



Caracterización de un nuevo diseño de sensor de temperatura basado en el efecto de resonancia de plasmones

Characterization of a new design of temperature sensor based on plasmon resonance effect

Ponce Camacho Miguel Ángel¹ , Heredia Aguilar Mayra Alejandra¹, López Leyva Josué Aarón¹ , Oliveira Leiva Casemiro² 

¹CETYS Universidad, Calzada CETYS s/n, Col. Rivera, C. P. 21259 Mexicali, Baja California, México

²Centro de Ciências Exatas e Naturais, Universidade de Federal Rural do Semi-Árido, Brazil

Autor de correspondencia: Ponce Camacho, Miguel Ángel, CETYS Universidad, Calzada CETYS s/n, Col. Rivera, C. P. 21259 Mexicali, Baja California, México, e-mail: miguel.ponce@cetys.mx, clave ORCID 0000-0002-3320-1277.

Recibido: 30 de Agosto del 2019 **Aceptado:** 15 de Septiembre del 2019 **Publicado:** 20 de Septiembre del 2019

Resumen. - En este trabajo se propone un estudio del efecto de la temperatura sobre la superficie del plasmón polaritón (SPP). En una escala macroscópica, como consecuencia de la variación de temperatura, los materiales muestran dilatación o contracción. Por lo tanto, basado en el efecto SPP, utilizando la configuración de resonancia de plasmón de la superficie de rejilla dorada, se caracteriza un nuevo diseño de sensor de temperatura.

Palabras clave: Sensor de temperatura; Superficie de rejilla de oro resonancia de plasmón; Escala macroscópica

Abstract. - In this work a study of the effect from temperature on surface plasmon polariton (SPP) is proposed. On a macroscopic scale, as a consequence in the variation of temperature, materials show dilation or contraction. Thus, based on SPP effect, using the gold grating surface plasmon resonance configuration, a novel temperature sensor design is characterized.

Keywords: Temperature sensor; Gold grating surface plasmon resonance; Macroscopic scale.

1. Introducción

En años recientes el estudio de la nanotecnología ha experimentado un creciente interés debido a las innumerables aplicaciones que ésta tiene en diferentes transmisiones

óptica a través de aperturas ondulares y alta resolución óptica por debajo del límite de difracción [1].

Los plasmones superficiales también han sido empleados en un amplio espectro de estudios que van desde electroquímica [2] y biosensores [3-5] hasta la microscopía de túnel [6], crecimiento de nanopartículas [7-8], microscopía de plasmones

ramas. Entre ellas destaca su utilidad en la guía óptica y manipulación a nanoescala, biodetección a nivel molecular,

superficiales [9-10] y tecnología de resonancia de plasmones-superficiales [11-17]. Un nuevo interés en los plasmones superficiales se ha originado por los recientes avances en la investigación de propiedades electromagnéticas de materiales nanoestructurados [18-19].



Estos descubrimientos han conducido a la noción de plasmónica como la ciencia y tecnología de la óptica basada en metales y nanofotónica. Varios retos tecnológicos actuales podrían solucionarse mediante el empleo de las propiedades únicas de los plasmones superficiales [1].

Los plasmones polaritones de superficie representan la base para la construcción de circuitos fotónicos a nanoescala capaces de transmitir tanto señales ópticas como corrientes eléctricas. [20-21]. De acuerdo con los nuevos avances registrados en el área, los sensores basados en el fenómeno de resonancia de plasmones superficiales se caracterizan por su alta sensibilidad, precisión, repetibilidad y su bajo límite de detección [22].

El objetivo del presente trabajo es el estudio del efecto de la temperatura en la curva característica del fenómeno de resonancia de plasmones superficiales, la cual ha sido descrita en experimentos previos. El alcance del proyecto es la caracterización mediante una variación de la temperatura de la rejilla de oro con la finalidad de emplear la información resultante en futuros trabajos encaminados al diseño de un sensor de temperatura que se distinga por su alta sensibilidad y precisión.

Con tal fin, iniciaremos con la revisión teórica del fenómeno de resonancia de plasmones. Los plasmones de superficie son oscilaciones de carga eléctrica que se producen en la interface entre un material conductor y un material dieléctrico [1].

La excitación de las cargas superficiales se produce de la siguiente manera. Se considera una onda polarizada con un ángulo incidente (θ_1). La onda incidente tiene un momento fotónico definido por $\hbar k_d$ (donde $k_d = \frac{2\pi n_d}{\lambda}$) en el dieléctrico con un índice de refracción n_d . Cuando la señal de luz llega a la interface, la onda reflejada se propaga a lo largo de la dirección con un ángulo equivalente al incidente y el momento fotónico se conserva. La onda en el metal se propaga en una nueva dirección con un ángulo de refracción θ_2 . El momento fotónico es $\hbar k_m$ (donde $k_m = \frac{2\pi n_m}{\lambda}$, n_m es el índice de refracción del metal y la componente del momento a lo largo de la dirección en x se conserva ie.

$k_{dx}=k_{mx}$, donde $k_{dx}=\text{sen}\theta_1$ y $k_{mx}=k_m\text{sen}\theta_2$ por lo tanto tenemos:

$$n_d\text{sen}\theta_1=n_m\text{sen}\theta_2 \quad (1)$$

A esta relación se le conoce como la ley de Snell. En general, el índice de refracción del dieléctrico n_d es mayor que el del metal n_m (especialmente en los metales nuevos) en el campo visible. Para el oro $n_m=0.608$ a 516.6 nm, $n_m=0.306$ a 563.6 nm.

Por tanto, si $n_d > n_m$ para estas longitudes de onda, el valor máximo para θ_2 es de 90° y el ángulo incidente se ve limitado. Más allá del ángulo limitante, la onda no puede propagarse en el metal, en este caso, el ángulo incidente limitante es conocido como ángulo crítico θ_c el cual está dado por:

$$\text{sen}\theta_c = \frac{n_m}{n_d} \quad (2)$$

Una onda con un ángulo de incidencia mayor a la limitante tiene mayor momento a lo largo de la superficie que pueda ser soportado por el metal. Para la onda polarizada incidente en la interface, el campo eléctrico oscilante causará cargas superficiales en la interface entre el metal y el dieléctrico y las cargas superficiales bajo una oscilación colectiva. A pesar de que la onda es totalmente reflejada en la interface, habrá cargas que tienen campos de radiación asociados que penetran en el metal. Éstas se encuentran en decaída espacialmente (campos evanescentes) en dirección de la normal de la interface. En el ángulo crítico la longitud de decremento es infinita, pero ésta cae rápidamente en el orden en que la longitud de onda de la luz cuando el ángulo de incidencia crece. En estos casos, los campos evanescentes para la onda incidente bajo el ángulo crítico son útiles para radiación de acoplamiento de SPPs [23].

Partiendo de las ecuaciones de campo electromagnético de Maxwell la relación de la dispersión de SPP puede expresarse como:

$$k_{spp} = k \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}} \quad (3)$$

La curva de dispersión para el SPP no exhibe un comportamiento lineal. El momento $\hbar k_{pps}$ de la onda



SPP es mayor que la de la luz en un fotón en espacio libre ($\hbar k$) para la misma frecuencia, lo que resulta en un desajuste de momento entre la luz y el PPS. Dicha diferencia deberá superarse mediante el acoplamiento de los modos de luz y SPP en la interface cuando:

$$\varepsilon_d + \varepsilon_m = 0 \quad (4)$$

Las cargas superficiales pueden generar oscilación colectiva y los PPSs pueden excitarse. Como alcance del presente proyecto se pretende establecer una relación entre una variación de temperatura y su

2. Metodología

En décadas recientes ha habido un interés creciente en la fabricación de sensores compactos basados en resonancia de plasmones. Debido a su alta sensibilidad a pequeños cambios en el índice de refracción y propiedades de materiales, estos dispositivos tienen un gran potencial en diversas áreas de la ingeniería, particularmente en arreglos llamados “lab-on-a-chip”. En el presente trabajo se utiliza una configuración basada en el método de la rejilla metálica de difracción que muestra el efecto de resonancia de plasmones para ángulos de difracción mayores a 90° , configuración muy práctica y conveniente para la realización de las mediciones de los cambios en la intensidad de la señal luminosa. Con una ventaja adicional, al fijar el ángulo de resonancia y variar el ángulo de polarización en un arreglo de montura cónica, el dispositivo ofrece un mayor control, y es aún más compacto que la configuración basada en la variación azimutal del ángulo de resonancia.

El método consiste en una rejilla de difracción de oro como inductor de plasmones polaritones superficiales,

subsecuente repercusión en el fenómeno de resonancia plasmónica. Para el logro de lo anterior se propone como método de estudio una investigación experimental en donde la variable de tratamiento será la temperatura.

Como hipótesis se plantea que una variación de temperatura en el fenómeno de resonancia plasmónica conlleva un cambio en el ángulo de resonancia resultante. De comprobarse lo anteriormente citado el fenómeno en estudio abrirá la pauta para el desarrollo de sensores de temperatura con características prometedoras basados en nanotecnología.

la cual se encuentra encapsulada por una capa de vidrio como material dieléctrico.

El curso de la investigación ha resultado en el diseño de un experimento basado en la resonancia de plasmones con una señal de luz con polarización **p**. El prototipo para mediciones incorpora un sistema de polarizadores lineales que permite la variación del ángulo entre sus ejes de transmisión óptica. De tal forma que, en esta fase experimental, se mide la señal de luz en el orden de difracción $+1$ fijando el ángulo de incidencia en el valor del ángulo resonante. Se mide la señal difractada. Al variar el ángulo de posicionamiento del polarizador la luz del diodo láser cambia su intensidad, obteniéndose un máximo y mínimo de señal. Por tanto, el experimento consistió en realizar un barrido del ángulo de posición del polarizador tomándose lecturas de los haces difractados por la rejilla, los cuales fueron detectados por un fotorresistor.

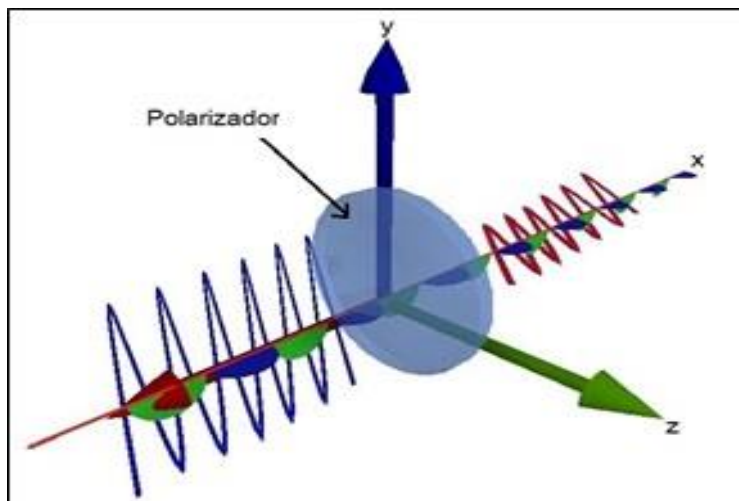


Figura 1. Esquema de trabajo del polarizador lineal.

3. Resultados

De acuerdo con el objetivo planteado se presentaron limitaciones para realizar el estudio del efecto de la temperatura sobre la rejilla de oro. Por tanto, fue necesario replantear el experimento enfocado en la variación del sistema de polarizadores lineales.

con base a un barrido del ángulo de posicionamiento entre los ejes de transmisión del sistema de polarizadores lineales. En la figura 2 se muestran los valores de la intensidad del haz difractado obtenidos del experimento.

En el experimento practicado se realizó una serie de mediciones del haz difractado por la rejilla metálica

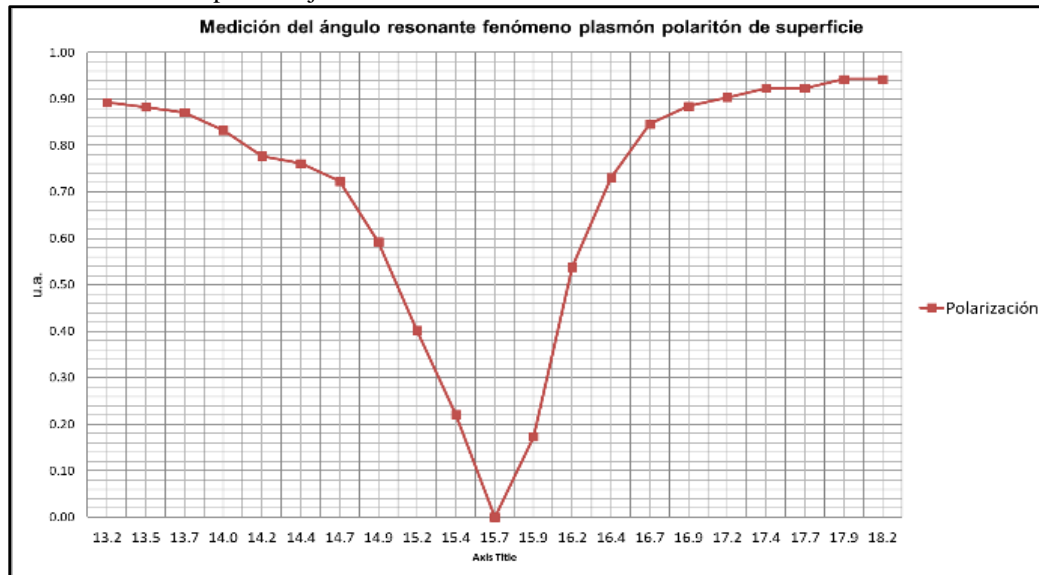


Figura 2. Gráfica de los valores de intensidad empleando una variación en posición del polarizador. Los datos obtenidos se encuentran normalizados.



De acuerdo con los resultados normalizados obtenidos en la figura 2, se observa que la curva en color rojo presenta un mínimo de intensidad, el cual fue ajustado a un ángulo fijo equivalente a 15.75° , el cual se obtuvo como resultado en anteriores experimentos. La gráfica muestra una buena aproximación de la curva característica del fenómeno de resonancia de

plasmones. Lo cual conduce a concluir que es posible caracterizar el fenómeno de resonancia plasmónica mediante una variación de los ejes de transmisión de los polarizadores lineales del prototipo, empleando el método de acoplamiento de la rejilla de difracción.

En la figura 3 se observa la comparativa entre el método propuesto en el presente trabajo, con relación a los resultados en los que se buscó el ángulo resonante

mediante una variación del ángulo de incidencia en la rejilla.

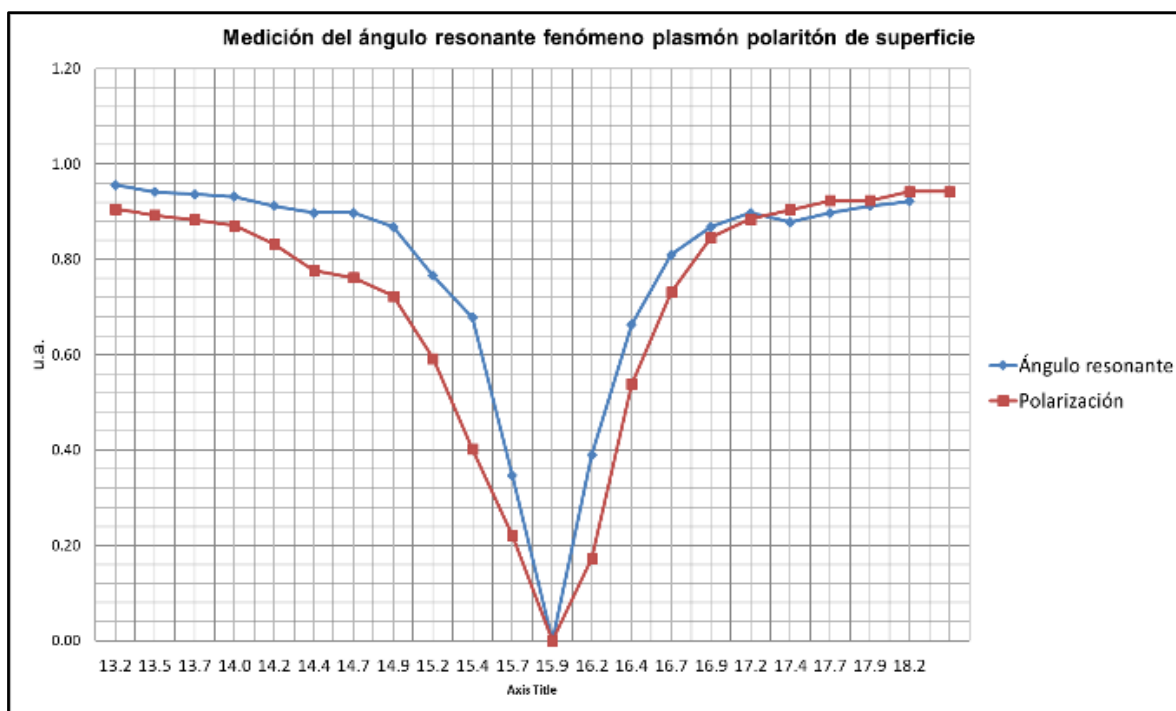


Figura 3. Gráfica comparativa del fenómeno de resonancia con variación del ángulo incidente en color azul y en rojo la curva de valores de intensidad de luz para el experimento donde se fija el ángulo resonante y se modula el ángulo entre los ejes de transmisión del sistema de polarizadores lineales.

En la figura 3 se realiza una comparativa de los dos experimentos llevados a cabo en donde, la curva en color azul representa el ángulo resonante al variar el ángulo incidente del haz de luz del diodo láser, cuyo valor experimental se encontró cercano a los 15.75° .

polarizadores. En la figura 3, se distingue que las curvas obtenidas muestran claramente el fenómeno de resonancia plasmónica, asimismo que la correspondencia entre ambas curvas es muestra similitudes entre sí.

En el segundo experimento, representado por la curva en color rojo, se trabajó con la variación del ángulo formado entre los ejes de transmisión del sistema de

Se llevó a cabo una simulación del efecto de resonancia de plasmón polaritón, en el cual se puede



apreciar un ángulo resonante igual a 16° lo cual se puede constatar en la figura 4.

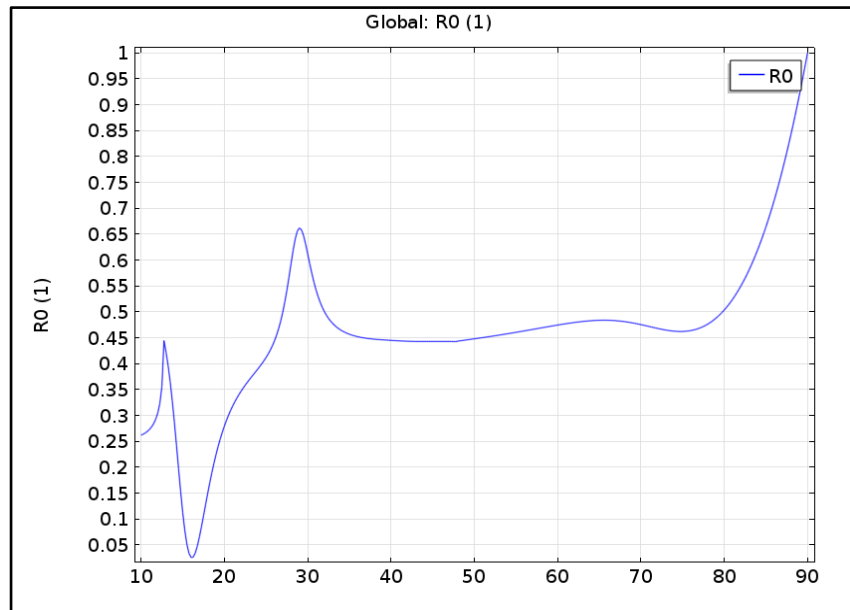


Figura 4. Gráfica obtenida de simulación del fenómeno de plasmón polaritón de superficie por Leiva Casemiro Oliveira.

La simulación realizada considera un amplio rango de ángulo incidente que va desde los 10 a 90° . En la gráfica de la figura 4 se puede reconocer el patrón que sigue la curva simulada y el cual se asemeja a los resultados obtenidos mostrados en las figuras 2-3 para el rango entre 13.2° a 18.2° . El resultado procedente del experimento efectuado data de un ángulo resonante equivalente a 15.75° existiendo una variación de 0.25°

4. Conclusiones

Como se pudo comprobar en el experimento es posible observar el fenómeno de resonancia del plasmón polaritón de superficie fijando el ángulo de incidencia θ_i , y midiendo la variación de la intensidad del haz difractado controlando el ángulo entre los ejes de transmisión del sistema de polarizadores lineales. Con el fin de efectuar lo anterior, fue necesario cambiar la metodología basando la medición del ángulo formado entre dos polarizadores lineales a diferencia del ángulo azimutal formado en la rejilla de

con respecto a la simulación. Lo anterior, indica que la metodología implementada en el presente trabajo, así como aquella empleada en anteriores experimentos permite caracterizar el fenómeno de resonancia de plasmones superficiales.

oro. Se efectuó dicho cambio, debido a las limitaciones encontradas para observar el efecto de la variación de la rejilla directamente dado a que no fue posible apreciarlo.

La aportación desarrollada del presente trabajo consiste en la variante de la metodología, la cual emplea un sistema de polarizadores lineales sobre los cuales se ejerce un cambio del ángulo entre sí, dando como resultado la curva característica del fenómeno de resonancia de plasmones superficiales obtenida en



anteriores estudios haciendo uso de una técnica diferente a la propuesta.

Los resultados derivados de los experimentos efectuados representan un avance en la metodología para el desarrollo de un sensor de temperatura con alta sensibilidad y precisión.

Se plantea como hipótesis para futuros trabajos el diseño de experimentos destinados a medir el efecto que tiene la variación de la temperatura en el sistema de polarizadores lineales, en la intensidad de luz de la señal difractada y con ello ver su aplicabilidad para el diseño de un nuevo sensor de temperatura.

5. Referencias

- [1] M. L. Brongersma and P. G. Kik, *Surface Plasmon Nanophotonics*, 1st ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4333-8>.
- [2] W. Knoll, "Interfaces and Thin Films as Seen by Bound Electromagnetic Waves," *Annu. Rev. Phys. Chem.*, vol. 49, no. 1, pp. 569-638, Oct. 1998. <https://doi.org/10.1146/annurev.physchem.49.1.569>.
- [3] M. Malmqvist, "Biospecific interaction analysis using biosensor technology," *Nature*, vol. 361, no. 6408, pp. 186-187, 1993. <https://doi.org/10.1038/361186a0>.
- [4] R. Narayanaswamy and O. S. Wolfbeis, *Optical Sensors: Industrial Environmental and Diagnostic Applications*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. https://books.google.com.mx/books/about/Optical_Sensors.html?id=IHTfoQEACAAJ&redir_esc=y.
- [5] F.-C. Chien and S.-J. Chen, "A sensitivity comparison of optical biosensors based on four different surface plasmon resonance modes," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 20, no. 3, pp. 633-642, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2004.03.014>.
- [6] R. Berndt, J. K. Gimzewski, and P. Johansson, "Inelastic tunneling excitation of tip-induced plasmon modes on noble-metal surfaces," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 67, no. 27, pp. 3796-3799, Dec. 1991. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.67.3796>.
- [7] R. Jin, Y. Cao, C. A. Mirkin, K. L. Kelly, G. C. Schatz, and J. G. Zheng, "Photoinduced Conversion of Silver Nanospheres to Nanoprisms," *Science (80)*, vol. 294, no. 5548, pp. 1901 LP - 1903, Nov. 2001. <https://doi.org/10.1126/science.1066541>.
- [8] R. Jin, Y. Charles Cao, E. Hao, G. S. Métraux, G. C. Schatz, and C. A. Mirkin, "Controlling anisotropic nanoparticle growth through plasmon excitation," *Nature*, vol. 425, no. 6957, pp. 487-490, 2003. <https://doi.org/10.1038/nature02020>.
- [9] B. Rothenhäusler and W. Knoll, "Surface-plasmon microscopy," *Nature*, vol. 332, no. 6165, pp. 615-617, 1988. <https://doi.org/10.1038/332615a0>.
- [10] G. Flätgen, K. Krischer, B. Pettinger, K. Doblhofer, H. Junkes, and G. Ertl, "Two-Dimensional Imaging of Potential Waves in Electrochemical Systems by Surface Plasmon Microscopy," *Science (80)*, vol. 269, no. 5224, pp. 668 LP - 671, Aug. 1995. <https://doi.org/10.1126/science.269.5224.668>.
- [11] J. G. Gordon and S. Ernst, "Surface plasmons as a probe of the electrochemical interface," *Surf. Sci.*, vol. 101, no. 1, pp. 499-506, 1980. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(80\)90644-5](https://doi.org/10.1016/0039-6028(80)90644-5).
- [12] B. Liedberg, C. Nylander, and I. Lunström, "Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing," *Sensors and Actuators*, vol. 4, pp. 299-304, 1983. [https://doi.org/10.1016/0250-6874\(83\)85036-7](https://doi.org/10.1016/0250-6874(83)85036-7).
- [13] S. C. Schuster, R. V Swanson, L. A. Alex, R. B. Bourret, and M. I. Simon, "Assembly and function of a quaternary signal transduction complex monitored by surface plasmon resonance," *Nature*, vol. 365, no. 6444, pp. 343-347, 1993. <https://doi.org/10.1038/365343a0>.
- [14] P. Schuck, "Reliable determination of binding affinity and kinetics using surface plasmon resonance biosensors," *Curr. Opin. Biotechnol.*, vol. 8, no. 4, pp. 498-502, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(97\)80074-2](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(97)80074-2).



- [15] J. Homola, S. S. Yee, and G. Gauglitz, "Surface plasmon resonance sensors: review," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 54, no. 1, pp. 3-15, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(98\)00321-9](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(98)00321-9).
- [16] A. R. Mendelsohn and R. Brent, "Protein Interaction Methods-Toward an Endgame," *Science* (80-), vol. 284, no. 5422, pp. 1948 LP - 1950, Jun. 1999. <https://doi.org/10.1126/science.284.5422.1948>.
- [17] R. J. Green, R. A. Frazier, K. M. Shakesheff, M. C. Davies, C. J. Roberts, and S. J. B. Tendler, "Surface plasmon resonance analysis of dynamic biological interactions with biomaterials," *Biomaterials*, vol. 21, no. 18, pp. 1823-1835, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(00\)00077-6](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(00)00077-6).
- [18] J. Pendry, "Playing Tricks with Light," *Science* (80-), vol. 285, no. 5434, pp. 1687 LP - 1688, Sep. 1999. <https://doi.org/10.1126/science.285.5434.1687>.
- [19] E. Prodan, C. Radloff, N. J. Halas, and P. Nordlander, "A Hybridization Model for the Plasmon Response of Complex Nanostructures," *Science* (80-), vol. 302, no. 5644, pp. 419 LP - 422, Oct. 2003. <https://doi.org/10.1126/science.1089171>.
- [20] W. L. Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen, "Surface plasmon subwavelength optics," *Nature*, vol. 424, no. 6950, pp. 824-830, 2003. <https://doi.org/10.1038/nature01937>.
- [21] W. Nomura, M. Ohtsu, and T. Yatsui, "Nanodot coupler with a surface plasmon polariton condenser for optical far/near-field conversion," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, no. 18, p. 181108, Apr. 2005. <https://doi.org/10.1063/1.1920419>.
- [22] J. Homola, "Present and future of surface plasmon resonance biosensors," *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 377, no. 3, pp. 528-539, 2003. <https://doi.org/10.1007/s00216-003-2101-0>.
- [23] J. Zhang, L. Zhang, and W. Xu, "Surface plasmon polaritons: physics and applications," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 11, p. 113001, 2012. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/11/113001>.
- [24] K. M. McPeak, S. V. Jayanti, S. J. P. Kress, S. Meyer, S. Iotti, A. Rossinelli, and D. J. Norris, "Plasmonic films can easily be better: Rules and recipes," *ACS Photonics* 2, 326-333, 2015. <https://doi.org/10.1021/ph5004237>.
- [25] S. Babar and J. H. Weaver, "Optical constants of Cu, Ag, and Au revisited," *Appl. Opt.* 54, 477-481, 2015. <https://doi.org/10.1364/AO.54.000477>.
- [26] F. Lemarchand, private communications (2013). Index determination is performed using method explained in: L. Gao, F. Lemarchand, and M. Lequime. Comparison of different dispersion models for single layer optical thin film index determination, *Thin Solid Films* 520, 501-509 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.07.028>.
- [27] R. L. Olmon, B. Slovick, T. W. Johnson, D. Shelton, S.-H. Oh, G. D. Boreman, and M. B. Raschke, "Optical dielectric function of gold," *Phys Rev. B* 86, 235147, 2012. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.235147>.
- [28] W. S. M. Werner, K. Glantschnig, C. Ambrosch-Draxl, "Optical constants and inelastic electron-scattering data for 17 elemental metals," *J. Phys Chem Ref. Data* 38, 1013-1092, 2009. <https://doi.org/10.1063/1.3243762>.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)