

MÔ PHÒNG CỘNG HƯỞNG PLASMON BỀ MẶT TRÊN CẤU HÌNH KRETSCHMANN BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

Nguyễn Thị Thùy Dương¹, Lê Ngọc Minh², Lê Phước Định²,
Lê Thị Ngọc Bảo², Võ Thanh Tùng^{3*}

¹ Trường THPT Nguyễn Trãi, Phú Yên

² Khoa Điện, Điện tử và CNVL, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế

³ Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế

*Email: vttung@hueuni.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/9/2020; ngày hoàn thành phản biện: 23/9/2020; ngày duyệt đăng: 02/10/2020

TÓM TẮT

Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng phần mềm mô phỏng dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để nghiên cứu cộng hưởng plasmon bề mặt (SPR) trên cấu hình Kretschmann với lăng kính được phủ vàng kim loại. Đã xác định được rằng, tại bước sóng 632,8 nm bề dày tối ưu của lớp vàng là 50 nm và hệ số phản xạ đạt cực tiểu tại góc tới 43,8°. Kết quả mô phỏng cũng cho thấy sự giảm của góc cộng hưởng khi nồng độ của dung dịch tăng.

Từ khóa: Cấu hình Kretschmann, SPR, FEM.

1. MỞ ĐẦU

Cộng hưởng plasmon bề mặt (SPR) là một kỹ thuật đầy hứa hẹn trong vài thập kỷ gần đây. Nó có nhiều ứng dụng trong vật lý, hóa học, sinh học [1,2] và an toàn thực phẩm [3,4]. Việc quan sát SPR lần đầu tiên được thực hiện bởi Wood [5] vào năm 1902 trên cách tử nhiễu xạ. Khi một ánh sáng phân cực chiếu vào gương có cách tử, người ta quan sát được một vân tối và vân sáng. Điều này thường được gọi là tính dị thường Wood.

Năm 1941, Fano kết luận rằng những dị thường mà Wood quan sát được là do sự kích thích của sóng bề mặt trên bề mặt của cách tử. Ritchie [6], vào năm 1957, đã chứng minh về mặt lý thuyết sự kích thích của các plasmon bề mặt (SP) trên bề mặt kim loại. Năm 1958, Turbadar [7], trong khi chiếu sáng các màng kim loại mỏng trên một đế, đã quan sát thấy hệ số phản xạ giảm mạnh.

Tuy nhiên, hiệu ứng này không được liên kết với SP. Sau đó Otto [8] vào năm 1968 đã chỉ ra rằng sự sụt giảm này là do kích thích SP làm hệ số phản xạ toàn phần bên trong suy giảm.

Năm 1971, Kretschmann [9] đã sửa đổi cấu hình của Otto bằng cách đặt lớp kim loại bên dưới lăng kính. Trong những năm 1970, SPR được sử dụng để nghiên cứu các đặc tính màng mỏng [10,11] và như một đầu dò cho bề mặt điện hóa [12]. Sau đó, hiện tượng SPR dẫn đến sự phát triển của các cảm biến, đặc biệt là nhằm mục đích phát hiện khí và cảm biến sinh học[13-15]. Từ đường cong SPR, phản ánh mối quan hệ giữa góc tới của ánh sáng và hệ số phản xạ tại cộng hưởng, người ta có thể thu thập được các thông tin sinh học và hóa học của môi trường.

Với sự phát triển của các phần mềm máy tính, bằng cách mô phỏng hiện tượng SPR, dữ liệu lý thuyết có thể được thu thập để đưa ra lựa chọn tối ưu cho thử nghiệm SPR. Trong bài báo này chúng tôi sử dụng phần mềm COMSOL Multiphysics [13] để mô phỏng SPR trên cấu hình Kretschmann với kim loại vàng bằng cách giải phương trình Maxwell trong miền tần số bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Trong phần 2 chúng tôi sẽ giới thiệu các khái niệm cơ sở của SPR, các phương trình mô tả và hình học của mô hình khảo sát SPR. Trong phần 3 trình bày các kết quả nhận được khi thực hiện mô phỏng: bề dày tối ưu của lớp vàng tại đó hệ số phản xạ đạt cực tiểu và góc cộng hưởng tương ứng, sự thay đổi của góc cộng hưởng theo bước sóng của ánh sáng tới và nồng độ của dung dịch NaCl.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ MÔ HÌNH

Khi áp đặt điện trường lên bề mặt của kim loại sẽ gây nên chuyển động của các electron tự do. Các electron tự do này lại chịu lực hút tác động theo chiều ngược lại của các ion dương trong mạng nền. Dao động tập thể này của các electron được gọi là các plasmon. Cộng hưởng plasmon bề mặt (SPR) là sự kích thích plasmon tại mặt phân cách của kim loại và điện môi bằng ánh sáng tới. Điều kiện cộng hưởng được thỏa mãn khi tần số của ánh sáng phù hợp với tần số riêng của dao động các electron trên bề mặt. Để mô tả một cách đơn giản sự tồn tại và tính chất của plasmon bề mặt, ta coi mỗi lớp vật liệu là một môi trường liên tục đồng nhất, trong đó hằng số điện môi của vật liệu có giá trị phức. Để tồn tại plasmon bề mặt, phần thực của hằng số điện môi của kim loại phải âm và giá trị tuyệt đối của nó phải lớn hơn hằng số điện môi của môi trường. Trên hình 1 là sơ đồ của cấu hình Kretschmann để kích thích plasmon và mô hình các lớp vật liệu trên COMSOL.

Trong cấu trúc này, một lớp kim loại bằng vàng nằm giữa hai lớp là lăng kính và môi trường (nước, không khí hoặc các loại dung dịch cần khảo sát). Ánh sáng tới là ánh sáng phân cực từ ngang. Gọi $\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3$ lần lượt là vector sóng của ánh sáng tới, ánh

sáng khúc xạ trong lớp vàng và môi trường, khi đó các thành phần k_{1x}, k_{1y} của vector sóng của ánh sáng tới bằng:

$$k_{1x} = k_0 n_1 \sin \theta, \quad k_{1y} = k_0 n_1 \cos \theta \quad (1)$$

trong đó $n_1 = \sqrt{\varepsilon_1}$ là chiết suất của môi trường tới, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ là số sóng và λ_0 là bước sóng ánh sáng trong chân không. Do tính liên tục của thành phần tiếp tuyến của điện trường dọc theo mặt phân cách, các thành phần ngang của các vector sóng được bảo toàn khi đi qua các môi trường:

$$k_{1x} = k_{2x} = k_{3x} = k_0 n_1 \sin \theta \quad (2)$$

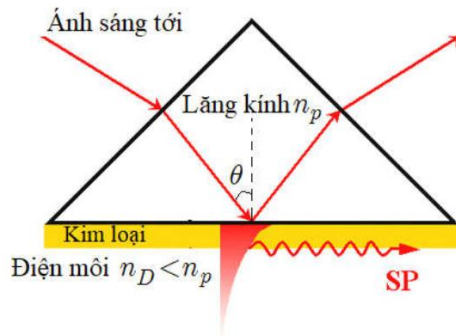
Các thành phần k_{2y} và k_{3y} được xác định bởi các hệ thức sau:

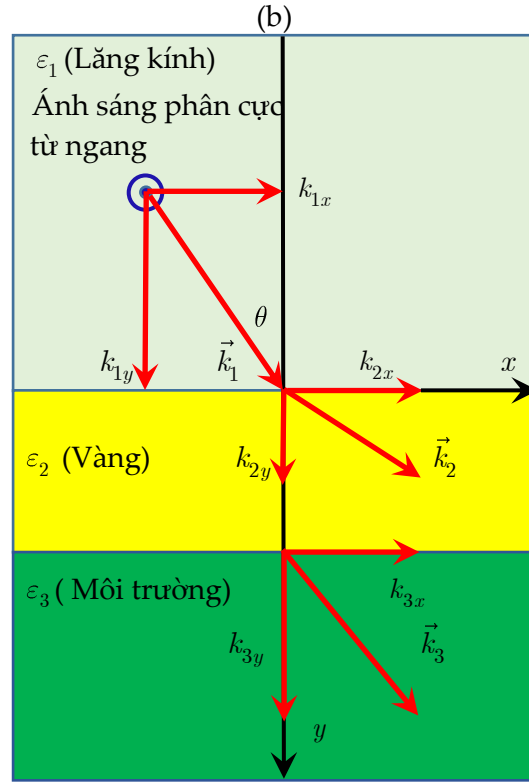
$$k_2^2 = k_0^2 \varepsilon_2 = k_{2x}^2 + k_{2y}^2, \quad k_3^2 = k_0^2 \varepsilon_3 = k_{3x}^2 + k_{3y}^2 \quad (3)$$

Do đó:

$$k_{2y} = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_2 - k_{1x}^2}, \quad k_{3y} = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_3 - k_{1x}^2}, \quad (4)$$

(a)





Hình 1. Kích thích plasmon bề mặt trong cấu hình Kretschmann
(a) Sơ đồ của cấu hình, (b) Mô hình các lớp vật liệu trong COMSOL

Sự lan truyền của sóng điện từ được mô tả bởi phương trình Maxwell trong miền tần số:

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \vec{E} \right] - k_0^2 \left(\varepsilon_r - \frac{i\sigma}{\omega\varepsilon_0} \right) \vec{E} = 0 \quad (5)$$

Để đảm bảo tính đối xứng của điện trường trên các biên song song với mặt phẳng $x - z$ ta phải sử dụng điều kiện biên tuần hoàn Floquet trên các biên trái và phải của tất cả các lớp. Điện trường sai khác nhau một nhân số pha:

$$E_z|_{x_2} = E_z|_{x_1} \cdot e^{-ik_F(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)} \quad (6)$$

ở đây $\vec{r}_2 - \vec{r}_1$ là vector vuông góc với các biên đối xứng. Độ lớn của độ dịch pha phụ thuộc số sóng và góc tới của ánh sáng tới. Vì các biên đối xứng là song song với trục y nên chỉ cần xác định thành phần x của vector k_F :

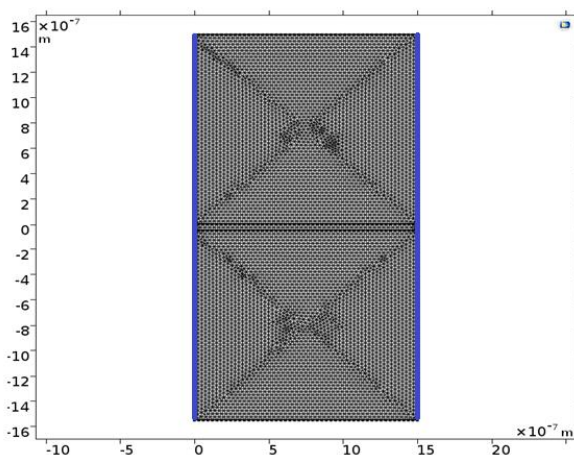
$$\vec{k}_F = 0, k_{Fx} = k_0 n_1 \sin \theta, 0 \quad (7)$$

Ánh sáng tới là ánh sáng phân cực từ ngang:

$$\vec{H} = 0, 0, e^{-ik_{1x}x} \quad (8)$$

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Việc mô phỏng SPR trên cấu hình Kretschmann bằng phương pháp phần tử hữu hạn được thực hiện bằng việc giải số phương trình (5) với các điều kiện (6) - (8) trên phần mềm COMSOL Multiphysics. Trên hình 2 là hình học của miền tính toán sau khi được chia lưới. Kích thước của miền lăng kính là $1,5\mu\text{m} \times 1,5\mu\text{m}$, lớp vàng có bề dày d và bề rộng $1,5\mu\text{m}$ và kích thước của môi trường là $1,5\mu\text{m} \times 1,5\mu\text{m}$. Để đảm bảo cho tính vô hạn theo trục x , điều kiện biên tuần hoàn Floquet được áp đặt trên hai biên ở hai bên của miền tính toán, khi sóng tới biên bên phải sẽ chuyển qua biên bên trái với độ dịch pha tương ứng và điều này không ảnh hưởng đến kết quả tính toán.



Hình 2. Mô hình tính toán được chia lưới và áp đặt điều kiện biên tuần hoàn.

3.1. Sự phụ thuộc của SPR vào bề dày của lớp kim loại.

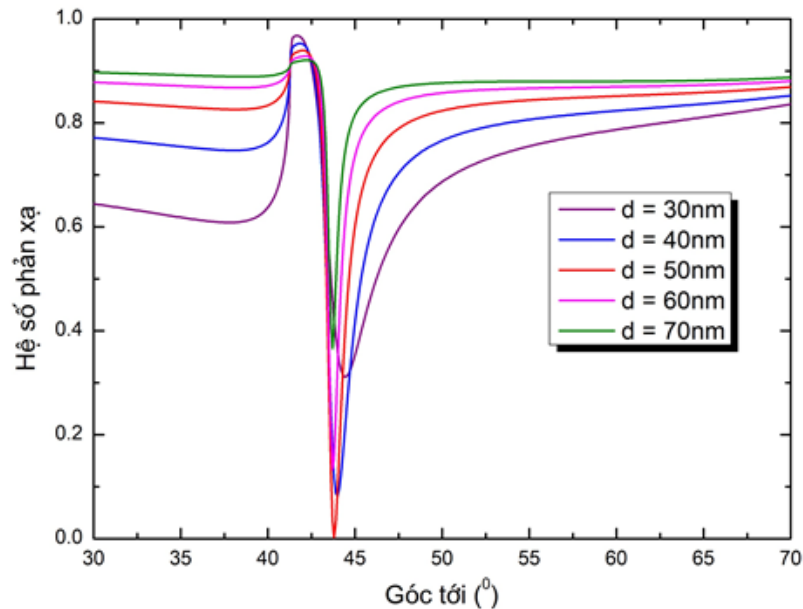
Để nghiên cứu ảnh hưởng của bề dày lớp kim loại lên SPR, chúng tôi sử dụng ánh sáng tới là bức xạ laser He – Ne với bước sóng $\lambda = 632.8\text{nm}$, lăng kính làm bằng thủy tinh quang học BK7 có chiết suất $n = 1,5151$ [17]; kim loại là vàng có hằng số điện môi $\varepsilon = -11,740 + 1,2611i$ [17] và môi trường là không khí. Chiều dày của lớp vàng thay đổi từ 20nm đến 70nm. Góc tới thay đổi trong khoảng $30^\circ - 60^\circ$. Kết quả tính số cho trên bảng 1.

Bảng 1. Sự phụ thuộc của SPR và hệ số phản xạ vào chiều dày lớp vàng.

Chiều dày lớp vàng (nm)	Góc cộng hưởng ($^\circ$)	Hệ số phản xạ tại cộng hưởng
30	44,44	0,3108
35	44,15	0,1849
40	43,98	0,0807
45	43,87	0,0154
50	43,80	0,0018
55	43,75	0,0427
60	43,73	0,1289
65	43,71	0,2427
70	43,70	0,3653

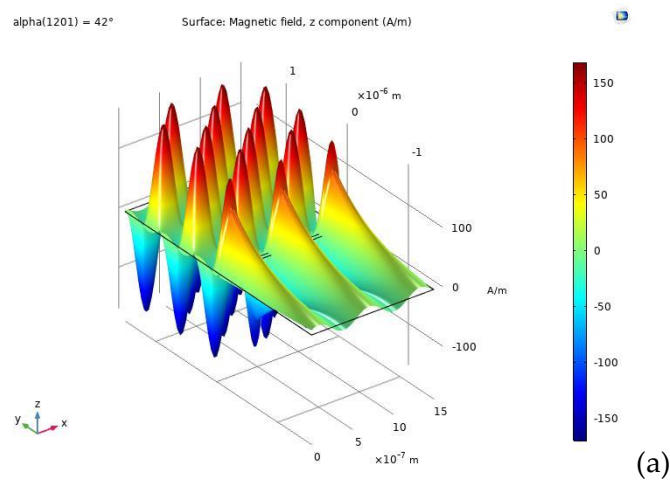
Mô phỏng cộng hưởng plasmon bề mặt trên cấu hình Kretschmann bằng phương pháp phần tử hữu hạn

Từ đây ta thấy rằng, tại bước sóng $\lambda = 632,8nm$, bề dày tối ưu của lớp vàng là $50nm$ và góc cộng hưởng là $43,8^\circ$. Tại đó hệ số phản xạ gần như bị triệt tiêu hoàn toàn. Đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của hệ số phản xạ vào góc tới ứng với các bề dày khác nhau cho trên hình 3

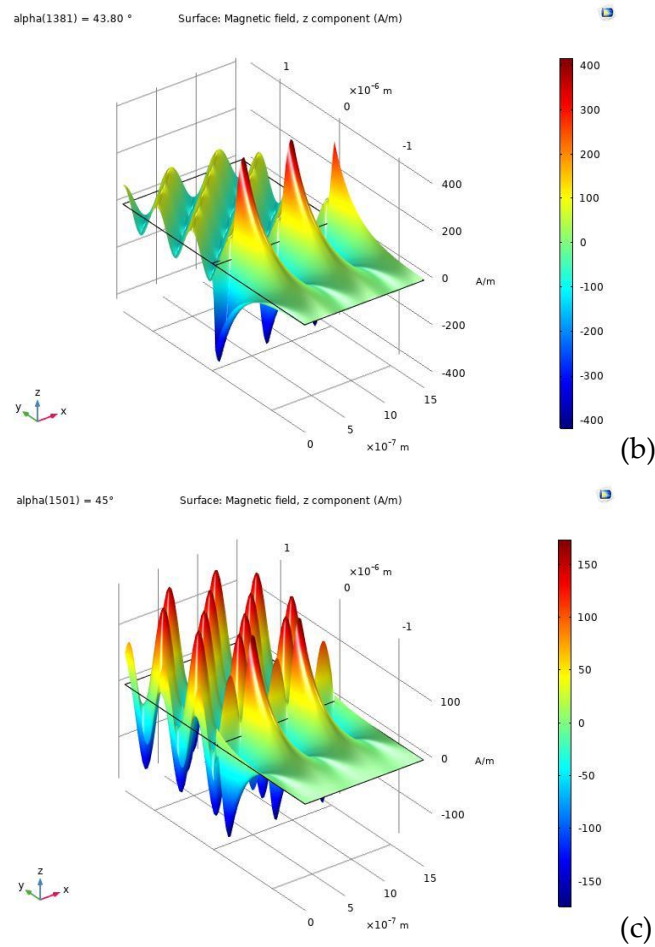


Hình 3. Sự phụ thuộc của hệ số phản xạ vào góc tới và chiều dày lớp vàng.

Dạng điệu của trường điện từ trong cấu hình ứng với chiều dày lớp vàng bằng $50nm$ ở các góc tới khác nhau cho trên hình 4a, 4b và 4c.



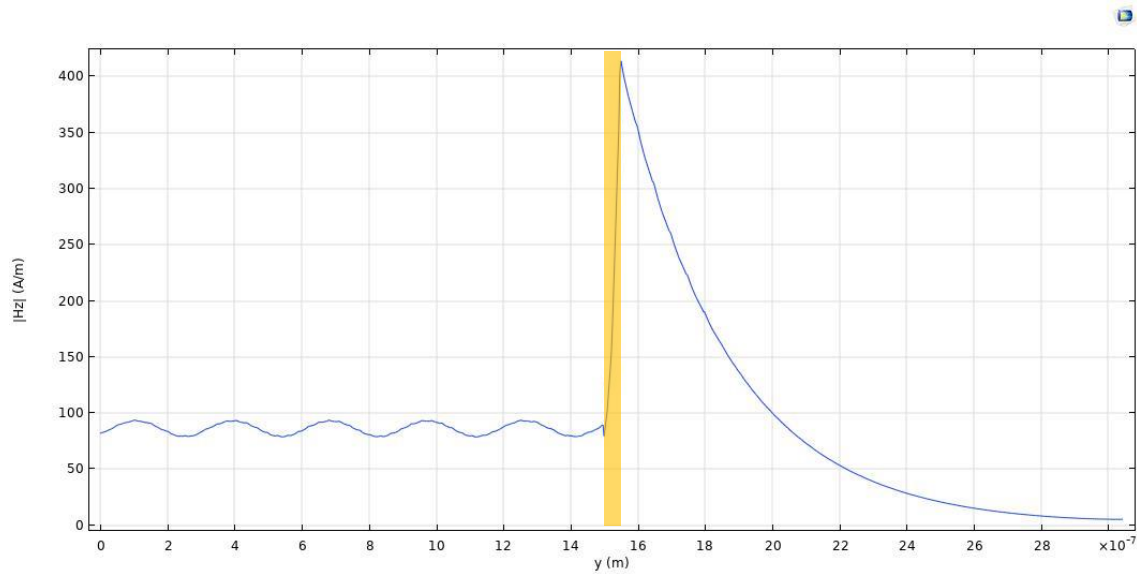
(a)



Hình 4. Cường độ từ trường trong miền mô phỏng ứng với các góc tới khác nhau.

(a) $\theta = 42^\circ$, (b) $\theta = 43,8^\circ$ (góc cộng hưởng), (c) $\theta = 45^\circ$

Từ đó ta thấy rằng, khi ở xa cộng hưởng, hệ số phản xạ lớn, trường trong vùng lăng kính rất mạnh và tắt dần rất nhanh khi đi qua lớp kim loại vào điện môi còn tại cộng hưởng, hệ số phản xạ giảm mạnh, sóng điện từ bị hấp thụ mạnh trong lớp kim loại nên cường độ trường trong vùng này lớn hơn nhiều so với trong lăng kính và giảm theo quy luật hàm mũ khi đi vào vùng điện môi (hình 5)



Hình 5. Mặt cắt của trường của SP tại cộng hưởng, dải màu vàng là miền kim loại.

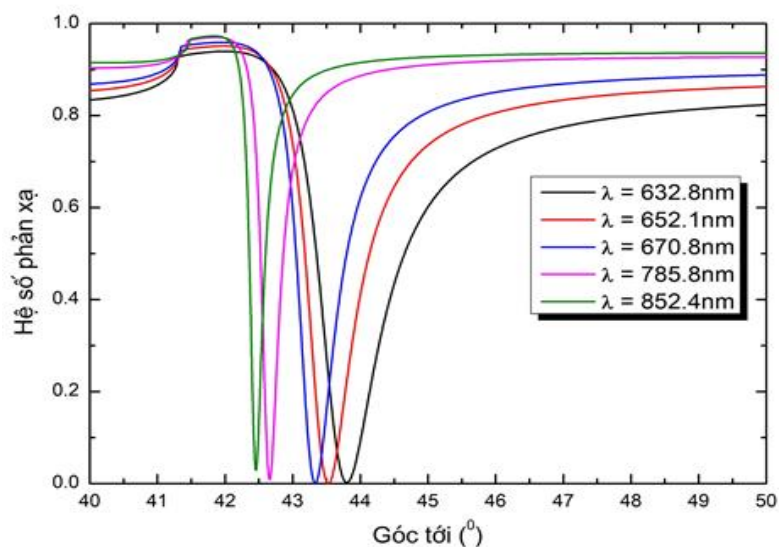
3.2. Sự phụ thuộc của SPR vào bước sóng ánh sáng kích thích khi cố định chiều dày lớp vàng kim loại.

Để nghiên cứu ảnh hưởng của bước sóng ánh sáng kích thích lên SPR, chúng tôi sử dụng các bức xạ laser với các bước sóng $\lambda = 632,8nm, 652,1nm, 670,8nm, 785,8nm$ và $852,4nm$. Lăng kính làm thủy tinh quang học BK7 và lớp vàng có bề dày $50nm$.

Kết quả tính số cho trên bảng 2. Đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của hệ số phản xạ vào góc tới ở các bước sóng khác nhau cho trên hình 6. Từ bảng 2 và hình 6 ta thấy rằng chiều dày tối ưu của lớp vàng để hệ số phản xạ tại cộng hưởng là nhỏ nhất không phụ thuộc bước sóng, tuy nhiên góc cộng hưởng và độ rộng của đỉnh cộng hưởng giảm theo sự tăng của bước sóng ánh sáng kích thích.

Bảng 2. Sự phụ thuộc của SPR và hệ số phản xạ vào bước sóng ánh sáng kích thích.

Bước sóng ánh sáng (nm)	Góc cộng hưởng ($^{\circ}$)	Hệ số phản xạ tại cộng hưởng
632,8	43,80	0,00180
652,1	43,53	0,00006
670,8	43,33	0,00056
785,8	42,66	0,00800
852,4	42,46	0,00276



Hình 6. Sự phụ thuộc của hệ số phản xạ vào góc tới ở các bước sóng khác nhau.

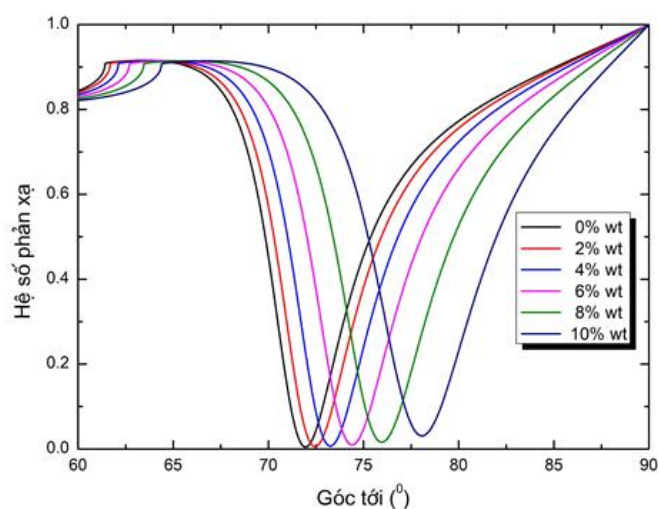
3.3. Sự phụ thuộc của SPR vào nồng độ của chất tan trong dung dịch khi cố định bước sóng ánh sáng kích thích và chiều dày lớp vàng kim loại.

Trong phần này ta khảo sát sự phụ thuộc của SPR vào nồng độ của dung dịch trong môi trường ở sau lớp vàng. Lăng kính sử dụng vật liệu BK7, lớp vàng có bề dày 50 nm và bước sóng ánh sáng kích thích $\lambda = 632,8$ nm. Dung dịch sử dụng ở đây là dung dịch NaCl. Kết quả tính số được cho trên bảng 3. Đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của hệ số phản xạ vào góc tới các nồng độ dung dịch khác nhau cho trên hình 7.

Bảng 3. Sự phụ thuộc của SPR và hệ số phản xạ vào chiết suất của lăng kính.

Nồng độ dung dịch NaCl (%wt)	Góc cộng hưởng ($^{\circ}$)	Hệ số phản xạ tại cộng hưởng
0	71.95	0.0045
2	72.45	0.0053
4	73.26	0.0068
6	74.40	0.0097
8	75.96	0.0160
10	78.07	0.0308

Từ bảng 3 và hình 7 ta thấy rằng, tại một bước sóng xác định khi chiết suất của dung dịch tăng thì góc cộng hưởng và độ rộng của đỉnh cộng hưởng tăng. Mặt khác từ kết quả trong mục 3.2. ta đã biết, sự tăng của bước sóng ánh sáng kích thích lại dẫn tới sự giảm của góc cộng hưởng và độ rộng của đỉnh cộng hưởng, đây là điều cần phải chú ý khi nghiên cứu SPR trong thực nghiệm. Sự thay đổi của góc cộng hưởng theo nồng độ của dung dịch là cơ sở của các cảm biến đo nồng độ trong hóa học và sinh học.



Hình 7. Sự phụ thuộc của hệ số phản xạ vào góc tới ứng với các nồng độ khác nhau của dung dịch NaCl.

4. KẾT LUẬN

Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn trong phần mềm Comsol Multiphysics, chúng tôi đã xây dựng được mô hình để mô phỏng SPR trên cấu hình Kretschmann với lớp phủ bằng vàng. Chúng tôi đã xác định được chiều dày tối ưu của lớp vàng để SPR là rõ nhất. Khi khảo sát ảnh hưởng của bước sóng ánh sáng kích thích, chúng tôi đã thấy rằng sự tăng của bước sóng ánh sáng kích thích dẫn tới sự giảm của góc cộng hưởng và bề rộng của đỉnh cộng hưởng. Chúng tôi cũng đã khảo sát ảnh hưởng của nồng độ dung dịch NaCl trong môi trường phía sau lớp kim loại đến SPR, kết quả cho thấy sự tăng của nồng độ dung dịch dẫn đến sự tăng của góc cộng hưởng và độ rộng của đỉnh cộng hưởng. Mô hình đã xây dựng ở đây cũng có thể được sử dụng để nghiên cứu SPR trên các kim loại khác với các môi trường khác nhau.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ kinh phí từ đề tài cấp Đại học Huế mã số DHH2019-01-144 cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Liedberg B., Nylander C. and Lunström I. (1983). Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing. *Sens. Actuators*, Vol.4, pp. 299–304.
- [2]. Villuendas F. and Pelayo J. (1990). Optical fibre device for chemical sensing based on surface plasmon excitridon. *Sens. Actuators A. Phys.*, Vol.23, pp.1142–1145.
- [3]. Piliarik M., Parova L. and Homola J. (2009). High-throughput SPR sensor for food safety. *Biosens. Bioelectron.* Vol.24, pp.1399-1404.
- [4]. Homola J. (2006). Surface plasmon resonance (SPR) biosensors and their applications in food safety and security. *Frontiers in Planar Lightwave Circuit Technology*, Springer, pp. 101–118.
- [5]. Wood R.W. (1902). On a Remarkable Case of Uneven Distribution of Light in a Diffraction Grating Spectrum. *Proceedings of the Physical Society of London*, Vol.18, Iss.1, pp. 269-275.
- [6]. Ritchie R.H. (1957). Plasma Losses by Fast Electrons in Thin Films. *Physical Review*. Vol.106, Iss.5, pp. 874-881.
- [7]. Turbadar T. (1959) Complete absorption of light by thin metal films. *Proc. Phys. Soc.* Vol. **73**, pp. 40–44.
- [8]. Otto A. (1968). Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection. *Zeitschrift Fur Physik*. Vol.216, Iss.4, pp. 398-410.
- [9]. Kretschmann E. and Raether H. (1968) Radiative decay of nonradiative surface plasmons excited by light. *Z. Naturforsch. A*. Vol.23, pp. 2135-2136.
- [10]. Pockrand I. *et al.*, (1978) Surface plasmon spectroscopy of organic monolayer assemblies. *Surf. Sci.* Vol. 74, pp. 237–244.
- [11]. Pockrand I. *et al.*, (1978) Optical properties of organic dye monolayers by surface plasmon spectroscopy. *J. Chem. Phys.*, Vol. 69, **pp.** 4001–4011.
- [12]. Gordon J. and Ernst S. (1980) Surface plasmons as a probe of the electrochemical interface. *Surf. Sci.*, Vol. 101, pp. 499–506.
- [13]. Patel K., Halevi S., Melman P., Schwartz J., Cai S. and Singh B. (2017). A Novel Surface Plasmon Resonance Biosensor for the Rapid Detection of Botulinum Neurotoxins. *Biosensors*, Vol. 7, Iss. 4, 32
- [14]. Firdous S., Anwar S. and Rafya R. (2018). Development of surface plasmon resonance (SPR) biosensors for use in the diagnostics of malignant and infectious diseases. *Laser Physics Letters*, Vol. 15, Iss. 6, 065602(5pp).
- [15]. Baschir L., Popescu A. A., Savastru D. and Miclos S. (2020). Surface Plasmon Resonance Chemical Sensors Based on Amorphous Chalcogenide Waveguides. *Macromolecular Symposia*, Vol. 389, Iss. 1, 1900066.
- [16]. COMSOL Multiphysics® Modeling Software. Website: www.comsol.com
- [17]. <https://refractiveindex.info/>

SIMULATION OF SURFACE PLASMON RESONANCE ON KRETSCHMANN CONFIGURATION BY FINITE ELEMENT METHOD

**Nguyen Thi Thuy Duong¹, Le Ngoc Minh², Le Phuoc Dinh²,
Le Thi Ngoc Bao², Vo Thanh Tung^{3*}**

¹ Nguyen Trai High School, Phu Yen, Vietnam

² Faculty of Electronics, Electrical Engineering and Material Technology,
University of Sciences, Hue University

³ University of Sciences, Hue University

*Email: vttung@hueuni.edu.vn

ABSTRACT

In this paper, we use a modeling software based on finite element method (FEM) to study surface plasmon resonance (SPR) on Kretschmann configuration with prisms coated with gold metal. It was determined that, at wavelength 632,8 nm, the optimal thickness of the gold layer was 50 nm and the reflectance falling to a minimum at an angle of 43,8°. The simulation results also showed a decrease of the resonant angle with increasing wavelength of the excitation light, and increase of the resonant angle with increases of concentration of the solution.

Keywords: Kretschmann configuration, SPR, FEM.



Nguyễn Thùy Dương sinh ngày 12/03/1986 tại Phú Yên. Năm 2009, bà tốt nghiệp cử nhân ngành Sư phạm Vật lý tại Trường Đại học Quy Nhơn. Hiện nay bà là giáo viên Vật lý tại Trường THPT Nguyễn Trãi, Tp Tuy Hòa, tỉnh Phú Yên và đang theo học thạc sĩ chuyên ngành Vật lý Chất rắn tại Trường Đại học Khoa Học, Đại học Huế khóa 2018-2020.



Võ Thanh Tùng sinh ngày 17/07/1979 tại Quảng Bình. Năm 2001, ông tốt nghiệp cử nhân ngành Vật lý Chất rắn tại Trường Đại học Tổng hợp Huế. Năm 2004, ông tốt nghiệp thạc sĩ chuyên ngành Vật lý Chất rắn. Năm 2009, ông tốt nghiệp tiến sĩ chuyên ngành Vật lý Chất rắn tại Belarus. Năm 2015, ông được phong hàm PGS và hiện nay là Hiệu trưởng Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế.

Lĩnh vực nghiên cứu: Vật liệu áp điện, kỹ thuật siêu âm, mô phỏng lý thuyết, kỹ thuật vi xử lý và ứng dụng, xử lý tín hiệu số...



Lê Ngọc Minh sinh ngày 06/12/1963 tại Nam Định. Năm 1985, ông tốt nghiệp cử nhân ngành Vật lý lý thuyết tại trường Đại học Tổng hợp Huế. Năm 1998, ông tốt nghiệp thạc sĩ chuyên ngành Vật lý Chất rắn và hiện nay công tác tại Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế.

Lĩnh vực nghiên cứu: lý thuyết chất rắn, vật lý tính toán, kỹ thuật siêu âm, mô phỏng ...



Lê Phước Định sinh ngày 15/10/1991 tại Thành phố Huế. Năm 2014, ông tốt nghiệp cử nhân ngành Vật lý Chất rắn tại trường Đại học Khoa học, Đại học Huế. Năm 2017, ông tốt nghiệp Thạc sĩ chuyên ngành Vật lý Chất rắn và hiện nay công tác tại trường Đại học Khoa học, Đại học Huế.

Lĩnh vực nghiên cứu: vật lý chất rắn, kỹ thuật siêu âm, mô phỏng...



Lê Thị Ngọc Bảo sinh ngày 31/10/1983 tại Thừa Thiên Huế. Năm 2006, bà tốt nghiệp Cử nhân ngành Vật lý tại Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế. Năm 2009, bà tốt nghiệp Thạc sĩ chuyên ngành Vật lý lý thuyết và Vật lý toán tại trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế. Năm 2020 bà tốt nghiệp tiến sĩ chuyên ngành Vật lý lý thuyết và vật lý toán tại trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế. Từ năm 2006 đến nay bà công tác tại trường Đại học Khoa học, Đại học Huế.

Lĩnh vực nghiên cứu: Vật lý hệ thấp chiều, vật lý mô phỏng.

