تحسين أداء الحساسات الضوئية المعتمدة على الألياف البلورية الفوتونية باستخدام المواد البلازمونية والبنية الحلزونية

د.رالدا جعفر[1]

الملخص

شهدت تكنولوجيا الألياف الضوئية تطوراً ملحوظاً منذ ظهور الألياف التقليدية المعتمدة على مبدأ الانعكاس الكلي الداخلي، ومع التقدم في علم الفوتونيات ظهرت الألياف البلورية الفوتونية (Photonic Crystal Fibers(PCFs)) كجيل متطور يوفر قدرة عالية على التحكم الدقيق في خصائص الانتشار الضوئي من خلال عدد كبير من البارامترات البنيوية، خاصة التوزيع الهندسي للثقوب الهوائية والمواد الجديدة التي يمكن إضافتها، كما تتميز هذه الألياف بقدرتها العالية على تعزيز التفاعل بين المجال الكهرطيسي والوسط المحيط مما يجعلها مناسبة جداً لتطبيقات الحساسات الضوئية.

وفي هذا البحث قمنا بدراسة وتصميم وتحليل ليف بلوري فوتوني يعتمد توزيعاً حلزونياً للثقوب الهوائية في الغلاف وإضافة المواد البلازمونية (مادتي الذهب والفضة) بهدف استثمار ظاهرة الرنين البلازموني السطحي (Surface Plasmon Resonance(SPR)) ودراسة أثرها على النمط الأساسي المنتشر في الليف وذلك عند استخدامها في تطبيقات الحساسات الضوئية كما نناقش في هذا البحث المبادئ الفيزيائية الأساسية للتصميم المقترح وتأثير التوزيع الهندسي (الحلزوني) ونوع المادة البلازمونية على الخصائص الضوئية. تم في هذا البحث استخدام برنامج (Comsol Multiphysics) المعتمد على طريقة العناصر المنتهية (Finite Element Method(FEM)) وبرنامج (Matlab) لتصميم النموذج المقترح وحساب قرينة الانكسار الفعالة وخسارة الحصر.

أظهرت النتائج تحسناً ملحوظاً في قيم الحساسية للتصميم المقترح نتيجة زيادة اقتران الحقول الكهرطيسية مما يؤكد فعالية التصميم في تطبيقات الاستشعار عالي الدقة فقد وصلت الحساسية الطيفية إلى 5000 nm/RIU.

الكلمات المفتاحية: الألياف البلورية الفوتونية، التوزيع الحلزوني، المواد البلازمونية، الرنين البلازمونية السطحي، الحساسات الضوئية.

[1]مشرف بالاعمال - قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة اللاذقية- اللاذقية-سورية.

Optimization of Photonic Crystal Fiber Sensors Using Plasmonic Materials and Spiral Structures

Dr. Ralda Jaafar[1]

Abstract

Optical fiber technology has witnessed remarkable development since the emergence of conventional fibers based on the principle of total internal reflection. With the rapid advancement in photonics, photonic crystal fibers (PCFs) have emerged as an advanced generation of optical fibers that provide exceptional control over light propagation characteristics through numerous structural parameters, particularly the geometrical arrangement of air holes and the incorporation of novel materials. These fibers also exhibit a superior capability to enhance the interaction between the electromagnetic field and the surrounding medium, making them highly suitable for optical sensing applications.In this study, the design and analysis of a photonic crystal fiber incorporating a spiral distribution of air holes in the cladding and plasmonic materials (gold and silver) are investigated in order to exploit the phenomenon of surface plasmon resonance (SPR) and examine its influence on the fundamental propagation mode when employed in optical sensing applications. Furthermore, the fundamental physical principles of the proposed design, as well as the effects of the spiral geometrical distribution and the type of plasmonic material on the optical properties, are discussed.

The proposed structure was modeled using COMSOL Multiphysics based on the finite element method (Finite Element Method(FEM)), in addition to MATLAB for calculating the effective refractive index and confinement loss. The obtained results demonstrate a significant improvement in the sensitivity values of the proposed design due to the enhanced coupling of electromagnetic fields, confirming the effectiveness of the structure for high-precision sensing applications. The spectral sensitivity reached up to 5000 nm/RIU.

Keywords: Photonic crystal fibers, spiral distribution, plasmonic materials, surface plasmon resonance, optical sensors.

[1]Supervisor - Department of communication Engineering- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering- Lattakia University ,Lattakia- Syria.

1. مقدمة:

تعد الألياف البلورية الفوتونية (PCFs) الشكل المطور من الألياف الضوئية، والتي تتكون من قلب محاط بغلاف ولها نوعان أساسيان فهي إما مصمتة أو مجوفة القلب وتسمى الألياف مصمتة القلب بالألياف ذات النمط الوحيد غير المنتهي (Endlessly Single Mode) عل الرغم من وجود عدة أنماط ممكنة في هذه البنى إلا أنه يوجد نمط وحيد أساسي ينتشر فيها بشكل موجه عبر نطاق واسع من الأطوال الموجية كما أن الغلاف في (PCFs) يحوي مصفوفة من ثقوب يمكن توزيعها بأنماط دورية كالترتيب السداسي والثماني والعشاري وغيرها أو غير دورية كالنمط الحلزوني، ويسهم هذا التنوع البنيوي في إحداث تباين في قرينة الانكسار بين القلب والغلاف مما يمنح هذه الألياف قدرة استثنائية على التحكم في خصائص الانتشار الضوئي مقارنة بالألياف التقليدية[2-1].

من جهة أخرى شهدت المواد البلازمونية تطوراً كبيراً نظراً لقدرتها على دعم ظاهرة الرنين السطحي (SPR) الناتجة عن تفاعل الضوء مع الإلكترونات الحرة على سطح المعدن مثل الذهب والفضة،

وتؤدي هذه الظاهرة إلى تعزيز الحقول الكهرطيسية عند سطح المعدن مما يزيد من حساسية المستشعر الضوئي للتغيرات الدقيقة في الوسط المحيط [4-3].

تشير الدراسات الحديثة إلى أن دمج المواد البلازمونية مع (PCFs) التي تملك بنى غير دورية مثل التوزيع الحلزوني يؤدي إلى تحسن كبير في زيادة الاقتران بين النمط الأساسي والبلازموني، ومن هنا تأتي أهمية البحث الذي يهدف إلى دراسة هذا الدمج وتأثيره على الخصائص الضوئية. وقد شهدت الحساسات المعتمدة على PCF اهتماماً واسعاً نظراً لقدرتها العالية على التحكم في خصائص الانتشار الموجي وتحقيق حساسية مرتفعة للاستشعار كما ورد في العديد من الدراسات المرجعية الحديثة، ويمكن تقسيم الدراسات المرجعية إلى ثلاثة محاور:

- دراسات عن PCF يعمل كحساس ضوئي.
- دراسات عن PCF حلزوني يعمل كحساس ضوئي.
- دراسات عن PCF بلازموني يعمل كحساس ضوئي.

نبدأ أولاً بالدراسات التي توضح الألياف البلورية الفوتونية التي تعمل كحساس ضوئي.

القسم الأول : دراسات عن PCF يعمل كحساس ضوئي:

ناقش الباحثون في المرجع [5] حساساً ضوئياً يعتمد على دمج بنية sagnac ring مع PCF لقياس قرينة الانكسار، وقد اعتمد التصميم على تقليل تأثير درجة الحرارة على أداء الحساس، وأظهرت النتائج قيم حساسية جيدة واستقرار حرارياً مناسباً لتطبيقات القياس الدقيقة، بينما قدم البحث [6] تصميم حساس لقياس قرينة الانكسار يعتمد على PCF مزدوج القلب للكشف عن الخلايا السرطانية واستخدم طريقة العناصر المنتهية (FEM) لتحليل أداء الحساس ووضحت النتائج قدرة عالية على التمييز بين الخلايا السليمة والمصابة من خلال اختلاف قرائن الانكسار بالإضافة إلى إمكانية استخدامه في أنظمة الاتصالات الضوئية بسبب انخفاض قيم الخسارات وتحسين انتقال الإشارة الضوئية ضمن الليف. كما وضحت الدراسة [7] تصميم حساس يعتمد على PCF في نطاق(THz) باستخدام (FEM) وأظهرت النتائج حساسية وصلت كنسبة إلى 94.65% مع خسارة حصر منخفضة، مما جعله مناسباً لتطبيقات الاتصالات الضوئية ونقل الإشارات الطبية ضمن نطاق THz.أما في المرجع [8] قدم الباحثون تصميم حساس PCF لقياس قرائن الانكسار يعتمد على (Four Wave Mixing) داخل الليف الذي يملك الشكل D- shaped في نطاق الاشعة تحت الحمراء، وقد حقق قيم حساسية وصلت إلى 7692)

(nm/RIU وأشارت الدراسة إلى أهمية هذا النوع من الألياف في تطبيقات الاتصالات الضوئية عالية السرعة ومعالجة الإشارة الضوئية.

القسم الثاني: دراسات عن PCF حلزوني يعمل كحساس ضوئي:

على الرغم من أن معظم التصاميم التقليدية لل PCF اعتمدت التوزيع السداسي الدوري لثقوب الهوائية إلا أن السنوات الأخيرة شهدت توجهاً متزايداً نحو استخدام البنى غير الدورية مثل التصاميم الحلزونية، وقد بينت الدراسات الحديثة كما في البحث [9] الذي درس تصميم حساس للغازات السامة باستخدام PCF حلزوني في نطاق (THz)، فقد اعتمد التصميم على البنية الحلزونية لتحسين التفاعل المجال الكهرطيسي مع المادة المقاسة، وقد حقق قيم حساسية وصلت إلى (3000 nm/RIU) مع انخفاض ملحوظ في قيم خسارة الحصر، كما أوضحت الدراسة أن البنية الحلزونية تساعد على تحسين انتقال الإشارة وتقليل التشوه في أنظمة الاتصالات الضوئية وخاصة في مجال THz. بينما قدمت الدراسة [10] تصميم حساس لدرجة الحرارة يعتمد على PCF حلزوني، وأظهرت النتائج أن الحساسية الحرارية وصلت إلى (18 nm/C) مع انخفاض تأثير الضغط على الحساس مما يؤكد فعالية البنية الحلزونية في تحسين خصائص الاستشعار، بالإضافة إلى تحسين استقرار انتقال الضوء وتقليل التداخل بين الأنماط المنتشرة مما يجعلها مناسبة جدا لتطبيقات الاتصالات الضوئية الدقيقة.

القسم الثالث دراسات عن PCF بلازموني يعمل كحساس ضوئي:

أدى ادخال المواد البلازمونية في تصميم الحساسات الضوئية إلى نقلة نوعية في أداء أنظمة الاستشعار، حيث تسمح ظاهرة الرنين البلازموني السطحي بزيادة تركيز الحقول الكهرطيسية على سطح المعدن مما يعزز حساسية الكشف عن التغييرات الصغيرة في قرينة الانكسار، وتعد مادتا الذهب والفضة أكثر المواد استخداماً في هذا المجال نظرا لخصائصهما الضوئية ضمن المجال الطيف المرئي والتحت الحمراء القريبة. ناقشت الدراسة [11] تصميم حساس بلازموني يعتمد على PCF على الشكل D-Shaped مع طبقة من مادة (TIO_2) وطبقة من مادة الذهب لتحفيز ظاهرة SPR ،وقد حقق الحساس قيم حساسة عالية لقياس قرينة الانكسار مع تحسين الاقتران بين النمط الأساسي والبلازموني .بينما قدمت الدراسة [12] تصميم حساس يعتمد أيضاً على ظاهرة SPR وقد استخدم مادة الذهب كطلاء لأحدى ثقوب الغلاف، وأظهر قدرة كبيرة على قياس مدى واسع من قرائن الانكسار تراوحت بين (1.4-1.35) مما يجعله مناسباً لتطبيقات الحساسات الحيوية والكيميائية، كما ناقش البحث [13] تصميم حساس

ضوئي بلازموني يعتمد على PCF على الشكل H− shaped مع دراسة طبقة من مادة $(Ag - MoS_2)$ لتحسين الحساسية ومنع الاكسدة، واستخدم هذا التصميم كحساس وكمرشح استقطاب ضمن مدى واسع لقرائن الانكسار. أما الدراسة [14] وضحت تصميم حساس PCF−SPR وقد استخدم مادة الفضة كمادة بلازمونية لتحسين الرنين البلازموني السطحي، وقد وصلت قيمة الحساسية إلى 1500nm/RIU وأوضحت الدراسة إلى أن مادة الفضة قد ساعدت على تحسين خصائص نقل الإشارة في نطاق Near−IR المستخدم في الاتصالات الضوئية. كما قدمت الدراسة [15] تصميم مقسم استقطاب يعتمد على طلاء طبقة من مادة الفضة داخل ليف مزدوج القلب، وأظهرت النتائج إلى أن استخدام الفضة أدى إلى توسيع عرض الحزمة لتصل إلى 900nm ضمن مجالات الاتصالات الضوئية (E+S+C+L+U) ،كما ساهمت إضافة طبقة الفضة إلى تعزيز التأثير البلازموني وتحسين كفاءة نقل الإشارة الضوئية، وأخيراً قدمت الدراسة [16] تصميم حساس مزدوج القلب يعتمد على PCF−SPR مع إضافة طبقة الفضة لتحفيز الرنين البلازموني السطحي، وقد استخدمت الدراسة الطريقة الرياضية (FEM) وأظهرت النتائج إمكانية استخدام هذه الحساسات في شبكات الاتصالات الضوئية عالية الدقة.

2. هدف البحث:

على الرغم من التقدم الكبير في مجال الحساسات الضوئية المعتمدة على PCF والبنى البلازمونية، إلا أن معظم الدراسات ركزت بصورة أساسية على التوزيعات الدورية للثقوب الهوائية داخل الليف، في حين لا تزال الأبحاث المتعلقة بالبنى الحلزونية محدودة نسبياً ولاسيما عند دمجها مع المواد البلازمونية ضمن بنية واحدة لذلك يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير التوزيع الحلزوني في تحسين عملية الاقتران بين النمطين الأساسي والبلازموني وانعكاس ذلك على تعزيز قيم الحساسية للحساسات الضوئية ورفع كفاءتها في تطبيقات الاستشعار الضوئي عالي الدقة.

3. مواد وطرائق البحث:

تم الاعتماد في هذا البحث على الأسس النظرية والرياضية التي تصف الليف الضوئي الفوتوني البلازموني الحلزوني، بالإضافة إلى استخدام برنامج (COMSOL Multiphysics) الذي يعتمد طريقة ((Finite Element Method(FEM) في الحل والتي تعتمد على مكتبة (MODULEF)، وذلك لتمثيل الليف وتحديد قيم المعاملات الأساسية له وبارامتراته، والحصول على الأطوال الموجية الموافقة للرنين البلازموني السطحي ، ثم استخدام برنامج (Matlab) للحصول على منحنيات خسارة الحصر،

وأخيراً مناقشة نتائج الدارسة وصياغة الاستنتاجات. سنبدأ أولاً بدراسة المواد البلازمونية وتوضيح أهم خصائصها.

4. المواد البلازمونية وخصائصها:

إن المواد البلازمونية (Plasmonic Materials)هي مواد قادرة على التفاعل مع الضوء عبر اهتزاز إلكتروناتها الحرة، ولها تأثير كبير على الطول الموجي المنتشر سواء في الألياف الضوئية أو غيرها، وخاصة من ناحية الامتصاص وبالتالي التخميد، وتتميز المواد البلازمونية بامتلاكها ثابت عازلية نسبية سالب عند أطوال موجية معينة وأهم هذه المواد هي المعادن التي تلعب دوراً هاماً في مختلف المجالات، حيث يمكن استخدمها كمواد بلازمونية عند ورود الضوء عليها بشروط معينة أهمها تردد الضوء الوارد، وأحد أهم الأمثلة على المواد البلازمونية المعدنية الفضة والذهب، وهما يملكان ثابت عازلية كهربائية حقيقي سالب وفي هذه الدراسة استخدمنا مادتي الذهب والفضة للأسباب الموضحة بالجدول (1) [17–20].

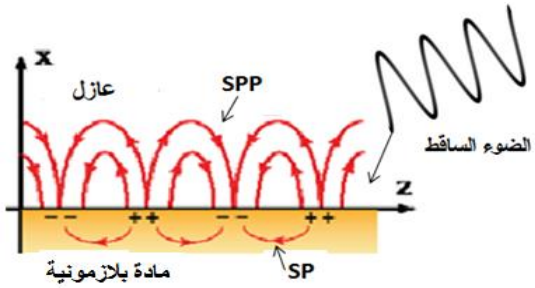
الجدول (1) مقارنة بين مادتي الذهب والفضة

الخاصية	مادة الذهب (Au)	مادة الفضة (Ag)	التحليل العلمي والتطبيقات
الاستجابة البلازمونية	مستقرة وفعالة في المجال المرئي وتحت الحمراء القريبة	استجابة أقوى وخسائر ضوئية أقل	الفضة تعطي حساسة أعلى بينما يكون الذهب أكثر استقراراً
الحساسية الضوئية	حساسية يمكن اعتبارها جيدة خاصة بالنسبة للحساسات الكيميائية والحيوية	حساسية أعلى بسبب انخفاض الخسارة الضوئية	تعد الفضة مناسبة للكشف عالي الدقة في التغيرات الصغيرة لقرينة الانكسار
الخسائر الضوئية	خسارة أعلى	خسارة أقل وانتقال أفضل للموجات السطحية	الفضة أفضل وخاصة بالنسبة للتطبيقات التي تعتمد على ظاهرة (SPR)

الثبات الكيميائي	مقاومة ممتازة للتأكسد والتآكل	يتأكسد سريعاً	الذهب أفضل للتطبيقات طويلة الأمد او البيئة الكيميائية القاسية
التكلفة	أعلى	أقل	تعد الفضة خيار اقتصادي عند الحاجة الى حساسية مرتفعة
التطبيقات	الحساسات الحيوية والطبية والاستشعار طويل الأمد	الحساسات فائقة الحساسية والاستشعار الدقيق	اختيار المادة يعتمد على التوازن بين الحساسية والاستقرار.

بالإضافة إلى أن كل من الذهب والفضة يظهران سلوكاً ضوئياً مميزاً في المجال المرئي وتحت الحمراء القريب نتيجة تفاعلات الالكترونات الحرة مع الضوء، حيث يتميز الذهب بامتصاص قوي في الجزء الأزرق من الطيف المرئي نتيجة انتقال الالكترونات الداخلية مما يمنحه اللون الذهبي المميز بينما يتحول الى مادة شديدة الانعكاسية في نطاق تحت الحمراء القريب، أما الفضة فتعد أكثر المعادن انعكاساً للضوء عبر الطيف المرئي وتحت الحمراء القريب إذ تعكس معظم الاطوال الموجية بكفاءة عالية مع امتصاص منخفض جداً، ويعود هذا السلوك في كلا المعدنين إلى استجابتهما الإلكترونية الموصوفة بنموذج الإلكترونات الحرة مع اختلاف موقع الانتقالات للنطاقات الإلكترونية بينمها وهذا ما يفسر الفروق في اللون والانعكاسية والخسائر الضوئية. يمكن استخدام مواد بلازمونية أخرى مثل أكسيدات الناقلة الشفافة وأنصاف النواقل عند المجال الطيفي المرئي، مثل aluminum zinc oxide (AZO) و Germanium zinc oxide (GZO) وأكسيد النيتردات وأكسيدات الزنك تملكان خسارة منخفضة في مجال الأطوال المرئية وأيضاً indium tin oxide (ITO) aluminum doped zinc oxide (AZO) وتعد هذه المواد فعالة ولها خسارة أقل من المعادن في مجال الأطوال الموجية الضوئية إلا أنها لا تملك ثابت عازلية حقيقي كبير القيمة مقارنة بالمعادن[24-21] . تسهم بلازمونات السطح (Surface Plasmon) التي يمكن تصنيفها إلى نوعين الأول هو بلازمونات السطح (SP) الذي ينتشر في المادة البلازمونية، والثاني بوليريتونات بلازمونات السطح (Surface Plasmon

((Polariton (SPP الذي ينتشر في الوسط العازل كما هو موضح بالشكل (1) [25]، وهذه المواد تقوم بتحسين الخواص الضوئية للأنماط المنتشرة في الليف البلوري الفوتوني بشكل كبير نظراً لما تتمتع به من ميزات متعددة مثل العازلية السالبة الناتجة عن الإلكترونات الحرة، وإمكانية التحكم في الخصائص الضوئية وكذلك القدرة على حصر الأنماط البلازمونية في أبعاد أصغر من الطول الموجي، وقد أدى هذا إلى ظهور تطبيقات متطورة مثل مرشحات الاستقطاب والعدسات فائقة الدقة والحساسات الضوئية وغيرها.



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

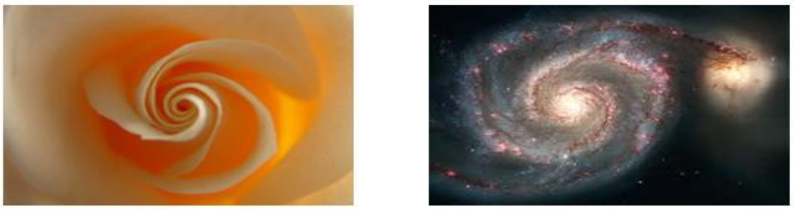
ويمكن إضافة هذه المواد إما على شكل طبقات رقيقة تحيط بالثقوب الهوائية، أو ثقوب نانوية المساحة موزعة في الليف. واضافة هذه المواد إلى (PCF) يساهم بشكل كبير في تعزيز الحقول الكهرطيسية وزيادة اقتران النمط

الأساسي بالأنماط البلازمونية، مما يؤدي إلى تحسن كبير في بارامتر الحساسية للمستشعرات الضوئية. تعد ظاهرة الرنين البلازموني السطحي(SPR) أهم خاصية للمواد البلازمونية والتي تحدث عند تطابق تردد الضوء الوارد مع التردد الطبيعي لاهتزاز الالكترونات الحرة على سطح المعدن، وهذا الاهتزاز يسمى رنيناً لأنه يحدث بقوة عند تردد محدد للضوء على سطح المعدن، وعندها تنتقل الطاقة من النمط الأساسي إلى موجة البلازمون السطحي وبالتالي حدوث الرنين الذي يظهر على شكل قمة امتصاص حادة في الطيف ويحدث خسارة حصر كبيرة في الليف عند طول موجة محدد وعندها يظهر انخفاض واضح في شدة الإشارة الخارجة وينتج عندها الموجة البلازمونية التي يمكن ملاحظتها في الطيف المرئي وتحت الحمراء القريبة. وهي ظاهرة مهمة لأنها تتيح لنا كشفاً دقيقاً وتحكماً عالياً في الضوء على المستوى النانوي، كما تساعد في تحسين أداء الأجهزة الضوئية مثل العدسات والمرشحات، وأيضاً ويمكن

استخدامها في الاتصالات الضوئية وتقنيات النانو، كما تمتاز بدقة عالية جداً في قياس التغيرات الصغيرة في البيئة المحيطة مما يجعلها مناسبة جداً لتطبيقات الحساسات الضوئية [28–24].

5. البنية الحلزونية

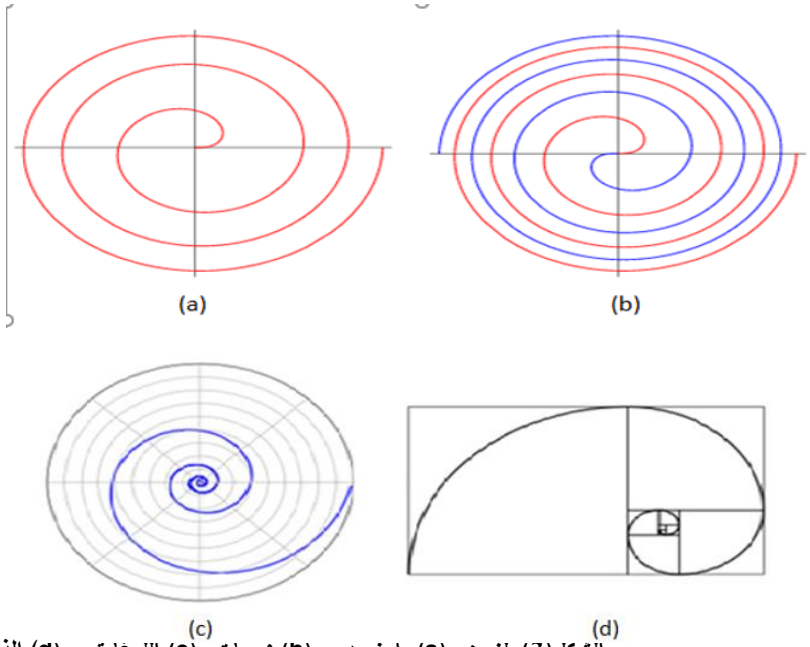
إن الحلزونات هي منحنيات هندسية تلتف حول نفسها بشكل دائري أو لولبي وتكرر نفسها (self–similar) أي أن شكل الحلزون هو تكرار لشكل أحد أجزاءه، وحجم الحلزون يزداد دون تغير شكله مع كل لفة متعاقبة. وكان أول من حدد حلزوناً معيناً هو أرخميدس.



(a) (b)

الشكل (2) الحلزونات (a) في الزهور،(b) في المجرات

تختلف الحلزونات بحسب طريقة الالتفاف حول المحور مثل الحلزونات اللوغارتمية، والمستوية والمخروطية، وتظهر في الطبيعة كما في الشكل (2) بعدة أشكال، وتمثل القوقعة بإمتياز هذا النوع من الحلزونات فهي تتميز بازدياد مستمر في سعتها وفق معامل ثابت، وتظهر الحلزونات اللوغارتمية أيضًا في إنحناء أنياب الفيل وفي قرون الكبش البري وفي مخالب عصفور الكناري، وتوجد مماثِلات لهذه الحلزونات في أنواع كثيرة من النباتات، مثل الأناناس والصنوبريات وأوراق الأشجار وغيرها، ومن أنواع الحلزون اللوغارتمي الحلزون الذهبي(Golden Spiral) الذي يحقق النسبة الذهبية (1.62) ويوضح الشكل(3) أنواع للحلزونات[29].



الشكل(3)حلزون :(a) ارخميدس،(b) فيرمات ،(c) اللوغارتمي،(d) الذهبي

أما بالنسبة للتوزيع الهندسي للثقوب في هذا البحث فقد استخدمنا التوزيع بحسب حلزون ارخميدس.

برزت في السنوات الأخيرة تصاميم غير دورية مثل التوزيعات الحلزونية كبدائل للتوزيعات الدورية، ووجد بحسب الدراسات أن الترتيب الهندسي لهذه البنى غير الدورية يؤدي إلى تحسين تفاعل الضوء مع الليف الضوئي وتغيير الأنماط الضوئية المنتشرة في القلب مقارنة بالتوزيع الدوري.

وهكذا بسبب انتشار الحلزونات بأنواعها المختلفة في الطبيعة بشكل كبير والخواص المميزة لهذه المنحنيات، استخدم العلماء هذه المنحنيات في الألياف البلورية الفوتونية وبالتحديد في ترتيب ثقوب الهواء بشكل حلزوني، ووجدوا العديد من الخواص الجديدة بالإضافة إلى تحسين كبير في الخواص الضوئية للألياف البلورية الفوتونية، بسبب تشكل مسار متعرج للضوء مما يمنح البنية خصائص وسطية ما بين النظام الدوري وغير الدوري وهذا النوع من التوزيع يؤدي إلى:

1. تقليل التماثل الهندسي وزيادة في درجات الحرية للبارامترات التصميمة.
2. تحسين حصر الضوء في القلب.
3. تعزيز الحساسية للتغيرات البسيطة في الوسط المحيط.

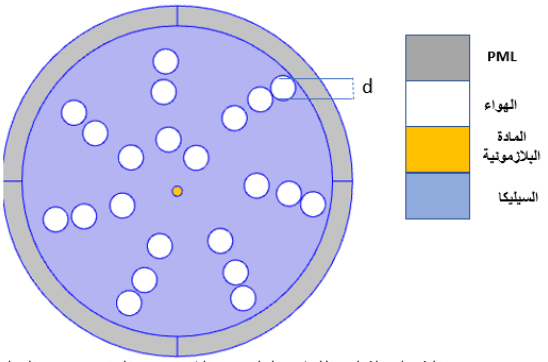
وبالتالي يمكن التحكم في توزيع الطاقة الضوئية وانتشار الموجة في الليف. حيث تعد هذه الخصائص مثالية لتطبيقات الحساسات الضوئية وأي تغير طفيف في قرائن الانكسار ينعكس بشكل واضح على الطيف الناتج[31-29] .

6. الألياف البلورية الفوتونية البلازمونية الحلزونية:

تتكون البنية المدروسة والموضحة بالشكل (4) من قلب مصمت وغلاف، يتكون من مادة أساس هي السليكيا والتي تملك تشتت مادي ممثل بمعادلة سليميه (Sellmeier's Equation)الموضحة في المرجع [32] وبثابت عازلية مساو ل ($\varepsilon_d = 2.09$) وتوزيع الثقوب بترتيب حلزوني بقطر ($d = 0.25\mu m$) له وتملك ثقوب الهواء ثابت عازلية مساو ل ($\varepsilon_a = 1$)، وتم تصميم البنية وإضافة المواد البلازمونية على شكل ثقب دائري في مركز الليف بقطر مساو (30nm) باستخدام برنامج (COMSOL Multiphysics) الذي يعتمد طريقة (FEM) في الحسابات الرياضية علماً أن البرنامج يعتمد على حل معادلة الموجة بالاعتماد على معادلات ماكسويل الموضحة في المرجع [33]. قمنا في هذا البحث بدراسة وتصميم ليف بلوري فوتوني يتم فيه توزيع الثقوب بشكل حلزوني وإضافة مادة بلازمونية وأثر تغيير نوع هذه المادة البلازمونية بين الذهب والفضة على خسارة الحصر (Confinement Loss (CL)) التي تعطى بالمعادلة(1) [34]:

$$CL = 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda} Im(neff) \quad (\frac{\mathrm{dB}}{\mathrm{Km}}) \qquad (1)$$

حيث ($Im(neff)$) القسم التخيلي لقرينة الانكسار الفعالة علماً أن الدراسة أجريت في مجال الأطوال الموجية ($0.6\mu m \leq \lambda \leq 2\mu m$) والتي تشمل النوافذ الضوئية الأساسية الثلاث. (λ) هي طول الموجة،



الشكل (4): الليف البلوري الفوتوني البلازموني الحلزوني

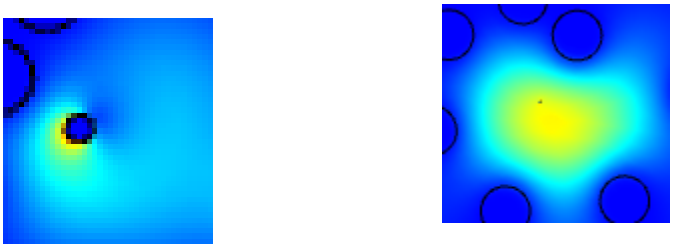
يمكن الحصول على ثابت العازلية الفعال للمادة البلازمونية من نموذج درود (Drude Model) [35] الممثل بالمعادلة(2) :

$$\varepsilon_m = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_D^2}{\omega(\omega + j\gamma_D)} - \frac{\Delta\varepsilon.\Omega_L^2}{(\omega^2 - \Omega_L^2) - j\Gamma_L^\omega} \quad (2)$$

حيث (ε_∞) هو ثابت العازلية، $(\Delta\varepsilon)$ عامل الوزن، (ω) التردد الزاوي للضوء الموجه، (ω_D) تردد البلازما، (γ_D) تردد التخامد، (Ω_L) تردد هزاز لورنتز، (Γ_L) العرض الطيفي لهزاز لورنتز.

7. النتائج والمناقشة:

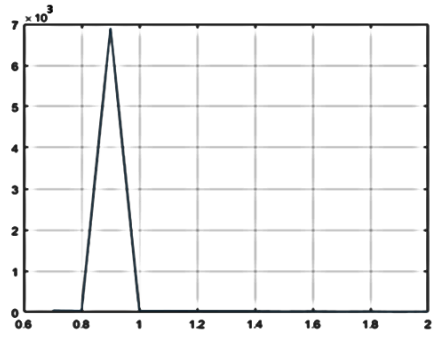
أظهرت نتائج المحاكاة حدوث اقتران فعال بين النمط الأساسي والبلازموني، ويوضح الشكل (5) توزع الحقل الكهرطيسي للنمطين الأساسي وهو النمط الوحيد المنتشر في الألياف وحيدة النمط ويرمز له بالرمز (HE11) والنمط البلازموني باستخدام برنامج (Comsol Multiphysics).

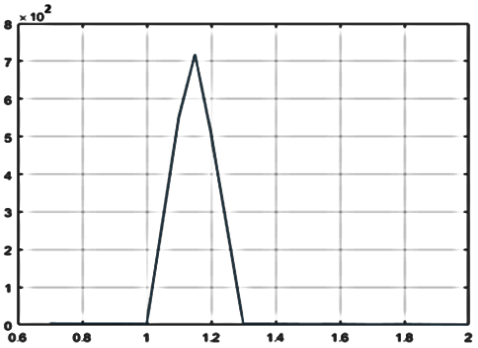


(a) (b)

الشكل (5) توزع الحقل الكهرطيسي: (a) النمط الأساسي (b) النمط البلازموني.

نلاحظ أنه يحدث الاقتران بين النمط البلازموني والنمط الأساسي كلما كانت الثقوب أقرب إلى النواة، وعندها تنتقل الطاقة من القلب إلى المادة البلازمونية لتتحول إلى أمواج بلازمونية وفيما يلي نتائج منحنيات خسارة الحصر لليف المدروس عند تغيير نوع المادة البلازمونية.





CL(dB/m)

CL(dB/m)

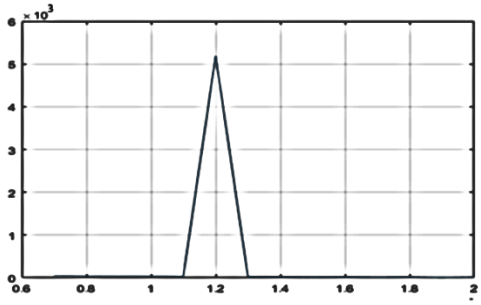
Wavelength (μm)
(b)

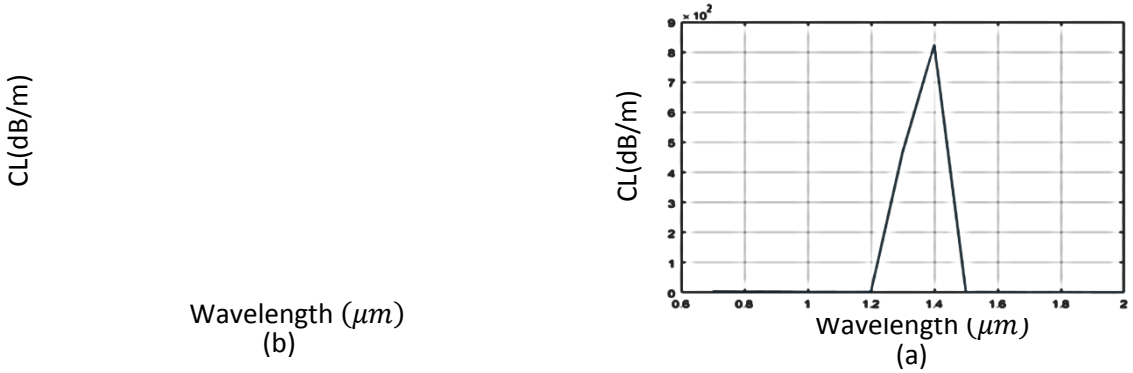
Wavelength (μm)
(a)

الشكل (6): منحنيات خسارة الحصر لمادة (a) الفضة، (b) الذهب.

من منحنيات خسارة الحصر لمادتي الفضة والذهب نلاحظ أن ذروة منحني الخسارة وصلت إلى$* 6.84 = CL$ $10^3 dB/m$ عند الطول الموجي $\lambda = 0.89\mu m$ لمادة الذهب، أما في مادة الفضة فقد وصلت ذروة الخسارة إلى $CL = 7.26 * 10^2 dB/m$ عند الطول الموجي $\lambda = 1.18\mu m$.

من أجل إثبات أن الليف يعمل كحساس ضوئي يجب إضافة مادة حساسة(analyte) وقياس مدى تغير ذروة الرنين، وفي هذا البحث سندخل أولا مادة لها قرينة انكسار مساوية ل 1.33 ثم حساب خسارة الحصر مرة أخرى.





الشكل (7): منحنيات خسارة الحصر بعد إضافة المادة الحساسة من اجل مادة (a) الفضة ، (b) الذهب.

نلاحظ اختلاف قيم خسارة الحصر بعد إضافة المادة الحساسة ذات قرينة الانكسار n=1.33 حيث وصلت ذروة الرنين لمادة الفضة إلى $CL = 8.32 * 10^2 dB/m$ عند الطول الموجي $\lambda = 1.36\mu m$، بينما كانت قيمة خسارة الحصر لمادة الذهب $CL = 5.18 * 10^3 dB/m$ عند الطول الموجي $\lambda = 1.17\mu m$،كما نلاحظ تغير مواقع أطوال أمواج الرنين وقيم الخسارة وهذا يدل على استجابة الحساس لتغير قرينة الانكسار.

وعند ادخال مواد حساسة ذات قرائن انكسار مختلفة لوحظ تغير واضح في مواقع أطوال موجات الرنين مما يؤكد استجابة الحساس للتغيرات في الوسط المحيط ويمكن تلخيص النتائج بالجداول التالية:

أولاً مادة الفضة: الجدول (2)

قرائن انكسار المادة الحساسة	طول موجة الرنين
1.33	$1.36\mu m$
1.34	$1.41\mu m$
1.35	$1.45\mu m$
1.36	$1.5\mu m$
1.37	$1.55\mu m$

ثانياً الذهب: الجدول (3)

قرائن انكسار المادة الحساسة	طول موجة الرنين
1.33	$1.17\mu m$

$1.2\mu m$	1.34
$1.24\mu m$	1.35
$1.27\mu m$	1.36
$1.3\mu m$	1.37

إن أي انزياح في طول موجة الرنين عند تغير قرينة انكسار الوسط المحيط هو الاساس الذي تبنى عليه مبدأ الحساسية، حيث يتم رصد التغير في طول موجة الرنين الناتج عند تغير طفيف لقرينة الانكسار، حيث يقاس أداء معامل الحساسية والدقة للحساس بقدرته على اظهار انزياح كبير مقابل أي تغير طفيف في قرينة الانكسار. وقد تم حساب الحساسية والتي تعطى بالقانون[36]

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}\left(\frac{nm}{RIU}\right) \qquad (3)$$

بالتالي يمكن تلخيص النتائج السابقة بالجداول التالية:

أولاً مادة الفضة: الجدول (4)

قرائن انكسار المادة الحساسة	طول موجة الرنين (nm)	$\Delta\lambda(nm)$	$\Delta n(RIU)$	$S\left(\frac{nm}{RIU}\right)$
1.33	1360	–	–	–
1.34	1410	50	0.01	5000
1.35	1450	40	0.01	4000
1.36	1500	50	0.01	5000
1.37	1550	50	0.01	5000

ثانياً مادة الذهب: الجدول(5)

قرائن انكسار المادة الحساسة	طول موجة الرنين (nm)	$\Delta\lambda$	Δn	$S\left(\frac{nm}{RIU}\right)$
1.33	1170	–	–	–
1.34	1200	30	0.01	3000
1.35	1240	40	0.01	4000
1.36	1270	30	0.01	3000

1.37	1300	30	0.01	3000

ونلاحظ من النتائج السابقة أن التصميم المقترح الذي يعتمد توزيع الثقوب بشكل حلزوني يؤدي تعزيز شدة الاقتران بين النمط الأساسي والنمط البلازموني السطحي، وكنتيجة يصبح الانزياح الطيفي أكثر وضوحاً واستجابة للتغيرات البسيطة في قرينة الانكسار مما يحسن الحساسية، بالإضافة إلى أن اختيار نوع المعدن مهم جداً ويؤثر مباشرة على مقدار الانزياح، فالفضة وبسبب خسائرها الداخلية المنخفضة نسبياً تعطي رنين أكثر حدة وانزياح أكبر أما الذهب يوفر استقرار كيميائي عالي مما يجعله أكثر ملائمة للتطبيقات طويلة الأمد، وبالتالي فإن تصميم ليف بلوري فوتوني والتحكم في البنية الهندسية لليف (قطر الثقوب وعددها وترتيبها وشكلها) وسماكة الطبقة البلازمونية ونوع المعدن المستخدم يسمح بتصميم حساس ضوئي عالي الأداء قادر على الكشف على التغيرات الطفيفة في قرينة الانكسار.

8. الاستنتاجات:

يمكن تلخيص النتائج الى مجموعة من النقاط التالية:

- يحقق التصميم المقترح لليف البلوري الفوتوني الحلزوني اقتراناً فعالاً بين النمط الأساسي والنمط البلازموني مما يؤدي إلى تعزيز ظاهرة الرنين السطحي.
- يسهم التوزيع الحلزوني في زيادة مساحة التفاعل بين الضوء والطبقة البلازمونية مقارنة بالبنى الدورية بينما تساهم المواد البلازمونية في تعزيز دقة الاستشعار وبالتالي الجمع بين التوزيع الحلزوني والمواد البلازمونية نحصل على:

☒ زيادة الحساسية للحساسات الضوئية بالمقارنة مع التصاميم الدورية التقليدية

☒ توسيع مجال التطبيقات العملية في الاستشعار عالي الدقة مما ينعكس إيجاباً على حساسية المستشعر.

- يؤثر نوع المادة البلازمونية ومساحتها يؤثر بشكل كبير على خصائص الرنين البلازموني حيث أظهرت الفضة قمماً أكثر حدة وانزياحاً طيفياً أكبر وقيم حساسية أعلى نتيجة انخفاض خسائرها الداخلية في حين أظهر الذهب استقرار كيميائياً أعلى مما يجعله مناسبا للتطبيقات طويلة الأمد.

- كما أن موقع المواد البلازمونية يؤثر أيضاً على نمط البلازمون فعندما تكون المواد أقرب إلى القلب يؤدي هذا إلى انتقال الطاقة من النمط الأساسي إلى الطبقة البلازمونية بشكل أفضل وظهور قمم واضحة في منحنيات خسارة الحصر.
- أظهر الحساس استجابة واضحة للتغيرات في قرينة الانكسار للوسط المحيط مما يؤكد امكانية استخدامه في تطبيقات الاستشعار عالي الدقة.
- يحقق التصميم المقترح قيماً مرتفعة للحساسية مما يجعله مناسباً لتطبيقات القياس عالي الدقة في المجالات البيئية والحيوية.

9. الخاتمة:

تقدم هذه الدراسة نموذجاً متقدماً لليف البلوري الفوتوني البلازموني الذي يعتمد التوزيع الحلزوني للثقوب الهوائية، وقد أظهرت النتائج أن هذا الدمج يحقق تحسناً ملحوظاً في خصاص الاستشعار الضوئي، ويعود ذلك إلى المرونة الهندسية للبينة الحلزونية وتعزيز الحقول الكهرطيسية الناتج عن الرنين البلازموني السطحي، وتشير النتائج التي وصلت فيها الحساسية إلى قيم مرتفعة (حتى $5000\ nm/RIU$) إلى أن هذا النوع من البنى يمثل اتجاهاً واعداً في تطوير الحساسات الضوئية عالية الحساسية والدقة، مع إمكانية توسيع نطاق التطبيقات لتشمل مجالات متعددة من الاستشعار الحيوي والبيئي والتقنيات النانوية، كما تفتح هذه الدراسة المجال امام أبحاث مستقبلية تركز على تحسين التصميم البنيوي واستخدام مواد بلازمونية أخرى وأيضاً دراسة الأنماط الأعلى النقية TE و TM والأنماط الهجينة الأخرى لتحقيق أداء أفضل.

10. المراجع:

[1] D Suslov, D Komanec,. ***Exact modeling of photonic crystal fibers for determination of fundamental properties.***Optical Fiber Technology,Czech Republic .2020.

[2] I Yakasai, K Abas,E Suhaimi, H Begum.***Low loss and highly birefringent photonic crystal fiber for terahertz applications.*** Optik. Brunei Darussalam.2020.

[3]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.

[4]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.

[5] L Zhiying, L Hao, Z Zhiwen. ***Sagnac ring and photonic crystal fiber structure refractive index sensor with high birefringence and low temperature sensitivity*** Frontiers in Physics. China.2022.

[6] A Ehyaee, M Mohammadi, M Seifouri , S Olyaee .***Design and numerical investigation of a dual-core photonic crystal fiber refractive index sensor for cancer cells detection***.Springer The European Physical Journal Plus. IRAN. 2023

[7] M Hossain , R Hossen , S Tasmia Alvi , S Sen , M Al-Amin , M Hossain. ***Design and numerical analysis of a novel photonic crystal fiber based chemicals sensor in the THz regime.*** ScienceDirect. Bangladesh 2023.

[8] Y GAO, X YAN, X CHEN, LI Bin, T CHENG .***A Refractive Index Sensor Based on Four-Wave Mixing in D-Shaped Tellurite Photonic Crystal Fiber*** PHOTONIC SENSORS. China. 2023.

[9] V Sharif, H Saberi,H Pakarzadeh. ***Designing a terahertz optical sensor based on helically twisted photonic crystal fiber for toxic gas sensing*** scientific reports. Spain. 2025.

[10] S Qiu, J Yuan ,S Duan, X Zhou, C Mei, Qu Yuwei, B Yan, ***High sensitivity temperature sensor based on a helically twisted photonic crystal fiber*** ScienceDirect. China 2021.

[11] Q Zhang, Li Wei ,Q Ren, J Zheng.A ***D-type dual side-polished,highly sensitive, plasma refractive index sensor based on photonic crystal fiber*** .Optics and Photonics, section of the journal Frontiers in Physics China 2022.

[12] S Jain , K Choudhary , S Kumar · ***Photonic crystal fiber-based SPR sensor for broad range of refractive index sensing applications***. Optical Fiber Technology. India 2022.

[13] S Zhang , Y Wang · ***A PCF-SPR sensor for dual-polarization and wide refractive index detection range*** .Optics Communications. China 2024.

[14] T Hajiani , H Shirkani , Z Sadeghi. ***Surface plasmon resonance photonic crystal fiber biosensor: Utilizing silver-phosphorene nanoribbons for Near-IR detection***. Optics Communications .Iran. 2024.

[15]H Zou, J Zhou, A Jiang, L Wei, Yan Lu. ***Ultra-broadband small-size dual-core photonic crystal fiber polarization splitter based on silver coating***. Optics Communications. China. 2024.

[16] F Wang, Y Wei, Y Han. **High-Sensitivity Refractive Index Sensor with Dual-Channel Based on Surface Plasmon Resonance Photonic Crystal Fiber**. MDPI, China 2024.

[17] J Divya , S Selvendran . ***Performance Evalution of D shape phoronic crystal fiber based spr sensor with different plasmonic material : A comparative analysis.*** Result in Engeneering. India. 2025.

[18] S JIAO ,Z GAO .**Analysis of a photonic crystal fiber SPR sensor based on dual polarization direction and two different metal layers**. Optical Materials Express. China. 2025.

[19] A Ramola , A Kumar Shakya, Vi Kumar ,A Bergman. **Recent Advances in Photonic Crystal Fiber-Based SPR Biosensors: Design Strategies, Plasmonic Materials, and Applications** MDPI, India; 2025.

[20] 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.

[21[A PAUL, A Krishno SARKAR, A KHALEQUE,' ***Dual-Core Photonic Crystal Fiber Plasmonic Refractive Index Sensor: A Numerical Analysis', PHOTONIC SENSORS***, Bangladesh ,2018

[22] Q.M. Kamrunnahar, J Robaiat Mou, M Momtaj, ' ***Dual-Core Gold Coated Photonic Crystal Fiber Plasmonic Sensor: Design and Analysis'***, *Physics* 2020.

[23] M Kim, S Kim,***' Epsilon-near-zero photonic crystal fibers for a large mode separation of orbital angular momentum modes'***, Elsevier , South Korea,2020.

[24] M Kim ,S Kim,' ***High efficiency dielectric photonic crystal fiber metalens'***, Advanced Photonics Research Institute, GIST, Republic of Korea.,2020.

[25] R Kashyap, U Baruah, A Gogoi ,B Mondal. ***'Sensitivity-Enhanced Surface Plasmon Resonance Sensor Based on Zinc Oxide and Blue P-MoS_2 Heterostructure*** '.Springer Nature. India. 2023.

[26] M Nazmus Sakiba, M Biplob Hossainb, K Al-tabatabaiec,' ***High performance dual core D-shape PCF-SPR sensor modeling employing gold coat'***, Elsevier, Bangladesh. 2019.

[27] 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.

[28] 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.*

[29] M NSDF. ***Golden,√2, and π Flowers: A Spiral Story***. Mathematical Magazine.2022.

[30] A KNORR,S RDFG. ***ARCHIMEDEASN DT HE SPIRALS: THE HEURISTIC BACKGROUND.*** Elsevier.1978.

[31] M LAETEEF, Q MASD (2023). ***Polarization-insensitive Archimedes'-spiral-shaped ultrathin metamaterial absorbers for microwave sensing application*** .Scientific Reports.2023.

[32] B NHGD.***To the use of Sellmeier formula.*** enior Experten Service (SES) Bonn and HfT Leipzig. 2024.

[33] S Vujević, ***' A New Look to the Maxwell's Equations and Wave Equations in Conducting Media'.***IEEE. Croatia.2024

[34] A RAZZAK . ***Tailoring Dispersion and Confinement Losses of Photonic Crystal Fibers Using Hybrid Cladding***. Journal of Lightwave Technology. 2008.

[35] G KHEIANDER, M NASD . ***"Modified Drude model for small gold nanoparticles surface plasmon resonance based on the role of classical confinement"***, Scientific Reports .2020.

[36] J Wang, X Lu, Mi Chao, Yin Qianqian.***' Ultra-high sensitivity photonic crystal fiber sensor based on dispersion turning point***

sensitization of surface plasmonic polariton modes for low RI liquid detection'. Optics Express .China 2024.