الأستاذ المشرف
الدكتور المهندس عبد المعين أحمد الرفاعي - أستاذ مساعد

اعداد الطالبة
ميسم العبد الله

اعداد الطالب
عبد الحميدعدنان قطان

اعداد الطالب
عبد الله موفق الرفاعي

اعداد الطالبة
فاطمة العلي

مسابقة أفضل حلقة بحثية طلابية
- طب الأسنان
- الصيدلة
- الهندسة (معلوماتية و اتصالات)
- الهندسة المدنية
- هندسة العمارة و التخطيط العمراني
- العلوم الإدارية و المالية

تحميل الحلقة البحثية

الملخص:

الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تصميم ومحاكاة هوائي بوقي جديد يعمل في مجال التيراهرتز ذو معامل انعكاس أمثلي. يستخدم الهوائي البوقي في الاتصالات نظراً لخصائصه الجذابة، مثل التوجيهية العالية والربح الكبير والنطاق العريض. لقد قام العديد من الباحثين بدراسة هذا النوع من الهوائيات، ومنها المخروطية والهرمية. التصميمات المقترحة لها نفس الشكل العام ولكن تختلف في الجدار الجانبي وتدرس تأثير الشكل على خصائص الهوائي. تم تصميم ومحاكاة أربعة نماذج للهوائي البوقي. تعمل التصاميم المقترحة في نطاق THz ولها نطاقات متعددة أو هي عريضة النطاق. جميع الهوائيات المقترحة الأربعة البوقية لها طبقتين من الذهب لأنه يعتبر ناقل كهربائي مثالي لا تتغير خصائصه على مقياس النانو. يتم استخدام منفذ دليل الموجة لإثارة هذا النوع من الهوائي البوقي عبر خط النقل. تم تقييم أداء كل من الهوائيات البوقية الأربعة المقترحة باستخدام البرنامج CST STUDIO SUITE، بهدف الوصول إلى التصميم الأمثل.

1- المقدمة:

حدث في العقود القليلة الماضية، تطور سريع في مجال الاتصالات الفضائية واللاسلكية. وبالتالي فإن الاتجاه الحالي والمستقبلي يركز على تصغير الحجم وتخفيض التكلفة [1]. إن الاتجاه لتصغير حجم الأجهزة يؤدي إلى تخفيض حجم الهوائي. لذلك، علينا تصغير حجم الهوائيات إلى بضعة ميكرومترات ضمن نطاق عريض من الترددات العالية التي تبدأ من نطاقات الأشعة تحت الحمراء إلى الترددات الضوئية [2]. يعد الهوائي البوقي أحد أبسط الهوائيات وهو الأكثر استخداما في نطاق الترددات البصرية والأشعة تحت الحمراء. الهوائي البوقي عبارة عن أنبوب مجوف ذو مقاطع عرضية مختلفة، في نهايته قد يكون مستدقًا أو منفرج إلى فتحة أكبر. يتأثر الأداء العام للهوائي باتجاه ونوع وطول وانحناء النهاية المفتوحة للهوائي [3]. يستخدم الهوائي البوقي كتغذية (horn Feed) للهوائيات الأكبر حجماً مثل هوائيات القطع المكافئ، يستخدم أيضاً كمعيار لقياس ربح الهوائيات الأخرى، وكذلك في الهوائيات التوجيهية مثل مدفع الرادار وفتح الأبواب التلقائي. يوفر الهوائي البوقي نطاقًا ترددياً عريضاً وربحاً عالياً ونسبة موجة واقفة منخفضة (VSWR).

2- تطبيقات الهوائي البوقي النانوي:

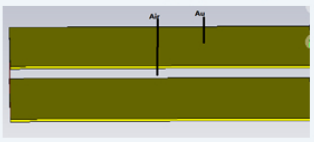
لقد دخل الهوائي البوقي النانوي في الوقت الحاضر في العديد من المجالات، منها:

- **في الفحص المجهري:** تمكن العديد من الباحثين من تطوير الفحص المجهري البصري بسبب البنيات النانوية [4].
- **في الاتصالات:** بسبب الطلب المتزايد على الاتصالات عالية السرعة والبيانات ذات السرعة العالية، هناك حاجة لاستخدام تردد العمل الأعلى للطيف الكهرطيسي. يلعب الهوائي النانوي دورًا كبيرًا ومهمًا في ذلك [5].
- **في الاستشعار:** البنية الصغيرة للهوائي تجعله أكثر حساسية للتغيرات البيئية [6].
- **في مجال حصاد الطاقة:** تتضمن مجموعة الهوائيات النانوية العديد من التطبيقات [7]. يتم توليد الكهرباء عن طريق إشعاع الجسم ، وعمليات التدفئة والتبريد داخل الملابس، وأنظمة التبريد من خلال تحويل الإشعاع الحراري تحت الأحمرIR إلى نوع آخر من الإشعاع، ومجمعات الطاقة وتبريد الأجهزة الإلكترونية مثل تلك التي تستخدم لتقليل حرارة أجهزة الكمبيوتر الشخصية (اللاب توب) بدلاً من المراوح التقليدية.
- **في المستوى الشمسي:** يتمتع الهوائي النانوي بالعديد من المزايا:
- يجب أن تكون الخلايا الكهروضوئية سميكة لامتصاص أفضل للطيف الشمسي، ومع ذلك فإن جزء كبير من الطيف الشمسي، وخاصة ضمن الأطوال الموجية (600-1100) nm، يكون امتصاصه ضعيفاً. إن استخدام الخلايا الكهروضوئية الكئيفة يخفض من الكفاءة، لذلك يمكن تقليل استخدام الخلايا الشمسية ذات الهوائي النانوي مع الحفاظ على ثبات السمك البصري [8].
- تعتمد الخلايا الشمسية الكهروضوئية على المبدأ الأساسي في عملهم. تعتمد العملية على توليد أزواج ثقب-الكترون والتي تقتصر على نطاق معين. يحتوي الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى الأرض على فوتونات ذات طاقة أعلى من طاقة الثقب في السيليكون، وبالتالي فإن الخلايا الشمسية سوف تمتص الفوتونات ذات الطاقة الأعلى. يمكن أن تسبب الطاقة المهدورة حرارة بسبب الفرق بين الثقب والإلكترون في السيليكون. ومع ذلك، يمكن لخلايا الهوائي النانوي الشمسي أن تمتص الطاقة بالكامل دون أي مشكلة [9].

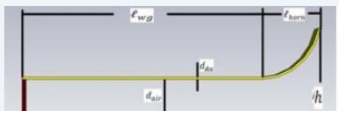
3- المحاكاة الحاسوبية لنماذج الهوائي البوقي النانوي الأربعة المقترحة:

3-1 التصميم الأول المقترح (الهوائي البوقي النانوي البسيط):

يتكون التصميم الأول للهوائي البوقي النانوي البسيط من طبقتين معدنيتين تمثلان دليل الموجة وفتحة فيزيائية في نهاية خط النقل. يتم استخدام منفذ الدليل الموجي لإثارة خط النقل، يمثل خط النقل المتناظر بـ Au-Air-Au، ويوضح الشكل 3.1 الرسم التخطيطي لخط النقل. وللحصول على انتشار ضمن ترددات تيراهيرتز، تم ضبط سماكة طبقات الذهب والهواء على 50nm و 500nm، على الترتيب. تم ضبط طول دليل الموجة P_{wg} وطول البوق P_{horn} على 4000nm و 2000nm على الترتيب، والارتفاع h مضبوط على 1500nm. ويوضح الشكل 3.2 الأبعاد الهندسية للهوائي.



الشكل (3.1)المقطع العرضي لخط النقل



الشكل (3.2) الأبعاد الهندسية للهوائي البوقي النانوي البسيط

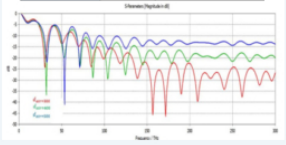
3-1 دراسة بارامترية للهوائي البوقي النانوي البسيط

3-1-1 تأثير تغير سماكة الهواء

تم تغيير أحد بارامترات الهوائي المقترح وهي سماكة طبقة الهواء كما هو موضح في الجدول 3.1. من الواضح أنه عند زيادة سماكة طبقة الهواء (d_{air}=500nm) تزداد قيمة معامل الانعكاس أكثر من السماكات الأخرى المقترحة، حيث تكون -22.28dB، و -41.09dB، و -24.27dB عند الترددات 32.9، و 53.49 و71.35 تيراهرتز على الترتيب. لذلك من المهم توضيح أنه يمكن تحسين معامل الانعكاس عن طريق زيادة سماكة طبقة الهواء. يظهر الشكل 3.3 معامل الانعكاس S_{11} المحسوب عند ترددات مختلفة لسماكات مختلفة لطبقة الهواء.

الجدول (3.1): مقارنة تصميم الهوائي المقترح بناءً على سماكة الهواء

Thickness of air d_{air}	S11 (dB)	Frequency resonant (THz)
d_{air}=300nm	-24.29	30.32
	-13.4	49.62
	-14.82	70.43
d_{air}=400nm	-36.73	32.106
	-19.84	52.74
	-22.39	71.29
d_{air}=500nm (proposed)	-22.28	32.9
	-41.09	53.49
	-24.27	71.35



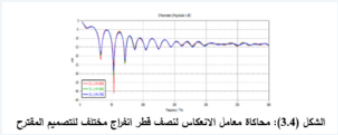
الشكل (3.3): سماكات مختلفة للهواء من أجل الهوائي المقترح

3-1-2 تأثير نصف قطر مختلف من الانفراج (الانحناءات):

تم أمثلة نصف قطر الانفراج r_f لتحقيق أفضل معامل انعكاس ويمكننا ملاحظة تأثير تغيير r_f على أداء التصميم المقترح كما هو ملخص في الجدول 3.2. في البداية، يتم أخذ قيمة r_fتساوي 1500nm ويتم زيادتها تدريجياً بمقدار 100nm حتى تصل إلى القيمة 1700nm. تجدر الإشارة إلى أنه عندما يكون r_f يساوي 1500nm، فإنه يمكن تحقيق أفضل قيم لمعامل الانعكاسS_{11} . كما يظهر في الشكل 3.4 مقارنة بمعامل الانعكاس S_{11} عند ترددات مختلفة لقيم مختلفة لـ r_f.

الجدول (3.2): نتائج تغيير نصف قطر انفراج مختلف للهوائي البوقي النانوي البسيط

Radius of curvatures	S11 (dB)	Frequency resonant (THz)
r_f =1500nm (proposed)	-22.28	32.9
	-41.09	53.49
	-24.27	71.35
r_f =1600nm	-19.56	32.75
	-31.46	53.204
	-24.2	71.607
r_f =1700nm	-18.68	32.766
	-28.31	52.839
	-21.92	71.307



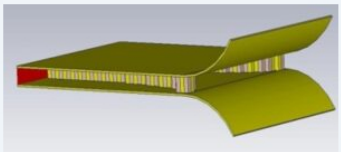
الشكل (3.4): محاكاة معامل الانعكاس لنصف قطر انفراج مختلف للتصميم المقترح

على الرغم من أن الهوائي المقترح يعمل على عمل ضمن مجال التيراهيرتز، إلا أن هناك بعض العيوب: على سبيل المثال، الإشارة لها توافقية، وعرض النطاق الترددي ضيق للغاية. وبناء على ذلك نستنتج أن هناك تسرب للإشارة، لذلك سنقوم ببعض التقنيات الجديدة للحصول على نتيجة أفضل وسنقوم بالتفصيل بالتصميم الثاني المقترح.

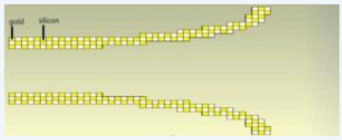
3-2 التصميم الثاني المقترح (الهوائي البوقي النانوي الذهبي – السيليكوني):

الهدف الأول الذي يجب دراسته في التصميم الجديد للهوائي النانوي البوقي الذهبي-السيليكوني هو حساب بارامترات خط النقل. التصميم المقترح مكون من طبقتين من الذهب تتقاطع مع الهواء وتدخل مجموعة من الفيات المربعة كما هو موضح في الشكل 3.5. تم ضبط سماكة طبقات الذهب على 50nm وطبقة الهواء على 400nm، وطول البوق (P_{horn}) يساوي 2000nm، وطول دليل الموجة (P_{wg}) يساوي 4000nm.

يتم ترتيب مجموعة المربعات عبر مادة ناقلة ومادة عازلة بالتناوب في شكل هندسي، كما هو موضح في الشكل 3.6.



الشكل (3.5): نظرة عامة على تصميم الهوائي البوقي النانوي الذهبي–السيليكوني



الشكل (3.6) تم تشكيل فيا مربعة من الذهب والسيليكون في الشبكة الهندسية المقترحة

3-2-1 دراسة بارامترية الهوائي البوقي النانوي الذهبي – السيليكوني

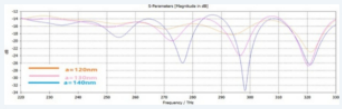
3-2-1-1 تأثير الطول المختلف لضلع المربع الذهبي (a)

يوضح الجدول 3.3 مقارنة بين قيم مختلفة لضلع الذهب المربع (a) . من الواضح أنه عندما يكون طول a يساوي 140nm، يمكننا الحصول على أفضل قيمة لمعامل الانعكاس من القيم الأخرى. ولذلك، يتم استخدام قيمة (a) هذه في تنفيذ الهوائي كطول ضلع المربع. كما يتم توضيح مقارنة معامل الانعكاس لقيم مختلفة لـ (a) في الشكل 3.7.

الجدول (3.3): مقارنة بين قيم مختلفة لطول ضلع المربع

The length of square side	S11 (dB)	Frequency resonant(THz)
a=120nm	-16.74	270.5
	-18.29	293.7
	-23.01	321.16
a =130nm	-19.95	272.57
	-23.89	296.53
	-26.74	320.3
a =140nm (proposed)	-25.97	276.42
	-33.42	298.17
	-26.43	321

الجدول (3.3): مقارنة بين قيم مختلفة لطول ضلع المربع

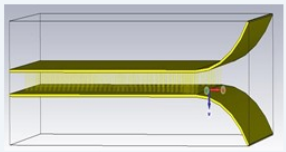


الشكل (3.7): مقارنة لمعامل الانعكاس لقيم مختلفة لطول ضلع المربع

من الواضح أن ترددات الرنين تتأثر عند تغيير مقدار (a). يلاحظ أن معامل الانعكاس يميل إلى الانخفاض مع زيادة قيمة البارامتر (a).

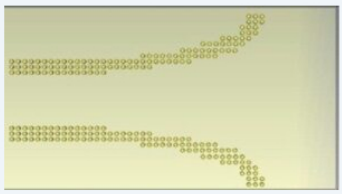
3-3 التصميم الثالث المقترح (الهوائي البوقي النانوي الذهبي-الأسطواني):

يتكون الهوائي البوقي النانوي الذهبي- الاسطواني المقترح من طبقتين ذهبيتين عند أحدى نهايات دليل الموجة الذي يمثل خط النقل ومنفرج عند فتحة النهاية. يمثل بُعد التصميم المقترح سماكة الذهب وطبقات الهواء التي تم ضبطها على 50nm و 400nm نانومتر على الترتيب، كما هو موضح في الشكل 3.8.



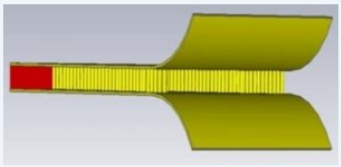
الشكل (3.8): هوائي نانوي بوقي ذهبي-أسطواني طبقتين فقط من الذهب

يتكون شكل الهوائي البوقي من دليل موجة معدني بطريقة تزيد الفتحة الفيزيائية وبالتالي ربح الهوائي وموافقة تدريجية لممانعة دليل الموجة مع الفراغ الحر. طول البوق (P_{horn}) يساوي 2000nm، وطول دليل الموجة (P_{wg}) يساوي 4000nm، تم ضبط ارتفاع الفتحة الرأسية (h) على 1500nm، ويعتبر نصف قطر الانحناء وزاوية الانفراج من البارامترات المهمة جدا التي تؤثر على الاتجاهية وربح الهوائي، التي تم ضبطهما على 1500nm و45° على الترتيب. يتم ترتيب فيا ذهبية أسطوانية في الشبكة الهندسية كما هو موضح في الشكل 3.9 a,b لتقليل تسرب الإشارة الكهرطيسية عبر دليل الموجة.



(a) تم تشكيل فيا ذهبية-اسطوانية في هذه

الشبكة الهندسية.



(b) نظرة عامة على تصميم الهوائي النانوي البوقي الذهبي-الاسطواني

الشكل (3.9): تصميم هوائي نانوي بوقي ذهبي-اسطواني (a) تم تشكيل فيا ذهبية-اسطوانية في هذه الشبكة الهندسية. (b) نظرة عامة على تصميم الهوائي النانوي البوقي الذهبي-الاسطواني

3-3-1 دراسة بارامترية للهوائي النانوي البوقي الذهبي-الاسطواني

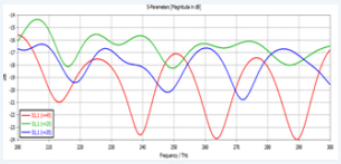
3-3-1-2 تأثير قيم مختلفة لنصف قطر فيا (r)

يتم تحديد نصف قطر فيا أو الفتحة (r) . تم أخذ ثلاث قراءات لتفسير نتائج الهوائي المقترح كما هو مبين في الجدول 3.4. يتم أخذ نصف قطر فيا لثلاث قيم مختلفة 25nm 35nmg و 45nm. إنها موافقة ممانعة جيدة عند 45nm، مقارنة معامل الانعكاس عند ترددات مختلفة موضح في الشكل 3.10.

الجدول (3.4): مقارنة للنموذج المقترح من أجل أنصاف قطر مختلفة لـ فيا

Radius of via	S11 (dB)	Frequency resonant (THz)
r=25nm	-18.11	215.92
	-18.25	249.35
	-17.99	287.54
r=35nm	-19.4	218.29
	-20.17	248.2
	-20.73	272.53
r=45nm (proposed)	-23.58	239.45
	-23.89	263.65
	-23.96	289.22

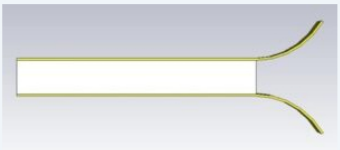
الجدول (3.4): مقارنة للنموذج المقترح من أجل أنصاف قطر مختلفة لـ فيا



الشكل (3.10): محاكاة معامل الانعكاس عند نصف قطر مختلف لـ فيا (r)

3-4 النموذج الرابع المقترح: الهوائي البوقي النانوي دليل موجة مدمج الركيزة

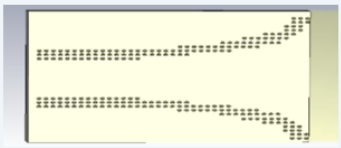
تم استخدام تقنية جديدة تسمى دليل الموجة مدمج الركيزة SIWفي التصميم الرابع للهوائي البوقي النانوي. يتكون التصميم المقترح للهوائي النانوي البوقي دليل الموجة مدمج الركيزة من طبقتين معدنيتين تمثلان خط نقل متحرض بواسطة منافذ دليل الموجة بموافقة تدريجية لممانعة دليل الموجة مع الفراغ الحر. سمك الذهب 50nm الطبقة العازلة Rogers RT5880 المدخلة بين طبقتي الذهب سمكها 800nm، وسماحيتها $\varepsilon_r = 2.2$ وظل خسارتها $\delta = 0.0009$ كما هو موضح في الشكل 3.11.



الشكل (3.11): الهوائي البوقي النانوي دليل موجة مدمج الركيزة أثنان من الذهب و Rogers RT5880

الشكل (3.11): الهوائي البوقي النانوي دليل موجة مدمج الركيزة أثنان من الذهب و Rogers RT5880

في طبقة الركيزة يتم عمل ثقوب على شكل هندسي محدد. يتم ملء هذه الثقوب بمادة ناقلة تسمى فيا، ويفضل أن تكون من نفس نوع الطبقات للحصول على موافقة أكبر كما هو موضح في الشكل 3.12 a,b.



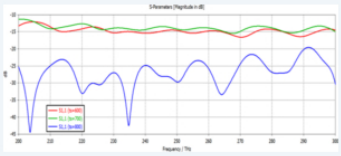
(a) يتم عمل الثقوب بمادة عازلة

(b) تستخدم فيا لملء الثقوب

3-4-1 دراسة بارامترية للهوائي النانوي البوقي دليل موجة مدمج الركيزة

3-4-1-1 تأثير سماكات مختلفة للعازل (ts)

يتم فحص سماكة المادة العازلة عن طريق اختيار ثلاثة قيم. من الواضح أنه عند سمك 800nm، فإن معامل الانعكاس S_{11} له أفضل قيمة تساوي -44.37dB, -42.4dB, -27.09dB, -29.63dB عند تردد الرنين (203.61, 234.7, 250, 282.68)THz وعرض النطاق الترددي يساوي 100THz. بالإضافة إلى ذلك، تظهر في الشكل 3.13 مقارنة بين سماكات مختلفة للعازل الكهربائي لتحديد خاصية معامل الانعكاس.



الشكل (3.13): محاكاة معامل الانعكاس لسمك مختلف للعازل الكهربائي

4- النتائج:

تمت المحاكاة لأربعة تصاميم للهوائي النانوي ولبارامترات تصميمية مختلفة لكل نوع، حيث وجد أن التصميم الأول هو الأسوأ كونه يعاني من تسرب للإشارة وعرض نطاق ترددي ضيق للغاية ضمن نطاق التيراهرتز. أما التصميم الثاني فقد أدى استخدام الفيا المكونة من تناوب من السيلكون والذهب إلى تحسين معامل الانعكاس. في التصميم الثالث تم استخدام فيا ذهبية اسطوانية أدت لتقليل تسرب الإشارة الكهرطيسية عبر دليل الموجة وبالتالي معامل انعكاس أفضل، أما التصميم الأخير فقد استخدم تقنية وهي عبارة عن دليل موجة مدمج الركيزة، حيث تم الحصول على أفضل معامل انعكاس من بين مختلف التصاميم وله أعرض نطاق ترددي يساوي 100THz.

5- المراجع:

- Ramesh et al, Microstrip Antenna Design Handbook, london: artechhouse, 2019.
- Amanti et al, "Horn Antennas for Terahertz Quantum CascadeLasers," *ELECTRONICS LETTERS*, vol. 43, no. 10, May 2017.
- Constiane A. Balanis, Advanced Engeineering Electromagnetics, New York: John Wily& Sons, 2018.
- Shubhendu , "Design and Analysis of Pyramidal Horn Antenna at 8 GHz Frequency," *International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering*, vol. 3, no. 2, February 2014.
- Krasnok A. et al, "Optical Nanoantennas," *Physics – Uspekhi*, 56, no. 6, November 2022.
- Tadao et al, "Advances in Terahertz Communications Accelerated by Photonics," *NATURE PHOTONICS*, vol. 10, June 2016.
- Kumud Jha and Singh G. , "Terahertz Planar Antennas for FutureWireless Communication: Atechnical review," *Elsevier*, 2013.
- Garcia-Parajo , "Optical Antennas Foucs in on Biology," *Nat. Photon. 2*, 2018.
- Andrea A. and Nader E., "Theory, Modeling and Features of Optical Nanoantennas," *IEEE,*