



Confinamiento de luz en escalas de sublongitud de onda: análisis teórico experimental

CARLOS MARTÍNEZ HERNÁNDEZ*

La propagación bidimensional de modos electromagnéticos en medios estructurados ha sido objeto de intensos estudios en los últimos años. El medio estructurado produce esparcimiento múltiple de modos electromagnéticos, da lugar a la posibilidad del fenómeno conocido como localización de modos electromagnéticos. Este fenómeno es una manifestación de campos evanescentes (no propagativos) que pueden ser detectados sólo con técnicas de microscopía óptica de barrido de campo cercano (MOBCC). Esta técnica implica el uso de equipo sofisticado y costoso del que, generalmente, no se dispone en los laboratorios por lo que en este trabajo se propone como alternativa experimental el uso de microondas. Los microscopios de barrido de campo cercano en el rango de microondas (MMBCC) se han usado en estudios de permitividad en materiales dieléctricos,¹ mediciones en circuitos planos de alta frecuencia² y en circuitos impresos,³ mapeo de resistividad,³ conductividad,^{4,5} constante dieléctrica,^{3,6} semiconductores,^{3,4,6} superconductores,³ muestras biológicas y botánicas,⁷ impedancia eléctrica de aislantes y conductores.⁵ La técnica también ha sido usada en términos de mejorar su resolución^{6,8} y extender los resultados hacia el rango óptico.^{1,9} Aunque, en el rango de las microondas, las demandas mecánicas y de precisión son menos severas que en el visible; los MMBCC repor-

tados, hasta el mejor de nuestro conocimiento, no son simples en diseño y operación.^{3,7,8} Sin embargo, el uso de un MMBCC es una eficaz alternativa para mejorar nuestro entendimiento de los fenómenos en escalas de sublongitud de onda, ya que permite realizar un modelo a escala del experimento y mantener la ventaja de la super resolución. El objetivo de este trabajo es lograr el control local y confinamiento de modos evanescentes. Para este fin, la parte teórica se investigó usando el llamado modelo escalar de múltiple esparcimiento. Se presentan las simulaciones numéricas de componentes para una potencial óptica bidimensional de modos evanescentes, en particular para plasmones de superficie (PS). En el aspecto experimental, se propone el uso de técnicas de MOBCC para el rango de microondas, con el fin de confinar modos electromagnéticos bidimensionales de forma controlada para la investigación de nanoestructuras. Se propone un diseño simple de un MMBCC y se demuestra el funcionamiento del mismo. El MMBCC funciona a la frecuencia de 10.56 GHz y está diseñado para operar en diferentes modos de iluminación. Con lo anterior, se tendrá un nuevo método para investigar la concentración de altas energías en regiones de dimensiones de sublongitud de onda, lo

* Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, UANL, Pedro de Alba S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, N. L., México 66450.

cual abre el camino hacia el desarrollo de la llamada *óptica bidimensional de nanoestructuras*.

Modelo teórico

El modelo usado se basa en las siguientes suposiciones: 1) el esparcimiento elástico (en el plano) de PS es dominante, respecto al esparcimiento fuera del plano de la superficie de la interfase; 2) el PS esparcido por un esparcidor individual se representa por un PS cilíndrico isótropo. Estas suposiciones son consistentes con las observaciones experimentales.¹¹ En el régimen de esparcimiento lineal, la amplitud de un PS esparcido es proporcional a la del PS incidente en el sitio del esparcidor. La rugosidad de la superficie se puede considerar formada por esparcidores puntuales, caracterizados por su polarizabilidad efectiva, la cual relaciona las amplitudes de PS esparcido con las del PS incidente. Tomando en cuenta que la geometría del esparcimiento elástico de PS es esencialmente bidimensional, tenemos que en cualquier punto sobre la superficie cuya coordenada es \vec{r} , el campo eléctrico total \vec{E} asociado con PS, que es la superposición de PS cilíndricos con el mismo número de onda β (igual al del PS incidente),¹² muestra la misma dependencia espacial a lo largo de la dirección perpendicular a la superficie de la interfase. Por lo tanto, el bien conocido decaimiento exponencial del campo eléctrico de PS en el medio se puede omitir. Además, es razonable suponer que la componente del campo paralela a la superficie es ridículamente pequeña en comparación con la componente perpendicular. Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, el campo total $\vec{E}(\vec{r})$ asociado con PS, en cualquier punto arbitrario \vec{r} sobre la superficie, el cual no coincide con la posición de los esparcidores, se puede escribir como:

$$E(\vec{r}) = E_0(\vec{r}) + \sum_{j=1}^N \alpha_j E(\vec{r}_j) G(\vec{r}, \vec{r}_j) \quad (1)$$

con

$$G(\vec{r}, \vec{r}_j) = \frac{i}{4} H_0^1(\beta |\vec{r} - \vec{r}_j|)$$

donde E_0 corresponde al PS incidente, α_j es la polarizabilidad efectiva del j -ésimo esparcidor, localiza-

do en la coordenada superficial \vec{r} (mientras se considere el esparcimiento elástico), N es el número de esparcidores, H_0^1 es la función de Hankel de orden cero y de primera clase, y β es la constante de propagación del PS incidente. Para medios semi-infinitos a ambos lados de la interfase metal/aire, la constante de propagación está dada por $\beta = (2\pi/\lambda)[\epsilon/(\epsilon+1)]^{1/2}$, donde λ es la longitud de onda de la luz en el aire, y ϵ la constante dieléctrica del metal.

La relación general para el campo eléctrico total de PS, (1) es una ecuación autoconsistente del esparcimiento múltiple, que sólo se puede usar después de determinar el campo autoconsistente, en los sitios de los esparcidores, $E(\vec{r}_j)$, el cual está dado por:

$$E(\vec{r}_j) = E_0(\vec{r}_j) + \sum_{k=1, k \neq j}^N \alpha_k E(\vec{r}_k) G(\vec{r}_j, \vec{r}_k) \quad (2)$$

El sistema de ecuaciones autoconsistentes dado por (2) se puede resolver de manera exacta, con métodos de álgebra lineal, siempre y cuando el número de esparcidores no sea muy grande (usualmente menos de 400), ya que el tiempo de cómputo aumenta.

Los parámetros utilizados en las simulaciones son $\epsilon = -16 + i$ para la constante dieléctrica, que es un valor típico para películas delgadas de plata con $\lambda = 633$ nm para la longitud de onda de iluminación en el vacío. El valor de la polarizabilidad α se elige de tal manera que el contraste, en la imagen simulada, corresponda al contraste experimental.

Consideremos ahora microcomponentes ópticos que consisten en esparcidores colocados en un área de 5×5 mm² e iluminados por PS (figura 1). Colocando un conjunto de esparcidores en un arreglo lineal, se puede obtener un frente de onda plano de la luz esparcida. En este caso se ha modelado un arreglo lineal, cuya inclinación respecto al campo aplicado es de 90° (figura 1 (a)). Otro dispositivo microóptico realizable con un arreglo de nanopartículas es el microespejo parabólico. La idea consiste en colocar las partículas a lo largo de una curva parabólica $(y - y_0)^2 = 4F(x - x_0)$, donde las coordenadas (x_0, y_0) se localizan en el vértice del espejo, F es la distancia focal y x está a lo largo del eje óptico. Por lo tanto, en el punto $(x_0 + F, y_0)$ se espera una concen-

tración de luz. En la figura 1 (b, c), estas ideas se llevan a cabo para un espejo parabólico con dimensiones diferentes. El enfoque conduce a un reforzamiento de la intensidad en el punto focal de hasta 10 y 20 veces para cada caso. En la figura 1 (b), el espejo parabólico logra cierto enfocamiento en una zona extensa a lo largo del eje óptico, aunque este efecto es relativamente bajo. Cuando la distancia focal se disminuye, el espejo resultante logra un enfocamiento notablemente mejor, ya que la zona de enfocamiento está bien localizada y en el punto focal del espejo (figura 1 (c)). Lo anterior concuerda con otros cálculos¹¹ que han demostrado que con espejos de dimensiones similares, al aumentar el número de esparcidores y disminuir la distancia focal, se logran grandes reforzamientos de la señal en el punto focal. En materia de aplicación, los microespejos parabólicos son interesantes en el sentido de que dan la posibilidad de reforzar localmente la señal de PS de manera controlada. Las simulaciones presentadas demuestran la factibilidad de crear componentes microópticos bidimensionales, mediante el arreglo de un conjunto de esparcidores especialmente configurados, con el propósito de lograr el control

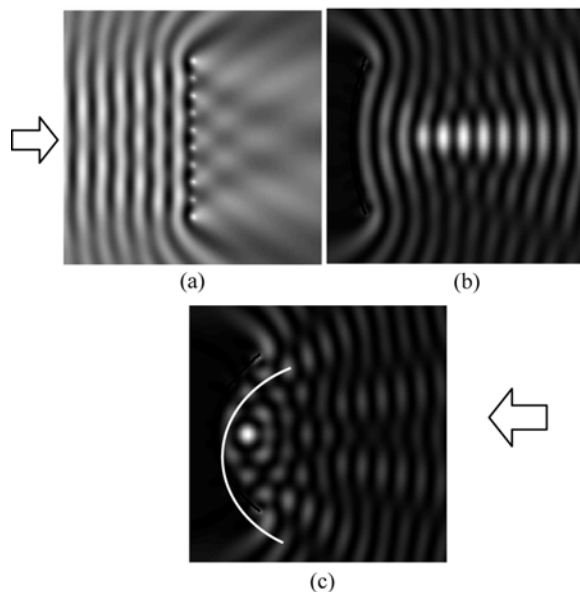


Fig. 1. Escala de grises de la distribución de intensidad en un área de $5 \times 5 \text{ m}^2$ calculada (en el régimen de esparcimiento múltiple), para (a) un microespejo formado por diez esparcidores individuales, (b, c) un microespejo parabólico con distancias focales diferentes. La línea blanca indica la posición de los esparcidores del espejo. Las flechas indican la dirección de propagación del PS incidente.

local de la luz en la escala de sublongitudes de onda.

Arreglo experimental

El arreglo experimental se muestra esquemáticamente en la figura 2. Consiste de un microscopio de barrido de campo cercano en el rango de microondas (MMBCC) combinado con un arreglo para la generación de microondas evanescentes. La fuente de microondas es una unidad comercial que consiste de un diodo emisor de microondas, que proporciona 15 mW de salida de microonda, coherente y linealmente polarizada, con una longitud de onda, l , de 2.85 cm.

La unidad completa se compone de un diodo emisor, localizado en una cavidad resonante a 10.525 GHz, una corneta para dirigir la salida de las microondas y una base de 18 cm de alto que ayuda a re-

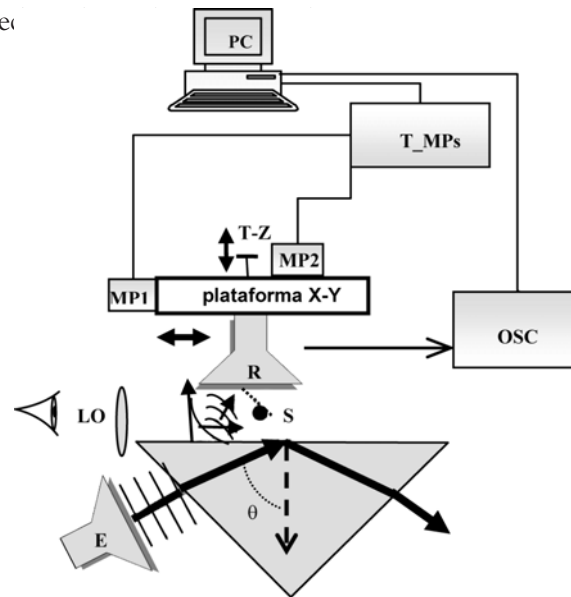


Fig. 2. Representación esquemática del microscopio de barrido de campo cercano en el rango de microondas para obtener imágenes de distribuciones de intensidad de modos evanescentes generados para la longitud de $\lambda = 2.8 \text{ cm}$: E, emisor; θ , ángulo de incidencia; LO, lente óptica; S, sonda; R, receptor; OSC, osciloscopio digital; T_MPs, tarjeta para controlar motores a pasos; PC, computadora personal; MP1, MP2, motores a pasos 1,2; T-Z, tornillo para movimiento-z.

El diodo emisor actúa como una resistencia no-lineal que oscila en la banda de microondas (1-300 GHz). La salida está linealmente polarizada a lo largo del eje vertical de la corneta. El receptor de microondas es una corneta idéntica a la del emisor que colecta la señal y la envía a un diodo Schottky,

en una cavidad resonante a 10.525 GHz. El diodo responde únicamente a la componente de la señal de microondas polarizada a lo largo del eje del diodo, y produce un voltaje que varía con la magnitud de la señal de microondas. El barrido del microscopio se efectúa con un sistema de barrido (no comercial) que mueve una sonda a lo largo de una muestra fija. La ventaja de este modo de operación es que se pueden barrer diferentes partes de una muestra grande manteniendo las condiciones de iluminación sin cambio. El escáner es particularmente sencillo y se basa en un sistema de dos motores a pasos para controlar el movimiento en el plano xy . El movimiento se controla por computadora a través de una tarjeta electrónica (no comercial). La sonda para esparcir la señal de campo cercano es una esfera metálica de 1.5 mm de radio, la cual actúa como un centro eficiente de esparcimiento de la señal evanescente en la cual está inmersa. Además, se utiliza un tornillo mecánico para aproximar o retraer la sonda respecto a la superficie. La presencia de la sonda frustra la RTI en la forma de ondas que se propagan, proporcionando así una señal de microondas proporcional a la intensidad del campo que existiría en la muestra en ausencia de la sonda. En la figura 3 se muestra una imagen digital del arreglo experimental.



Fig. 3. Imagen digital del arreglo experimental. Las notaciones son las mismas que las de la figura 2.

Una vez que la sonda se acerca a la superficie, el máximo nivel de señal detectado se toma como el punto de contacto entre la sonda y la superficie. Se

utiliza una lente óptica para el control de la distancia sonda-superficie mediante inspección visual. La imagen de la señal se efectúa en el modo de altura constante.^{11,13,14} Cuando se barre la sonda sobre la muestra, el extremo de ésta puede tocar ligeramente la superficie y genera fuerzas de fricción entre la punta de la sonda y la superficie. Para disminuir esto, la sonda se colocó en el extremo de un resorte, tipo fleje, de material acrílico. Así, una vez en contacto con la superficie, el resorte sufre una deflexión vertical, lo cual permite al dispositivo barrer partes de la muestra con alturas hasta del orden de $l/2$. Por último, la señal se envía, a través de un osciloscopio digital, a una computadora para ser procesada por el programa de control desarrollado para este trabajo, que incluye funciones como posicionamiento de la sonda en el plano xy y control de la rapidez de barrido. La rapidez de barrido está limitada por el número de datos colectados para un solo punto mapeado. Para asegurar una razón señal/ruido suficientemente alta, típicamente se colectan 5000 valores de la señal. La resolución del paso de los motores es de 0.125 cm para un paso sencillo (píxel).

Resultados

Se caracterizaron esferas de hierro para determinar la magnitud del radio que podría responder más eficientemente al esparcimiento elástico, efecto deseable, de los modos de microondas evanescentes. Se encontró que una esfera de ~ 0.5 cm de radio produce una perturbación de la señal en forma de franjas casi parabólicas. El efecto es similar al reportado en el caso óptico.¹¹ Para lograr un control sistemático y local de la distribución de intensidad de campo cercano, se sugiere colocar los esparcidores con cierto orden y con una separación entre ellos menor de $l/2$. Esta idea se llevó a cabo para un arreglo lineal de cinco esparcidores, cuya inclinación respecto al campo aplicado es de 90° . La imagen del espejo lineal muestra la interferencia entre la microonda evanescente incidente y la reflejada, mostrando un comportamiento satisfactorio para incidencia normal (figura 4a, 4b). Otro componente bidimensional investigado fue un espejo parabólico.¹¹ Idealmente, el espejo para enfocamiento con-

siste en esparcidores colocados a lo largo de una curva parabólica cuya ecuación es de la forma $y = ax^2 + bx + c$, donde (x_0, y_0) localiza al vértice del espejo, el eje x está orientado a lo largo del eje óptico y F es la distancia focal.

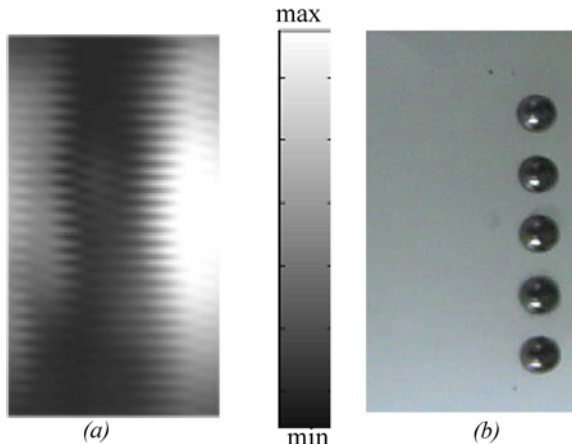


Fig. 4. (a) Escala de grises de la imagen de campo cercano, de $4 \times 8 \text{ cm}^2$, debido al esparcimiento elástico de la microonda evanescente que viaja de izquierda a derecha hacia la línea de esparcidores colocados sobre la superficie del prisma de parafina; (b) imagen digital del espejo lineal.

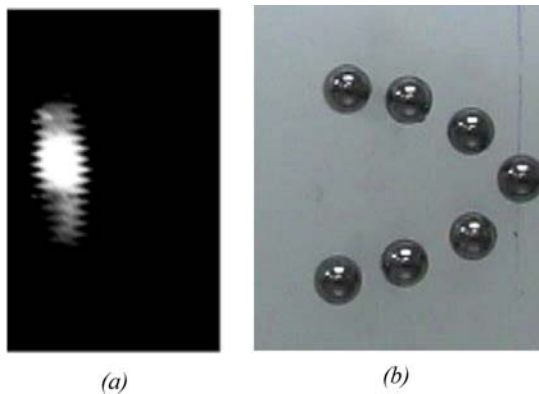


Fig. 5. (a) Representación en escala de grises de la imagen de $4 \times 8 \text{ cm}^2$, debida al esparcimiento elástico de microondas evanescentes que viajan de izquierda a derecha hacia el arreglo parabólico de esparcidores sobre la superficie de parafina de un prisma; (b) la correspondiente imagen digital de la superficie (no está a escala).

En base a esto, se fabricó un espejo parabólico con una longitud focal $F = 2.5 \text{ cm}$, como se ilustra en la figura 5 (b). El efecto de enfocamiento se muestra claramente en la figura 5 (a). Dicho efecto también se puede apreciar en la figura 5 (c) donde se muestra el reforzamiento de la señal de hasta diez veces la señal promedio. El reforzamiento de la señal, en la zona de enfocamiento del espejo parabólico, indica

que dicho efecto está relacionado directamente con el componente fabricado. No obstante que esta técnica puede usarse con ciertas limitaciones como el tamaño de la muestra y la resolución del paso de los motores, proporciona un medio potencial para verificar, a escala, micro y nanocomponentes formados por esparcidores individuales, como los divisores de haz e interferómetros.^{15,16}

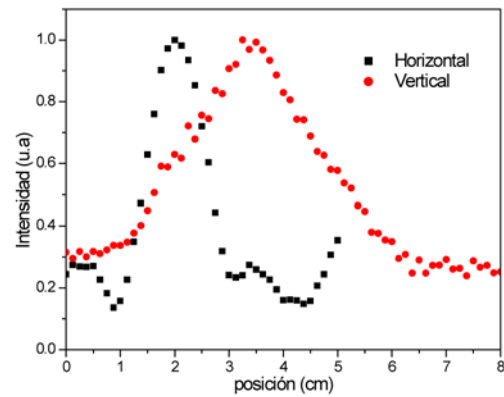


Fig. 5. (c) Sección transversal, horizontal (cuadros llenos) y vertical (círculos llenos), de la imagen de (a). La sección transversal horizontal está a lo largo del eje óptico del espejo parabólico y la sección transversal vertical a través del área de enfocamiento. La escala de grises es la misma que en la figura 3.

Conclusiones

Con el modelo escalar de múltiple esparcimiento, se simuló numéricamente dos tipos de microcomponentes, compuestos por un conjunto de microesparcidores. Se estudió el efecto que tiene el arreglo geométrico de los esparcidores sobre la distribución de intensidad, demostrando la factibilidad de crear componentes microópticos bidimensionales, mediante el arreglo de un conjunto de esparcidores especialmente configurados, con el propósito de lograr el control local de la luz en la escala de sublongitudes de onda. Se diseñó y construyó un MMBCC, el cual incluye la electrónica y el software para el control y adquisición de datos. Se demostró que el MMBCC tiene capacidad para obtener imágenes de campo cercano de microondas evanescentes. Este dispositivo tiene ventajas como la construcción con materiales accesibles, lo cual reduce los costos de investigación y aumenta la posibilidad de mejorar la resolución usando sondas más pequeñas.

El trabajo experimental a futuro podría estar dirigido al diseño y a la construcción de microcircuitos, es decir, a combinar diferentes componentes para crear cualquier clase de circuito óptico integrado. Es deseable desarrollar trabajo de investigación sobre la excitación local de modos evanescentes. Esto podría aplicarse en áreas como la química de superficies, biosensores y óptica de superficies.

Resumen

Usando el modelo escalar de múltiple esparcimiento, en el cual la respuesta de un esparcidor individual al campo incidente se describe por su polarizabilidad dipolar isótropa, se simuló el comportamiento de dos tipos de espejos bidimensionales formados por un conjunto de esparcidores puntuales. Las simulaciones numéricas presentadas muestran la factibilidad de crear componentes microópticos bidimensionales, para el control local de la luz en la escala de sublongitudes de onda. El control local de microondas evanescentes se investigó experimentalmente usando un microscopio de barrido de campo cercano en el rango de microondas. Se muestran dos espejos bidimensionales para el control local de microondas evanescentes junto como sus correspondientes imágenes de campo cercano y su eficiencia es discutida.

Palabras clave: Microscopía de barrido de campo cercano, Confinamiento de luz, Ondas evanescentes, Microondas.

Abstract

Using the multiple scattering model, in which the response of an individual scatterer to the incident field is described by its isotropic dipolar polarizability, the behavior of two kinds of two-dimensional mirrors, formed by sets of point scatterers, are simulated. Numerical simulations are presented, showing the feasibility to make two dimensional micro components for local control of light in the subwavelength scales. Local control of evanescent microwave is experimentally investigated using a scanning near-field microwave microscope. A set of two dimensional mirrors for local control of

evanescent modes are shown along with their corresponding near field images, and their efficiency is discussed.

Keywords: Scanning near-field microscopy, Light confinement, Evanescent waves, Microwaves.

Agradecimientos

El autor agradece a las autoridades de la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la UANL, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

Referencias

1. Fee, M., Chu, S. y Hansch, T. W. Scanning electromagnetic transmission line microscope with sub-wavelength resolution. *Opt. Commun.* 69: 219-224. (1989).
2. Osofsky, S. S. y Schwarz, S. E. Design and performance of a non-contacting probe for measurements on high-frequency planar circuits. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.* 40: 1701-1708. (1992).
3. Golosovsky, M. y Davidov, D. Novel millimeter-wave near-field resistivity microscope. *Appl. Phys. Lett.* 68: 1579-1581. (1996).
4. Kramer, A., Keilman, F., Knoll, B. y Guckenberger, R. The coaxial tip as a nano-antenna for scanning near-field microwave transmission microscopy. *Micron.* 27: 413-417. (1996).
5. Abu-Teir, M., Glosovsky, M., Davidov, D., Frenkel, A. y Goldberger, H. Near-field scanning microwave probe based on a dielectric resonator. *Rev. Sci. Instrum.* 72: 2073-2078. (2001).
6. Lu, Y., Wei, T., Duewer, F., Lu, Y., Ming, N-B., Schultz, P. G. y Xiang, X.-D. Nondestructive imaging of dielectric-constant profiles and ferroelectric domains with a scanning-tip microwave near-field microscope. *Science.* 276: 2004-2006. (1997).
7. Tabib-Azar, M., Katz, J. L. y LeClair, S. R. Evanescent microwaves: a novel super-resolution noncontact nondestructive imaging technique for biological applications. *IEEE*

- Trans. of Instrum. and Measurement. 48: 1111-1116. 1(1999).
8. Lee, Ch. H. Picosecond optics and microwave technology. IEEE Trans. On Microwave Theory and Tech. 38: 596-606. (1990).
 9. Grober, R. D., Schoelkopf, R. J. y Prober, D. E. Optical antenna: toward a unit efficiency near-field optical probe. Appl. Phys. Lett. 70: 1354-1356. (1997).
 10. Keilmann, F., Van der Weide, D. W., Eickelkamp, T., Merz, R. y Stockle, D. Extreme sub-wavelength resolution with a scanning radio-frequency transmission microscope. Opt. Commun. 129: 15-18. (1996).
 11. Bozhevolnyi, S. I. y Coello, V. Elastic scattering of surface plasmon polaritons: Modeling and experiment. Phys. Rev. B. 58: 10899-10910. (1998).
 12. Valle, P. J., Ortiz, E. M. y Saiz, J. M. Opt. Commun. 137: 334. (1997).
 13. Reddick, R. C., Warmack, R. J. y Ferrel, T. L. New form of scanning optical microscopy. Phys. Rev. B. 39: 767-770. (1989).
 14. Meixner, J., Bopp, M. A. y Tarrach, G. Direct measurement of standing evanescent wave with a photon-scanning tunneling microscope. Appl. Opt. 33: 7995-8000. (1994).
 15. Ditlbacher, H., Krenn, J. R., Schider, G., Leitner, A. y Aussenegg, F. R. Two dimensional optics with surface plasmon polariton. Appl. Phys. Lett. 81: 1762-1764. (2002).
 16. Coello, V., Sondergaard, T., Bozhevolnyi, S. I. Modeling of a surface plasmon polariton interferometer. Opt. Commun. 240: 345-350. (2004).

Recibido: 17 de julio de 2007
Aceptado: 05 de octubre de 2007