكل (D Shape) بنقوب دائرية الشكل، وقد استخدم مادة الفضة كمادة بلازمونية، ودرس القسم الحقيقي لقرائن الانكسار الفعالة وخسارة الحصر والحساسية عند الأطوال الموجية الضوئية، أهمل هذا البحث تأثير دراسة مادة أخرى وأشكال أخرى من النقوب. بينما درس البحث [10] استخدام مواد بلازمونية أخرى مثل النحاس والألمنيوم مقارنتها مع مادتي الذهب والفضة، ودرس القسم الحقيقي لقرينة الانكسار وخسارة الحصر عند مجال الطيف المرئي، ووجد أن للذهب والفضة أعلى خسارة حصر وبالتالي هما المادتين الأفضل استخداماً لإنشاء بلازمونات السطح.

تضمن البحث [11] دراسة خسارة الحصر لمواد أخرى مثل أكسيد الزنك المطعم بالألمنيوم (AZO) وأكسيد الزنك المطعم بالجرمانيوم (GZO) ومقارنتها بالمعادن وبالتحديد بمادتي الذهب والفضة، ووجد أن (GZO) مواد تستخدم بشكل واسع في مجال الأمواج تحت الحمراء، ودرس خسارة الامتصاص لهذه المواد مع مقارنتها بمادتي الذهب والفضة. اقترحت إحدى الدراسات [12] إضافة مادتي نيتريدات التيتانيوم (TIN) ونيتريدات الزركونيوم (ZRN) كمواد بلازمونية ومقارنتها مع مادتي الذهب والفضة، ودرس الاستجابة البصرية وشدة حقل الأنماط البلازمونية لهذه المواد في مجال الطيف المرئي، ووجد أن المعادن تملك استجابة بصرية وشدة حقل الأنماط البلازمونية أعلى من مادتي (TIN) و (ZRN).

2- أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية هذا البحث من الحاجة إلى تطوير أنظمة الاتصالات الضوئية والحصول على ميزات وخواص جديدة توفرها المواد البلازمونية وبلازمونات السطح، وإمكانية استغلال خسارة الحصر وتحويلها إلى أمواج بلازمونية.

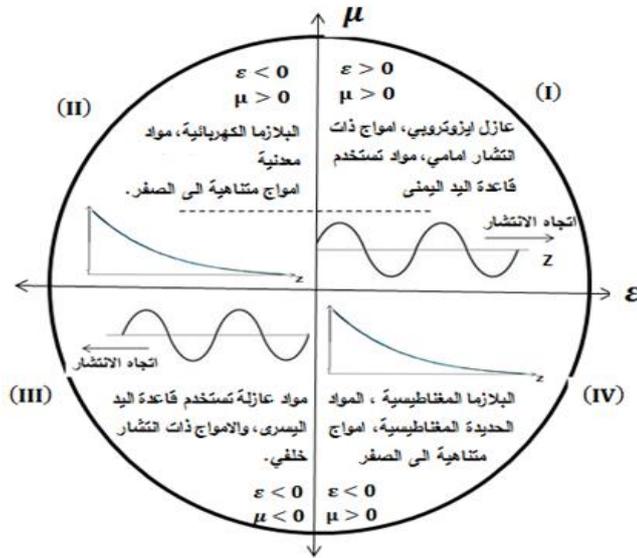
3- طرائق البحث ومواده:

تم الاعتماد في هذا البحث على الأسس النظرية والرياضية التي تصف الليف الضوئي الفوتوني البلازموني، بالإضافة إلى استخدام برنامج Comsol Multiphysics لتمثيل الليف الضوئي الفوتوني البلازموني وتحديد قيم المعاملات الأساسية لليف وبارامتراته، والحصول على قيم قرائن الانكسار الموافقة للأطوال الموجية المدروسة، علماً أن هذا البرنامج يعتمد على طريقة العناصر المنتهية (Finite Element Method (FEM))، ثم استخدام برنامج (Matlab) للحصول على منحنيات القسم الحقيقي لقرائن الانكسار وخسارة الحصر، وأخيراً مناقشة نتائج الدراسة وصياغة الاستنتاجات.

(Metamaterial(MMs)): 1-3 المواد سالبة قرينة الانكسار

تحدد الخواص البصرية لأي مادة من الاستجابات الكهربائية والمغناطيسية الناتجة عن تفاعل الامواج الكهرطيسية للضوء مع الذرات المكونة لهذه المادة، ويمكن تغيير هذه الاستجابات وبالتالي تغيير الخواص البصرية من خلال تغيير البنى والمواد المتوفرة (أي تغيير قرائن الانكسار) لنحصل على خواص جديدة تماماً غير موجودة في المواد الطبيعية التي تمتلك بشكل عام ثابت عازلية كهربائية وثابت نفوذية مغناطيسية موجبين، وقد درست هذه المواد، التي تسمى بمواد قاعدة اليد اليمنى ((Right Hand material(RHM)، بشكل كاف في معظم مجالات العلوم الهندسية حيث كان لها تطبيقات واسعة جداً. ووجد تجريبياً أن بعض المواد في حالة البلازما تملك ثابت عازلية سالباً عند عدد محدود من الترددات العالية، وبعضها الآخر، مثل المواد المغناطيسية (الحديدية) تملك ثابت نفوذية مغناطيسية سالباً تملك هاتان المجموعتان خواصاً جديدة تحدد آلية مختلفة لانتشار الأمواج الكهرطيسية خلالها [13]. في العقد الأخير تم اكتشاف تقنية جديدة لتصنيع مواد تملك ثابت عازلية ونفوذية سالبين وسميت بالمواد ذات قرينة الانكسار السالبة (Negative refractive index) او (Metamaterial(MMs) وبالنتيجة سيكون سلوك هذه المواد بالنسبة لكل من الحقل الكهربائي والمغناطيسي معاكس لسلوك المادة الطبيعية الموصفة بقاعدة اليد اليمنى، وهكذا يمكن توصيف سلوكها في المجال الكهرطيسي بقاعدة اليد اليسرى ولذلك تسمى بمواد قاعدة اليد اليسرى (Left Hand Material(LHM) ، وهي عبارة عن مواد صناعية ذات خصائص جديدة لا تمتلكها المواد ذات قاعدة اليد اليمنى في مجال الترددات العالية في الاتصالات، وتكمن أهمية هذه المواد بالخصائص الجديدة الناتجة عن قرينة الانكسار السالبة أو عن سالبية كل من العازلية الكهربائية (ϵ) والنفوذية المغناطيسية (μ) والتي لم تعرف من قبل في مواد RHM [13-14]. من هذه الخصائص هي آلية انحراف الأشعة الواردة إلى هذه المواد وآلية الرنين الناتج عن الحقول الكهرطيسية، وقد واكبت هذه المواد التطور السريع لعلم الاتصالات وأضافت خصائص جديدة مهمة لم تكن موجودة سابقاً في هذا المجال، وفي الأعوام القليلة السابقة تم التوصل الى بناء هذه المواد وتركيبها بهيكلية ما باستخدام التطور التقني في مجال الدرات المطبوعة حيث تحقق السماحية والنفوذية السالبين، منذ ذلك الحين دخلت (MMS) في معظم مجالات العلم وكانت ذات اهمية بالغة بخاصة في مجالات الاتصالات حيث استخدمت في عدة تطبيقات أهمها الهوائيات والادلة الموجية المكروية [13-15].

تعطي مواد اليد اليسرى فكرة عن الربع الثالث III من المخطط ϵ, μ ، الذي حله العالم الروسي Veselago يحوي في مربعه الأول I على المواد الطبيعية المعروفة RHM ذات معامل العازلية الكهربائية $\epsilon > 0$ ومعامل النفوذية المغناطيسية $\mu > 0$ و هي تمثل المواد الطبيعية المعروفة ويكون انتشار الأمواج فيها بشكل مباشر (أمامي)، أما الربع الثاني II والرابع IV فيمثلان المواد وحيدة السالبة يكون فيها انتشار الامواج على شكل موجات متناهية الى الصفر. يعبر القسم الأخير حيث $\epsilon < 0$ او $\mu < 0$ عن المواد سالبة السماحية الكهربائية والنفوذية المغناطيسية، وهي تمثل المواد التي يكون انتشار الامواج فيها خلفياً [15].

الشكل (2): مخطط ϵ, μ

2-3 المواد البلازمونية وخصائصها:

يمكن تعريف البلازمونات بشكل عام على أنها أمواج أو أنماط كهروطسية لها ترددات تحت حمراء أو مرئية تنتشر على طول الحد الفاصل بين مادتين الأولى ذات ثابت عازلية سالب والثانية ذات ثابت عازلية موجب، ومصطلح البلازمونات يشمل نوعان من انتشار الأمواج الكهروطسية الأول في المادة ذات ثابت العازلية السالب (مثل المواد البلازمونية الموضحة لاحقاً) والذي يسمى ببلازمونات السطح والثاني في المادة ذات ثابت العازلية الموجب (مثل العازل أو الهواء أو الزجاج) ويسمى بوليبريتونات بلازمونات السطح ((Surface Plasmon Polaritons (SPP)، التي توجه على طول الحد الفاصل بين المادتين بشكل مشابه لتوجيه الضوء في الليف الضوئي كما هو موضح بالشكل (1)، ولها طول موجة أقصر من طول موجة الضوء الوارد [16-18].

3-3 آلية حدوث الاقتران وانشاء الموجة البلازمونية:

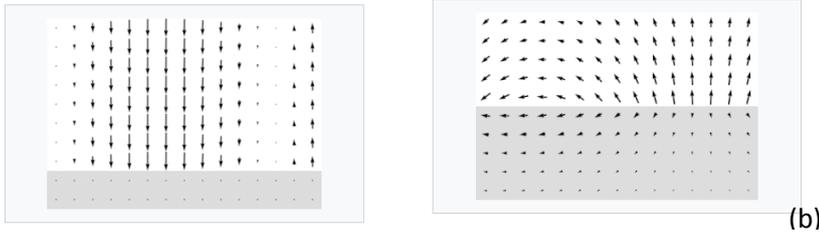
بما أن الليف البلوري الفوتوني الذي تم دراسته ذو قلب مصمت فإن آلية انتشار الضوء فيه هي الانعكاس الكلي الداخلي، وتبعاً لهذه الآلية فإن الضوء المنعكس من الغلاف يعود بكامله الى القلب، ولكن جزء بسيط من هذا الضوء المنعكس يحدث له انكسار عند الحد الفاصل بين المادة السيليكا والمادة البلازمونية التي تحتوي الإلكترونات الحرة، والذي ينتج عنه الموجة البلازمونية بسبب اقتران الفوتونات مع الإلكترونات الحرة، وعنده تكون قيمة خسارة الحصر أعلى ما يمكن [19-20].

إن المواد البلازمونية لها تأثير كبير على الطول الموجي المنتشر سواء في الألياف الضوئية أو غيرها، وخاصة من ناحية التخميم والامتصاص، وغيرها من الخصائص. لذا يجب ان نعرض أهم المواد البلازمونية.

المواد البلازمونية:

3-4-1 المعادن:

تلعب المعادن دوراً هاماً في مختلف المجالات، حيث يمكن استخدامها كنواقل في استخدامات معينة وكمواد بلازمونية عند ورود الضوء عليها بشروط معينة كزاوية الورود وتردد الضوء الوارد، وأحد أهم الأمثلة على المواد البلازمونية هي المعادن وخاصة الفضة والذهب وهما يملكان ثابت عازلية كهربائية حقيقي سالب. ويوضح الشكل(3) حالة استخدام معدن الفضة كناقل وكمادة بلازمونية وتوزع الحقل الكهربي في الحالتين. و بالمقابل تملك المعادن خسائر عالية في مجال الاطوال الموجية الضوئية لذا أدت الحاجة إلى زيادة الأبحاث في المواد البلازمونية الجديدة، كما يمكن التغلب على الخسائر من حيث المبدأ من خلال تطوير مخططات لتعويض الخسارة عن طريق الريح البصري[21-22].



الشكل(3) توزع الحقل الكهربي لمعدن الفضة في حالة استخدامه: (a) كمادة بلازمونية، (b) كناقل.

3-4-2 المواد الاخرى :

يمكن استخدام مواد بلازمونية أخرى مثل اكسيدات الناقلة الشفافة وانصاف النواقل عند المجال الطيفي المرئي، مثل aluminum zinc oxide(AZE) و Germanium zinc oxide(GZE) و اكسيد النيتريدات و اكسيدات الزنك تملكان خسارة منخفضة في مجال الاطوال المرئية وأيضاً indium tin oxide (ITO) aluminumdoped zinc (AZO oxide) وتعد هذه المواد فعالة ولها خسارة أقل من المعادن في مجال الاطوال الموجية الضوئية إلا أنها لا تملك ثابت عازلية حقيقي كبير القيمة مقارنة بالمعادن[23-24].

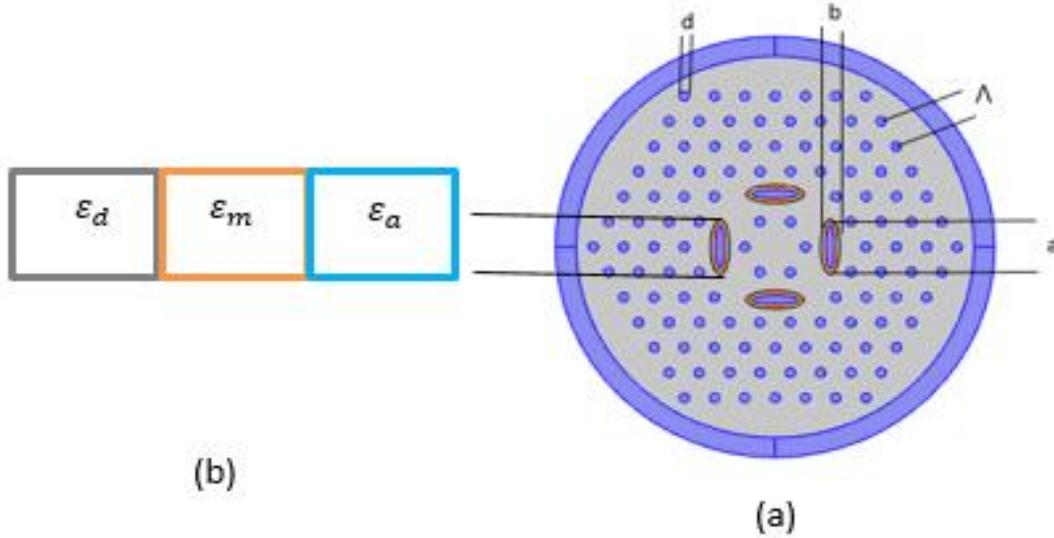
4. الليف البلوري الفوتوني البلازموني:

إن الليف المدروس في هذا البحث المقترح هو ليف بلوري فوتوني يعتمد على وجود أمواج بلازموونات السطح الذي توفره المواد البلازمونية الداخلة في تركيبه وذلك نتيجة التفاعل الكهربي بين الموجة الواردة والكترونات التوصيل للمعدن عند الحد الفاصل بين المعدن والعازل، مما يؤدي إلى تغير قرينة الانكسار الفعالة للنمط المنتشر في القلب وبالتالي تغير الخواص الضوئية المعتمدة عليها.

وللحصول على بلازموونات السطح يجب تحقيق شرط تطابق الرقم الموجي للنمطين الأساسي والبلازموني ويمكن معرفة ذلك عن طريق:

1. تطابق قرائن الانكسار الحقيقية للنمطين عند طول موجة معين وهو طول موجة الرنين.
2. قيمة خسارة الحصر يجب ان تكون أعظمية حتى يتحقق انتقال الطاقة الى الأمواج البلازمونية.

وعند تحقق النقطتين السابقتين نتأكد بأن النمط لمطلوب هو النمط البلازموني[25-26].



الشكل(4): (a) الليف البلوري الفوتوني البلازموني، (b) ترتيب المواد التي يتكون منها الثقب الاهليلجي.

تتكون البنية المدروسة والموضحة بالشكل(4) وهي اسهل وابسط أنواع الليف البلوري الفوتوني من قلب مصمت وغلاف يتكون من مادة أساس هي السليكا والتي تملك تشتت مادي ممثل بمعادلة سليمييه (Sellmeier's Equation) الموضحة في المرجع [27] وثابت عازلية مساو ل ($\epsilon_a = 2.09$) وست حلقات من ثقوب الهواء مرتبة على الشكل السداسي والتي لها شكلين وهما الدائري له القطر ($d = 1.4\mu m$) والحلقة الثانية فقط كان شكل ثقوب الهواء إهليلجي بالابعاد التالية القطر الصغير ($a = 1.4\mu m$) والقطر الكبير ($b = 4.2\mu m$) وتملك ثقوب الهواء ثابت عازلية مساو ل ($\epsilon_a = 1$) والمسافة بين مركزي ثقبين متجاورين ($\Lambda = 2.2\mu m$).

وتم اختيار ترتيب ثقوب الهواء على الشكل السداسي لأن هذه البنية مصنعة سابقاً بحيث معدل مواصفاتها بإضافة ثقوب اهليلجية ومواد بلازمونية، وتم تصميم البنية وإضافة المواد البلازمونية باستخدام برنامج Comsol Multiphysics الذي يعتمد طريقة (FEM) في الحسابات الرياضية.

تملك المادة البلازمونية ثابت عازلية فعال يمكن الحصول عليه من نموذج درود (Drude Model)

[28] الممثل بالمعادلة(1):

$$\epsilon_m = \epsilon_\infty - \frac{\omega_D^2}{\omega(\omega + j\gamma_D)} - \frac{\Delta\epsilon \cdot \Omega_L^2}{(\omega^2 - \Omega_L^2) - j\Gamma_L\omega} \quad (1)$$

حيث ϵ_∞ هو ثابت العازلية، $\Delta\epsilon$ عامل الوزن، ω التردد الزاوي للضوء الموجه، ω_D تردد البلازما، γ_D

تردد التخماد، Ω_L تردد هزاز لورنتز، Γ_L العرض الطيفي لهزاز لورنتز.

وتم دراسة الذهب والفضة كمواد بلازمونية، ويبين الجدول(1) مقارنة بين هاتين المادتين وأهم

مميزتهما[29-32].

الجدول(1): مقارنة بين مادتي الذهب والفضة.

المساوي	الميزات	المواد البلازمية
1. مادة سريعة التأكسد ويتأثر بالبيئة المحيطة.	1. تعد من المواد فائقة التوصيل. 2. تملك ذروة زنين حادة وحساسية عالية مما يجعلها مناسبة في تطبيقات الحساسات الضوئية.	الفضة
1. منحني الزنين عريض نسبياً مما يخفض من دقة الكشف في حالة استخدامه في تطبيقات الحساسات الضوئية.	1. معدن ثابت كيميائياً ولا يتأثر بالبيئة المحيطة. 2. يملك ناقلية عالية في المجال الضوئي إلى تحت الحمراء.	الذهب

وقد تم دراسة تغيير سماكة المادة البلازمية $th = (35,45,55)nm$ وأثر هذا التغيير على قرينة الانكسار الفعالة (n_{eff}) و خسارة الحصر (L) التي تعطى بالمعادلة(2):

$$L = 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda} Im(n_{eff}) \times 10^4 \quad (2)$$

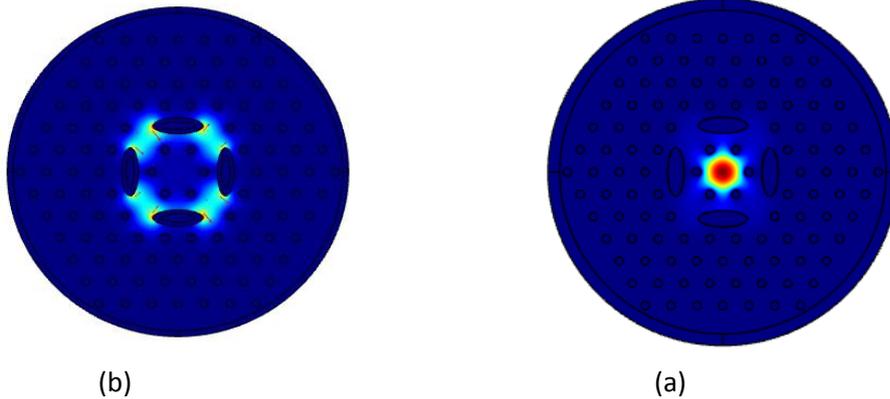
حيث λ هي طول الموجة، $Im(n_{eff})$ القسم التخيلي لقرينة الانكسار الفعالة [33].
 علماً أن الدراسة أجريت في مجال الأطوال الموجية ($0.4\mu m \leq \lambda \leq 2\mu m$) والتي تشمل النواذ الضوئية الأساسية الثلاث.

5. النتائج والمناقشة:

تمت دراسة أداء الليف البلوري الفوتوني البلازموني ذو البارامترات الموضحة بالشكل(4)، عند إضافة مادتين بلازمونيتين الأولى هي الذهب والثانية هي الفضة، ودراسة خسارة الحصر وقرينة الانكسار الفعالة عند هاتين المادتين.

أولاً: مادة الذهب:

يوضح الشكل(5) توزيع الحقل الكهرومغناطيسي للنمط الأساسي وهو النمط الوحيد المنتشر في الألياف وحيدة النمط ويرمز له بالرمز (HE₁₁) والنمط البلازموني في الليف المدروس.



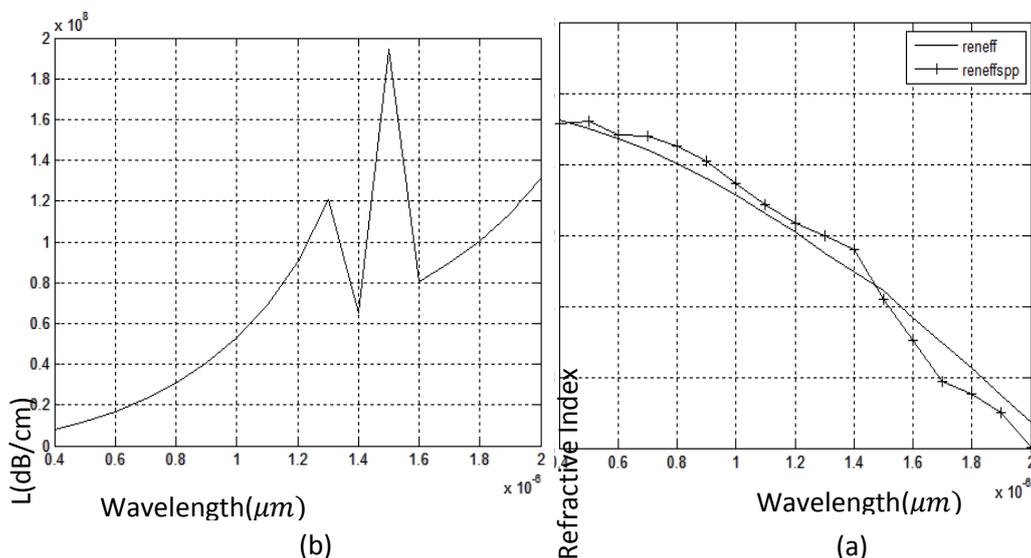
الشكل(5) توزيع الحقل الكهرومغناطيسي لليف البلوري الفوتوني البلازموني: (a) النمط الأساسي، (b) النمط البلازموني

ونلاحظ أن الثقوب في الحلقة الأولى تعمل على تقييد النمط وحصره في النواة في حالة النمط الأساسي ويحدث الاقتران بين النمط البلازموني والنمط الأساسي كلما كانت الثقوب الأهلجية الشكل أقرب الى النواة وعندها تنتقل

الطاقة من اللب إلى المادة البلازمية لتتحول إلى أمواج بلازمية، ويمكن التحكم بشدة النمط البلازموني من خلال تغيير بارامترات معينة أهمها سماكة المادة البلازمية (الذهب والفضة).

أما قرائن الانكسار للنمطين الأساسي والبلازموني وخسارة الحصر للنمط الأساسي فكانت على الشكل

التالي:

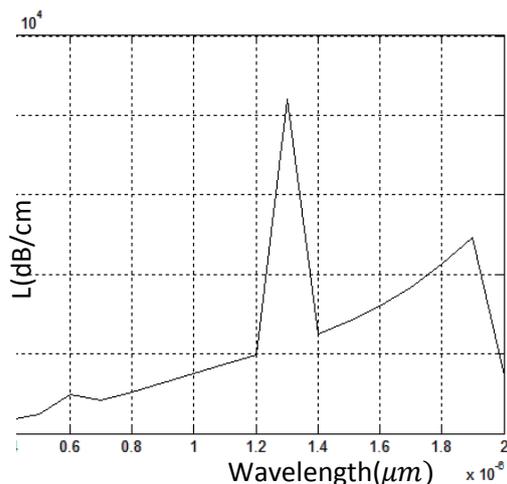


الشكل (6) مادة الذهب: (a) قرائن الانكسار للنمطين الأساسي والبلازموني، (b) خسارة الحصر للنمط الأساسي.

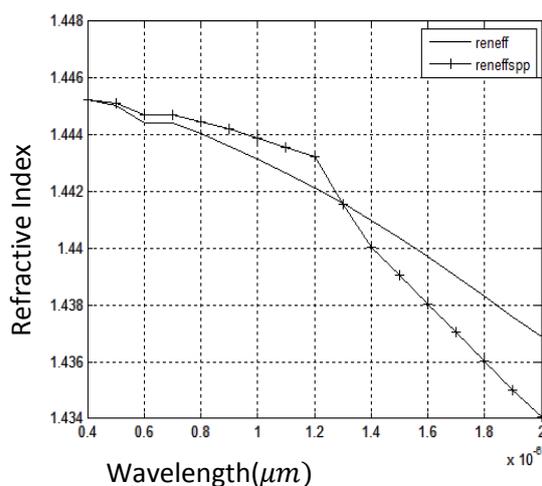
وقد حصلنا على قيم قرائن الانكسار عند كل طول موجي من برنامج (Comsol Multiphysics) الذي يعتمد طريقة العناصر المنتهية (Finit Element Method(FEM)) كطريقة رياضية للحصول على قرائن الانكسار. نلاحظ أن نقطة تقاطع منحنى قرائن الانكسار للنمطين الأساسي والبلازموني كان عند الطول الموجي (1.51 μm) وهو طول موجة الرنين والذي يوافق عنده أعظم قيمة لخسارة الحصر وهي * (1.988) (10^8 dB/cm) أي أنه يوجد انتقال للطاقة كاملة من النمط الأساسي للنمط البلازموني، علماً أن هذه المنحنيات كانت عند السماكة (th=45nm). أما عند السماكتين (35nm) و (55nm) كان منحنى الخسارة متزايد ولا يوجد تقاطع لمنحنيات قرائن الانكسار.

ثانياً : مادة الفضة:

أما بالنسبة للمادة البلازمية الثانية وهي الفضة فكان توزيع النمط الكهرومغناطيسي للنمطين الأساسي والبلازموني مشابه للمادة البلازمية السابقة وهي الذهب، أما منحنيات قرائن الانكسار وخسارة الحصر فكانت على الشكل التالي:



(b)



(a)

الشكل (7) مادة الفضة: (a) قرائن الانكسار للنمطين الأساسي والبلازموني، (b) خسارة الحصر للنمط الأساسي.

نلاحظ أن نقطة تقاطع منحنى قرائن الانكسار للنمطين الأساسي والبلازموني كان عند الطول موجة الرنين $(1.32\mu\text{m})$ والذي يوافق عنده أعظم قيمة لخسارة الحصر وهي $(2.16 * 10^4 \text{ dB/cm})$ ، وكانت هذه المنحنيات كانت عند السماكة $(th=45\text{nm})$. أما عند السماكتين (35nm) و (55nm) كان منحنى الخسارة متزايد ولا يوجد تقاطع لمنحنيات قرائن الانكسار.

بما أن النتائج التي حصلنا عليها إيجابية وسماكة المواد البلازمونية المضافة هي بالنانومتر فلا ننظر إلى الجدوى الاقتصادية خاصة أن المواد المستخدمة في تصنيع الليف هي السليكا والهواء وهما مادتين ذات كلفة لا تذكر.

6. الاستنتاجات والتوصيات :

يمكن تلخيص النتائج بالجدول التالي:

الجدول(2):مقارنة بين النتائج التي حصلنا عليها من استخدام مادتي الذهب والفضة كمواد بلازمونية

المادة	السماكة (nm)	طول موجة الرنين (μm)	الخسارة (dB/cm)
الذهب	45	1.51	$1.988 * 10^8$
الفضة	45	1.32	$2.16 * 10^4$

✓ نستنتج أن شدة النمط البلازموني في حالة استخدام مادة الذهب أقوى من حالة استخدام مادة الفضة، وذلك لأن خسارة الحصر كانت أكبر.

✓ يمكن استخدام الليف البلوري الفوتوني البلازموني كحساس ضوئي عند استخدام مادة الفضة كمادة بلازمونية، بسبب ذروة الرنين الحادة عند الطول الموجي $(\lambda = 1.32\mu\text{m})$.

✓ يمكن استخدام مادة الجرافين مع مادة الفضة للتقليل من حالة الأكسدة.

.7 المراجع:

1. Z AL-Kinani, K. Hussain,' *Analysis of circular plasmonic photonic crystal fiber for filter applications*', AIP Conference Proceedings, 2020.
2. V.K. Sharma, Anil Kumar, A. Kapoor, ' *Analysis of surface and guided wave plasmon polariton modes in insulator-metal-insulator planar plasmonic waveguides*', Elsevier,2012.
3. A Khaleque, G. Mironov , T. Hattori, ' *Analysis of the properties of a dual-core plasmonic photonic crystal fiber polarization splitter*', Springer-Verlag Berlin Heidelberg ,2015.
4. I Haddouche, L Cherbi,' *Comparison of finite element and transfer matrix methods for numerical investigation of surface plasmon waveguides*', Elsevier,2017.
5. A Paul, A Krishno Sarkar, Md. Hafizul Islam, M Morshed,' *Dual Core Photonic Crystal Fiber based Surface Plasmon Resonance Biosensor*', optics Australia ,2018.
6. Y Xin, G Ziheng, T Cheng, Li Shuguang, ' *A novel gold-coated PCF polarization filter based on surface plasmon resonance*', Optics and Laser Technology china,2020.
7. A Kumar Paul, M Habib, N Hoang Hai,' *An air-core photonic crystal fiber based plasmonic sensor for high refractive index sensing*' Optics Communications. Iran. 2020.
8. E Khoobjou ,H Khalesi, V Ghods, ' *Dispersion and light loss reduction in photonic crystal fibers using nanoparticles optimization*' .Optical and Quantum Electronics. Iran. 2021.
9. S. Selvendran , J. Divya , A. Sivanantha Raja. *A Reconfigurable Surface-Plasmon-Based Filter/Sensor Using D-Shaped Photonic Crystal Fiber*, School of Electronics Engineering (SENSE), Vellore Institute of Technology, India; 2022.
10. G. Akinoglu , K. Kempa ,J.Hutchiso, ' *Materials design of vertically coupled plasmonic arrays*', School of Chemistry, University of Melbourne, Parkville, Australia,2021.
11. [M. K. Hamza](#),[J.-M. Bluet](#), [K. Masenelli-Varlot](#), [B. Canut](#), [O. Boisron](#), [P. Melinon](#) ,[B. Masenelli](#). ' *Tunable mid IR plasmon in GZO nanocrystals, Nanoscale*',
12. A.Shabani, M. Korsaa Søren, M.Nezhad, ' *Zirconium Nitride: Optical Properties of an Emerging Intermetallic for Plasmonic Applications*', Computational Materials Group Ferdowsi University of Mashhad ,Iran,2021.
13. Z Jacob," *Virtual photon interactions mediated by metamaterials*", Purdue University and University of Alberta,2016.
14. L Negro," *Routes to aperiodic metamaterials*", Boston University,2016
15. N Engheta," *Mathematical operations and processing with structured materials*", University of Pennsylvania,2016
16. A PAUL, A Krishno SARKAR, A KHALEQUE,' *Dual-Core Photonic Crystal Fiber Plasmonic Refractive Index Sensor: A Numerical Analysis*', *PHOTONIC SENSORS*, Bangladesh ,2018

17. Q.M. Kamrunnahar, J Robaiat Mou, M Momtaj, ' *Dual-Core Gold Coated Photonic Crystal Fiber Plasmonic Sensor: Design and Analysis*', *Physics* 2020.
18. M Kim, S Kim,' *Epsilon-near-zero photonic crystal fibers for a large mode separation of orbital angular momentum modes*', Elsevier , South Korea,2020.
19. A Yasli , H Ademgil,' *Geometrical comparison of photonic crystal fiber-based surface plasmon resonance sensors*', SPIE, Turkey,2020.
20. M Rahman, A Khaleque, Md Rahman,F Rabbi,' *Gold-coated photonic crystal fiber based polarization filter for dual communication windows*', Elsevier, Bangladesh.,2019.
21. M Kim ,S Kim,' *High efficiency dielectric photonic crystal fiber metalens*', Advanced Photonics Research Institute, GIST, Republic of Korea.,2020.
22. M Nazmus Sakiba, M Biplob Hossainb, K Al-tabatabaiee,' *High performance dual core D-shape PCF-SPR sensor modeling employing gold coat*', Elsevier, Bangladesh. 2019.
23. Yu Ying , Jia-Kai Wang, Ke Xu, Guang-Yuan Si,' *High sensitivity D-shaped optical fiber strain sensor based on surface plasmon resonance*', Optics Communications,china,2020.
24. M Al Mahfuz, M Aslam Mollah , M Rojy Momota, A Kumar Paul,' *Highly sensitive photonic crystal fiber plasmonic biosensor: Design and Analysis*', Optical Materials, Banglades,2020.
25. Yuwei Qu, Jinhui Yuan, Xian Zhou, Feng Li, Binbin Yan, Qiang Wu,' *Mid-infrared silicon photonic crystal fiber polarization filter based on surface plasmon resonance effect*', Optics Communications,china,2020.
26. Chao Liu, Jianwei Wang, Xin Jin, Famei Wang, Lin Yang,' *Near-infrared surface plasmon resonance sensor based on photonic crystal fiber with big open rings*', Optik,china , 2020.
27. A J.Talib, A.Yasser,' *Maximizing spectral sensitivity of plasmonic photonic crystal fiber sensor*', Optik, Banglades , 2021
28. Y BoFu ,Mi Liu', Pi Shum,' *An ultrahighly sensitive photonic crystal fiber based surface plasmon resonance sensor*' , Optical Materials, china 2020.
29. X Guo' L Han' FengLiu' *Refractive index sensing characteristics of dual-core PCF based on surface plasmon resonance*', Optik,china , 2020.
30. Xi Meng, Yu Zhao, Xi Wang,' **High-performance plasmonic sensor based on Photonic Crystal Fiber for refractive index and temperature sensing**' *Infrared Physics & Technology*,2022.
31. Gu Sanfeng ,W Sun, M Deng,' **Simultaneous measurement of magnetic field and temperature based on Photonic Crystal Fiber plasmonic sensor with dual-polarized modes**' Optik, Banglades , 2022.
32. Gh Soghra , B Jamal ,M Bahar,' **Design and analysis of surface plasmon resonance based Photonic Crystal Fiber sensor employing gold nanowires**' Optik, Iran , 2022.
33. M Ifaz AhmadIsti' H Talukder' S.M. RiazulIslam,' *Asymmetrical D-channel photonic crystal fiber-based plasmonic sensor using the wavelength interrogation and lower birefringence peak method*' , Optik, Banglades , 2020.