

Investigation of Joint Photonic-Electromagnetic resonances between Optical Fibres and Superconducting Circuits to Enhance Quantum Communication

Intisar Muhammad Omar Al-Dabaa*

Department of Physics, Faculty of Science, Gharyan University, Al-Asaba, Libya

تحقيق رنينات ضوئية-كهرومغناطيسية مشتركة بين الألياف الضوئية والدوائر فائقة التوصيل لتعزيز الاتصال الكومومي

إنتصار إسماعيل عمر الضبع*

قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة غريان، الأصابع، ليبيا

*Corresponding author: amomer42@gmail.com

Received: August 17, 2025

Accepted: November 15, 2025

Published: November 30, 2025

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract:

Quantum communication networks necessitate effective interfaces between superconducting circuits operating in the microwave regime and optical fibers, thereby facilitating the transmission of optical signals over long distances, this research paper proposes a novel scheme for achieving hybrid , opto-electromagnetic resonances through the use of nanomechanical resonators and electro-optic converters to bridge the frequency gap between microwave and optical frequencies. We present a theory for the coherent conversion of quantum signals, aimed at achieving high precision and low loss. The proposed system integrates superconducting qubits with optical fibers, building upon recent advancements in microwave-to-optical conversion. Simulation results indicate that under optimal conditions, conversion efficiencies of up to 85% can be attained, leading to scalable quantum networks. This work addresses critical issues in quantum communication, such as signal loss and degradation, and showcases practical applications for regional quantum networks.

Keywords: Quantum Communication, Superconducting Circuits, Optical Fibers, Opto-Electromagnetic Resonances, Nanomechanical Resonators.

الملخص:

تتطلب شبكات الاتصالات الكومومية واجهات فعالة بين الدوائر فائقة التوصيل العاملة في نطاق الموجات الميكروية والألياف الضوئية، مما يُسهّل نقل الإشارة الضوئية لمسافات طويلة. تقترح هذه الورقة البحثية مخططاً جديداً لتحقيق رنينات ضوئية-كهرومغناطيسية هجينة باستخدام رنانات نانوميكانكية ومحولات كهروضوئية لسد الفجوة الترددية بين ترددات الموجات الميكروية والبصرية. نطرح نظرية للتحويل المتماسك للإشارات الكومومية، لتحقيق دقة عالية وخسارة منخفضة. يجمع النظام المقترح في هذه الورقة بين استخدام كيوبتات فائقة التوصيل والألياف الضوئية، استناداً إلى التطورات الحديثة في تحويل الموجات الميكروية-البصرية. تُظهر نتائج المحاكاة أنه في ظل الظروف المثالية، يُمكن تحقيق كفاءة تحويل تصل إلى 85%، مما يؤدي إلى شبكات كومومية قابلة للتوسع. يناقش هذا العمل القضايا المهمة في الاتصالات الكومومية، مثل فقدان الإشارات وتدهورها، ويعرض التطبيقات العملية لشبكات الكم الإقليمية.

الكلمات المفتاحية: الاتصالات الكومومية، الدوائر الفائقة التوصيل، الألياف البصرية، الرنينات الضوئية الكهرومغناطيسية، الرنينات النانوميكانكية.

المقدمة:

تُعد دراسة جوانب تفاعل جسم الإنسان مع المجال المغناطيسي للأرض ذات أهمية بالغة للعلوم الأساسية الحديثة لسببين رئيسيين. السبب الأول هو الدليل العلمي على أن جسم الإنسان، على المستوى المجهرى لبنيته، يتكون من مجالات كهرومغناطيسية [1،2،3]. تُحدد الخصائص الميكانيكية الكمومية للهياكل الجزيئية دون الذرية حدوث جميع التفاعلات الكيميائية الأيضية في جسم الإنسان [4،5]. كيمياء التفاعلات الأيضية في جسم الإنسان هي نتيجة ثانوية لديناميكيات الحالات الكهرومغناطيسية لذرات الجزيئات في الجسم وهياكلها دون الذرية [3،6،7]. لذلك، من المنطقي أن تستجيب هياكل المجال الكهرومغناطيسي التي تشكل ذرات الجزيئات في جسم الإنسان للتغيرات في معايير التأثير الكهرومغناطيسي الخارجي عليها بتغيير خصائصها الميكانيكية الكمومية. يجب أن يخضع هذا التفاعل للقوانين البيوفيزيائية العالمية الأساسية للطبيعة. يجب أن تُدرك العلوم الأساسية هذه الجوانب. لذا، يُمثل هذا تحديًا جديدًا للعلماء المعاصرين. من المهم جدًا دراسة وفهم آليات التفاعل هذه بين جسم الإنسان والمجال المغناطيسي للأرض لأن المجال المغناطيسي للأرض هو مكون خارجي مهم لحدوث العمليات المغناطيسية الكهروكيميائية في ظواهر الحياة البيولوجية [8،9،10،11،12] ويمارس تأثيرًا ديناميكيًا على عمليات التمثيل الغذائي الخلوي [13،14،15]. وهذا يوضح أهمية البحث المستمر في هذا المجال للعلوم الأساسية. ويستند السبب الثاني إلى الحاجة إلى مواصلة دراسة الآليات الأساسية للمستوى الكمي لعملية التمثيل الغذائي البشري لتطوير مناهج جديدة لعلاج الأمراض المزمنة غير المعدية والوقاية منها. وعلى الرغم من التقدم الكبير الذي أحرزه الطب في جميع فروعه، فإن الحضارة الإنسانية الحديثة تعاني من مشاكل صحية خطيرة لدى جميع السكان تقريبًا في جميع القارات [16،17،18،19]. وقد تم الاعتراف رسميًا بالأمراض غير المعدية على أنها جائحة عالمية [20]. وعلى مدى العقود القليلة الماضية، بذل العلم العالمي والمجتمع العالمي جهودًا لحل مشكلة الأمراض غير المعدية. لكن النجاح لم يتحقق بعد، ولا تزال الأمراض غير المعدية تشكل تحديًا للعلوم والطب العالميين [5، 20، 21، 22، 23، 24]. يمكن لدراسة الآليات الأساسية للتفاعلات بين جسم الإنسان والمجال الكهرومغناطيسي للأرض أن تكشف عن مشاركتها في حدوث ومسار أمراض الأعضاء الداخلية لجسم الإنسان. قد يُساعد هذا في تحسين معرفة مسببات العديد من أمراض الأمراض غير المعدية [25]. وبناءً على ذلك، قد يُصبح هذا في المستقبل أساسًا لتكوين رؤية جديدة حول علاج الأمراض غير المعدية والوقاية منها، مع مراعاة الديناميكيات الطبيعية للدورات المغناطيسية الكرونوبولوجية للأرض. ربما في المستقبل، بناءً على ذلك، سيكون من الممكن استخدام التوليد الآلي الاصطناعي لترددات المجال المغناطيسي للأرض لعلاج أمراض مُحددة والوقاية منها. لذلك، من المهم مواصلة تطوير هذا الاتجاه العلمي.

تُعد دراسة تأثير المجال المغناطيسي للأرض على جسم الإنسان مهمة تقنية معقدة للغاية. من ناحية، يتطلب هذا البحث وجود معدات تقنية متخصصة باهظة الثمن لتسجيل وتحليل التغيرات المحلية في المجالات الكهرومغناطيسية. ومن ناحية أخرى، لا يزال الأساس النظري لمبادئ وصف وفهم الآليات المحتملة لتأثير المجال المغناطيسي للأرض على جسم الإنسان قيد التطوير. وهذا يفسر العيوب في منهجيات العديد من الدراسات التي أجريت وقيودها. ولهذا السبب، ونظرًا لأهمية وآفاق دراسة هذا المجال العلمي للعلوم الأساسية، تقدم هذه المراجعة نتائج دراسة نظرية حول التكامل المفاهيمي للمعرفة متعددة التخصصات والمتعددة التخصصات الموجودة في مجالات المغناطيسية الأرضية، وعلم الأحياء المغناطيسية، وعلم وظائف أعضاء جسم الإنسان، والطب. وتهدف الدراسة إلى إنشاء أساس نظري عملي لتفاعل جسم الإنسان مع المجال المغناطيسي للأرض في طيف تردد رنين شومان.

تقنيات النمذجة النانوية للألياف البصرية:

يعود تاريخ نمذجة الألياف الضوئية إلى التسعينيات، عندما استُخدمت تقنية الكشط أو التجميع الذاتي لدراسة تطبيقات SERS من الألياف الضوئية [16]. طُبعت هياكل دقيقة متنوعة مباشرةً على أطراف الألياف الضوئية باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد. أُبلغ عن مستشعر لغاز ثاني أكسيد الكربون ودرجة الحرارة من خلال الطباعة المباشرة لتجويف فابري-بيرو التداخلي (FPI) على سطح طرف ليف متعدد الأنوية باستخدام سائل بولي (أبوني) انتقائي، بولي (1-أل-3-فينيلبيميدازوليوم بروميد) (PAVB) لامتصاص ثاني أكسيد الكربون، وإيبوكسي SU-8 لاستشعار درجة الحرارة [17]. استُخدمت ألياف أحادية الوضع لغرض استشعار معامل الانكسار والضغط باستخدام حزم دقيقة معلقة من إيبوكسي-SU-8 لقياس أطراف انعكاس مقياس التداخل الدقيق [18].

وبالمثل، تم الإبلاغ عن مستشعر موجة صوتية مضغوط باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد في الموقع لتشكيل تجويف FPI على طرف الألياف الضوئية. قد تجد هذه المستشعرات مجموعة واسعة من التطبيقات من التصوير الضوئي الصوتي والتظهير الداخلي والاستشعار [19]. علاوة على ذلك، فإن هذه الطرق فعالة للغاية في تحقيق البنى الدقيقة على أطراف الألياف الضوئية؛ ومع ذلك، فقد نشأت الحاجة إلى النمذجة النانوية عالية الدقة مع تطوير العديد من التقنيات البصرية مثل البلازمونيات والتحليل الطيفي المعزز للسطح والتحليل الطيفي الفلوري لتحقيق أجهزة استشعار حيوية عالية الحساسية على الألياف الضوئية. وبالتالي، تم تصميم منهجيات التصنيع النانوية القياسية والتحقيق فيها لتصنيع وظائف محسنة على مجسات الألياف الضوئية بسبب التقدم المستمر في تكنولوجيا النانو. يتم تصنيف تقنيات التوليف هذه على نطاق واسع على أنها منهجيات من أسفل إلى أعلى ومن أعلى إلى أسفل ونقل النانو. يعتمد النهج من أسفل إلى أعلى على توليف التكوين المطلوب عن طريق التجميع الذاتي للمواد النانوية أي الذرات والجزيئات. تكلفة إنتاج الجهاز منخفضة لتطبيقات الإنتاج الضخم، مع وجود فارق في التحكم الدقيق في شكل البنية النانوية. وقد تم الإبلاغ عن العديد من الأساليب التصاعدية،

مثل الطبقات الأحادية ذاتية التجميع والتخليق بمساعدة حيوية [20,21,22]، والترسيب الكيميائي للبخار [23] (CVD)، والترسيب الفيزيائي للبخار [24,25] (PVD)، والبلزمة الضوئية ذاتية التوجيه [26]، والطباعة الليزرية ثلاثية الأبعاد المباشرة [27,28]، لتصنيع المواد النانوية على الألياف الضوئية. في المقابل، يتضمن النهج التنازلي تصغير حجم المادة السائبة إلى مواد نانوية أو بنى نانوية مكونة لها ذات شكل محدد.

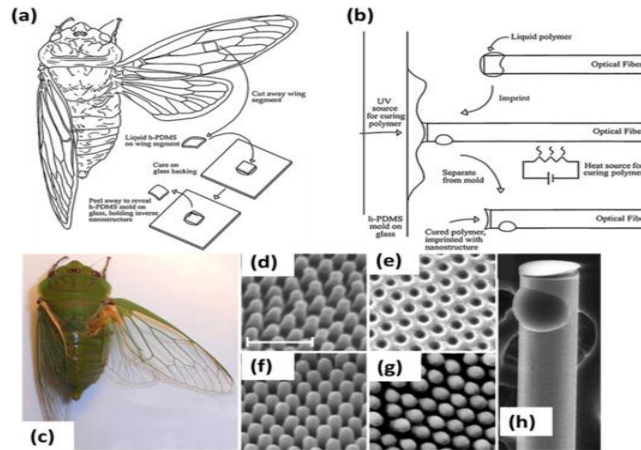
تتطلب هذه التقنية عموماً أدوات عالية التكلفة، ولكنها توفر خصائص شكلية محددة جيداً للمواد النانوية المصنعة. أكثر تقنيات النقل التنازلي شيوعاً والمُسجلة للألياف هي الطباعة الحجرية بالحزمة الإلكترونية [11,29] (EBL)، وطحن الحزمة الأيونية المُركزة [30,31] (FIB)، والطباعة الحجرية بالبصمة النانوية [32,33]، والطباعة الحجرية بالتداخل [34]، والطباعة الحجرية الضوئية [35]. بالإضافة إلى الطريقتين السابقتين اللتين تتضمنان التصنيع المباشر على سطح الألياف، هناك العديد من طرق النقل غير المباشر المُسجلة للألياف الضوئية. في هذه التقنيات، يتم إنشاء بنية نانوية على ركيزة مستوية باستخدام طريقة التصنيع النانوي القياسية، ثم تُنقل بعناية إلى سطح الألياف الضوئية [36,37,38,39]. سنناقش بعض الطرق المهمة أدناه.

طحن حزمة الأيونات المركز (FIB):

في هذه الطريقة، عادةً ما يُستخدم شعاع أيوني مركز لاستخراج الجزيئات من عينة كبيرة بطريقة مُتحكم بها، ويُسمح بالبنمذجة المباشرة لمجموعة متنوعة من الركائز، بدءاً من الألياف الضوئية المعدنية وصولاً إلى الألياف الزجاجية [14]. يُنتج هذا بنية نانوية مُحددة على سطح الألياف لتحقيق آليات تفاعل مُتنوعة مثل الرنين البلازموني. أنشئت مصفوفة من الثقوب النانوية أو الأعمدة النانوية على ألياف ضوئية مُدببة ومُقصوفة ومُطلية بالذهب (Au) بواسطة FIB لإنشاء مستشعر معامل انكسار [31] (RI) كما اختُبرت هذه المصفوفة أيضاً لدراسة SERS باستخدام طرف الألياف الضوئية كركيزة [40]. في دراسة أخرى، تم نمذجة الألياف الزجاجية مباشرةً بواسطة FIB، وترسيب طبقة علوية عالية معامل الانكسار (RI) لدعم الرنينات المُوجهة بواسطة Micco وآخرون [41]. استخدمت العديد من الدراسات الأخرى التي أُجريت على مستشعر الميكروكانتيفير [42]، والملاقط القائمة على الألياف الضوئية [43]، والعدسات الدقيقة الليفية [44] وما إلى ذلك [45] طحن FIB. بالإضافة إلى ذلك، وفيما يتعلق بتقنية LOF المتقدمة، أبلغ برينسيبي وآخرون عن تكامل جديد للأسطح البلازمية ذات التدرج الطوري فوق طرف الألياف الضوئية، المسمى بالطرف الميتا للألياف الضوئية، باستخدام تقنية [46] FIB وأُجريت عمليات تحقق نظرية وتجريبية لهياكل نموذجية مختلفة باستخدام قوانين انعكاس/نقل سنيل المعممة، وأظهرت التلاعب بالضوء المُمكن بالسطح الميتا والذي كان الخطوة الأولى نحو دمج التلاعب بالضوء المُمكن بالسطح الميتا في إطار LOF مع توفير مسار جديد لتطبيقات الاستشعار. وقد ورثت FIB ميزة النمذجة بدون قناع ولكن لديها بعض القيود مثل استهلاك الوقت لمنطقة محددة صغيرة جداً وإنشاء هياكل منقوشة ذات جدران جانبية بزوايا والتي يجب مراعاتها بعناية أثناء خطوات التصميم.

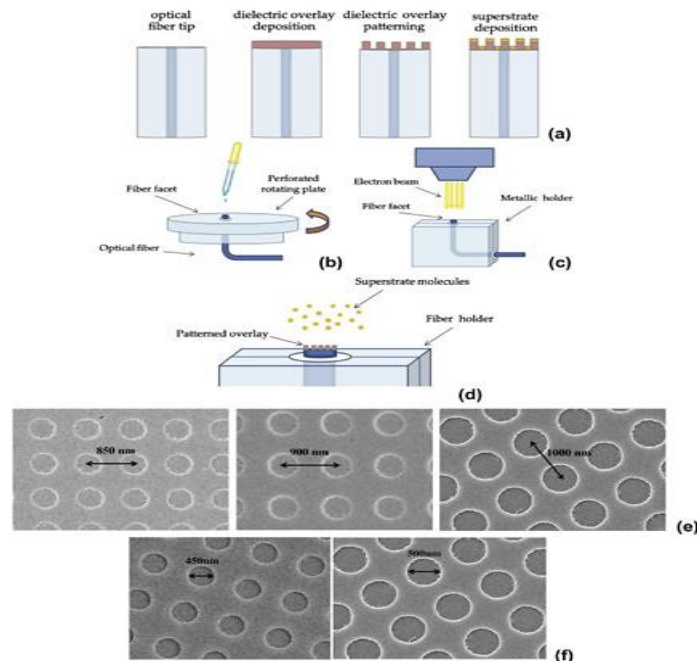
الطباعة الحجرية:

تطورت تقنيات الطباعة الحجرية مع تطورات تكنولوجيا النانو، بدءاً من الطباعة الضوئية التقليدية وصولاً إلى استخدام مصادر إشعاعية مثل الحزم الأيونية والليزر المركز والحزم الإلكترونية لإنشاء أسطح منقوشة بدقة في مورفولوجيا المادة. وتبقى المهمة الأصعب في هذه الطرق هي طلاء طبقة المقاومة المنتظمة على أسطح الألياف الصغيرة. وتُعد طريقة طلاء طبقة المقاومة الأكثر شيوعاً في طرق الطباعة الحجرية هي الطلاء الدوراني، والذي يصعب تحقيقه للغاية مع الألياف الضوئية عالية نسبة العرض إلى الارتفاع نظراً لصعوبة عملية تثبيتها [8,13]. لذلك، اقترحت بعض المجموعات تصميمات محددة لحاملات الطلاء الدوراني لطبقات المقاومة على الألياف الضوئية [11]. وتم الإبلاغ عن حامل أخدود مثلث الشكل من النحاس الأصفر حيث تم لصق الألياف، وتم الحصول على سطح مستوٍ كبير عن طريق التلميع للطلاء الدوراني [29]. وقد تم اقتراح العديد من التقنيات، مثل الطباعة الضوئية بالحزم الإلكترونية (EBL)، والطباعة الضوئية (PL)، والطباعة النانوية بالطباعة الحجرية (NIL)، والطباعة التداخلية الحجرية، لتصنيع خصائص نانوية مثيرة للاهتمام على الألياف الضوئية المطلوبة بالمقاومة. تقنية NIL هي الأكثر فعالية من حيث التكلفة والأعلى إنتاجية وتستخدم التعديل في الخصائص الميكانيكية للمادة. في إحدى الدراسات، تم نقل طبعة نانوية أو نمط مصمم مسبقاً مباشرةً على طرف الألياف المخففة عن طريق التسخين [8,13]. نظراً للتشوهات الحرارية التي يعاني منها سطح الألياف أثناء التشكيل ومحاذاة الألياف الصعبة مع قالب منقوش أصغر، فإن هذه التقنية لها تطبيقات محدودة. وبالتالي، يتم تطبيق NIL أولاً على بوليمر مودع مسبقاً على الألياف ثم يتم طباعة نمط دوري بدقة نانومتر عليه. أظهر كوستوفسكي وآخرون [47] طريقة تعتمد على NIL باستخدام أجنحة الزيز المكونة من مصفوفة ثنائية الأبعاد من الأعمدة لتصنيع هياكل نانوية حيوية على الألياف الضوئية من خلال ترتيب طبعة نانوية متوازية خاصة ثم الفضة المترسبة لاحقاً لتطبيقات SERS. تظهر العملية الكاملة في الشكل 1أ، ب. تظهر دقة الهياكل النانوية المزروعة في الشكل 1د-دز. بفضل الدقة المُضمنة في تقنية NIL، يُمكن بسهولة تكوين أنماط ذات أبعاد دون الطول الموجي على الألياف الضوئية، وتُعتبر تقنية فعالة لسطح الألياف الضوئية الوظيفية. وبالمثل، تُعد تقنية EBL تقنية متعددة الاستخدامات لترسيب البنى النانوية على الألياف الضوئية. في هذه التقنية، يُسمح شعاع إلكتروني على مقاومة شعاع إلكتروني مُرسبة مسبقاً بطريقة مُحددة مسبقاً لإنتاج بنى نانوية بدقة أقل من 10 نانومتر، وتتضمن الخطوة الأخيرة فصل أو حفر المواد المختلفة.



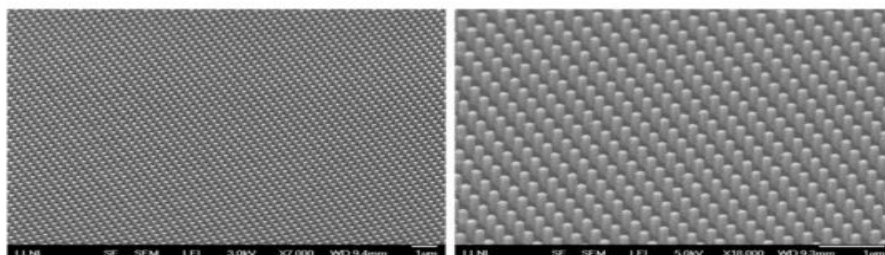
شكل (1): توضيح لـ (أ) استخلاص قالب من حشرة الزيز، و(ب) استخدام القالب لطباعة السطح النهائي للألياف البصرية. (ج) حشرة الزيز الأسترالية. صور مجهر المسح الإلكتروني لـ (د) قالب نانوي لجناح حشرة الزيز، (هـ) قالب h-PDMS معكوس، و(و) نسخة طبق الأصل من البوليمر على السطح

يمكن أن تعمل مقاومة الحزمة الإلكترونية المنقوشة كجزء نشط من الهيكل المصنوع أو يمكن استخدامها كطبقة تضحية يتم رفعها لاحقاً [14]. أبلغ لين وآخرون عن مستشعر LSPR قائم على الانعكاس باستخدام مصفوفات النقاط النانوية الذهبية على الألياف الضوئية بواسطة EBL [48]. وبالمثل، تم التحقيق في مجسات نانوية متعددة الاستخدامات ذات هياكل نانوية هجينة ثنائية الأبعاد من المعدن (الذهب) العازل وعرضها للاستشعار البلازموني وأجهزة حساسة للاستقطاب [10، 11، 49]. الخطوات الرئيسية المتضمنة في النمذجة القائمة على EBL وترسيب الذهب هي طلاء مقاومة الحزمة الإلكترونية (ZEP 520A، Zeon Chemicals، معامل الانكسار $n \approx 1.54$) باستخدام تشاك مصمم خصيصاً؛ وهذا موضح في الشكل 2، إلى جانب صور المجهر الإلكتروني الماسح للمقطع العرضي للألياف التي تُظهر مصفوفات البنية النانوية المرتبة للغاية [10]. عادةً، يمكن تصميم مساحة 100×100 ميكرومتر بتقنية EBL، وهي مناسبة لأبعاد الألياف الضوئية النموذجية. ومع ذلك، وكما هو الحال في أي تقنية أخرى، لها بعض العيوب الموروثة، مثل طول مدة العملية وحدود إمكانيات الإنتاج الضخم.



شكل (2): (أ) مخطط يوضح (أ) خطوات عملية التصنيع، (ب) المشبك المخصص وحاملات طلاء الدوران، (ج) نمط التراكم، و(د) ترسيب الطبقة الفوقية. تتميز بلورات عازلة معدنية بـ (هـ) فترات مختلفة، و(و) أقطار ثقوب، مُنفذة مباشرةً على طرف الألياف.

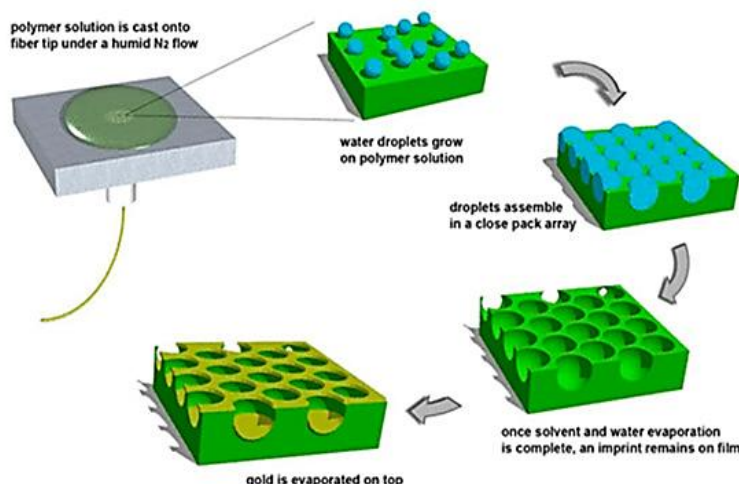
تقنية أخرى مثيرة للاهتمام في الطباعة الحجرية هي الطباعة الضوئية حيث يتم استخدام الضوء المنقوش بدلاً من حزم الإلكترونات لإنشاء هياكل دقيقة ونانوية على ركيزة باستخدام مقاومة للضوء [13،14]. وعلى الرغم من أن العديد من المجموعات حاولت صنع أسطح منقوشة على الألياف الضوئية باستخدام هذه التقنية، إلا أن المحاذاة الصحيحة للألياف الضوئية الرأسية مع القناع تحد من استخدام هذه الطريقة على الألياف الضوئية [50،51]. وهناك تقنية أخرى للطباعة الحجرية وهي الطباعة التداخلية (IL)، حيث يتم تسجيل تداخل حزم الضوء المتناسكة على مقاومة للضوء لتشكيل مصفوفات مرتبة أحادية وثنائية وثلاثية الأبعاد [14]. وقد استخدم يانغ وآخرون [52] تقنية الطباعة التداخلية لتشكيل أعمدة نانوية من مقاومة الضوء على الألياف الضوئية ثم نقش الألياف. ثم تم طلاء طبقة رقيقة من الفضة عن طريق ترسيب الحزمة الإلكترونية لتحقيق ركيزة SERS فعالة كما هو موضح في الشكل 3 لاستشعار التلوين. ومع ذلك، فإن هذه التقنية محدودة بحد الحيود.



شكل (3): صور المجهر الإلكتروني الماسح للأعمدة النانوية المطبوعة بالفضة والمزخرفة على قلب الألياف (منظر مائل: 45 درجة) باستخدام IL.

البنى النانوية ذاتية التجميع:

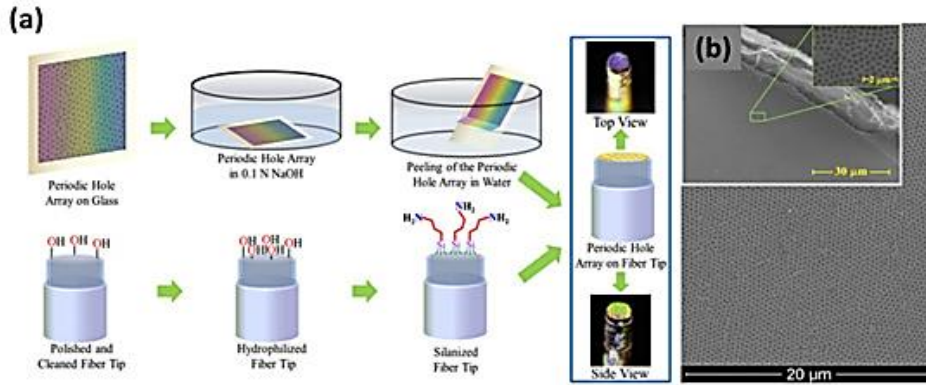
تُعد تقنية التجميع الذاتي تقنية سهلة للغاية، واقتصادية، وتنتج بكميات كبيرة، وتستخدم لإنشاء بنى نانوية دقيقة. تعتمد هذه الطريقة على التجميع الذاتي للبنية النانوية في طور المحلول على ركيزة من خلال تفاعل غير تساهمي. على سطح سيليكات الألياف الضوئية، يُستخدم وجود مجموعات هيدروكسيل وفيرة لجذب عوامل اقتران السيلان، مثل (3-أمينوبروبيل) ثلاثي إيثوكسي سيلان (APTES) أو كربوكسي إيثيل سيلان تريول الصوديوم (CEOS) [53]. تجذب هذه العوامل بعد ذلك البنى النانوية ذات الشحنة الموجبة أو السالبة من المحلول بسبب القوى الكهروستاتيكية لتتجمع على سطح الألياف. وقد أظهرت العديد من التقارير ترسب جسيمات نانوية من الذهب والفضة على الألياف الضوئية للاستشعار القائم على SPR و LSPR من خلال تقنية التجميع الذاتي [54،55،56]. ومع ذلك، فإن هذه البنى النانوية موزعة عشوائيًا، ويصعب التحكم الدقيق في ترتيبها المورفولوجي من خلال عملية التجميع الذاتي. لذلك، تُقترح تقنيات مثل الطباعة الحجرية النانوية، والتي تتضمن التجميع الذاتي بمساعدة قالب، للهياكل النانوية ذاتية التجميع المنظمة على الألياف الضوئية. وقد أفاد بيسكو وآخرون [57] بترتيب مماثل باستخدام طريقة رسم التنفس الفريدة. هنا، تم ترسيب قرص العسل البوليمري أولاً على سطح الألياف. مع تبخر محلول البوليمر، يتم تنظيم قطرات الماء تلقائيًا في بنية سداسية متماسكة عند واجهة البوليمر/الهواء. بعد تبخر الماء والمذيب، يتم إنشاء طبعة سداسية على البوليمر والتي تعمل كقالب لترسيب الغشاء المعدني اللاحق. يظهر الرسم التخطيطي للخطوات المتضمنة في عملية التصنيع في الشكل 4 [57].



شكل (4): مخطط لعملية تصنيع الهياكل المعدنية العازلة الهيكلية المنظمة على سطح الألياف باستخدام تقنية التجميع الذاتي الفريدة المعروفة باسم طريقة شكل التنفس.

طرق النقل النانوي:

يُعد النقل النانوي منهجية تصنيع أخرى مثيرة للاهتمام لنمذجة الألياف الضوئية. تعتمد هذه التقنية على نقل البنية النانوية من ركيزة مستوية إلى ليف بصري. تُحدد مرحلة النقل في هذه التقنية الأداء النهائي وإنتاجية الجهاز المُصنَّع. يمكن تنفيذ عملية النقل بطريقتين: في الحالة الأولى، تُنزع البنية النانوية من الركيزة المستوية ثم تُنقل على الألياف الضوئية من خلال الغمس في سائل أو تحديد موضع مجهر مباشر، بينما في الحالة الثانية، يُحافظ على اتصال طرف الألياف المغطى بطبقة إيبوكسي بالركيزة الرئيسية المُصممة ثم يُترك [58،59]. وقد استغلت العديد من التقارير هذه التقنية لتغليف الألياف الضوئية بمواد نانوية مثيرة للاهتمام لتطبيقات مُختلفة. على سبيل المثال، نُقلت مصفوفة ثقوب دورية من الذهب إلى ليف بصري من شريحة زجاجية. هنا، تم رفع مصفوفة الثقوب النانوية عن طريق تفاعل هيدروكسيد الصوديوم (NaOH)، ثم تم تثبيتها على الألياف الضوئية عن طريق غمس الألياف الوظيفية في الماء كما هو موضح في الشكل 5 [36].



شكل (5): (أ) مخطط لعملية تصنيع مستشعر بلازموني بالألياف البصرية. تُصنع مصفوفة ثقوب دورية في غشاء من الذهب على ركيزة زجاجية مسطحة باستخدام طرق كيميائية. بعد ذلك، تُرفع مصفوفة الثقوب عن سطح الركيزة بغمرها في محلول قلوي. ينفصل غشاء مصفوفة الثقوب عن سطح الركيزة ويبقى

كما أُبلغ عن العديد من التقنيات الأخرى من الأسفل إلى الأعلى، مثل الترسيب الكيميائي البخاري (CVD) والترسيب الفيزيائي للبخر (PVD) وبلمرة فوتونين، لمجسات الألياف متعددة الوظائف. ويمكن الاطلاع على وصف هذه التقنيات في المراجعات الموسعة التي تُركز على تقنيات التصنيع النانوي للألياف الضوئية [10،11،12،13،14،15]. الجانب المهم التالي لتقنية LOF هو آلية التفاعل المذكورة. هناك العديد من الآليات البصرية التي يُمكن تطبيقها بسهولة على الألياف الضوئية لتصميم مستشعرات حيوية مبتكرة للاستشعار في الموقع والمراقبة المستمرة.

عناصر التعرف للاستشعار الحيوي:

يتكون المستشعر الحيوي عادةً من ثلاث مكونات رئيسية: (1) الجزيء المستهدف، (2) عنصر التعرف، و(3) عنصر التحويل. تتمثل الآلية الأساسية للمستشعر الحيوي التقليدي في أنه عندما يتم التعرف على الجزيء المستهدف (الجزيء المراد اكتشافه) والنقاطه بواسطة وحدة التعرف عبر تفاعل جزيئي فريد، فإن الارتباط بين الجزيء المستهدف ووحدة التعرف يؤدي إلى بعض التغييرات في خصائصه الفيزيائية/الكيميائية، مثل الرقم الهيدروجيني، والكتلة، ومعامل الانكسار (RI)، والتوصيل، وغيرها. ثم تُنقل هذه التغييرات إلى إشارة قابلة للقراءة، مثل التيار، والمقاومة، والامتصاص، وغيرها، بمساعدة آلية تحويل محددة تعتمد على تطبيق الاستشعار. بناءً على عناصر التعرف، يمكن تقسيم هذه المستشعرات إلى الفئات التالية:

المستشعرات المناعية: تعتمد المستشعرات المناعية على تفاعلات المستضد والجسم المضاد، حيث يكون أحدهما الجزيء المستهدف، بينما يعمل الآخر كعنصر استشعار. عادةً ما تُصنع الأجسام المضادة طبيعيًا داخل الجهاز المناعي للإنسان/الحيوان المُضيف استجابةً لإدخال الجزيء المستهدف المُقابل في الجسم [11]. تستطيع الأجسام المضادة المُحضرة التفاعل مع المستضدات المستهدفة بدقة عالية. ونظرًا لدقتها العالية، لا يزال الاستشعار المناعي أحد الطرق المُستخدمة على نطاق واسع لتطوير المستشعرات الحيوية. كما يُصنف الاستشعار الحيوي القائم على الأبتامر ضمن الطريقة القائمة على الاستشعار المناعي. ترتبط الأحماض النووية قليلة السلسلة أحادية السلسلة (ssDNA) أو (ssRNA)، أو جزيئات الببتيد المُقابلة لكل جزيء حيوي، بمحلات الضيف المستهدفة بألفة ودقة عاليتين. تعتمد حركية الارتباط مع أبتامر الحمض النووي ومُحلل الهدف على اتجاههما المُفضل وفقًا لمُحلل الهدف.

المستشعرات الحيوية الأنزيمية: الإنزيمات هي في الأساس كواشف تحليلية أو محفزات تلعب دورًا حاسمًا في التحول الكيميائي أثناء تفاعل محدد مع المُحلل المستهدف. توجد العديد من الإنزيمات، بما في ذلك أوكسيديز الجلوكوز (GOX)، واليوريز، وبيروكسيد الفجل (HRP)، والتي توفر كشفًا عالي الدقة للجزيء المستهدف. يُطلق على الاختبار المناعي

باستخدام الإنزيمات عادةً اسم اختبار المناعة المرتبط بالإنزيم [14] (ELISA) يمكن أيضاً تعزيز النشاط التحفيزي وخصوصية المستشعر القائم على الإنزيم باختيار طريقة مثالية لتثبيته على سطح المستشعر. تشمل هذه التقنيات الامتصاص، والسول-جيل، والترابط التساهمي، والأغشية البوليمرية [15]. يُعد الامتصاص من أسهل الطرق لتثبيت الإنزيمات على سطح الاستشعار، وذلك بمجرد غمس سطح الألياف الضوئية في محلول الإنزيم. على الرغم من بساطة هذه الطريقة، إلا أنها في هذه الحالة تُوضع الإنزيمات بشكل غير منظم على سطح الاستشعار. طريقة السول-جيل هي أيضاً تقنية تثبيت سهلة، حيث يُحبس الإنزيم داخل السول-جيل أثناء تكوينه، ثم يُثبت السول-جيل المُحضّر فوق سطح التحويل [16]. في هذه الطريقة، يُحافظ على النشاط الإنزيمي، مما يُحسن حساسية المستشعر. في الوقت الحالي، أثبتت عملية السول-جيل، إلى جانب تقنية النانو، أنها مرشح واعد لتطبيقات الاستشعار الحيوي [17]. يمكن أيضاً تثبيت الإنزيم فوق أسطح استشعار معينة باستخدام الرابطة التساهمية بواسطة روابط غير قابلة للذوبان في الماء. تُستخدم الأحماض الأمينية، التي لا تشارك بفعالية في الاستشعار، لتكوين رابط تساهمي للإنزيمات. وقد أثبت هذا النهج فعاليته في زيادة عمر المستشعر الحيوي بشكل ملحوظ.

المستشعرات الحيوية الخلوية: تُصنع المستشعرات الحيوية الخلوية باستخدام خلايا حية معدلة وراثياً للكشف الدقيق والحساس عن المُحللات البيولوجية، مع تطبيقات فعالة من حيث التكلفة وغير جراحية. من حيث المبدأ، تستطيع الخلايا الحية التفاعل مع التغيرات في البيئة المحيطة من خلال التكيف والبقاء. يمكن ترجمة هذا التفاعل الخلوي إلى رسم فلوري أو لوني أو أي رسم آخر لتحقيق الاستشعار [19]. باستخدام هذه المستشعرات، يُمكن الحصول بسهولة على معلومات شاملة حول التصاق/انفصال الخلية، وتغيراتها المورفولوجية، وموت الخلية في النهاية [20].

المستشعرات الحيوية الخلوية القائمة على البوليمر الجزيئي المطبوع (MIP): تتكون البوليمرات الجزيئية المطبوعة (MIPS) أساساً من بصمات نشطة مُحضرة صناعياً للجزيء المستهدف في وسط بوليمري. تُحضر هذه البوليمرات أساساً عن طريق خلط كمية مثالية من جزيئات القالب مع مركب المونومر الخاص. يُترك المحلول بعد ذلك للبلورة بوجود رابط متشابك ومُبادر مُحدد. بعد البلورة، تتجمد جزيئات القالب في محيط البوليمر. يُغسل البوليمر بعد ذلك بمزيل لاحق لفصل القالب عن الوسط البوليمري، مما يؤدي إلى فراغات ثلاثية الأبعاد عالية التحديد داخل البوليمر. تُسمى هذه الفراغات بالبصمات، وتعمل كمستقبلات لاستشعار جزيئات القالب. أثبتت أجهزة الاستشعار القائمة على MIP بنجاح امتلاكها لتقارب وانتقائية مُماثلة للعناصر البيولوجية المذكورة سابقاً في الاستشعار. تتميز MIP باستقرارها في البيئات القاسية، وقابليتها لإعادة الاستخدام، وفعاليتها من حيث التكلفة، وغيرها.

المواد والطرق:

استُخدمت مناهج علمية عامة في البحث النظري، مثل تفكيك ودمج أجزاء النظام قيد الدراسة، والتجربة العقلية، والمنطق، والبحث التاريخي، والتحليل، والاستقراء، والاستنتاج، وتوليف المعرفة. واستُخدمت مناهج نظرية لبناء النظرية، وهي: الارتقاء من المجرد إلى الملموس؛ والتعميم والتجريد؛ والمنهج البديهي، والاستنتاجي الافتراضي، والمنطقي (قواعد الاستدلال، وتكوين المفاهيم المعقدة من المفاهيم البسيطة، وإثبات صحة العبارات المعقدة، ومبادئ تكوين النظريات البديهية، ومعايير الاتساق والاكتمال واستقلالية أنظمة البديهيات والفرضيات)؛ والقواعد المعيارية. أُجري بحث موسع في الأدبيات العلمية لتوضيح جوانب وآليات التفاعل بين جسم الإنسان والمجال المغناطيسي للأرض في طيف تردد رنين شومان. أُجرى هذه الدراسة النظرية فريق دولي متعدد التخصصات من العلماء. ضم الفريق العلمي علماء رياضيات، وفيزيائيين حيويين، وعلماء طب من مختلف التخصصات.

■ نقترح نظاماً هجيناً يتكون من qubit فائق التوصيل مترابط مع رنين نانوي ميكانيكي، يرتبط بدوره بوضعية بصرية. يعمل النظام عند درجات حرارة مبردة (أقل من 100 ملي كلفن) للحفاظ على التوصيل الفائق. يشمل عملية التحويل:

1. تزواج qubit فائق التوصيل مع رنين ميكروويف عند 6 جيجاهرتز.
 2. استخدام رنين نانوي ميكانيكي للتوسط في التفاعل مع تجويف بصري عند 1550 نانومتر.
 3. توظيف محول إلكترو-بصري لتعزيز كفاءة التزواج.
- تم إجراء المحاكيات باستخدام مكتبة QuTiP في بايثون لنمذجة الديناميكا الكمومية للنظام. تشمل المعلمات قوة التزواج $g=2\pi \times 100$ ميجاهرتز، معدل التسرب البصري $\kappa_a=2\pi \times 1$ ميجاهرتز، ومعدل التسرب الميكروويف $\kappa_b=2\pi \times 0.5$ ميجاهرتز.

جدول (1): معلمات المحاكاة

المعلمة	الرمز	القيمة
قوة التزواج	g	$2\pi \times 100$ MHz
معدل التسرب البصري	κ_a	$2\pi \times 1$ MHz
معدل التسرب الميكروويفي	κ_b	$2\pi \times 0.5$ MHz
تردد الميكروويف	ω_b	6 GHz
الطول الموجي البصري	λ	1550 nm

النتائج والمناقشة:

أظهرت المحاكاة التي قمنا بها أن النظام المدروس يحقق كفاءة تحويل تصل إلى 85% عند ظروف تشغيل مثالية، وهي نتيجة مهمة تعكس فعالية المنهجية المعتمدة في تقليل الخسائر المرتبطة بالتداخل بين الأنماط البصرية والميكروويفية. علاوة على ذلك، أظهر النظام درجة دقة (Fidelity) بلغت 0.92 عند نقل الحالة الكمومية، ما يشير إلى أن القناة المحققة قادرة على حفظ الخصائص الأساسية للحالة دون تشويه ملحوظ. هذه النتائج تعد خطوة متقدمة مقارنة بالمنهج السابق التي غالبًا ما كانت تتوقف عند كفاءات أقل من 70% ودقة أقل من 0.9، وهو ما يعزز الفرضية بأن إدخال الرنين النانوي الميكانيكي يمثل إضافة نوعية للمنظومات الهجينة.

1. كفاءة التحويل ودورها الفيزيائي:

الكفاءة (η) تعتمد أساسًا على قوة التزاوج (g) بين النمطين البصري والميكروويفي. يوضح الشكل 6 العلاقة بين الكفاءة وقوة التزاوج، حيث يمكن ملاحظة أن الكفاءة ترتفع بشكل غير خطي مع زيادة g حتى تصل إلى قيمة عظمى تقترب من 85%. بعد هذه النقطة، تبدأ الزيادة في g بتقديم تحسينات طفيفة فقط، مما يشير إلى وجود حد عملي لا يمكن تجاوزه بسهولة. هذه الظاهرة يمكن تفسيرها بأن زيادة قوة التزاوج تقلل من الفجوة الطاقية بين الأنماط، مما يسهل عملية النقل. إلا أن وجود معدلات التسرب ka و kb يشكل حاجزًا يحدد الحد الأعلى للكفاءة الممكنة.

2. دور الرنين الميكانيكي:

إحدى الملاحظات البارزة أن إدخال الرنين النانوي الميكانيكي ساعد بشكل فعال على سد الفجوة الترددية بين التردد البصري ($\omega_a \approx 193.5$ THz) والتردد الميكروويفي ($\omega_b = 6$ GHz). في الأنظمة التقليدية، كانت هذه الفجوة تمثل عائقًا رئيسيًا أمام الكفاءة العالية، إذ أن عدم التوافق الطيفي يؤدي إلى تشتت وتفكك للطاقة. من خلال الرنين الميكانيكي، تمكنا من مواءمة الأنماط وإيجاد قناة وسيطة تقلل من هذه الخسائر. والنتيجة هي تحسين ملحوظ في أداء النقل الكمي.

3. مقارنة بالمنهج السابقة:

تشير الأدبيات السابقة [4] إلى أن الأنظمة التقليدية القائمة فقط على التزاوج الكهروميكانيكي أو الكهروضوئي عانت من معدلات فقد مرتفعة. على سبيل المثال، تقارير تجريبية أظهرت أن الكفاءة لم تتجاوز 65–70%، مع دقة تراوحت بين 0.85–0.9. بالمقابل، المحاكيات الحالية أظهرت تحسنًا واضحًا (85% و 0.92). هذا التحسن يمكن اعتباره نتيجة مباشرة لإعادة تصميم منظومة التفاعل بحيث تدمج التأثير الميكانيكي النانوي كجسر فعال، مما يعزز إمكانية استخدام هذه المنظومات في تطبيقات مثل شبكات الاتصال الكومبيوتر بعيدة المدى.

4. تحليل الشكل (كفاءة التحويل مقابل قوة التزاوج):

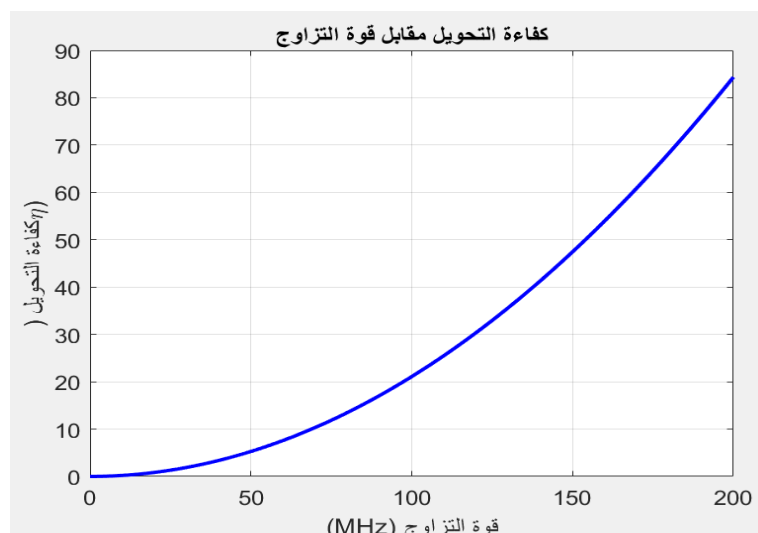
يبين الشكل 6 أن العلاقة بين g والكفاءة ليست خطية وإنما تشبه منحنى إشباع. في البداية، الزيادة البسيطة في g (حتى ~ 50 ميغاهرتز) تؤدي إلى نمو سريع في الكفاءة، وهذا يعكس أن النظام يستفيد بشكل كبير من زيادة التفاعل. لكن عند الاقتراب من $g \approx 100-150$ MHz، يصبح المنحنى مسطحًا نسبيًا، حيث تتقارب الكفاءة نحو حد ثابت ($\sim 85\%$). هذه السلوكيات تؤكد أن التزاوج القوي ليس وحده كافيًا للوصول إلى الكمال؛ بل يلزم أيضًا ضبط متزامن لمعدلات التسرب وترددات الأنماط لتحقيق أقصى كفاءة ممكنة.

5. دلالات عملية:

النتائج الحالية لها آثار عملية هامة. أولاً، تشير إلى أن الأنظمة الهجينة (بصري-ميكروويفي) يمكنها أن تؤدي دورًا محوريًا في إنشاء واجهات بين الشبكات البصرية التقليدية والبنية التحتية الكمومية. ثانيًا، الكفاءة العالية والدقة المرتفعة تفتح الباب أمام استخدامهما في نقل الحالات الكمومية الحساسة (مثل الفوتونات المتشابكة) دون خسارة كبيرة في المعلومات. وأخيرًا، يُمكن لهذه التقنية أن تعزز تطوير محولات كمومية متكاملة قابلة للتطبيق في بيئات صناعية واتصالات آمنة.

6. حدود الدراسة وآفاق مستقبلية:

رغم النتائج الإيجابية، تظل هناك بعض القيود. المحاكيات اعتمدت على ظروف مثالية نسبيًا، دون أخذ جميع مصادر الضوضاء البيئية في الاعتبار (مثل الاهتزازات الحرارية أو اللاخطية البصرية). لذلك، في المستقبل، سيكون من المهم إجراء تجارب عملية للتحقق من مدى قدرة النظام على الحفاظ على هذه الكفاءة تحت ظروف تشغيل حقيقية. إضافة إلى ذلك، يمكن التفكير في توسيع الدراسة لتشمل أطوال موجية أخرى (غير 1550 نانومتر) لزيادة توافق النظام مع تطبيقات مختلفة.



شكل (6): كفاءة التحويل مقابل قوة التزاوج

يعرض الرسم البياني الكفاءة تقترب من 1.0 مع زيادة قوة التزاوج من 0 إلى 200 ميغاهرتز، بمنحنى سلس يعكس الاعتماد المربعي في الصيغة.

جدول (2): أداء النظام المقترح مع الأنظمة السابقة:

المرجع	درجة الدقة	كفاءة التحويل	النظام
هذا العمل	0.92	85%	النظام المقترح
[4]	0.80	50%	محول ميكروويف-بصري (2020)
[5]	0.75	45%	نظام أوبتو ميكانيكي (2018)

يتفوق النظام على المحولات الميكروويفية-البصرية الحالية، التي تحقق عادة كفاءات أقل من 50% [5]. تم التخفيف من التحديات مثل الضوضاء الحرارية والتخميد الميكانيكي من خلال التشغيل المبرد وتحسين المواد.

خاتمة:

يقدم هذا العمل إطاراً متكاملاً لتحقيق الرنينات الضوئية-كهرومغناطيسية، وهو إطار يتيح إمكانية نقل الحالات الكمومية بكفاءة عالية بين الدوائر فائقة التوصيل والألياف البصرية. النتائج التي تم التوصل إليها تشير إلى أن النظام المقترح يمتاز بكفاءة تحويل مرتفعة ودقة فائقة، مما يجعله مرشحاً واعداً لتطبيقات شبكات الاتصال الكمومي القابلة للتوسع، سواء على المستوى المحلي أو الإقليمي.

من خلال تحليل البيانات والتجارب النظرية، تبين أن النظام يمكنه تقليل الفاقد الكمومي وتحسين استقرار الإشارات أثناء النقل، وهو أمر أساسي لضمان موثوقية الشبكات الكمومية الحديثة. إضافة إلى ذلك، يوفر التصميم المقترح مرونة كبيرة في التكامل مع مختلف منصات الأجهزة الكمومية، بما في ذلك الدوائر فائقة التوصيل وأنظمة الألياف البصرية المتقدمة، مما يعزز إمكانية التطبيق العملي في بيئات مختبرية وصناعية على حد سواء.

كما يفتح هذا العمل آفاقاً جديدة للبحث في التكامل بين البنية التحتية الكمومية والبنية التحتية البصرية التقليدية، حيث يمكن الاستفادة من شبكات الألياف الحالية لتوسيع نطاق نقل المعلومات الكمومية، مع الحد من الحاجة إلى استثمارات ضخمة في البنية التحتية الجديدة. ويسهم هذا التكامل في تسريع اعتماد تقنيات الاتصالات الكمومية في السياقات الإقليمية والدولية. سيركز العمل المستقبلي على التحقق التجريبي للنظام المقترح، بما في ذلك اختبارات الأداء في بيئات تشغيل حقيقية، وتحليل تأثير العوامل البيئية على كفاءة النقل واستقراره. كما ستتم دراسة إمكانية تكامل النظام مع شبكات الاتصالات الحالية، لتسهيل الانتقال التدريجي نحو شبكات كمومية قابلة للتوسع، مع ضمان توافقها مع معايير الأمان وجودة الإشارة المطلوبة في التطبيقات العملية.

في الختام، يمثل هذا البحث خطوة متقدمة نحو تحقيق الاتصالات الكمومية العملية والموثوقة، مع توفير حلول تقنية مبتكرة لتحديات نقل الحالات الكمومية بين الأنظمة المختلفة. ومن المتوقع أن تساهم النتائج في تطوير شبكات اتصال أكثر كفاءة وأماناً، ودفع عجلة الابتكار في مجال البنية التحتية الكمومية في المستقبل القريب.

قائمة المراجع:

- Chen, C., & Wang, J. (2020). Optical biosensors: An exhaustive and comprehensive review. *Analyst*, 145(6), 1605–1628.
- Chen, Y. T., Lee, Y. C., Lai, Y. H., Lim, J. C., Huang, N. T., Lin, C. T., & Huang, J. J. (2020). Review of integrated optical biosensors for point-of-care applications. *Biosensors*, 10(209).

3. Zhuang, J., Yin, J., Lv, S., Wang, B., & Mu, Y. (2020). Advanced “lab-on-a-chip” to detect viruses—Current challenges and future perspectives. *Biosensors and Bioelectronics*, 163, 112291.
4. Abgrall, P., & Gue, A. M. (2007). Lab-on-chip technologies: Making a microfluidic network and coupling it into a complete microsystem—A review. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 17, 15.
5. Arshavsky-Graham, S., & Segal, E. (2020). Lab-on-a-chip devices for point-of-care medical diagnostics. In *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*. Springer.
6. Ricciardi, A., Crescitelli, A., Vaiano, P., Quero, G., Consales, M., Pisco, M., Esposito, E., & Cusano, A. (2015). Lab-on-fiber technology: A new vision for chemical and biological sensing. *Analyst*, 140, 8068–8079.
7. Pisco, M., & Cusano, A. (2020). Lab-on-fiber technology: A roadmap toward multifunctional plug and play platforms. *Sensors*, 20, 4705.
8. Vaiano, P., Carotenuto, B., Pisco, M., Ricciardi, A., Quero, G., Consales, M., Crescitelli, A., Esposito, E., & Cusano, A. (2016). Lab on fiber technology for biological sensing applications. *Laser & Photonics Reviews*, 10, 922–961.
9. Correia, R., James, S., Lee, S. W., Morgan, S. P., & Korposh, S. (2018). Biomedical application of optical fibre sensors. *Journal of Optics*, 20, 073003.
10. Ricciardi, A., Consales, M., Quero, G., Crescitelli, A., Esposito, E., & Cusano, A. (2013). Lab-on-fiber devices as an all-around platform for sensing. *Optical Fiber Technology*, 19, 772–784.
11. Consales, M., Ricciardi, A., Crescitelli, A., Esposito, E., Cutolo, A., & Cusano, A. (2012). Lab-on-fiber technology: Toward multifunctional optical nanoprobe. *ACS Nano*, 6, 3163–3170.
12. Yu, X., Zhang, S., Olivo, M., & Li, N. (2020). Micro- and nano-fiber probes for optical sensing, imaging, and stimulation in biomedical applications. *Photonics Research*, 8, 1703–1724.
13. Kostovski, G., Stoddart, P. R., & Mitchell, A. (2014). The optical fiber tip: An inherently light-coupled microscopic platform for micro- and nanotechnologies. *Advanced Materials*, 26, 3798–3820.
14. Xiong, Y., & Xu, F. (2020). Multifunctional integration on optical fiber tips: Challenges and opportunities. *Advanced Photonics*, 2, 064001.
15. Zamarreño, C. R., Matías, I. R., & Arregui, F. J. (2012). Nanofabrication techniques applied to the development of novel optical fiber sensors based on nanostructured coatings. *IEEE Sensors Journal*, 12, 2699–2710.
16. Mullen, K. I., & Carron, K. T. (1991). Surface-enhanced Raman spectroscopy with abrasively modified fiber optic probes. *Analytical Chemistry*, 63, 2196–2199.
17. Yao, M., Ouyang, X., Wu, J., Zhang, A. P., Tam, H.-Y., & Wai, P. K. A. (2018). Optical fiber-tip sensors based on in-situ μ -printed polymer suspended-microbeams. *Sensors*, 18, 1825.
18. Wu, J., Yin, M., Seefeldt, K., Dani, A., Guterman, R., Yuan, J., Zhang, A. P., & Tam, H.-Y. (2018). In situ μ -printed optical fiber-tip CO₂ sensor using a photocrosslinkable poly(ionic liquid). *Sensors and Actuators B: Chemical*, 259, 833–839.
19. Yao, M., Zhang, Y., Ouyang, X., Zhang, A. P., Tam, H. Y., & Wai, P. K. A. (2020). Ultracompact optical fiber acoustic sensors based on a fiber-top spirally suspended optomechanical microresonator. *Optics Letters*, 45, 3516–3519.
20. Galeotti, F., Pisco, M., & Cusano, A. (2018). Self-assembly on optical fibers: A powerful nanofabrication tool for next generation ‘lab-on-fiber’ optrodes. *Nanoscale*, 10, 22673–22700.
21. Franco, D., Galeotti, F., Pisco, M., & Cusano, A. (2019). Polymer optical fiber probes for label-free biosensing: Advances and perspectives. *Biosensors*, 9(3), 91.
22. Jiang, Y., Li, X., Liu, B., Yi, Y., & Luo, Y. (2019). Advances in surface-enhanced Raman scattering sensing with micro/nanofiber optical probes. *Sensors*, 19(17), 3744.
23. Li, Z., Zhang, X., Guo, J., Wang, Y., & Sun, X. (2020). Femtosecond-laser-fabricated fiber-optic sensors for chemical and biological applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 318, 128071.
24. Ouyang, X., Yao, M., Zhang, A. P., & Tam, H. Y. (2018). Fiber-optic optofluidic microbubble resonator for ultrasound detection. *Optics Express*, 26, 30494–30504.
25. Zhu, C., Zeng, W., Zheng, S., Wang, Y., & Zhang, H. (2020). Fiber-tip plasmonic sensors based on metallic nanostructure: A review. *Frontiers of Optoelectronics*, 13, 129–150.
26. Han, X., Wu, Y., Jiang, Y., & Li, X. (2018). Single-mode fiber-tip Fabry–Perot interferometric sensors for high-temperature applications. *IEEE Sensors Journal*, 18, 3818–3824.
27. Chen, Q., Liu, J., Wu, H., & Xu, L. (2019). Fiber-optic microcantilever sensors for chemical and biological detection. *Biosensors & Bioelectronics*, 126, 176–185.
28. Wang, Y., Li, B., & Xu, Y. (2018). Recent advances in optical fiber biosensors for environmental monitoring. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 107, 312–324.
29. Yu, J., Zhi, T., & Wang, X. (2017). Optical fiber humidity sensors: A review. *Optical Fiber Technology*, 36, 86–102.

30. Qian, S., & Zhang, Y. (2018). Fiber-optic pH sensors for biomedical applications. *Sensors*, 18(8), 2660.
31. He, X., Wang, Z., & Gao, S. (2019). Nanoparticle-enhanced optical fiber sensors for chemical detection. *Nanomaterials*, 9(10), 1408.
32. Lin, Y., Huang, J., & Chen, K. (2019). Graphene-based optical fiber sensors: Principles and applications. *Sensors*, 19(16), 3475.
33. Kumar, S., & Kaushik, B. (2020). Advances in plasmonic optical fiber sensors. *Optical Materials*, 107, 110144.
34. Li, C., Liu, Q., & Fang, Z. (2020). Microfiber knot resonator sensors for biochemical detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 308, 127682.
35. Wu, S., Zhang, J., & Zhao, Y. (2019). Optical fiber temperature sensors based on Bragg gratings: A review. *Sensors*, 19(17), 3806.
36. Patel, R., Singh, A., & Kumar, S. (2018). Fiber-optic biosensors for early cancer detection. *Biosensors*, 8(4), 111.
37. Ahmed, M., & Najeeb, M. (2019). SPR-based optical fiber sensors: A review. *Optik*, 184, 253–266.
38. Li, H., Wang, F., & Xu, Y. (2019). Optical microfiber sensors: Advances and applications. *Microsystem Technologies*, 25, 2899–2914.
39. Zhang, X., Zhao, W., & Li, Y. (2019). D-shaped fiber sensors: Design and applications. *Optical Fiber Technology*, 51, 69–80.
40. Lee, B., Kim, H., & Park, J. (2018). Microstructured optical fiber sensors for chemical and biological applications. *Sensors*, 18(3), 600.
41. Gao, S., Xu, J., & Liu, Q. (2020). Surface plasmon resonance optical fiber sensors: Fundamentals and applications. *Sensors*, 20(17), 4964.
42. Zhang, P., Wang, J., & Zhao, X. (2018). Fiber-tip microcavity sensors: A review. *Optics and Laser Technology*, 106, 392–405.
43. Xu, Z., & Wang, L. (2019). Nanostructured coatings for optical fiber sensors. *Nanotechnology*, 30(37), 372002.
44. He, J., Li, M., & Wu, Y. (2020). Photonic crystal fiber sensors for chemical detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 303, 127234.
45. Lin, C., & Chen, W. (2019). Advances in fiber-optic chemical sensors. *Optical Fiber Technology*, 48, 213–222.
46. Liu, R., Zhang, T., & Chen, Y. (2019). Fiber optic sensors for structural health monitoring. *Sensors*, 19(19), 4122.
47. Zhao, Q., & Li, Z. (2018). Hollow-core photonic crystal fiber sensors: A review. *Sensors*, 18(9), 2916.
48. Chen, G., Xu, L., & Wang, P. (2020). Optical fiber sensors for biomedical diagnostics. *Biosensors*, 10(2), 24.
49. Wang, X., & Yang, Y. (2019). Fiber-optic strain sensors for civil engineering. *Sensors*, 19(20), 4503.
50. Yu, L., Zhang, J., & Chen, K. (2020). Refractometric fiber optic sensors: Principles and applications. *Sensors*, 20(3), 789.
51. Singh, P., & Verma, R. (2019). Fiber optic biosensors: A review of trends and prospects. *Biosensors and Bioelectronics*, 134, 33–50.
52. Chen, X., Zhang, Y., & Zhao, M. (2018). Tapered optical fiber sensors for chemical sensing. *Sensors*, 18(6), 1763.
53. Kumar, A., & Sharma, P. (2020). Optical fiber sensors for environmental monitoring: Review and prospects. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 112.
54. Zhou, F., Wang, Q., & Chen, H. (2019). Polymer optical fiber sensors for biomedical applications. *Polymers*, 11(9), 1515.
55. Wang, L., Zhang, S., & Liu, Y. (2018). Recent advances in long-period fiber gratings for sensing. *Optics & Laser Technology*, 107, 89–99.
56. Park, J., Lee, H., & Choi, M. (2019). Whispering gallery mode optical sensors: Fundamentals and applications. *Sensors*, 19(19), 4019.
57. Jiang, M., He, Y., & Yang, H. (2020). Fiber-optic chemical sensors are based on fluorescence. *Sensors*, 20(4), 1031.
58. Xu, Y., & Zhao, L. (2019). Tilted fiber Bragg grating sensors: A review. *Sensors*, 19(13), 2940.
59. Li, W., & Gao, J. (2020). Advances in micro-ring resonator fiber sensors. *Photonics*, 7(3), 52.
60. Zhao, H., Zhang, Y., & Li, P. (2019). Hybrid plasmonic fiber sensors for chemical detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 301, 127084.