



بیست و دومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هشتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۶ تا ۸ بهمن ماه ۱۳۹۴، دانشگاه یزد



حسگر زیستی فوتونیک بر پایه نانوتوری طلا/ مغز

فوزیه سهرابی، سیده مهری حمیدی*

دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما، آزمایشگاه مگنتوپلاسمونیک، تهران، ایران ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱

*m_hamidi@sbu.ac.ir

چکیده - در این مقاله حسگر زیستی مبتنی بر توری پلاسمونی (بلورپلاسمونی یک بعدی) پیشنهاد گردیده است. نمونه ی زیستی مورد بررسی برشی از مغز موش می باشد. توزیع میدان در ساختار پیشنهادی با استفاده از روش معین فوریه (FMM) تصور شده است. علاوه بر این، جهت بررسی تاثیر دوره ی تناوب در میزان عبور نور، جاروب دوره ی تناوب از ۱۵۰ الی ۹۵۰ نانومتر برای ضخامت های متفاوت توری شامل ۱۵۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ نانومتر صورت گرفته است. پهنا در نصف مقدار بیشینه (FWHM) برای نمودارهای ترسیم شده مورد بررسی قرار گرفته و نهایتاً ضخامت ۲۵۰ نانومتر که سه کمینه با باریکترین پهنا در نصف مقدار بیشینه را ارائه می دهد انتخاب گردید. در بین این سه کمینه دوره تناوب ۵۹۵ نانومتر بهینه ترین پاسخ حسگری را می تواند فراهم آورد.

کلید واژه- پلاسمون، حسگر، روش معین فوریه، مغز.

Bio-photonic sensor based on Au/Brain nano grating

Foozieh Sohrabi, Seyedeh Mehri Hamidi*

Magneto-plasmonic Lab, Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

(* m_hamidi@sbu.ac.ir)

Abstract- In this paper, a biosensor based on plasmonic grating (1D plasmonic crystal) has been investigated. The biological sample was the slice of the brain mouse. The field distribution has been visualized by Fourier Modal Method (FMM) which is suitable for periodic structures. In addition, the grating period has been swept from 150 nm to 950 nm in order to show the effect of period on the transmission. This sweep has been done for three different thicknesses (heights) of 150, 250, 300 and 450 nm. Full widths at Half Maxima (FWHM) for simulated graphs have been investigated and finally the height of 250 nm which offered 3 dips with narrow FWHM was selected. Among these three dips, the second dip with grating period of 595nm would have the most optimum sensing response.

Keywords: Brain, Fourier Modal Method, Plasmon, Sensor.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

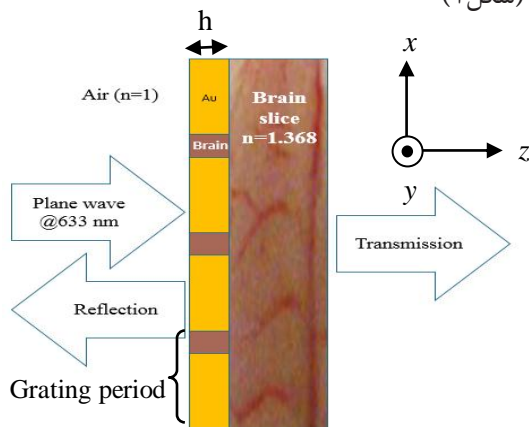
۱- مقدمه

در سال های اخیر، عملکردهای مغز توجه جهانی را به طور چشمگیری به خود جلب کرده است. هرچند که تکنیک های تصویربرداری فراوانی تا کنون ابداع شده اند [۱] ولی هیچ یک از آن ها قادر به تولید داده های معتبر کمی نیستند که نیازمندی هایی همچون ایمنی، عدم خاصیت تخریبگری، اطمینان در جمعیت های کاشته شده و القائات مزمن در حالت درون تنی (in vivo) با رزولوشن بالای فضایی و زمانی را فراهم آورند [۲]. با در نظر داشتن این چالش ها در ذهن، تکنیک های مبتنی بر تشدید پلاسمون سطحی به عنوان زیرمجموعه ی مهمی از تکنیک های نوری ثبت فعالیت عصبی معرفی شدند. حسگری تشدید پلاسمون سطحی بر تشخیص تغییرات کوچک ضریب شکست یا ضخامت استوار است [۳]. به بیان دیگر، هرگونه تغییر در خواص محیط دی الکتریک محلی موجب تغییری در شرط تشدید می شود. بطور خلاصه، خصوصیات این حسگری مبتنی بر تشدید پلاسمون سطحی عبارتند از: سرعت، عدم نیاز به برجسب گذاری، حساسیت بالا، فراهم آوردن داده های کمی و کیفی درباره اندرکنش بین زیرلایه و نمونه بیولوژیکی. در حالت کلی می توان تکنیک های مبتنی بر پلاسمون های سطحی را در دو دسته ی روش های تحریک مبتنی بر منشور و روش های تحریک بدون منشور تقسیم بندی کرد. دسته اول با وجود کاربرد فراوان از برخی مشکلات رنج می برد نظیر: سختی در یکپارچه سازی در ادوات کم هزینه، عدم قابلیت حمل و ساینز نسبتا بزرگ برای اندازه گیری های سریع آنالیز زیستی نمونه هایی که از نظر جرمی محدود هستند. بهترین راه حل استفاده از تحریک غیر منشوری مبتنی بر بلورهای پلاسمونی است. در حالت کلی، بلورهای پلاسمونی مزایای قابل توجهی نظیر عبور اپتیکی بهبودیافته، افزایش بزرگ میدان، موازی سازی نور از طریق گشودگی های طول موجی، تشدید- های پلاسمونی چند مدی قابل تنظیم، یکپارچگی، نفوذپذیری و ضریب شکست منفی در طول موج های مرئی به همراه غلبه بر حد پراش را دارا می باشند. در حوزه حسگری زیستی مبتنی بر بلورهای پلاسمونی بر روی بافت مغزی می توان به کارهای برجسته ی آقای لی

و همکارانش [۴] و آقای ژانگ و همکارانش [۵] اشاره کرد. در این مقاله سعی بر آن است که با استفاده از نانوتوری پلاسمونی مبتنی بر طلا و مغز، میزان عبور نور را در دوره های تناوب مختلف (از ۱۵۰ الی ۹۵۰ نانومتر) برای ضخامت های مختلف ۱۵۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ نانومتر توسط روش معین فوریه (FMM) مورد بحث و بررسی قرار دهیم و نهایتا ضخامت و دوره تناوب بهینه برای پاسخ حسگری را پیشنهاد نمائیم.

۲- ساختار پیشنهادی

در این مقاله ساختار مورد نظر از سه ناحیه تشکیل شده است. ناحیه اول، دوم و سوم به ترتیب هوا، لایه ای متناوب از طلا و برشی از بافت مغز موش می باشد. شایان ذکر است که طلا یکی از پرکاربردترین مواد در شیمی و زیست می باشد زیرا این فلز از نظر زیستی تقریبا سازگار و غیر سمی می باشد و همچنین خواص اپتیکی و شیمیایی پایداری دارد. موج تخت با طول موج ۶۳۳ نانومتر به صورت عمودی و با قطبش TM فرود می آید. ضریب شکست بافت مغزی در این طول موج به گزارش منبع [۶] ۱.۳۶۸ میباشد. لایه طلای میانی به صورت بلور پلاسمونی یک بعدی با تناوب در راستای X تعریف شده است که با شیارهایی از بافت مغزی موش پر شده است. ضریب شکست طلا در طول موج فرودی با استفاده از درون یابی لاگرانژ که توسط آقای کیم و همکارانش [۷] پیشنهاد شده است در شبیه سازی اعمال گردیده است. عرض شکاف ۵۰ نانومتر در نظر گرفته شده است. (شکل ۱)



شکل ۱ ساختار پیشنهادی متشکل از سه لایه هوا، توری و برش مغز موش. در شکل ضخامت (h) و دوره تناوب ساختار مشخص شده اند

۳- روش شبیه سازی

روش های حل عددی معادلات ماکسول می تواند به روش های مبتنی بر محدوده فضایی و روش های مبتنی بر محدوده فرکانس فضایی تقسیم گردد. در روش های دسته دوم مانند FMM، معادلات ماکسول به معادلات ویژه مقداری جبری ماکسول در محدوده ی فرکانس فضایی تبدیل می گردند و توزیع های میدان الکترومغناطیسی توسط بسط ویژه مدهای بلوخ نمایش داده می شوند [۷]. در روش FMM، مد ویژه بلوخ توسط سری شبه فوریه نمایش داده می شود و رابطه ی بین تابع میدان محدوده فضایی و نمایش میدان محدوده ی فرکانس فضایی مشابه رابطه ی بین تابع حوزه ی زمان و تبدیل فوریه زمانی آن است. از ویژگی های مهم FMM این است که با حل معادله ی جبری ویژه مقداری ماکسول در محدوده ی فرکانس فضایی، می توان به صورت ریاضی مجموعه ی کاملی از ویژه مدها برای یک ساختار اپتیکی ساخت که می تواند تمام مقادیر ممکن میادین داخل چارچوب عددی با ابعاد محدود را بپوشاند. در مقایسه با سایر روش های عددی حل معادلات ماکسول می توان گفت روش FMM، روشی مناسب و سریع برای لایه های متناوب است و علاوه بر این، فرمول بندی نسبتاً ساده ای دارد. [۷] با توجه به این موارد، استفاده از FMM برای شبیه سازی ساختار متناوب پیشنهادی در این مقاله مناسب خواهد بود. می توان توزیع میادین را با استفاده از این روش و با توجه به نواحی مشخص شده در شکل ۱ به سه بخش تقسیم نمود که در آن m و n شاخص های مرتبه پراش و C نشان دهنده ضرایب کوپلاژ می باشد:

$$a. z < z_-$$

$$(1)$$

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} E \\ H \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \bar{E}_i \\ \bar{H}_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{E}_r \\ \bar{H}_r \end{pmatrix} \\ &= \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \begin{pmatrix} \bar{E}_{i,x,m,n}, \bar{E}_{i,y,m,n}, \bar{E}_{i,z,m,n} \\ \bar{H}_{i,x,m,n}, \bar{H}_{i,y,m,n}, \bar{H}_{i,z,m,n} \end{pmatrix} e^{j(k_{x,m}x + k_{y,m,n}y + k_{z,m,n}(z-z_-))} \\ &+ \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \begin{pmatrix} \bar{E}_{r,x,m,n}, \bar{E}_{r,y,m,n}, \bar{E}_{r,z,m,n} \\ \bar{H}_{r,x,m,n}, \bar{H}_{r,y,m,n}, \bar{H}_{r,z,m,n} \end{pmatrix} e^{j(k_{x,m}x + k_{y,m,n}y + k_{z,m,n}(z-z_-))} \end{aligned}$$

$$b. z_- < z < z_+$$

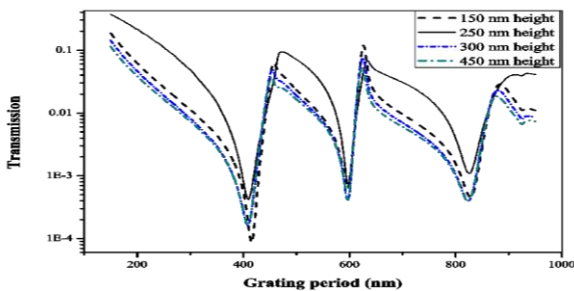
$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} E \\ H \end{pmatrix} &= \sum_{g=1}^{M^+} C_g^+ \begin{pmatrix} E^{(g)+} \\ H^{(g)+} \end{pmatrix} + \sum_{g=1}^{M^-} C_g^- \begin{pmatrix} E^{(g)-} \\ H^{(g)-} \end{pmatrix} \quad (2) \\ E^{(g)+}(x, y, z) &= \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \left(E_{x,m,n}^{(g)+}, E_{y,m,n}^{(g)+}, E_{z,m,n}^{(g)+} \right) e^{j(k_{x,m}x + k_{y,m,n}y + k_z^{(g)+}(z-z_-))} \\ E^{(g)-}(x, y, z) &= \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \left(E_{x,m,n}^{(g)-}, E_{y,m,n}^{(g)-}, E_{z,m,n}^{(g)-} \right) e^{j(k_{x,m}x + k_{y,m,n}y + k_z^{(g)-}(z-z_+))} \\ H^{(g)+}(x, y, z) &= \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \left(H_{x,m,n}^{(g)+}, H_{y,m,n}^{(g)+}, H_{z,m,n}^{(g)+} \right) e^{j(k_{x,m}x + k_{y,m,n}y + k_z^{(g)+}(z-z_-))} \\ H^{(g)-}(x, y, z) &= \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \left(H_{x,m,n}^{(g)-}, H_{y,m,n}^{(g)-}, H_{z,m,n}^{(g)-} \right) e^{j(k_{x,m}x + k_{y,m,n}y + k_z^{(g)-}(z-z_+))} \end{aligned}$$

$$c. z_+ \leq z$$

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \bar{E}_t \\ \bar{H}_t \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \bar{E}_{t,x}, \bar{E}_{t,y}, \bar{E}_{t,z} \\ \bar{H}_{t,x}, \bar{H}_{t,y}, \bar{H}_{t,z} \end{pmatrix} \quad (3) \\ &= \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \begin{pmatrix} \bar{E}_{t,x,m,n}, \bar{E}_{t,y,m,n}, \bar{E}_{t,z,m,n} \\ \bar{H}_{t,x,m,n}, \bar{H}_{t,y,m,n}, \bar{H}_{t,z,m,n} \end{pmatrix} e^{j(k_{x,m}x + k_{y,m,n}y + k_{z,m,n}(z-z_+))} \end{aligned}$$

۴- بحث و نتایج

برای بررسی تاثیر ثابت شبکه (دوره تناوب) در ساختار پیشنهادی با استفاده از روش FMM میزان عبور برای دوره تناوب های ۱۵۰ نانومتر الی ۹۵۰ نانومتر جاروب شده است. همچنین برای بررسی تاثیر ضخامت (ارتفاع) لایه ی بلور پلاسمونی این جاروب را برای ضخامتهای متفاوت ۱۵۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ نانومتر انجام داده ایم.



شکل ۲: نمودار عبور بر حسب دوره تناوب ساختار برای ضخامت های ۱۵۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ نانومتر. دوره تناوب از ۱۵۰ تا ۹۵۰ نانومتر جاروب شده است. با بررسی شکل ۲ به این نتیجه می رسیم که در ضخامت ۲۵۰ نانومتر، نمودار دارای کمینه های باریکتری میباشد. به عبارتی دیگر پهنا در نصف مقدار بیشینه (FWHM) کمتری را شاهد هستیم. پهنا در نصف مقدار بیشینه عامل موثری در بهبود خواص حسگری می باشد. [۸، ۹] توجیه این مساله را می توان در نوع مدهای

نانومتر و باریکترین کمینه با دوره تناوب ۵۹۵ نانومتر مصور شده است.

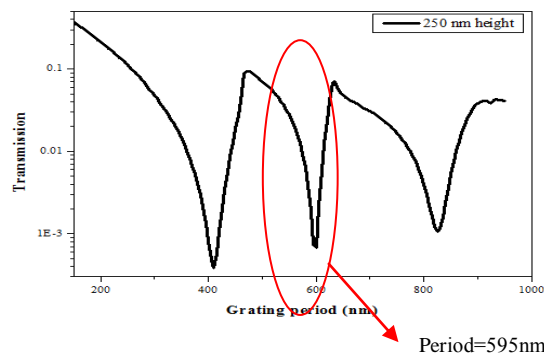
۵- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر دوره تناوب در نانوتوری پلاسمونی طلا/ بافت مغز موش برای ضخامت های ۱۵۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ نانومتر مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه سازی ها با استفاده از روش FMM در MATLAB صورت گرفته است. پس از بررسی های صورت گرفته بهینه ترین حسگر برای توری پلاسمونی با ضخامت ۲۵۰ نانومتر و دوره تناوب ۵۹۵ نانومتر گزارش شده است.

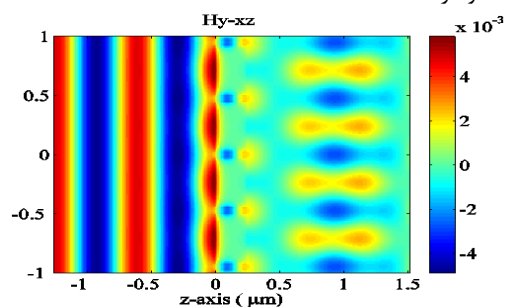
مراجع

- [۱] S. A. Kim and S. B. Jun, "In-vivo Optical Measurement of Neural Activity in the Brain," *Exp Neurobiol*, vol. 22, pp. 158-66, Sep 2013.
- [۲] R. V. Beletskiy, "Imaging electrical activity of neurons with metamaterial nanosensors," 2013.
- [۳] J. Q. Zhang, T. Atay, and A. V. Nurmikko, "Detection of Neural Cell Activity Using Plasmonic Gold Nanoparticles," in *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies*, San Jose, California, 2008, p. CWM3.
- [۴] A.-P. Le, S. Kang, L. B. Thompson, S. S. Rubakhin, J. V. Sweedler, J. A. Rogers, *et al.*, "Quantitative Reflection Imaging of Fixed *Aplysia californica* Pedal Ganglion Neurons on Nanostructured Plasmonic Crystals," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 117, pp. 13069-13081, 2013/10/24 2013.
- [۵] J. Zhang, T. Atay, and A. V. Nurmikko, "Optical Detection of Brain Cell Activity Using Plasmonic Gold Nanoparticles," *Nano Letters*, vol. 9, pp. 519-524, 2009/02/11 2009.
- [۶] N. Lue, J. Bewersdorf, M. D. Lessard, K. Badizadegan, R. R. Dasari, M. S. Feld, *et al.*, "Tissue refractometry using Hilbert phase microscopy," *Opt Lett*, vol. 32, pp. 3522-4, Dec 15 2007.
- [۷] J. P. Hwi Kim, ByoungHo Lee, *Fourier Modal Method and Its Applications in Computational Nanophotonics*: CRC Press, 2012.
- [۸] J. Li, J. Ye, C. Chen, L. Hermans, N. Verellen, J. Ryken, *et al.*, "Biosensing Using Diffractively Coupled Plasmonic Crystals: the Figure of Merit Revisited," *Advanced Optical Materials*, vol. 3, pp. 176-181, ۲۰۱۵.
- [۹] P. Offermans, M. C. Schaafsma, S. R. K. Rodriguez, Y. Zhang, M. Crego-Calama, S. H. Brongersma, *et al.*, "Universal Scaling of the Figure of Merit of Plasmonic Sensors," *ACS Nano*, vol. 5, pp. 5151-5157, 2011/06/28 2011.
- [۱۰] S. Collin, F. Pardo, R. Teissier, and J. L. Pelouard, "Strong discontinuities in the complex photonic band structure of transmission metallic gratings," *Physical Review B*, vol. 63, p. 033107, 01/02/ 2001.

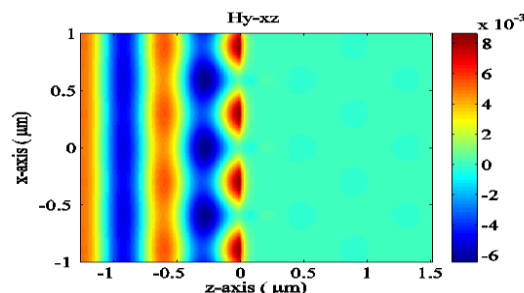
موجود جستجو کرد. در این ساختار مدهای پلاسمونی سطحی و مدهای مشابه با فابری- پرو داخل ساختار وجود دارند. [۱۰]



شکل ۳ جازوب دوره تناوب از ۱۵۰ الی ۹۵۰ نانومتر برای ضخامت ۲۵۰ نانومتر.



شکل ۴ میدان مصور شده برای ضخامت ۲۵۰ نانومتر و دوره تناوب ۴۷۵ نانومتر.



شکل ۵ میدان مصور برای ضخامت ۲۵۰ nm و دوره تناوب ۵۹۵nm.

کمینه ها در ضخامت ۲۵۰ نانومتر به ترتیب در دوره های تناوب ۴۱۰، ۵۹۵ و ۸۲۵ نانومتر اتفاق می افتند (شکل ۳). در این مقادیر میزان عبور به ترتیب برابر با 3.85×10^{-4} ، 7.35×10^{-4} ، 1.05×10^{-3} می باشد. همچنین بیشترین بیشینه در دوره ی تناوب ۴۷۵ نانومتر با میزان عبور 9.37×10^{-2} رخ می دهد. در شکل ۴ و ۵ به ترتیب توزیع میدان برای بیشترین بیشینه با دوره تناوب ۴۷۵