

STUDY ON EFFECT OF THE METALLIC LAYER THICKNESS ON SURFACE RESONANCE OF THE NANO METAL – METAL - DIELECTRIC STRUCTURE

Do Duc Tho¹, Vu Phi Hung¹, Nguyen Viet Hung², Dao Xuan Viet²,
Dinh Manh Tien², Nguyen Duy Cuong², Doan Quang Tri^{2*}

¹Faculty of Engineering Physics - Hanoi University of Science and Technology

²School of Materials Science and Engineering - Hanoi University of Science and Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 11/11/2025	In this paper, we have studied the influence of the metal layer on the surface resonance of the nanoparticle metal-metal- dielectric structure using the finite difference time domain method in the visible range. In the structure, the spherical silver (Ag) nanoparticles ordered in array, the gold (Au) metal layer with a variable thickness (from 10 nm to 70 nm) and the SiO ₂ substrate with a constant thickness (700 nm). The results showed that the thickness of the Au metal layer has a significant influence on the surface resonance, specifically the wave energy attenuation is up to nearly 5 times when the thickness of the Au layer increases from 5 nm to 70 nm, which is due to the additional light dissipation due to the surface SPP excitation. Besides, we have considered the influence of Ag particle size (radius of nanoparticles R_{NPs} varies from 10 nm to 50 nm), the results show that there is a peak shift from about 550 nm to about 590 nm when Ag particle size increases R_{NPs} = 10 nm to R_{NPs} = 50 nm. The influence of distance between Ag nanoparticles is also considered in this study.
Revised: 03/02/2026	
Published: 05/02/2026	
KEYWORDS	
Plasmonics	
LSPR	
SPRs	
Nanoparticles array	
Nanoparticles – metal – dielectric	

NGHIÊN CỨU SỰ ẢNH HƯỞNG ĐỘ DÀY LỚP KIM LOẠI ĐẾN CỘNG HƯỞNG BỀ MẶT CỦA CẤU TRÚC NANO KIM LOẠI – KIM LOẠI – CÁCH ĐIỆN

Đỗ Đức Tho¹, Vũ Phi Hùng¹, Nguyễn Việt Hưng², Đào Xuân Việt²,
Dinh Mạnh Tiến², Nguyễn Duy Cường², Đoàn Quảng Trị^{2*}

¹Khoa Vật lý kỹ thuật - Đại học Bách khoa Hà Nội, ²Trường Vật liệu - Đại học Bách khoa Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 11/11/2025	Trong bài báo này chúng tôi đã thực hiện nghiên cứu về sự ảnh hưởng của lớp kim loại đến sự cộng hưởng bề mặt của cấu trúc hạt nano kim loại – kim loại – cách điện bằng phương pháp sai phân hữu hạn trong miền thời gian của Lumerical trong vùng khả kiến. Các hạt nano Ag có hình dạng cầu với kích thước giống nhau được sắp xếp theo chuỗi, lớp kim loại Au với độ dày thay đổi (từ 10 nm đến 70 nm) và lớp đế SiO ₂ có độ dày cố định (700 nm). Kết quả nghiên cứu đã cho thấy độ dày của lớp kim loại Au có ảnh hưởng đáng kể đến sự cộng hưởng bề mặt, cụ thể sự suy giảm năng lượng sóng lên đến gần 5 lần khi độ dày của lớp Au tăng từ 5 nm lên 70 nm, nguyên nhân là do sự tiêu tán ánh sáng bổ sung do sự kích thích SPP bề mặt. Bên cạnh đó chúng tôi cũng đã xem xét đến sự ảnh hưởng của kích thước hạt Ag (bán kính hạt nano kim loại, R_{NPs} thay đổi từ 10 nm đến 50 nm), kết quả chỉ ra có sự dịch chuyển đỉnh từ khoảng 550 nm đến khoảng 590 nm khi kích thước hạt Ag tăng R_{NPs} = 10 nm đến R_{NPs} = 50 nm. Sự ảnh hưởng của khoảng cách giữa các hạt nano Ag cũng được xem xét trong nghiên cứu này.
Ngày hoàn thiện: 03/02/2026	
Ngày đăng: 05/02/2026	
TỪ KHÓA	
Hiệu ứng Plasmon	
Cộng hưởng plasmonic bề mặt định xứ	
Cộng hưởng plasmonic bề mặt Chuỗi các hạt nano	
Hạt nano kim loại - kim loại - cách điện	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.13983>

* Corresponding author. Email: tri.doanquang@hust.edu.vn

1. Giới thiệu

Cộng hưởng plasmon bề mặt (SPR) là biểu hiện của hiệu ứng cộng hưởng do sự tương tác giữa các electron dẫn của các hạt nano kim loại với các photon của ánh sáng tới. Sự tương tác này phụ thuộc vào kích thước và hình dạng của các hạt nano kim loại, cũng như bản chất và thành phần của môi trường phân tán. Trong những năm gần đây, việc ứng dụng hạt nano (NPs - Nanoparticles) kim loại vào cộng hưởng plasmon bề mặt nhận được rất nhiều sự quan tâm và được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực khác nhau như: cảm biến hóa học và sinh học, quang tử nano, phát xạ ánh sáng tăng cường, các thiết bị nhiệt quang điện, điều chỉnh phổ hồng ngoại để tản nhiệt có kiểm soát và sản xuất các thành phần dò để chụp ảnh [1] – [7]. Cho đến nay, việc nâng cao hiệu suất của các thiết bị plasmon đòi hỏi cần có các cấu trúc nano mới với các đặc tính quang học dễ điều chỉnh. Những cấu trúc như vậy là những cấu trúc có sự kết hợp ánh sáng-vật chất mạnh mẽ dẫn đến sự lai hóa ở chế độ plasmon. Mục tiêu này được hiện thực hóa trong cấu trúc NPs kim loại - NPs kim loại [8] và NPs kim loại - màng kim loại [9].

Cấu trúc kết hợp giữa một lớp các hạt nano kim loại và một màng kim loại đang được nghiên cứu tích cực. Cấu trúc này được dự đoán sẽ thể hiện các hiện tượng quang học thú vị do sự kết hợp giữa các plasmon bề mặt cục bộ của hạt nano với polariton plasmon bề mặt phi cục bộ [9], [10]. Sự kết hợp giữa phổ quang học của hệ các hạt nano kim loại/màng có thể được điều chỉnh bằng cách thay đổi hình dạng, kích thước của hạt nano, độ dày của lớp đệm giữa lớp hạt nano và màng, và/hoặc độ dày của màng kim loại.

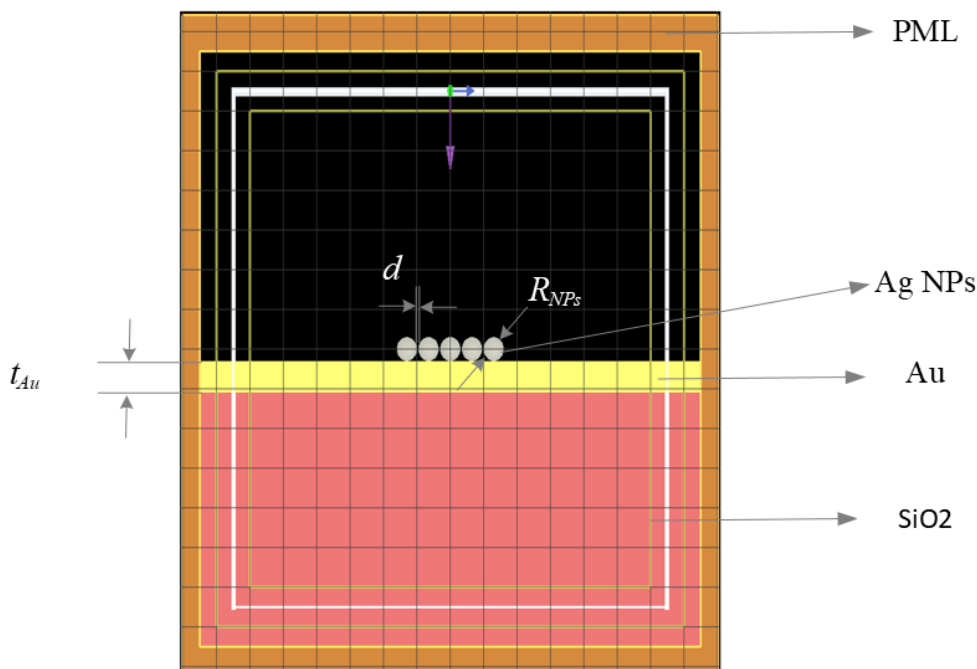
Trong nghiên cứu này, chúng tôi thực hiện một nghiên cứu về sự ảnh hưởng của độ dày lớp kim loại trong cấu trúc hạt nano kim loại NPs – kim loại – Cách điện, cụ thể NPs Ag – Au – SiO₂. Ở đây độ dày lớp kim loại được thay đổi từ 0 nm, 5 nm, 30 nm và 70 nm. Cũng trong nghiên cứu này chúng tôi cũng khảo sát sự ảnh hưởng của kích thước các hạt nano, cụ thể các hạt nano Ag có dạng hình cầu với bán kính 10 nm, 30 nm và 50 nm. Các phép tính được thực hiện trong vùng ánh sáng khả kiến. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng độ dày của lớp màng kim loại ảnh hưởng rất lớn đến sự cộng hưởng bề mặt, trong khi đó kích thước hạt NPs làm dịch chuyển các đỉnh của phổ hấp thụ. Trong nghiên cứu này chúng tôi cũng đã xem xét sự ảnh hưởng của khoảng cách giữa các hạt NPs.

2. Phương pháp mô phỏng

Để thực hiện nghiên cứu sự ảnh hưởng của độ dày lớp kim loại trong cấu trúc NPs – kim loại – cách điện, mô hình gồm chuỗi các hạt kim loại NPs Ag có kích thước R_{NPs} , khoảng cách giữa các hạt NPs là d , độ dày của lớp kim loại là t_{Au} và đế SiO₂ có độ dày 700 nm đã được xây dựng (Hình 1). Các mô hình điện từ tính toán để giải phương trình Maxwell được xây dựng trên bộ giải FDTD trong Ansys Lumerical. Phương pháp sai phân hữu hạn trong miền thời gian (Finite Difference Time Domain - FDTD) dựa trên việc rời rạc hóa các phương trình Maxwell dưới dạng vi phân bằng sơ đồ hữu hạn [11], [12].

Thuật toán tính toán được thực hiện theo các bước sau: i) Diện tích đếm, độ phân giải lưới và điều kiện biên đã được thiết lập. Một lưới vuông đã được thiết lập trong hệ Descartes và được sử dụng cho mô phỏng. Các tham số cơ bản của mô hình (tính chất vật liệu và hình học của vật thể, trường điện và từ) đã được tính toán riêng biệt tại mỗi điểm của lưới. Để duy trì độ chính xác, thuật toán chia lưới đã tạo ra một lưới nhỏ hơn với chỉ số cao. ii) Vật thể có các tham số hình học và quang học xác định được đặt trong vùng tính toán. Chiết suất của Ag được lấy từ cơ sở dữ liệu của mô hình và mô phỏng [13]. Chiết suất của SiO₂ được xác định từ công thức Sellmeier [14] còn chiết suất của không khí thì được lấy từ cơ sở dữ liệu của Lumerical. iii) Nguồn bức xạ đã được thiết lập. Nguồn trường tán xạ toàn phần (Total – Field Scattered Field - TFSF) đã được sử dụng cho mô phỏng. Nguồn TFSF chia vùng tính toán thành hai vùng riêng biệt: (a) diện tích trường tổng, bao gồm tổng sóng trường tới cộng với trường tán xạ, và (b) diện tích trường tán xạ, chỉ bao gồm trường tán xạ. Điều quan trọng cần lưu ý là mô hình vật lý đầy đủ được thực hiện trong

trường tổng thể và việc phân chia thành trường tới và trường tán xạ đòi hỏi phải diễn giải cẩn thận. Đối với các mảng hạt nano Ag trong môi trường đồng nhất, trường tới lần lượt là các mặt phẳng phân cực p và phân cực s. iv) Nguồn giám sát sóng điện từ hữu hạn thời gian đã được thiết lập. Như thể hiện trong Hình 1, một chuỗi các hạt nano NPs Ag được chiếu sáng bởi một sóng tới theo phương pháp tuyến tính trực tiếp với góc 0° . Độ phân cực của sóng tới được xác định bởi góc tới cũng như hướng của trường điện. Trường điện từ tới được đưa vào từ bên trái. Một lớp hoàn toàn phù hợp (Perfectly Matched Layer - PML) được triển khai trên tất cả các thành hộp để đảm bảo hấp thụ hoàn toàn sóng lan truyền. Các tham số mô hình chuẩn đã được thiết lập: thời gian truyền của sóng phân cực phẳng qua vùng làm việc là 1000 fs và nhiệt độ là 300 K.



Hình 1. Mô hình mô phỏng cấu trúc hạt nano kim loại – kim loại – cách điện (NPs Ag – Au – SiO₂)

3. Kết quả và thảo luận

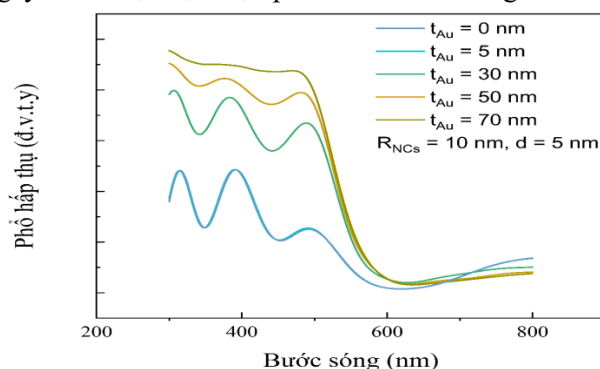
Phổ hấp thụ của cấu trúc NPs kim loại – Kim loại – Cách điện đã được tính toán dựa trên công thức sau:

$$\sigma_{abs} = \frac{P_{abs}(\omega)}{I_{int}(\omega)}$$

Trong đó $P_{abs}(\omega)$ là tổng năng lượng được hấp thụ bởi các hạt nano Ag, $I_{int}(\omega)$ là cường độ của nguồn chiếu, σ_{abs} phổ hấp thụ.

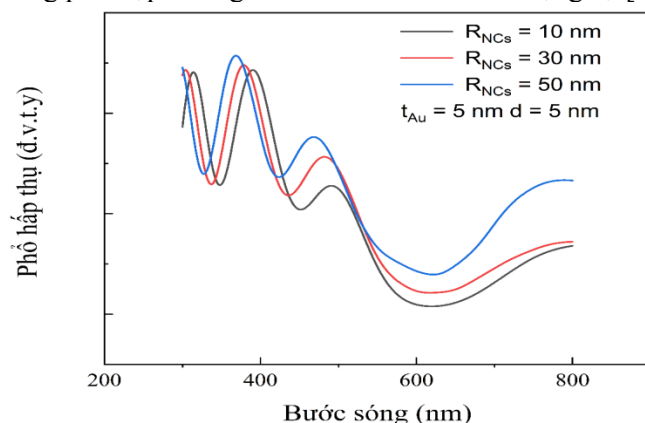
Trước tiên, chúng ta xem xét sự ảnh hưởng của độ dày lớp kim loại (Au) trong cấu trúc hạt nano kim loại NPs – kim loại – cách điện (Hình 2), ở đây lớp kim loại được thay đổi từ $t_{Au} = 0$ nm (không có lớp kim loại) đến $t_{Au} = 70$ nm. Chúng ta có thể thấy rằng, độ dày của lớp kim loại ảnh hưởng đáng kể đến sự hấp thụ, cụ thể sự hấp thụ tăng khi độ dày của lớp kim loại tăng và có xu hướng đạt đến điểm bão hòa khi độ dày tiếp tục tăng. Nguyên nhân có thể gây ra sự gia tăng này là do ánh sáng bị tán xạ bởi Ag NPs bao gồm các sóng điện từ có độ cong lớn ở mặt sóng, có thể kích thích các polariton plasmon bề mặt (SPP) trên bề mặt màng Au. Do đó, ngoài sự hấp thụ của chính Ag NPs, còn có sự tiêu tán năng lượng bổ sung của các chùm ánh sáng tới do sự kích thích SPP trên bề mặt màng Au, dẫn đến sự tiêu tán ánh sáng bổ sung [10]. Đồng thời chúng ta cũng quan sát được sự giảm biên độ đỉnh SPR của hạt và sự xuất hiện đồng thời của đỉnh chế độ

khe xảy ra theo sự giảm độ dày lớp đệm. Hiện tượng này là do sự lai hóa giữa SPR của hạt và chế độ khe trong Ag NPs gây ra bởi sự hiện diện phá vỡ tính đối xứng của màng Au [10].

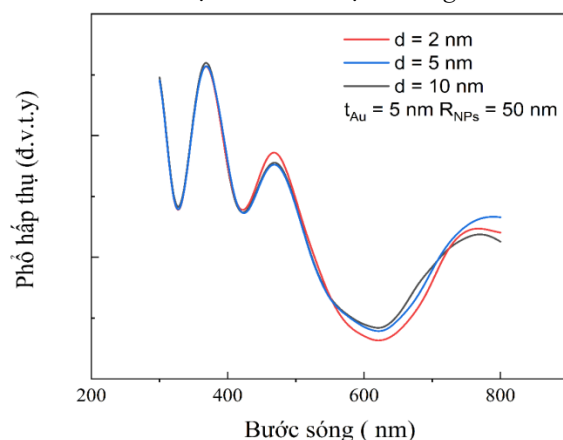


Hình 2. Phổ hấp thụ của cấu trúc hạt nano kim loại NPs Ag – Au – SiO₂ theo độ dày của lớp kim loại Au

Trong phần thứ hai, chúng tôi đã xem xét sự ảnh hưởng của kích thước hạt Ag NPs. Hình 3 chỉ ra sự ảnh hưởng của kích thước hạt NPs đến phổ hấp thụ của cấu trúc NPs – kim loại – cách điện. Ở đây chúng ta dễ dàng nhận thấy rằng, khi kích thước của hạt Ag NPs tăng phổ hấp thụ cũng tăng, đồng thời chúng ta cũng thấy được sự dịch chuyển (red-shift) của đỉnh phổ hấp thụ. Điều này được giải thích là do sự liên kết plasmon giữa các hạt NPs với môi trường xung quanh tăng. Kết quả này cũng phù hợp với nghiên cứu của Karimi và cộng sự [15].



Hình 3. Sự ảnh hưởng của kích thước hạt NPs Ag đến phổ hấp thụ của cấu trúc hạt nano kim loại NPs Ag – Au – SiO₂



Hình 4. Sự ảnh hưởng của khoảng cách giữa các hạt NPs Ag đến phổ hấp thụ của cấu trúc hạt nano kim loại NPs Ag – Au – SiO₂

Trong nghiên cứu này, chúng tôi cũng xem xét sự ảnh hưởng của khoảng cách giữa các hạt Ag NPs, cụ thể khoảng cách giữa các hạt được thay đổi $d = 2$ nm, $d = 5$ nm và $d = 10$ nm trong khi các thông số khác được cố định. Kết quả được thể hiện trong Hình 4. Chúng ta có thể thấy rằng với khoảng cách giữa $d = 5$ nm và 10 nm gần như không có sự thay đổi trong phổ hấp thụ. Tuy nhiên với khoảng cách giữa các hạt $d = 2$ nm có sự thay đổi nhẹ so với hai khoảng cách trước đó. Điều này được giải thích do sự xuất hiện của các “hot-spot” [16].

4. Kết luận

Sự ảnh hưởng của độ dày lớp kim loại trong cấu trúc NPs Ag – Au – SiO₂, cũng như kích thước các hạt nano Ag và khoảng cách giữa các hạt nano kim loại Ag đã nghiên cứu. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra độ dày của lớp Au càng tăng thì phổ hấp thụ càng tăng do có thêm sự cộng hưởng tán xạ bề mặt và có xu hướng đạt đến giá trị bão hòa. Bên cạnh đó nghiên cứu đã chỉ ra có sự dịch chuyển red-shift khi kích thước hạt nano Ag tăng là do sự tăng tương tác plasmon giữa các hạt nano Ag với môi trường xung quanh. Khi khoảng cách giữa các hạt nano Ag giảm xuống dưới 2 nm sẽ có ảnh hưởng đến phổ hấp thụ của cấu trúc do xuất hiện các “hot-spot”.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo mã số B2024.BKA.24.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/REFERENCES

- [1] E. Ozbay, “Plasmonics: Merging Photonics and Electronics at Nanoscale Dimensions,” *Science*, vol. 311, no. 5758, pp. 189-193, 2006, doi: 10.1126/science.1114849.
- [2] K. A. Willets and R. P. Van Duyne, “Localized surface plasmon resonance spectroscopy and sensing,” *Annual Review of Physical Chemistry*, vol. 58, pp. 267-297, 2006.
- [3] W. L. Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen, “Surface plasmon subwavelength optics,” *Nature*, vol. 424, pp. 824–830, 2003, doi: 10.1038/nature01937.
- [4] M. I. Stockman, “Nanoplasmonics: past, present, and glimpse into future,” *Optics Express*, vol. 19, no. 22, pp. 22029-22106, 2011, doi: 10.1364/OE.19.022029.
- [5] P. Bermel, M. Ghebrebrhan, W. Chan, Y. X. Yeng, M. Araghchini, R. Hamam, C. H. Marton, K. F. Jensen, M. Soljačić, J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, and I. Celanovic, “Design and global optimization of high-efficiency thermophotovoltaic systems,” *Optics Express*, vol. 18, no. S3, pp. A314-A334, 2010, doi: 10.1364/OE.18.00A314.
- [6] J. Hao, J. Wang, X. Liu, W. J. Padilla, L. Zhou, and M. Qiu, “High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial,” *Applied Physics Letters*, vol. 96, no. 25, 2010, doi: 10.1063/1.3442904.
- [7] F. B. P. Niesler, J. K. Gansel, S. Fischbach, and M. Wegener, “Metamaterial metal-based bolometers,” *Applied Physics Letters*, vol. 100, no. 20, May 2012, doi: 10.1063/1.4714741.
- [8] E. Prodan, C. Radloff, N. J. Halas, and P. Nordlander, “A Hybridization Model for the Plasmon Response of Complex Nanostructures,” *Science*, vol. 302, pp. 419-422, 2003, doi: 10.1126/science.1089171.
- [9] A. Moreau, C. Ciraci, J. J. Mock, R. T. Hill, Q. Wang, B. J. Wiley, A. Chilkoti, and D. R. Smith, “Controlled-reflectance surfaces with film-coupled colloidal nanoantennas,” *Nature*, vol. 492, pp. 86–89, 2012, doi: 10.1038/nature11615Nature492(2012)86.
- [10] J. J. Mock, R. T. Hill, A. Degiron, S. Zauscher, A. Chilkoti, and D. R. Smith, “Distance-Dependent Plasmon Resonant Coupling between a Gold Nanoparticle and Gold Film,” *Nano Letters*, vol. 8, no. 8, pp. 2245 - 2251, 2008, doi: 10.1021/nl080872f.
- [11] K. Yee, “Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, no. 3, pp. 302-307, May 1966, doi: 10.1109/TAP.1966.1138693.
- [12] K. Umashankar and A. Taflov, “A Novel Method to Analyze Electromagnetic Scattering of Complex Objects,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-24, no. 4, pp. 397-405, Nov. 1982, doi: 10.1109/TEM.1982.304054.
- [13] A. D. Rakić, A. B. Djurišić, J. M. Elazar, and M. L. Majewski, “Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices,” *Applied Optics*, vol. 37, no. 22, pp. 5271-5283, 1998, doi:

- 10.1364/AO.37.005271.
- [14] R. A. Kadhim, L. Yuan, H. Xu, J. Wu, and Z. Wang, "Highly Sensitive D-Shaped Optical Fiber Surface Plasmon Resonance Refractive Index Sensor Based on Ag- α -Fe₂O₃ Grating," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 17, pp. 9816-9824, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.2992854.
- [15] S. Karimi, A. Moshaii, S. Abbasian, and M. Nikkhah, "Surface Plasmon Resonance in Small Gold Nanoparticles: Introducing a Size-Dependent Plasma Frequency for Nanoparticles in Quantum Regime," *Plasmonics*, vol. 14, pp. 851-860, 2019, doi: 10.1007/s11468-018-0866-4.
- [16] A. L. Rodarte and A. R. Tao, "Plasmon-Exciton Coupling between Metallic Nanoparticles and Dye Monomers," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 121, no. 6, pp. 3496-3502, doi: 10.1021/acs.jpcc.6b08905.