



TẬP 58 - SỐ ĐẶC BIỆT
5/2022

TẠP CHÍ
Khoa học & Công nghệ
Journal of Science & Technology

P-ISSN 1859-3585
E-ISSN 2615-9619

TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI - HANOI UNIVERSITY OF INDUSTRY

CHUYÊN ĐỀ ĐIỆN - ĐIỆN TỬ - TỰ ĐỘNG HÓA

TÁI CẤU HÌNH

lưới điện phân phối sử dụng giải thuật di truyền và giải thuật tối ưu bầy đàn

XÂY DỰNG HỆ THỐNG

điều khiển cho robot tự hành di chuyển trong nhà ứng dụng hệ điều hành ROS

CẢM BIẾN CHIẾT SUẤT VÙNG HỒNG NGOẠI GẦN SỬ DỤNG CẤU TRÚC SIÊU BỀ MẶT NANO KIM LOẠI - ĐIỆN MÔI - KIM LOẠI

NEAR-INFRARED REFRACTIVE INDEX BIOSENSORS USING METAL-DIELECTRIC-METAL
NANOSTRUCTURED METASURFACES

Hoàng Thu Trang¹, Phạm Xuân Thành²,
Nguyễn Văn Ân³, Đỗ Văn Quân⁴, Phạm Thanh Sơn^{1,*}

TÓM TẮT

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất thiết kế và trình bày các kết quả mô phỏng cấu trúc siêu bề mặt nano kim loại trên đế điện môi - kim loại đặc biệt, tạo hiệu ứng cộng hưởng plasmon bề mặt tại vùng bước sóng hồng ngoại gần ứng dụng cho cảm biến chiết suất. Đế điện môi - kim loại đặc biệt gồm hai lớp vật liệu SiO_2/Ag trên đế Si để tăng cường khả năng hấp thụ và giam giữ ánh sáng tới. Tại bước sóng cộng hưởng của cấu trúc siêu bề mặt plasmon, ánh sáng bị hấp thụ và giam giữ mạnh tại lớp điện môi SiO_2 giữa lớp gương kim loại và đĩa kim loại. Các tính chất cộng hưởng của cấu trúc siêu bề mặt rất nhạy với sự thay đổi của chiết suất môi trường bên ngoài. Do đó, cấu trúc trên rất phù hợp để làm cảm biến đo sự thay đổi chiết suất của môi trường xung quanh.

Từ khóa: Cộng hưởng plasmon bề mặt, cảm biến chiết suất, siêu bề mặt.

ABSTRACT

In this paper, we design and present simulation results of a metal-dielectric-metal (MDM) metasurface creating surface plasmon effect in infrared wavelength toward applying for refractive index biosensor. The MDM metasurface is formed by stacking up silver (Ag) subwavelength disk array on SiO_2 layer and thick Ag film. The incident light is confined and absorbed in SiO_2 layer. The resonant properties of plasmonic metasurface structure is very sensitive with the variation of environment refractive index. Therefore, this metasurface is suitable for sensin application to detect the refractive index change of surrounding environment.

Keywords: Surface plasmon resonance, refractive index sensor, metasurface.

¹Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

²Khoa Điện tử, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

³Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế

⁴Trường Đại học Tài chính - Quản trị kinh doanh

*Email: sonpt@ims.vast.ac.vn

Ngày nhận bài: 02/4/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 02/5/2022

Ngày chấp nhận đăng: 25/5/2022

1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, một hướng nghiên cứu hiện đại đang dành được nhiều sự quan tâm của cộng đồng khoa học đó là hội tụ ánh sáng vào một vùng thể tích nhỏ hơn bước sóng. Sự

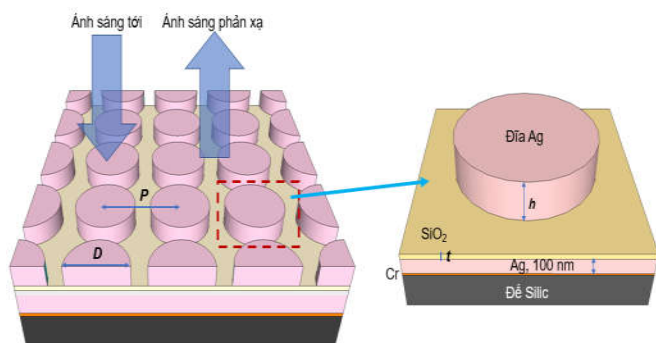
tương tác giữa ánh sáng và các cấu trúc kim loại ở kích thước nano có những đặc tính rất đặc biệt đó là chúng có thể tạo thành một trường nổi gọi là plasmons bề mặt. Cộng hưởng plasmon bề mặt (Surface plasmon resonance - SPR) là một loại plasmon bề mặt mà khi đó các dao động cộng hưởng của các điện tử dẫn xảy ra tại biên của mặt tiếp xúc giữa kim loại và điện môi. Cho đến nay, có hai loại mode cộng hưởng plasmon bề mặt đã được biết tới: (i) plasmon bề mặt phân cực (Surface plasmon polariton - SPP) hình thành ở các màng kim loại và (ii) plasmon bề mặt định xứ (Localized surface plasmon - LSP) tồn tại ở các cấu trúc kim loại có kích thước nhỏ hơn bước sóng ánh sáng chiếu tới. Cùng với các tiến bộ của công nghệ chế tạo ở kích thước nano các nghiên cứu và ứng dụng của hiệu ứng plasmon trở nên thuận tiện hơn bao giờ hết. Nhờ có các công nghệ tiên tiến như quang khắc chùm tia điện tử, khắc laser trực tiếp, phun xạ... các cấu trúc nano kim loại và thiết bị plasmonic làm việc trong các dải tần số hồng ngoại gần và tử ngoại gần có thể được chế tạo. Các cấu trúc kim loại và thiết bị này có thể hấp thụ ánh sáng, thay đổi màu sắc, sở hữu các tính chất điện và nhiệt đặc biệt so với tính chất của chính kim loại đó ở dạng vật liệu khối [1-10].

Các kích thích plasmon bề mặt trong các cấu trúc nano kim loại có khả năng giam giữ mạnh điện từ trường trong một vùng không gian nhỏ hẹp, từ đó chúng có thể dùng để tăng cường các hiệu ứng quang học. Một ví dụ điển hình là các tăng cường điện trường định xứ sử dụng trong các đầu dò có độ nhạy siêu cao. Ngày nay, chúng có rất nhiều điểm hấp dẫn các nhà nghiên cứu do các ứng dụng hứa hẹn trong tán xạ Raman tăng cường bề mặt, phát xạ huỳnh quang, công tắc quang học, cảm biến và các linh kiện quang tử. Hơn thế nữa, kích thước của kích thích plasmon bề mặt nhỏ hơn bước sóng chiếu tới, do đó, kích thước của các thành phần cấu tạo nên thiết bị quang học sẽ vượt qua giới hạn nhiễu xạ của ánh sáng [11-15].

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một cấu trúc màng đĩa kim loại bạc với kích thước đĩa nhỏ hơn bước sóng ánh sáng. Cấu trúc này được đặt trên một lớp SiO_2/Ag đặc biệt

với đế silic. Cấu trúc đĩa siêu bề mặt với các đĩa kim loại này có thể ghép cặp với ánh sáng ở vùng hồng ngoại gần với góc chiếu tùy ý để tạo thành cộng hưởng plasmon. Lớp bạc ở đáy có tác dụng như một gương phản xạ ánh sáng chiếu tới, trong khi lớp SiO₂ có tác dụng giam giữ trường giữa hai lớp bạc phía trên và dưới. Tại bước sóng cộng hưởng, ánh sáng bị giam giữ mạnh trong lớp SiO₂. Phụ thuộc vào độ dày của lớp SiO₂, hệ số ghép cặp giữa đĩa bạc và gương bạc có sự thay đổi, do đó dẫn đến sự thay đổi tần số cộng hưởng của cấu trúc siêu bề mặt plasmon. Hơn nữa, độ nhạy cộng hưởng của cấu trúc siêu bề mặt plasmon thay đổi theo môi trường bên ngoài, vậy nên chúng rất hữu dụng trong việc làm cảm biến chiết suất, cảm biến sinh học. Sử dụng phương pháp mô phỏng vi phân hữu hạn theo miền thời gian (Finite-difference time-domain - FDTD), chúng tôi đã chứng tỏ được sự phụ thuộc của bước sóng cộng hưởng của cấu trúc siêu bề mặt plasmon với chiết suất của môi trường bên ngoài. Các kết quả của nghiên cứu này có thể cung cấp một cái nhìn sâu sắc hơn về tương tác của ánh sáng với các cấu trúc nano kim loại. Nó cũng kiểm nghiệm độ nhạy của cộng hưởng plasmon với sự thay đổi chiết suất của môi trường từ đó sử dụng cấu trúc siêu bề mặt plasmon vào các ứng dụng cảm biến.

2. THIẾT KẾ VÀ MÔ PHỎNG

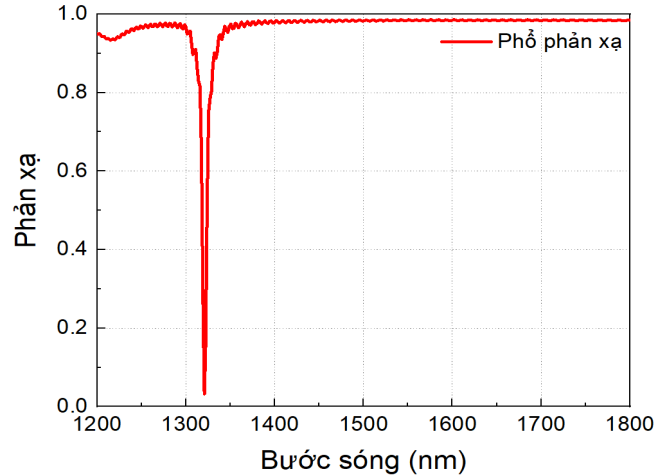


Hình 1. Cấu trúc siêu bề mặt plasmon và thiết kế đĩa bạc

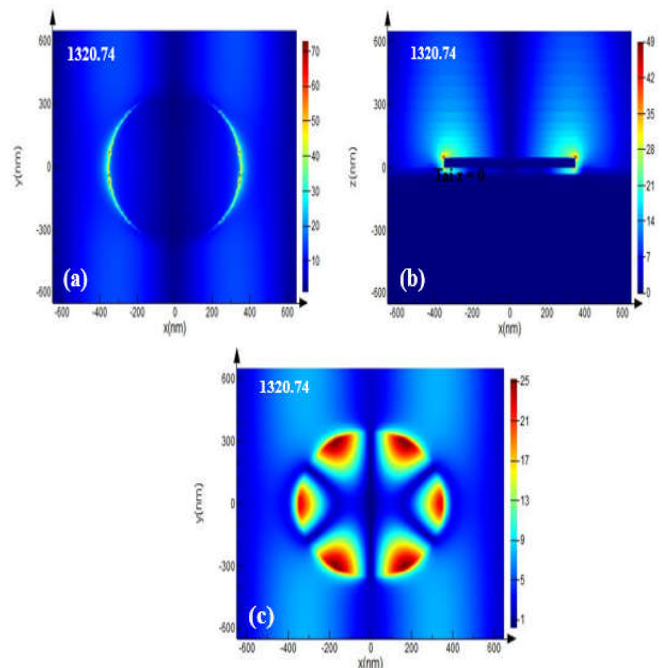
Cấu trúc siêu bề mặt plasmon trong nghiên cứu này được mô tả như trên hình 1. Nó bao gồm một mảng hai chiều các đĩa bạc với chu kỳ (P), đường kính đĩa (D), chiều cao đĩa (h) đặt trên một lớp SiO₂ mỏng có độ dày (t). Một lớp bạc có độ dày 100 nm có tác dụng như một gương phản xạ được sử dụng để ngăn cách toàn bộ cấu trúc với đế silic. Một lớp Crom rất mỏng (~5nm) được sử dụng để làm lớp chuyển tiếp nhằm tăng độ bám dính của lớp gương bạc trên đế silic, lớp Crom này không có tác dụng với các tính chất quang học của cấu trúc. Các mô phỏng được tiến hành sử dụng phần mềm thương mại tính toán toàn sóng (3D full-wave electromagnetic wave solver Lumerical FDTD) [16]. Trong thiết lập mô phỏng, các điều kiện biên hoàn hảo được sử dụng với các bề mặt phía đỉnh và đáy của vùng mô phỏng, điều kiện biên tuần hoàn được sử dụng cho các phương ngang của cấu trúc.

Hình 2 trình bày phổ phản xạ của cấu trúc siêu bề mặt plasmon với các thông số D = 700nm, h = 50nm, độ dày lớp SiO₂ t = 50nm ở góc chiếu tới vuông góc với siêu bề mặt.

Do bị phản xạ hết ở gương bạc nên không có ánh sáng truyền qua siêu bề mặt xuống tới đế. Phổ phản xạ cho thấy một đáy cộng hưởng tại bước sóng 1320nm. Tại bước sóng cộng hưởng ánh sáng bị giam giữ trong lớp SiO₂ và hấp thụ hết bởi siêu bề mặt. Chúng ta có thể thấy đáy phản xạ có độ tương phản rất lớn, và hệ số phẩm chất rất cao. Nên cấu trúc siêu bề mặt này rất phù hợp cho các ứng dụng cảm biến sinh học.



Hình 2. Phổ phản xạ của cấu trúc siêu bề mặt plasmon với kích thước chu kỳ P = 1300nm, D = 700nm, h = 50nm, và độ dày lớp SiO₂ t = 40nm



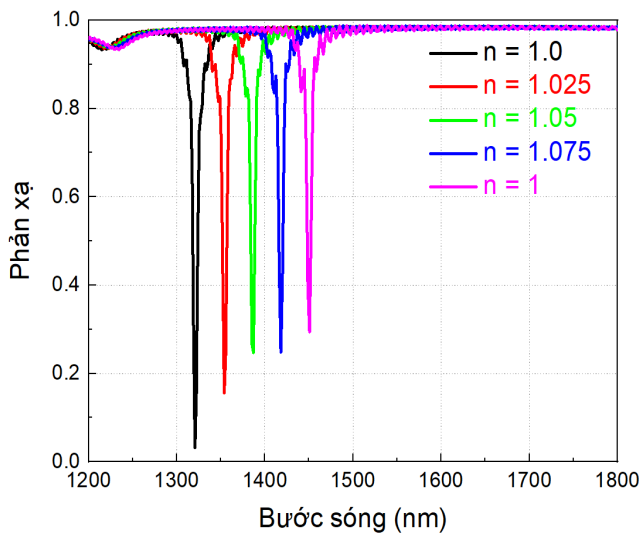
Hình 3. Phân bố điện trường trong cấu trúc siêu bề mặt plasmon tại bước sóng cộng hưởng (a) nhìn từ trên xuống, (b) nhìn từ cạnh, (c) trong lớp SiO₂

Phân bố điện trường trong cấu trúc siêu bề mặt plasmon ở tần số cộng hưởng theo ba góc nhìn: từ trên xuống, từ cạnh, và phía bên trong lớp SiO₂ được trình bày trên Hình 3. Hình 3(a) trình bày phân bố trường trong một đĩa bạc với góc nhìn từ trên xuống cho thấy điện trường chủ yếu tập trung ở rìa của đĩa kim loại. Với góc nhìn từ cạnh cho thấy cái nhìn tổng quan hơn về phân bố điện

trường ở đĩa bạc khi điện trường chủ yếu tập trung ở rìa phần đỉnh của đĩa như trong Hình 3(b). Qua phân bố trường ở đĩa bạc ta có nhận xét rằng khi thay đổi môi trường xung quanh đĩa bạc sẽ ảnh hưởng mạnh tới điện trường tại các phần rìa của đĩa từ đó làm thay đổi đặc tính cộng hưởng của cấu trúc siêu bề mặt plasmon. Hình 3(c) mô tả phân bố trường trong lớp SiO₂ cho thấy điện trường chia thành sáu thùy đối xứng tại các vị trí phía dưới của đĩa bạc. Điện trường mạnh tại các khu vực này cho thấy ánh sáng bị giam giữ tại lớp SiO₂ và được hấp thụ bởi hai lớp bạc phía trên và dưới của lớp này.

3. CẢM BIẾN CHIẾT SUẤT

Bởi cấu trúc siêu bề mặt plasmon rất nhạy với sự thay đổi của môi trường xung quanh, chúng tôi nghiên cứu ứng dụng cấu trúc này cho cảm biến. Các thông số được sử dụng trong nghiên cứu cảm biến này là $D = 700\text{nm}$, $P = 1300\text{nm}$, $h = 50\text{nm}$, $t = 40\text{nm}$. Hình 4 trình bày sự dịch chuyển bước sóng cộng hưởng của cấu trúc tương ứng với sự thay đổi của chiết suất môi trường xung quanh. Các tính chất và độ dịch chuyển bước sóng cộng hưởng so với môi trường xung quanh của cấu trúc được trình bày trong bảng 1. Khi chiết suất của môi trường xung quanh tăng từ 1 đến 1,1, bước sóng cộng hưởng của cấu trúc siêu bề mặt plasmon cũng dịch chuyển từ 1320nm tới 1451nm. Khi chiết suất môi trường tăng lên hệ số phẩm chất của đáy cộng hưởng bị giảm đi từ 180 xuống 119. Tuy nhiên điều đó không ảnh hưởng nhiều tới độ phân giải của cảm biến.



Hình 4. Kết quả mô phỏng phổ phản xạ của cấu trúc siêu bề mặt plasmon với các chiết suất môi trường khác nhau

Bảng 1. Sự dịch chuyển bước sóng cộng hưởng và hệ số phẩm chất của cảm biến với sự thay đổi của chiết suất môi trường xung quanh

Chiết suất	n = 1,0	n = 1,025	n = 1,05	n = 1,075	n = 1,1
Bước sóng cộng hưởng (nm)	1320	1352	1385	1420	1451
Hệ số phẩm chất	180	172	160	141	119

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã nghiên cứu cấu trúc siêu bề mặt plasmon ứng dụng cho cảm biến chiết suất với độ tương phản cao và hệ số phẩm chất lớn. Phân bố điện trường xung quanh các đĩa kim loại bạc và trong lớp SiO₂ cho thấy điện trường tập trung mạnh tại vùng rìa đỉnh của đĩa bạc và bên trong lớp SiO₂. Các khảo sát cho thấy cảm biến hoạt động tại vùng hồng ngoại gần, với bước sóng cộng hưởng có sự dịch chuyển nhỏ khi chiết suất của môi trường xung quanh tăng lên. Các nghiên cứu đã triển khai trong báo cáo này sẽ cung cấp một cách tiếp cận có hệ thống để thiết kế các thiết bị cảm biến sử dụng cấu trúc siêu bề mặt plasmon.

LỜI CẢM ƠN

Công trình này được thực hiện với sự hỗ trợ về kinh phí của đề tài nghiên cứu KHCN hỗ trợ cán bộ trẻ năm 2022, mã số: HTCBT.02/22-22 của Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Y. Huang, F. Wu, L. Yu, 2020. *Rabi oscillation study of strong coupling in a plasmonic nanocavity*. New J. Phys. 22 (2020) 1–9. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab9222>.
- [2]. D. Kotlarek, S. Fossati, P. Venugopalan, N. Gisbert Quilis, J. Slabý, J. Homola, M. Lequeux, F. Amiard, M. de la Chapelle, U. Jonas, J. Dostálek, 2020. *Actuated plasmonic nanohole arrays for sensing and optical spectroscopy applications*. Nanoscale. 12 (2020) 9756–9768.
- [3]. V. Yesudasu, H.S. Pradhan, R.J. Pandya, 2021. *Recent progress in surface plasmon resonance based sensors: A comprehensive review*. Heliyon. 7, e06321. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06321>.
- [4]. J.Y. Jing, Q. Wang, W.M. Zhao, B.T. Wang, 2019. *Long-range surface plasmon resonance and its sensing applications: A review*. Opt. Lasers Eng. 112, 103–118. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.09.013>.
- [5]. F. V Ramirez, S. Shen, A.J.H. McGaughey, 2017. *Near-field radiative heat transfer in graphene plasmonic nanodisk dimers*. Phys. Rev. B. 96, 1–9. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.165427>.
- [6]. J. Homola, 2008. *Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species*. Chem. Rev. 108, 462–493. <https://doi.org/10.1021/cr068107d>.
- [7]. O. Bitton, S.N. Gupta, L. Houben, M. Kvapil, V. Krápek, T. Šikola, G. Haran, 2020. *Vacuum Rabi splitting of a dark plasmonic cavity mode revealed by fast electrons*. Nat. Commun. 11, 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14364-3>.
- [8]. V.G. Kravets, F. Schedin, A.N. Grigorenko, 2008. *Extremely narrow plasmon resonances based on diffraction coupling of localized plasmons in arrays of metallic nanoparticles*. Phys. Rev. Lett. 101, 1–4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.087403>.
- [9]. P. Kvasnička, J. Homola, 2008. *Optical sensors based on spectroscopy of localized surface plasmons on metallic nanoparticles: Sensitivity considerations*. Biointerphases, 3, FD4–FD11. <https://doi.org/10.1116/1.2994687>.
- [10]. D.G. Baranov, M. Wersäll, J. Cuadra, T.J. Antosiewicz, T. Shegai, 2018. *Novel nanostructures and materials for strong light–matter interactions*. ACS Photonics, 5, 24–42. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.7b00674>.

[11]. Y. Chu, E. Schonbrun, T. Yang, K.B. Crozier, 2008. *Experimental observation of narrow surface plasmon resonances in gold nanoparticle arrays*. Appl. Phys. Lett. 93, 181108. <https://doi.org/10.1063/1.3012365>.

[12]. G. Vecchi, V. Giannini, J. Gómez Rivas, 2009. *Surface modes in plasmonic crystals induced by diffractive coupling of nanoantennas*. Phys. Rev. B. 80, 201401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.80.201401>.

[13]. S. Kasani, K. Curtin, N. Wu, 2019. *A review of 2D and 3D plasmonic nanostructure array patterns: fabrication, light management and sensing applications*. Nanophotonics, 8, 2065–2089. <https://doi.org/doi:10.1515/nanoph-2019-0158>.

[14]. B. Vasić, 2021. *Semi-analytical approach for refractive index sensors based on reflective metasurfaces*. J. Opt. Soc. Am. B. 38, 1676–1683. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.422070>.

[15]. X. Fang, L. Xiong, J. Shi, G. Li, 2021. *High-Q quadrupolar plasmonic lattice resonances in horizontal metal–insulator–metal gratings*. Opt. Lett. 46, 1546–1549. <https://doi.org/10.1364/OL.419364>.

[16]. Lumerical FDTD Solutions (Lumerical Solutions, Inc.), (n.d.). <https://www.lumerical.com/>.

AUTHORS INFORMATION

Hoang Thu Trang¹, Pham Xuan Thanh², Nguyen Van an³, Do Van Quan⁴, Pham Thanh Son¹

¹Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science & Technology

²Faculty of Electronic Engineering, Hanoi University of Industry

³University of Sciences - Hue University

⁴University of Finance and Business Administration