

تصميم هوائي بصري نانوي من الألمنيوم باستخدام السطوح البلازمية

م.م. علي عزاوي حسن

المديرية العامة لتربية النجف الاشرف

Design of an aluminum optical nanoantenna using plasmonic metasurfaces

Ali Azzawi Hasan

Najaf Education directorate

lalmdny449@gmail.com

الخلاصة:

تم في هذا البحث إجراء محاكاة حاسوبية عن طريق برنامج OPTIFDTD لشريحة مكونة من معدن الألمنيوم وثنائي أكسيد السيلكون وهي تعتبر بنية جديدة لأن أغلب هذا النوع من هوائيات مصنوع من الذهب وثنائي أكسيد السيلكون ودراسة تأثير إضافة الألمنيوم على الخواص البصرية لهذا الهوائي من حيث المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي وبعض الخواص الأخرى من خلال تصميم مجموعة من الأطوال للهوائي ودراستها.

Abstract:

In this research, a computer simulation was carried out using the OPTIFDTD program for a chip consisting of aluminum metal and silicon dioxide, which is considered a new structure because most of this type of antenna is made of gold and silicon dioxide, and a study of the effect of adding aluminum on the optical properties of this antenna in terms of electric field and magnetic field And some other properties by designing and studying a range of antenna lengths.

أهداف البحث :

يهدف البحث إلى تصنيع هوائي بصري نانوي من معدن الألمنيوم يماثل مثيله المصنوع من الذهب حيث الاقتصاد في التكلفة ودراسة تأثير استبدال الذهب بالألمنيوم ، كما يدرس إمكانية تغيير أبعاد الهوائي لكي يعوض استبدال خصائص الهوائي المعدني المصنوع من الذهب .

المقدمة :

تم طرح المفهوم الأول للهوائي النانوي البصري بواسطة مجموعة K.B.Crozier من جامعة ستانفورد ، مشيرة إلى أن هذا الجهاز الضوئي النانوي الذي يجمع بين الموجات الكهرومغناطيسية والتردد البصري وصولاً إلى نطاق الطول

الموجي الفرعي بشكل فعال باستخدام تأثيرات البلازمون السطحي والتي تكون قادرة على تحقيق تركيز نانومتري وتتيح إمكانية المعالجة البصرية لمقياس النانو ونقلها.

هناك العديد من آفاق التطبيق الجذابة في مجالات عدة كدقة المجهر الفائق التصوير ، الخلية الشمسية الفعالة و تخزين البيانات الضوئية عالية الكثافة ، وتشير النتائج النظرية و البحث التجريبي أيضًا إلى أن تصميم الهوائي النانوي لا يمكن أن يعتمد على نظرية هوائي المايكرويف فقط وهذا يولد صعوبة لتصميم هوائي لموجة محددة.[1]

وعلى مدى السنوات العشر الماضية ، كانت هناك زيادة في البحث في الخصائص البصرية للمعادن والجسيمات النانوية إذ من المعروف أن البنى النانوية المصممة بشكل صحيح تنتج ما يسمى النقاط الساخنة حيث يتم تعزيز المجال الكهرومغناطيسي الحادث من خلال عدة مراتب من الحجم و تفتح الأصداء البلازمية المرصودة في مثل هذه الهياكل إمكانية بناء هوائيات تعمل في الطيف المرئي [2، 3].

ويمكن استخدام النقاط الساخنة الخاصة بهم لإحداث تأثيرات غير خطية ولربط الإشعاع الكهرومغناطيسي بكفاءة بين الهوائيات والبواضع ثنائية القطب و تُظهر التقنيات التجريبية مثل التحليل الطيفي لرامان المحسن بفعل الحافة أو التحليل الطيفي لرامان المحسن للأسطح مع إمكانية ظهور هذه النقاط الساخنة للكشف عن البواضع الإشعاعية التي تتعرض لحساسية منخفضة [4,5].

تمت مناقشة الخصائص البصرية لأنواع مختلفة من الهوائيات خلال السنوات القليلة الماضية و يبدو أن اثنين من الأشكال الهندسية ، أي ثنائي القطب وهوائيات ربطة العنق ، تتحdan بطريقة فريدة من نوعها من حيث تشكيل بقعة ساخنة قوية في الفجوة وتناغم الصدى بهم، إذ تم تعزيز المجال القوي لهوائيات ثنائي القطب بسهولة من خلال توليد استمرارية الضوء الأبيض [3]. إذ تم استخدام هوائيات Bowtie مؤخرًا لتحقيق توليد في المجال القريب [6].

تجمع الهوائيات "Bowtie" ، المكونة من مثلثين معدنيين يواجهان طرفًا إلى طرف مفصولة بفجوة صغيرة ، بين الخصائص الكهرومغناطيسية للحواف المعدنية الحادة وتلك الخاصة بأزواج الجسيمات النانوية الرنانة للبلازمون (Plasmon) و تم اقتراح هوائي البوتاي لأول مرة في نظام المايكرويف [7].

هذه الهوائيات تُعرف أيضًا باسم الهوائيات الضوئية ، وتمثل أجهزة اقتران الضوء التي تتكون من جزيئات معدنية أحادية أو متعددة النانومتر مدمجة. بالمقارنة مع الهوائيات التقليدية في نطاق الترددات الراديوية ، تستخدم هوائيات النانو مفهومًا جديدًا في المنطقة البصرية وتلهم اهتمامات واسعة النطاق مؤخرًا. يتم تنفيذ وظيفة الهوائي النانوي من خلال رنين

البلازموں السطحي (SP) القريب من المجال الذي يستثيره مصدر الضوء ، والذي يحدث عند السطح البيني بين الهيكل المعدني للهوائي والمواد المدمجة فيه. هذه الإثارة SP يمكن أن تنتج مجالاً كبيراً مركزاً ومطابقاً للغاية يحيط بالهوائي النانوي ، وبالتالي يحسن بدرجة كبيرة الدقة في بصريات المجال القريب ، علاوة على ذلك ، فإن المجال المعزز عبر بقعة الضوء القوية التي ينتجها هوائي النانو يعتمد بشكل كبير على هيكله [8].

تم توضيح مسار المجهر الضوئي لمسح المجال القريب المتكامل مع فتحة ربطة النانو من أجل تعزيز الإرسال البصري. تتيح فتحة الفجوة وضع الانتشار في منطقة فجوة ربطة العنق ، والتي تتيح الدقة البصرية النانوية المتزامنة والإرسال البصري المحسن. يتم إظهار الخصائص البصرية لفتحة ربطة العنق عن طريق قياس الحقول القريبة البصرية التي تنتجها الفتحة. يتبين أن تحقيقات فتحة ربطة العنق لها ترتيب واحد من زيادة الحجم في الإرسال على مجسات ذات فتحة منتظمة الشكل بنفس الدقة. كما إن نتائج التصوير باستخدام فتحة ربطة العنق تتفق مع تلك التي تم الحصول عليها من الحسابات العددية [9].

تتوقع نظرية الهوائي أن الحقول الكهربائية (الحقول الإلكترونية) يتم تعزيزها على مقربة من نقاط المعدن الحادة بنصف قطر انحناء أصغر بكثير من الطول الموجي للإضاءة الساقطة ، وهو ما يسمى تأثير (مانعة الصواعق) الذي تم تطبيقه مؤخراً على الترددات البصرية ، لقد تم استغلال تحسين المجال الإلكتروني في أنظمة المجال القريب لإنتاج مصدر ضوئي صغير جداً شديد الكثافة يحتوي على تطبيقات في التخزين البصري عالي الكثافة و التصوير البصري عالي الدقة والتحليل الطيفي بالليزر [10].

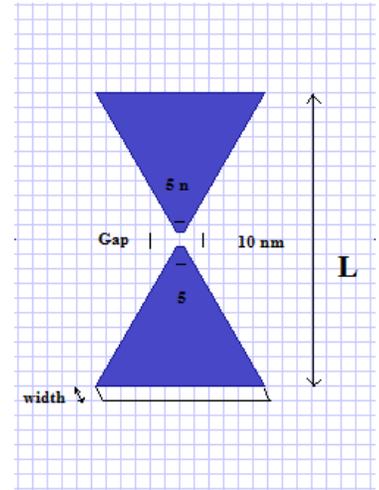
أدت التطورات في تقنية تسجيل البيانات الضوئية إلى زيادة في كثافة التخزين ، وإنتاج أنظمة ذاكرة بصرية تيرابايت ، كما انه في الأنظمة البصرية التقليدية ، يحدّ حيود الضوء من دقة النقطة الضوئية المراد استخدامها لتسجيل البيانات البصرية وقراءتها. كما إن حجم البقعة بدوره يحدد كثافة التخزين، و في الممارسة العملية ، يمكننا تقليل حجم البقعة الضوئية باستخدام مصدر ضوء أقصر طولاً موجياً ، مثل أشعة الليزر الأزرق ، أو نظام بصري عالي العدسة (NA) [11].

تم البرهنة على أنه يمكن تصميم هوائيات الذهب ثنائي القطب وتصنيعها لتتناسب مع الأطوال الموجية البصرية ، وعند الإضاءة باستخدام نبضات ليزر بزمن بيكو ثانية يتم توليد إشعاع فائق للضوء الأبيض (WLSC) في فجوة تغذية الهوائي بالإضافة إلى لمعان ضوئي ثنائي الفوتون (TPPL) في أذرع الهوائي و يبلغ الانبعاث الناتج عن الهوائيات أكثر من 10^3 أضعاف قوته من النماذج الذهبية الصلبة ذات الأبعاد نفسها ولكن دون فجوة في التغذية [12].

من بين تنوع الهياكل النانوية البلازمية المدروسة ، أثارت قضبان المعادن النبيلة اهتمامًا خاصًا بمجموعة واسعة من التطبيقات التي يمكن أن تسهم فيها ، على سبيل المثال ، تم استخدامها كعوامل تباين فعالة في التصوير الحيوي أو لتوجيه الضوء من خلال المقاطع العرضية الصغيرة ، بعد ذلك ، يمكن استخدام قضبان معدنية كهوائيات بصرية أولية لتوسيع نطاق مفاهيم الهوائي المعروفة في الموجات الراديوية وصولاً إلى النظام البصري ، كما إن الطباعة الحجرية ذات الدقة الإلكترونية تصبح مرهقة عند التعامل مع الأسطح غير المسطحة. [13]

يمكن تنفيذ هذا الجهاز في مجموعة واسعة من أشباه الموصلات الليزر التي تنبعث في المناطق الطيفية التي تتراوح من مرئية إلى الأشعة تحت الحمراء البعيدة والذي قد يكون مفيدًا في العديد من التطبيقات بما في ذلك المجاهر الضوئية القريبة من المجال وتخزين البيانات البصرية والتسجيل المغناطيسي بمساعدة الحرارة. [14]

وتُستخدم طريقة الفرق المحدود للمجال الزمني (FDTD) لدراسة الخصائص العددية لفتحة إرسال هوائي النانو حيث يتم تحريض بلازمون السطح الموضعي (LSP) على حواف الفتحة في فيلم فضي ولكن له تأثير سلبي على تباين الإشارة وتركيز الحقل ، في حين أن الألمونيوم يعمل بشكل مشابه للموصل المثالي إذا كان سمك الفيلم أكبر بعدة مرات من عمق السطح المحدد [15].



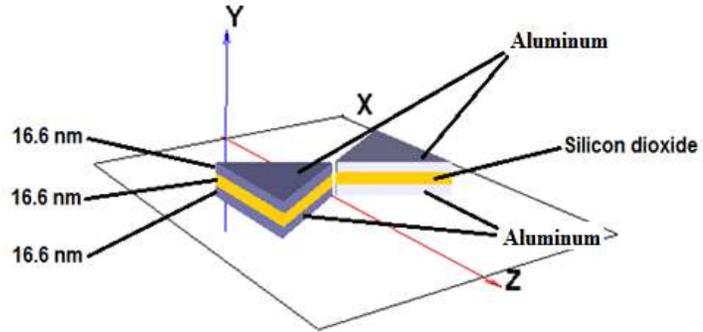
مواصفات نموذج الهوائي :

تم بناء نموذج الهوائي بسبعة أطوال هي :

(200 nm , 250 nm , 300 nm , 350 nm , 400 nm , 450 nm , 500 nm)

وبعرض متناسب مع كل طول بحيث تكون كل الهوائيات لها زاوية واحدة مقدارها (60°) وفجوة (Gap) بين جزئي الهوائي مقدارها (10 nm) وجزئي الهوائي الداخليان غير مدببين ومساحة سطح كل منهما هو (5 nm) كما في الشكل (1) .

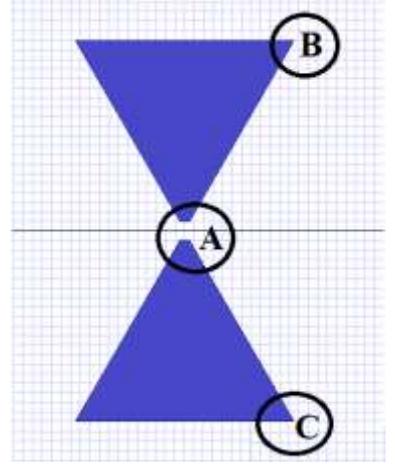
كما إن سمك الهوائي هو (50 nm) تنقسمه الطبقات الثلاث بعرض متساوي مقدارها $(16.6 + 16.6 + 16.6)$ أما عن مكونات الهوائي فتكون طبقات الهوائي الخارجية من مادة الألمنيوم وأما وسط الهوائي فهو من مادة عازلة هي ثنائي أكسيد السيليكون (SiO_2) ، وكما هو موضح في الشكل (2) .



شكل (2)

شروط المحاكاة وأماكن قياس شدة المجال الكهربائي :

تمت المحاكاة باستخدام برنامج (OptiFDTD) بالطريقة ثلاثية الأبعاد (3D) وبطول موجي (500 nm) ، ولجميع النماذج وهذا الطول الموجي يقع ضمن الطيف الكهرومغناطيسي المرئي .
تم قياس المجال الكهربائي (E_y) على ارتفاع (5 nm) فوق سطح الهوائي (أو على ارتفاع 55 nm من حافته السفلية) (والأخرى 5 nm) تحت النهاية السفلية للهوائي بالنسبة للأطراف (B) و (C) أما منطقة الفجوة (Gap) فتم القياس على ارتفاعات (5 nm) تحت السطح و (5 nm) فوق النهاية السفلى (في وسط الهوائي) و (5 nm) فوق النهاية السفلى (أي 5 nm) فوق السطح ، كما في الشكل (3) .

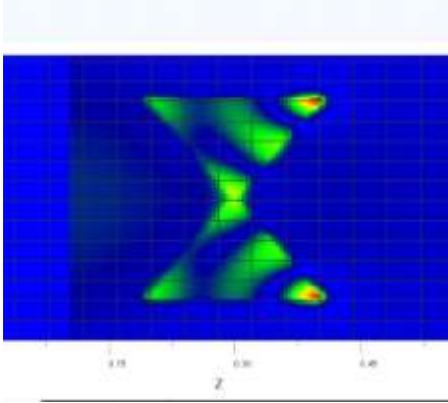


شكل (3)

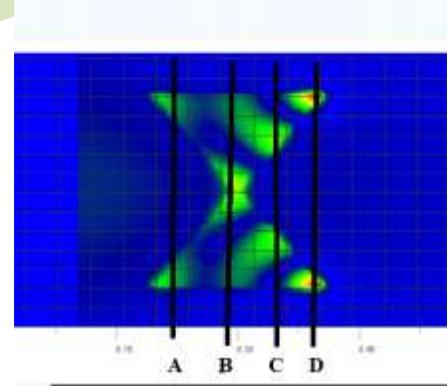
مناقشة نتائج توزيع المجال الكهربائي :

نلاحظ من خلال شكل المجال الكهربائي أن المجال الكهربائي يتوزع على الهوائي بثلاثة أنماط :

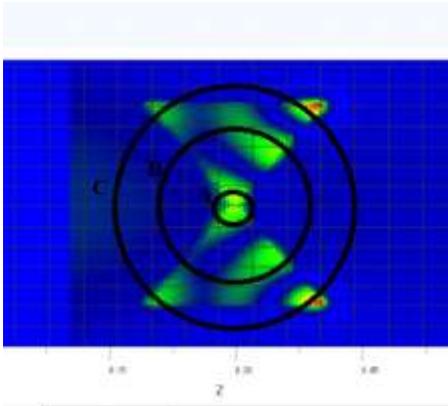
- 1) يتوزع المجال الكهربائي على جهتي الهوائي العليا والسفلى بشكل متناظر تقريباً ، أي أنه انعكاس أفقي للمجال الكهربائي في كلا قطعتي الهوائي كما في الشكل (5).
- 2) الموجة الداخلة إلى الهوائي ترفع قيمة المجال الكهربائي في الطرف الأيسر للهوائي (اتجاه مصدر الموجة) وبشكل خطوط عمودية موازية لطول الهوائي ، وتتوالى بعدها قمم وقعر الموجات كما في الشكل (6).
- 3) الموجة الناتجة من الهوائي والتي مصدرها الفجوة (Gap) للهوائي تنتشر بجميع الاتجاهات بشكل دوائر متحدة المركز كما في الشكل (7).
- 4) إن نتيجة التداخل تظهر لنا الأشكال التالية، حيث يتحد المجال الكهربائي للموجة الداخلة إلى الهوائي مع المجال الكهربائي المتولد من الفجوة والذي يكون مختلف عن الموجة الداخلة لكونه بشكل دوائر متحدة المركز كما في الشكل (8).



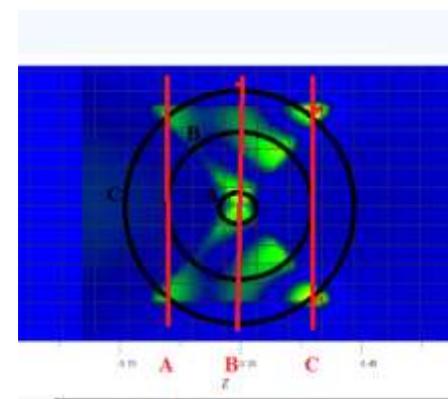
الشكل (6)



الشكل (5)



الشكل (8)



الشكل (7)

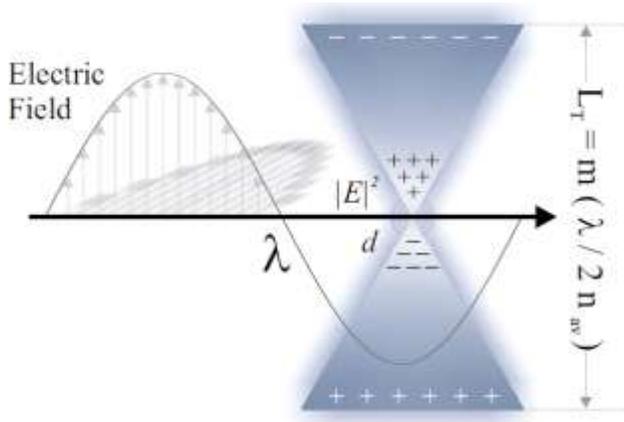
مخطط (1)

مناقشة نتائج قيم المجال الكهربائي :

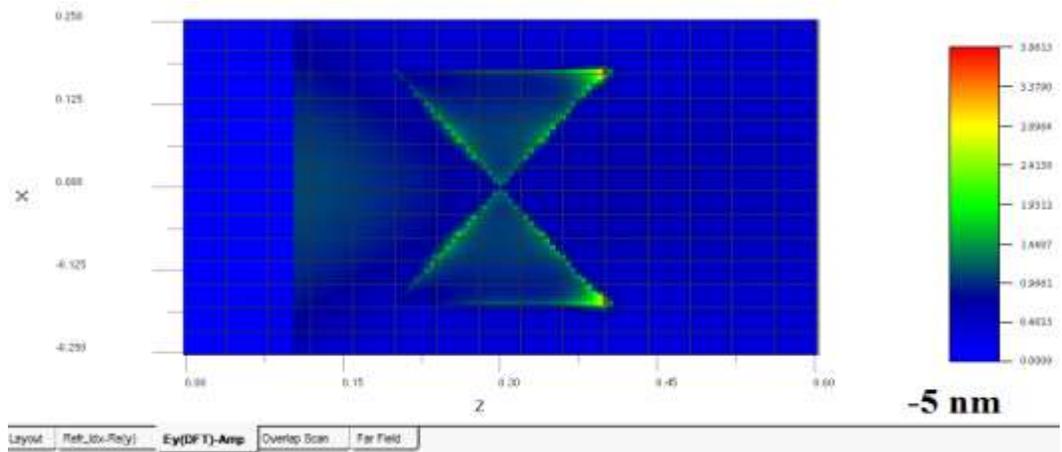
نلاحظ من خلال المخطط البياني أن ذروة المجال الكهربائي (E_y) تقع ضمن طول الهوائي (350 nm) $L =$ وفي كل نقاط هذا الهوائي عدا النقطتين (5 nm) Gap (55 nm) Gap الأولى تقع أسفل مستوى الهوائي بمقدار عمقه (5 nm) والثانية في نقطة أعلى من سطح الهوائي بمقدار (5 nm) في حين أن المجال الكهربائي في نقطة العمق الوسطي (25 nm) يكون هو الأعلى حيث يتركز المجال في وسط الشكل ويقل عند الأعلى والأسفل .

أما بالنسبة لبقية أطراف الهوائي (باقي زوايا المثلث) فتكون أعلى قيمة للمجال الكهربائي عند طول الهوائي $L = (350 \text{ nm})$ كما هو واضح من المخطط السابق .

أن العلاقة المحتملة بين طول الهوائي $L = (350 \text{ nm})$ والطول الموجي $\lambda = (500 \text{ nm})$ والتي يتوافق فيها هذا الطول مع هذا الطول الموجي هي :



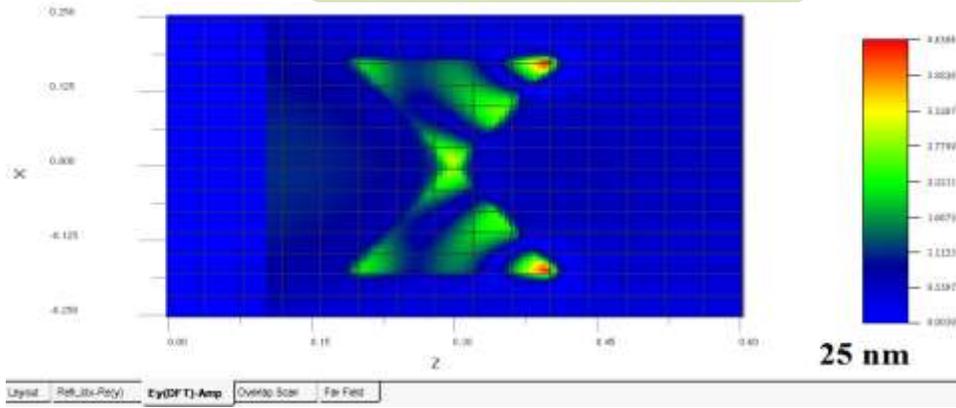
شكل ٤ (العلاقة بين طول الهوائي وطول الموجة)



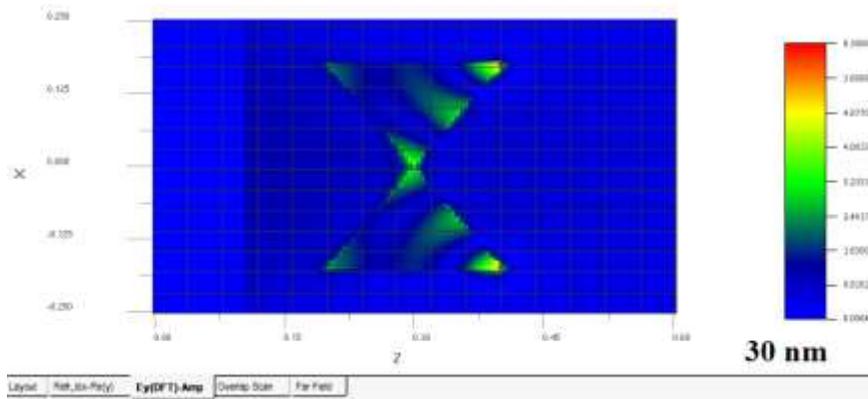
تبيين الأشكال من (9-12) شكل المجال الكهربائي على أطراف الهوائي ذي الطول (350 nm) ومنها يتضح أن تركيز المجال الكهربائي يكون في منتصف العازل عند عمق (30 nm) أو عمق (25 nm)

عدد خاص بالمؤتمر التربوي والتعليمي العاشر لرابطة التدريسيين التربويين
تصميم هواني بصري نانوي من الألمنيوم باستخدام السطوح البلازمية

مجلة كلية التربية الأساسية للعلوم التربوية والإنسانية
مجلة علمية محكمة تصدر عن كلية التربية الأساسية - جامعة بابل

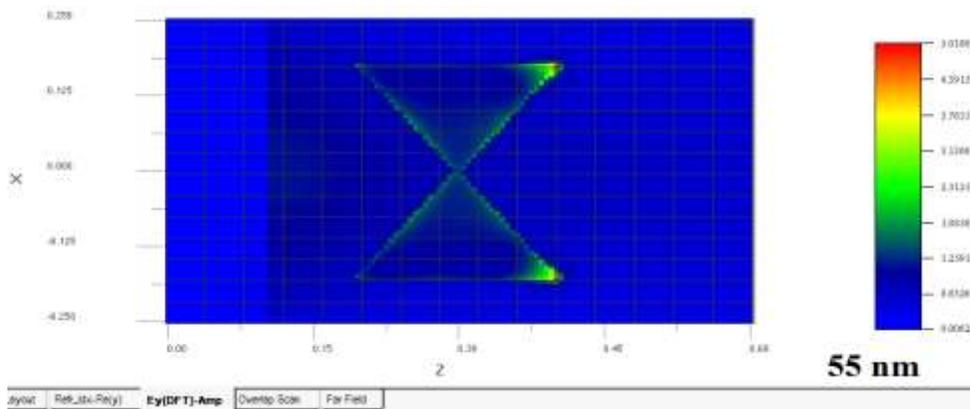


شكل (٩)

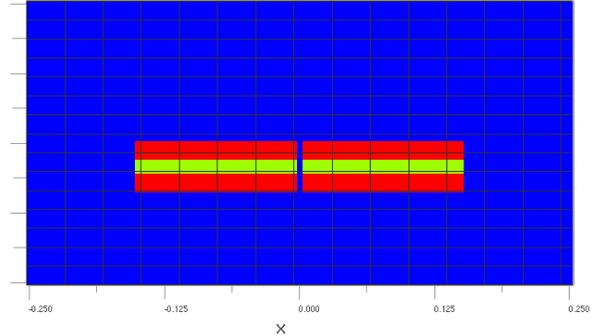


شكل (١٠)

شكل (11)

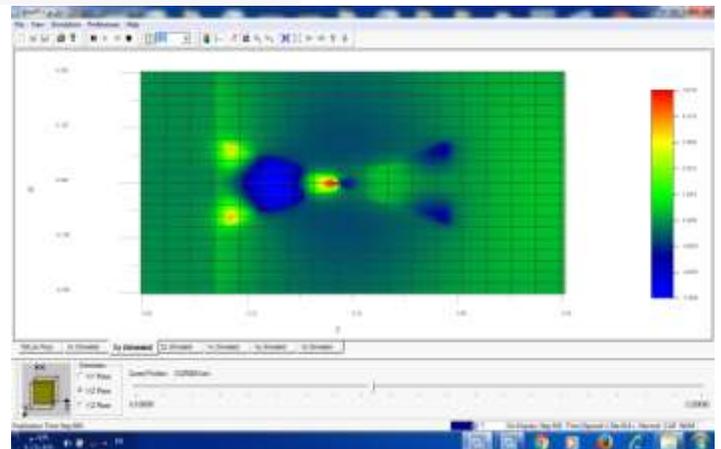
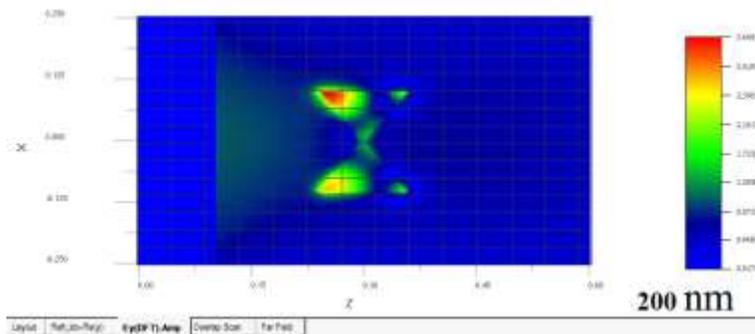


شكل (١٢)



وعند اخذ مقطع عرضي لهذا الهوائي يتضح أن قمة المجال الكهربائي تكون داخل العازل وفي منطقة الفجوة (Gap) تحديداً، كما هو واضح في الشكلين (13 ، 14)

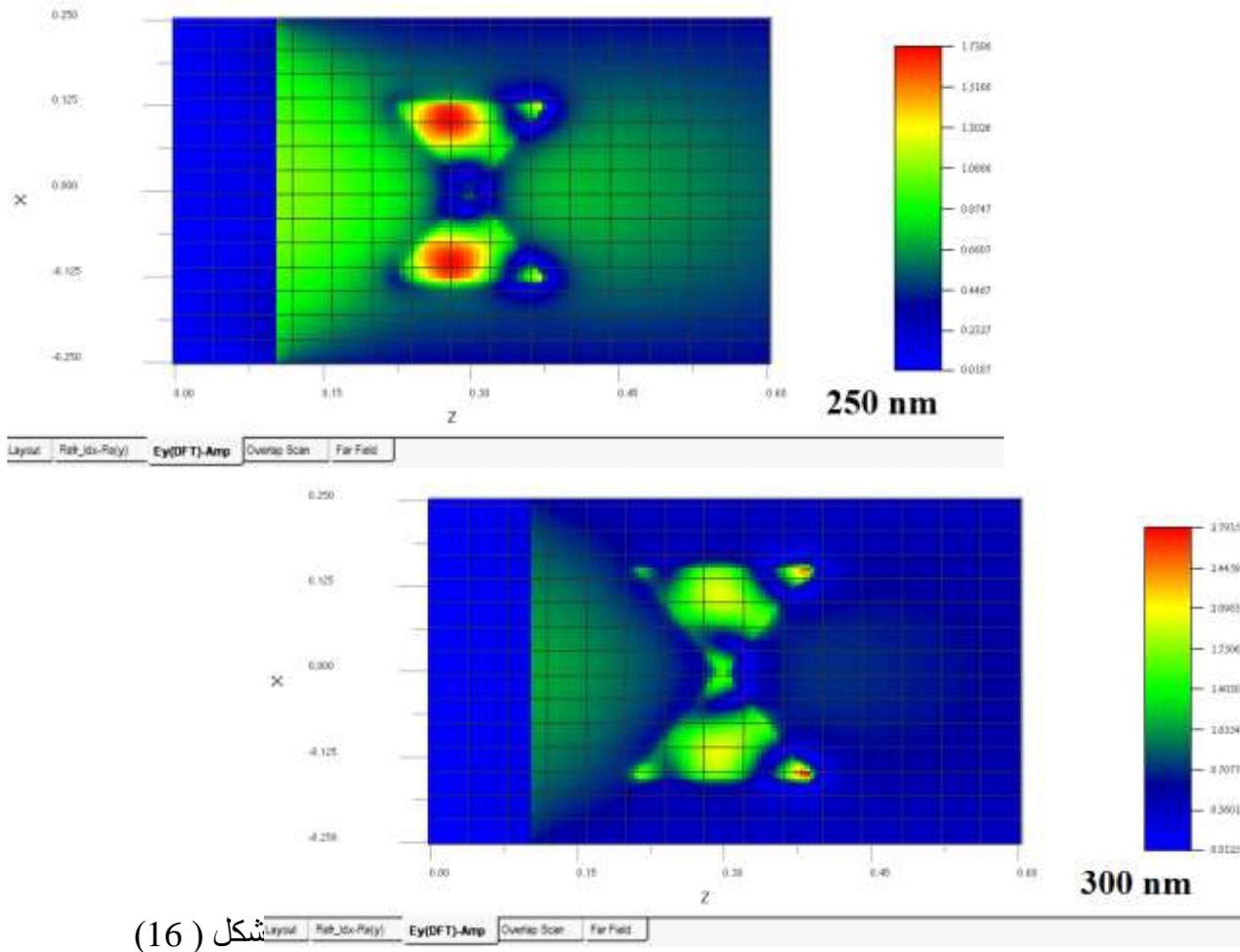
شكل (13)



شكل (14)

و عند مقارنة نماذج الهوائيات المختلفة في طولها فقط نلاحظ تميز المجال الكهربائي للهوائي الذي يبلغ طوله (350 nm) حيث يتناغم طول الهوائي مع الطول الموجي عند هذا الطول كما بيننا سابقاً وكما هو واضح من الأشكال (15 - 21)

شكل (15)

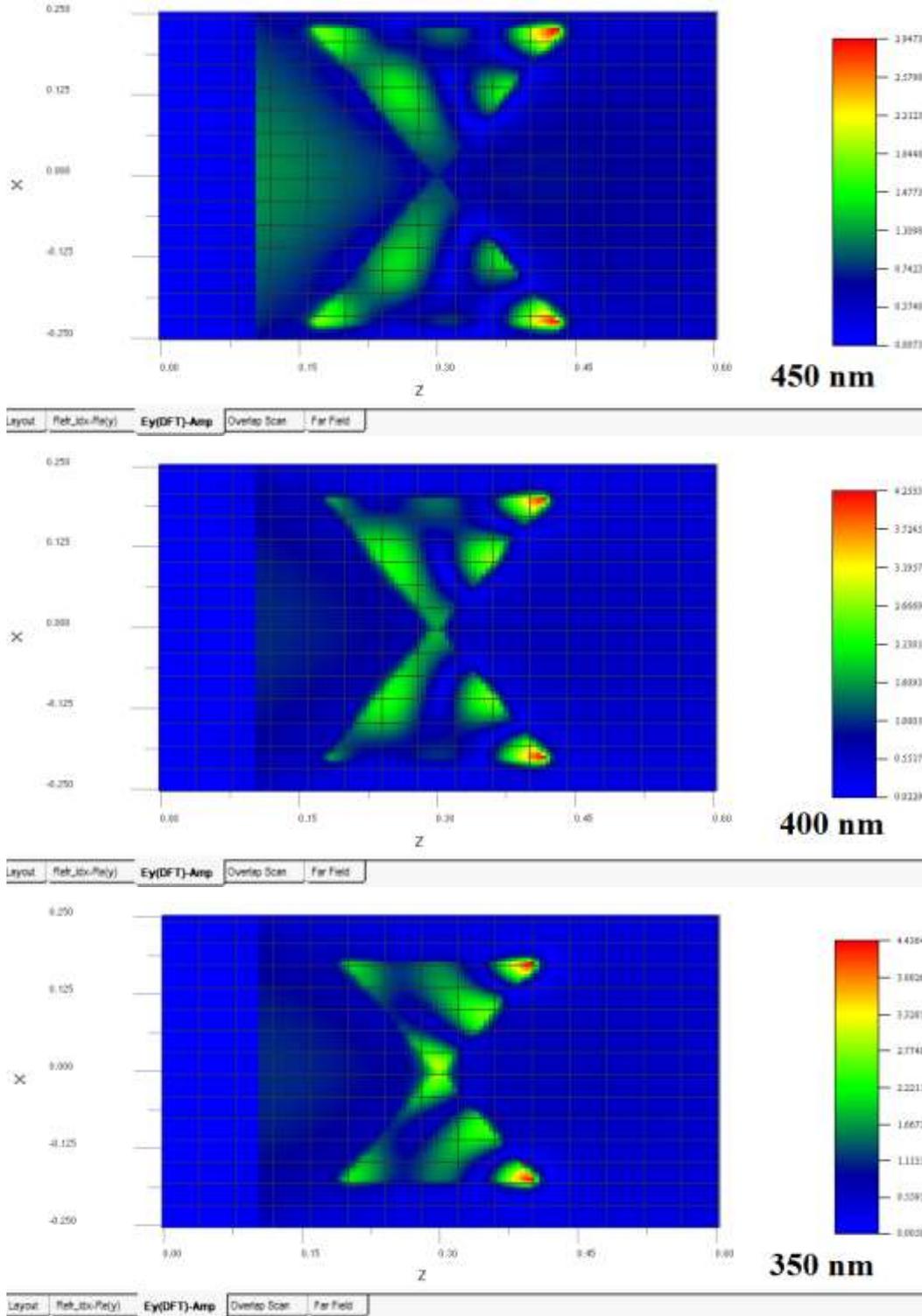


شكل (16)

عدد خاص بالمؤتمر التربوي والتعليمي العاشر لرابطة التدريسيين التربويين
تصميم هواني بصري نانوي من الألمنيوم باستخدام السطوح البلازمية

مجلة كلية التربية الأساسية للعلوم التربوية والإنسانية
مجلة علمية محكمة تصدر عن كلية التربية الأساسية - جامعة بابل

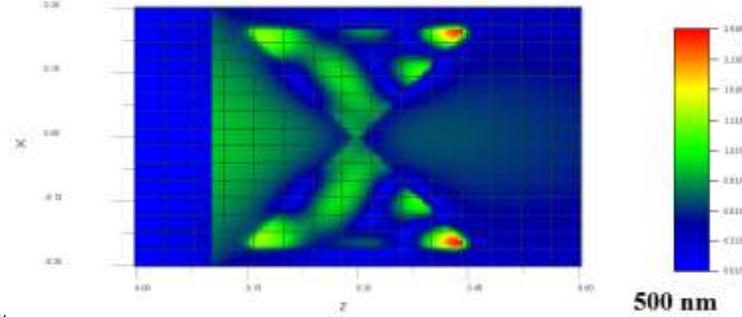
شكل (17)



عدد خاص بالمؤتمر التربوي والتعليمي العاشر لرابطة التدريسيين التربويين
تصميم هواني بصري نانوي من الألمنيوم باستخدام السطوح البلازمية

مجلة كلية التربية الأساسية للعلوم التربوية والإنسانية
مجلة علمية محكمة تصدر عن كلية التربية الأساسية - جامعة بابل

الأشكال من الأعلى إلى الأسفل (18 - 19 - 20)



الشكل (21)

المصادر :

- [1] [Zhan I ، .Shi J ، .Wen S .and Dong K" ،"Design of Resonant Optical Nano-antenna for 1.55μm wavelength ، "Institutes of Electrical and Electronics Engineers ، 2011, 10,1109
- [2] Fromm D. P., Sundaramurthy A., Schuck P. J., Kino G., and Moerner W. E., "Gap-Dependent Optical Coupling of Single "Bowtie" Nanoantennas Resonant in the Visible", Nano Lett.,2004, 4, 957-961.
- [3] M'uhlschlegel P. , Eisler H.-J. , Martin O. J. F. , Hecht B. , and Pohl D. W., " Resonant optical antennas" ,Science , 2005, **308**, 1607-1608 .
- [4] Nie S. , and Emory S. R. , " Probing Single Molecules and Single Nanoparticles by Surface-Enhanced Raman Scattering" , Science , 1997 , **275**, 1102-1106.
- [5] Taminau T. H. , Stefani F. D. , Segerink F. B. and Van Hulst N. F. , " Optical antennas direct single-molecule emission" , Nature Photonics 2, 2008 , 234-237.
- [6] Fischer H. and Martin O. J. F. ," Engineering the optical response of Plasmonic nanoantennas" , OPTICS EXPRESS , 2008,Vol. 16, No. 12 , 9144
- [7] Schuck P. J., Fromm D. P., Sundaramurthy A., Kino G. S., and Moerner W. E., "Improving the Mismatch between Light and Nanoscale Objects with Gold Bowtie Nanoantennas", PHYSICAL REVIEW LETTERS,2005,PRL **94**, 017402
- [8] Yu-Ming W. , Le-Wei L. , and Liu B. , "Gold Bow-Tie Shaped Aperture Nanoantenna: Wide Band Near-field Resonance and Far-Field Radiation", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 2010,vol. 46, No. 6, 1918-1921.

عدد خاص بالمؤتمر التربوي والتعليمي العاشر لرابطة التدريسيين التربويين
تصميم هواني بصري نانوي من الألمنيوم باستخدام السطوح البلازمية

مجلة كلية التربية الأساسية للعلوم التربوية والإنسانية
مجلة علمية محكمة تصدر عن كلية التربية الأساسية - جامعة بابل

- [9] Wang L. and Xu X. , "High transmission nanoscale bowtie-shaped aperture probe for near-field optical imaging , APPLIED PHYSICS LETTERS ,2007, 90, 261105 .
- [10] Fromm D.P., Sundaramurthy A., James Schuck P., Kino G. and Moerner W. E. , "Gap-Dependent Optical Coupling of Single "Bowtie" Nanoantennas Resonant in the Visible" , NANO LETTERS, 2004, vol .4, No .5,957-961.
- [11] Park S. and Won Hahn J. , "Plasmonic data storage medium with metallic nano-aperture array embedded in dielectric material" , OPTICS EXPRESS,2009, Vol. 17, No. 22,20203-20210
- [12] Muhlschlegel P. , Eisler H. J. , Martin O. J. F. , Hecht B. , Pohl D. W. , "Resonant Optical Antennas", SCIENCE , 2005 ,vol 308 ,1607.
- [13] Graells S. , cimovic S. ,Volpe G. and Quidant R., "Direct Growth of Optical Antennas Using E-Beam-Induced Gold Deposition" , Plasmonics , 2010 ,vol. 5,135–139
- [14] Cubukcu E., Kort E. A. , Crozier K. B., and Capasso F. , "Plasmonic laser antenna", APPLIED PHYSICS LETTERS, 2006, 89,093120.
- [15] JIN E. X. and XU X., " Finite-Difference Time-Domain Studies on Optical Transmission through Planar Nano-Apertures in a Metal Film" , Japanese Journal of Applied Physics , 2004,Vol. 43, No. 1, pp. 407–417