Plasmones de Superficie

Introducción, análisis matemático y aplicaciones

Mariana E. Farías Anguiano

sasuke@licifug.ugto.mx

Instituto de Física
Universidad de Guanajuato

Estado Sólido, octubre 2008

Contenido

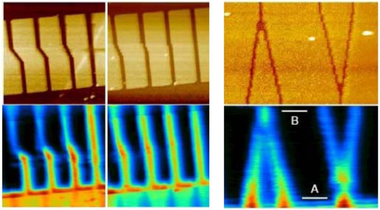
Contenido

Contenido

Contenido

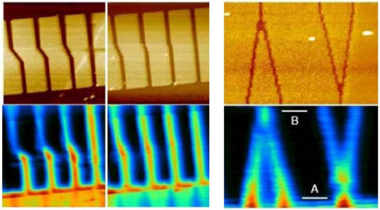
Tecnología del siglo XXI

- Son un tipo de excitación elemental en **sólidos**. Los fotones llegan a la superficie de un metal, quedan atrapados por los electrones libres y son transportados al interior del material.



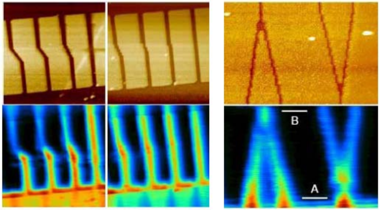
Tecnología del siglo XXI

- Son un tipo de excitación elemental en **sólidos**. Los fotones llegan a la superficie de un metal, quedan atrapados por los electrones libres y son transportados al interior del material.
- Son “partículas” que pueden ser usadas para transportar luz a través de una lámina. Es decir, no reflejan luz incidente: ¡la transmiten!



Tecnología del siglo XXI

- Son un tipo de excitación elemental en **sólidos**. Los fotones llegan a la superficie de un metal, quedan atrapados por los electrones libres y son transportados al interior del material.
- Son “partículas” que pueden ser usadas para transportar luz a través de una lámina. Es decir, no reflejan luz incidente: ¡la transmiten!
- Con ellos podrían fabricarse: procesadores que trabajen a la velocidad de la luz, *“nanoshells”* que contengan dosis de insulina para tratar diabéticos, y hasta lentes “perfectas”.



Contenido

Descubrimiento de los plasmones

- En la literatura, los plasmones de superficie fueron reportados por primera vez en 1957 por R. H. Ritchie.

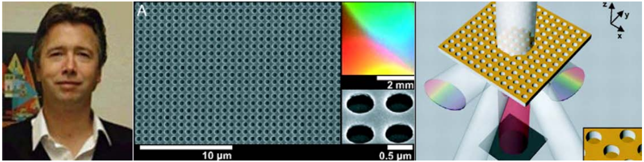


Figura: Thomas Ebbesen. Imágenes de un cristal plasmónico cuasi-tridimensional.

Descubrimiento de los plasmones

- En la literatura, los plasmones de superficie fueron reportados por primera vez en 1957 por R. H. Ritchie.
- Su descubrimiento se produjo en 1984: **Ebbesen** iluminó una estrecha lámina de oro con millones de agujeros microscópicos.

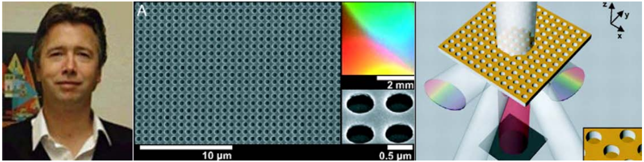


Figura: Thomas Ebbesen. Imágenes de un cristal plasmónico cuasi-tridimensional.

Descubrimiento de los plasmones

- En la literatura, los plasmones de superficie fueron reportados por primera vez en 1957 por R. H. Ritchie.
- Su descubrimiento se produjo en 1984: **Ebbesen** iluminó una estrecha lámina de oro con millones de agujeros microscópicos.
- La explicación de este fenómeno la dieron nueve años más tarde en el artículo que publicaron en la revista *Nature* en febrero de 1998.

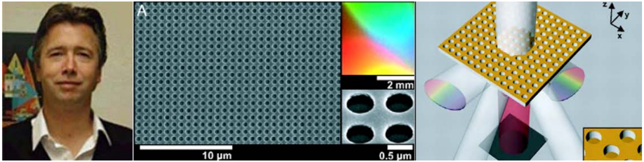


Figura: Thomas Ebbesen. Imágenes de un cristal plasmónico cuasi-tridimensional.

Contenido

Definición

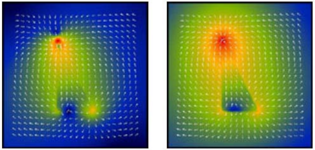


Figura: Distribución de amplitud del campo eléctrico en una nanopartícula triangular.

- Es un cuanto de una oscilación de un plasma. Cuasipartícula [fotones] [fonones].

Definición

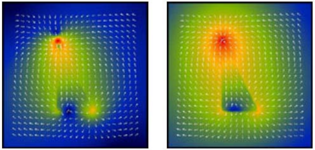


Figura: Distribución de amplitud del campo eléctrico en una nanopartícula triangular.

- Es un cuanto de una oscilación de un plasma. Cuasipartícula [fotones] [fonones].
- Oscilaciones colectivas de la densidad del gas de e's libres; frecuencias visibles. "Polaritón de plasma" (*plasma polariton*).

Definición

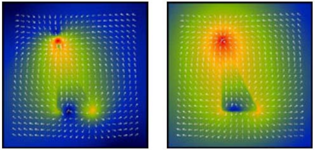


Figura: Distribución de amplitud del campo eléctrico en una nanopartícula triangular.

- Es un cuanto de una oscilación de un plasma. Cuasipartícula [fotones] [fonones].
- Oscilaciones colectivas de la densidad del gas de e's libres; frecuencias visibles. "Polaritón de plasma" (*plasma polariton*).
- Cuantizaciones de oscilaciones clásicas de plasma $\rightarrow$ muchas de sus propiedades pueden derivarse directamente de la ecuaciones de Maxwell.

Definición

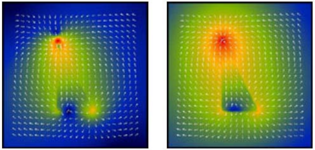


Figura: Distribución de amplitud del campo eléctrico en una nanopartícula triangular.

- Es un cuanto de una oscilación de un plasma. Cuasipartícula [fotones] [fonones].
- Oscilaciones colectivas de la densidad del gas de e's libres; frecuencias visibles. "Polaritón de plasma" (*plasma polariton*).
- Cuantizaciones de oscilaciones clásicas de plasma $\rightarrow$ muchas de sus propiedades pueden derivarse directamente de la ecuaciones de Maxwell.
- Modelo de Drude de metales.

Contenido

Función Dieléctrica del Gas de Electrones

- La función dieléctrica $\epsilon(\omega, \mathbf{K})$ en el límite K $\rightarrow$ 0, describe las excitaciones colectivas del **mar de Fermi**. En el otro límite ($\omega \rightarrow$ 0) describe los apantallamientos electrostáticos electrón-electrón y electrón-red.

Función Dieléctrica del Gas de Electrones

- La función dieléctrica $\epsilon(\omega, \mathbf{K})$ en el límite K $\rightarrow$ 0, describe las excitaciones colectivas del **mar de Fermi**. En el otro límite ($\omega \rightarrow$ 0) describe los apantallamientos electrostáticos electrón-electrón y electrón-red.

Definition (Momento Dipolar)

Definición de la función dieléctrica (en SI) a partir de la densidad de momento dipolar.

$$D = \epsilon_0 E + P = \epsilon \epsilon_0 E \tag{1}$$

$$\nabla \cdot D = \nabla \cdot \epsilon \, \epsilon_0 E = \rho_{ext} \tag{2}$$

$$\nabla \cdot E = \rho / \epsilon_0 = (\rho_{ext} + \rho_{ind}) / \epsilon_0 \tag{3}$$

Donde la densidad de carga total es $\rho = \rho_{ext} + \rho_{ind}$, y ρ_{ind} es la densidad de carga inducida en el sistema por la carga externa.

Contenido

Óptica del plasma

La respuesta diélectrica del gas de electrones se obtiene de la ec. de movimiento de un electrón libre en un campo eléctrico

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -eE \tag{4}$$

Si x y E tienen dependencia $e^{-i\omega t}$ entonces

$$-\omega^2 mx = -eE \; ; \qquad x = eE \big/ m\omega^2 \tag{5}$$

La polarización, definida como el momento dipolar por unidad de volumen es:

$$P = -n\,e\,x = -\frac{ne^2}{m\omega^2}E \tag{6}$$

donde n es la concentración de electrones.

Definition (Función Dieléctrica)

La función dieléctrica a frecuencia ω es (de la ec. (1)):

$$\epsilon(\omega) = \frac{D(\omega)}{E(\omega)} = 1 + \frac{P(\omega)}{\epsilon_0 E(\omega)} \tag{7}$$

De (6) y (7) se sigue que la función dieléctrica para un gas de electrones libres es:

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{ne^2}{\epsilon_0 m\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \tag{8}$$

Definiendo la **frecuencia de plasma** como $\omega_p \equiv ne^2 / \epsilon_0 m$.

Definition (Función Dieléctrica)

La función dieléctrica a frecuencia ω es (de la ec. (1)):

$$\epsilon(\omega) = \frac{D(\omega)}{E(\omega)} = 1 + \frac{P(\omega)}{\epsilon_0 E(\omega)} \tag{7}$$

De (6) y (7) se sigue que la función dieléctrica para un gas de electrones libres es:

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{ne^2}{\epsilon_0 m\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \tag{8}$$

Definiendo la **frecuencia de plasma** como $\omega_p \equiv ne^2 / \epsilon_0 m$.

- Un plasma es un medio con = concentración de iones [+] y [-], en el que al menos una de las dos cargas se mueve.

- En sólidos, las cargas [-] de los e's de conducción se balancean con la concentración de las cargas positivas de los núcleos iónicos.
  Si el núcleo iónico tiene una constante dieléctrica etiquetada como $\epsilon(\infty)$ aprox. constante a frecuencias mayores a ω_p, entonces (8) se convierte en:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon(\infty) - \frac{4\pi ne^2}{m\omega^2} = \epsilon(\infty)\left[1 - \frac{\tilde{\omega}_p^2}{\omega^2}\right] \tag{9}$$

donde $\tilde{\omega}_p$ se define como $\tilde{\omega}_p^2 = 4\pi ne^2 / \epsilon(\infty)\, m$. Notemos que $\epsilon = 0$ cuando $\omega = \tilde{\omega}_p$.

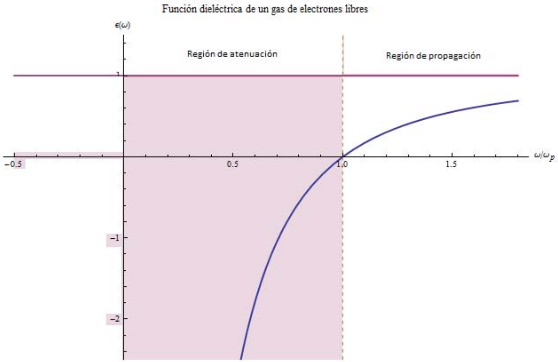


Figura: Gráfica de la función dieléctrica para un gas de electrones contra la frecuencia en unidades de la frecuencia de plasma ω_p. Las ondas electromagnéticas se propagan sin amortiguamiento cuando ϵ es positivo y real. Se reflejan totalmente del medio cuando ϵ es negativo.

Contenido

Dispersión en ondas EM

En un medio isotrópico no magnético, la ecuación de onda electromagnética (CGS) es:

$$\nabla^2 E = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 D}{\partial t^2} \tag{10}$$

Buscamos una solución con $E \propto e^{i(K\cdot r - \omega t)}$ y $D = \epsilon(\omega, K)\, E$; entonces tenemos:

Definition

Relación de dispersión para ondas electromagnéticas

$$\epsilon(\omega, K)\,\omega^2 = c^2 K^2; \quad \epsilon(\omega, K)\,\epsilon_0\mu_0\omega^2 = K^2 \tag{11}$$

Expresión de la que podemos obtener mucha información.

$K^2 = \epsilon(\omega, K)\,\epsilon_0\mu_0\omega^2$

Consideremos:

- $\epsilon > 0$ y real. Para ω real, K es real y una onda EM transversal que se propaga con velocidad de fase $c/\epsilon^{1/2}$.

$K^2 = \epsilon(\omega, K)\,\epsilon_0\mu_0\omega^2$

Consideremos:

- $\epsilon > 0$ y real. Para ω real, K es real y una onda EM transversal que se propaga con velocidad de fase $c/\epsilon^{1/2}$.
- $\epsilon < 0$ y real. Para ω real, K es imaginario y la onda EM se amortigua a una longitud característica $1/|K|$.

$K^2 = \epsilon(\omega, K)\,\epsilon_0 \mu_0 \omega^2$

Consideremos:

- $\epsilon > 0$ y real. Para ω real, K es real y una onda EM transversal que se propaga con velocidad de fase $c/\epsilon^{1/2}$.
- $\epsilon < 0$ y real. Para ω real, K es imaginario y la onda EM se amortigua a una longitud característica $1/|K|$.
- ϵ complejo. Para ω real, K es complejo y las ondas se amortiguan espacialmente.

$K^2 = \epsilon(\omega, K)\,\epsilon_0\mu_0\omega^2$

Consideremos:

- $\epsilon > 0$ y real. Para ω real, K es real y una onda EM transversal que se propaga con velocidad de fase $c/\epsilon^{1/2}$.
- $\epsilon < 0$ y real. Para ω real, K es imaginario y la onda EM se amortigua a una longitud característica $1/|K|$.
- ϵ complejo. Para ω real, K es complejo y las ondas se amortiguan espacialmente.
- $\epsilon = 0$. Las ondas polarizadas longitudinalmente pueden ocurrir sólo en los ceros de ϵ.

Contenido

La relación de dispersión (14) con (11) toma la forma

$$\epsilon(\omega)\,\omega^2 = \epsilon(\infty)\left(\omega^2 - \tilde{\omega}_p^2\right) = c^2K^2 \tag{12}$$

Un gas de electrones es transparente para $\omega > \tilde{\omega}_p$, región en la que la f. dieléctrica es real. La relación de dispersión se escribe:

$$\omega^2 = \omega_p^2 + c^2K^2/\varepsilon(\infty) \tag{13}$$

que describe ondas EM transversales en un plasma.

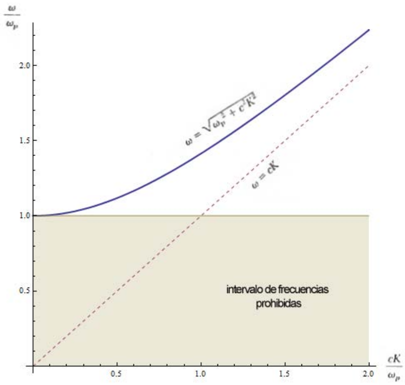


Figura: Relaciones de dispersión para ondas electromagnéticas transversales en un plasma. La velocidad de grupo es la pendiente de la curva de dispersión.

Aplicaciones experimentales

- Resonancia de plasmón de superficie. Usada para observar cambios nanométricos en espesor, fluctuaciones de densidad o absorción molecular.

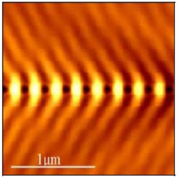


Figura: Campos ópticos de una cadena de nanopartículas metálicas.

Aplicaciones experimentales

- Resonancia de plasmón de superficie. Usada para observar cambios nanométricos en espesor, fluctuaciones de densidad o absorción molecular.
- Excitaciones de plasmones de superficie en nanoestructuras metálicas aisladas.

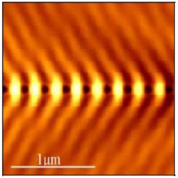


Figura: Campos ópticos de una cadena de nanopartículas metálicas.

Aplicaciones experimentales

- Resonancia de plasmón de superficie. Usada para observar cambios nanométricos en espesor, fluctuaciones de densidad o absorción molecular.
- Excitaciones de plasmones de superficie en nanoestructuras metálicas aisladas.
- Pero sobre todo, ¡el potencial de aplicación!

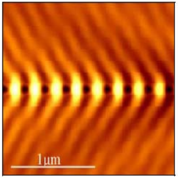


Figura: Campos ópticos de una cadena de nanopartículas metálicas.

Bibliografía

C. Kittel.
Introduction to Solid State Physics, 7th Edition.
Wiley, 1996.

Bibliografía

- C. Kittel.
  Introduction to Solid State Physics, 7th Edition.
  Wiley, 1996.
- R. J. Goldston.
  Introduction to Plasma Physics.
  IoP, 1997.

Bibliografía

- C. Kittel.
  Introduction to Solid State Physics, 7th Edition.
  Wiley, 1996.
- R. J. Goldston.
  Introduction to Plasma Physics.
  IoP, 1997.
- Wikipedia.org

Bibliografía

- C. Kittel.
  Introduction to Solid State Physics, 7th Edition.
  Wiley, 1996.
- R. J. Goldston.
  Introduction to Plasma Physics.
  IoP, 1997.
- Wikipedia.org
- http://www.ece.rice.edu/ halas/articles/NewSciPlasmonArticle.pdf

Bibliografía

- C. Kittel.
  Introduction to Solid State Physics, 7th Edition.
  Wiley, 1996.
- R. J. Goldston.
  Introduction to Plasma Physics.
  IoP, 1997.
- Wikipedia.org
- http://www.ece.rice.edu/ halas/articles/NewSciPlasmonArticle.pdf
- http://blogs.creamoselfuturo.com/nano-tecnologia/2007/05/11/plasmones-un-reto-de-la-nanotecnologia-del-siglo-xxi/

Bibliografía

- C. Kittel.
  Introduction to Solid State Physics, 7th Edition.
  Wiley, 1996.
- R. J. Goldston.
  Introduction to Plasma Physics.
  IoP, 1997.
- Wikipedia.org
- http://www.ece.rice.edu/ halas/articles/NewSciPlasmonArticle.pdf
- http://blogs.creamoselfuturo.com/nano-tecnologia/2007/05/11/plasmones-un-reto-de-la-nanotecnologia-del-siglo-xxi/
- http://www.plasmonanodevices.org/publications.html, Surface Plasmon Nanophotonics, Mark L. Brongersma and Pieter G. Kik (Eds.), Springer Series in Optical Sciences (2007).

¡Gracias por su atención! ¿Dudas?