

# Estudio de estructuras de banda prohibida electromagnética (EBG) para la reducción de acoplamiento mutuo entre antenas *microstrip*

Federico Luna

Facultad de Ingeniería,  
Universidad de Buenos Aires

*fluna@fi.uba.ar*

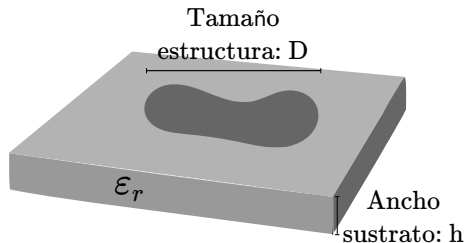
Tutores: Dr. Ing. W. Gustavo Fano y Mg. Ing. Silvina Boggi

- 1 Presentación del problema
- 2 Conceptos básicos de electromagnetismo
- 3 Fundamentos de EBGs
- 4 Modelado
- 5 Análisis y modelado de la celda de Yang
- 6 Construcción del algoritmo de simulación en el dominio del tiempo

- Propagación de ondas de superficie.
- Estructuras periódicas.
- Comportamiento de EBGs uniplanares.
- Modelo circuital equivalente de una celda unitaria.
- Programa de simulación en el dominio del tiempo.
- Introducción al uso de EBGs en antenas.

- 1873: *Maxwell*. Bases de teoría electromagnética clásica.
- 1885-1887: *Heaviside*. Simplificación de expresiones: Notación vectorial.
- 1886-1891: *Hertz*. Validación de teoría de ondas electromagnéticas. Primer antena dipolo y parabólica.
- 1897: *Rayleigh*. Propagación de ondas en guías metálicas.
- 1926: *Yagi-Uda*. Conjunto de antenas, fase fija.
- 1938-1945: Antenas de fase variable.
- 1953: *Deschamps*. Antenas *microstrip*.
- 1970': Uso en aplicaciones prácticas. Solución a problemas de dispersión y modos indeseados.

# Ventajas de las estructuras *microstrip*



- Bajo costo.
- Bajo peso.
- Construcción sencilla (fotolitografía).
- Cómodas para implantación de componentes discretos.
- Alto Q (resonantes).

Aplicaciones: filtros microondas, acopladores direccionales, transformadores de impedancia, planos de tierra y redes de distribución de circuitos impresos.

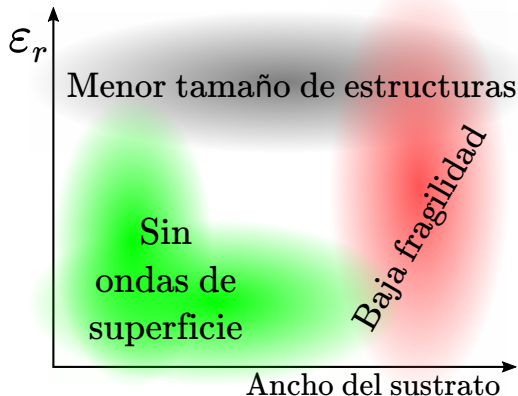
# Problemas de las estructuras *microstrip*

El tamaño de las antenas y estructuras *microstrip* depende de la permitividad dieléctrica del sustrato y de la longitud de onda de trabajo.

- $\downarrow D \Rightarrow \uparrow \epsilon_r, \uparrow \text{SW}$ .
- $\uparrow \epsilon_r \Rightarrow \uparrow Q, \downarrow \text{BW}$ .
- $\downarrow Q \Rightarrow \uparrow h$ .
- $\uparrow h \Rightarrow \uparrow \text{SW}, \uparrow \text{modos}$ .

Las ondas de superficie:

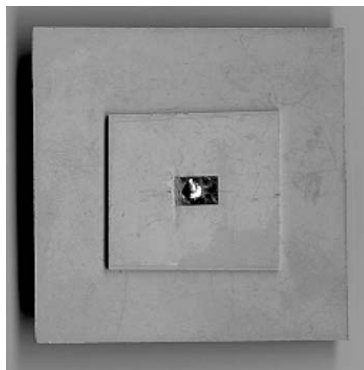
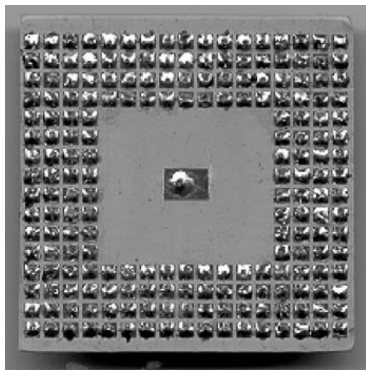
- $\downarrow$  potencia radiada.
- $\uparrow$  **acoplamiento**.
- Diagrama de radiación:  
 $\uparrow$  lóbulos secundarios.



SW: Ondas de superficie. BW: Ancho de banda.  $D$ : Tamaño de la estructura.  $h$ : Ancho del sustrato.

# Soluciones propuestas en la literatura

- Separación del plano de tierra de las estructuras.
- Modificar la altura o la permitividad del sustrato a corta distancia.
- Estructuras periódicas: EBG, DGS.



F. Yang e Y. Rahmat-Samii, Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering, Cambridge University Press, 2009.

# Conceptos básicos de electromagnetismo

- 1 Presentación del problema
- 2 Conceptos básicos de electromagnetismo
  - Ecuaciones de Maxwell
  - Ondas electromagnéticas
- 3 Fundamentos de EBGs
- 4 Modelado
- 5 Análisis y modelado de la celda de Yang
- 6 Construcción del algoritmo de simulación en el dominio del tiempo



# Ecuaciones de Maxwell

$$\left. \begin{array}{l} \text{Faraday} \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \mathbf{M} \\ \text{Ampère} \quad \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \\ \text{Gauss} \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \text{Gauss} \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B} - \mathbf{M} \\ \nabla \times \mathbf{H} = j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{array} \right.$$

Si:

- No hay dispersión. ( $\epsilon$  y  $\mu$  independientes de  $\omega$ ).
- Material isotrópico.
- Estudio macroscópico.
- Comportamiento armónico.
- Régimen permanente.



# Campos en medios materiales

Si el medio es lineal, isotrópico y homogéneo:

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}_e = \epsilon_0(1 + \chi_e) \mathbf{E} = \epsilon \mathbf{E} = (\epsilon' - j\epsilon'') \mathbf{E} \\ \mathbf{B} &= \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{P}_m) = \mu_0(1 + \chi_m) \mathbf{H} = \mu \mathbf{H} = (\mu' - j\mu'') \mathbf{H}. \end{aligned}$$

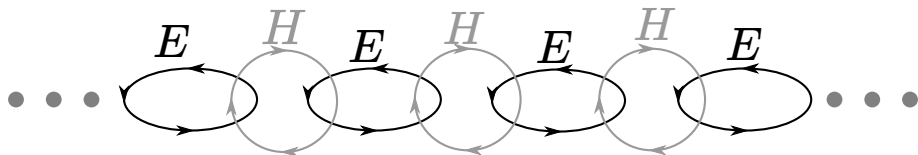
Si el material posee una conductividad  $\sigma$  independiente del campo eléctrico aplicado, se cumple la Ley de Ohm:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \Rightarrow \mathbf{D} = \left( \epsilon' - j\epsilon'' - j\frac{\sigma}{\omega} \right) \mathbf{E}.$$

## Tangente de pérdidas

$$\tan \delta = \frac{\omega\epsilon'' + \sigma}{\omega\epsilon'}.$$

# Ondas electromagnéticas (I)



En una región libre de fuentes, se pueden deducir las ecuaciones de Helmholtz para ondas monocromáticas, a partir de las ecuaciones de Maxwell.

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{E} + \gamma^2 \mathbf{E} &= 0 \\ \nabla^2 \mathbf{H} + \gamma^2 \mathbf{H} &= 0 \end{aligned} \right\} \implies \begin{cases} \mathbf{E}(x, y, z) = \mathbf{E}_0 e^{\pm j\gamma \cdot \mathbf{r}} \\ \mathbf{H}(x, y, z) = \mathbf{H}_0 e^{\pm j\gamma \cdot \mathbf{r}} \end{cases}$$

$$\gamma = -j\alpha + \beta = j\omega \sqrt{\mu(\epsilon' - j\epsilon'')} - j\sigma\epsilon/\omega.$$

$$\gamma = \gamma_x + \gamma_y + \gamma_z.$$

# Ondas electromagnéticas (II)

Para las ondas planas,

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \pm \frac{\hat{\beta} \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\eta}.$$

Impedancia de onda

$$\eta = \frac{j\omega\mu}{\gamma}.$$

Prof. penetración

$$\delta_s = -1/\alpha = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}.$$

Velocidad de fase

$$v_p = \omega/\beta = c/\sqrt{\mu_r\epsilon_r}.$$

Velocidad de grupo

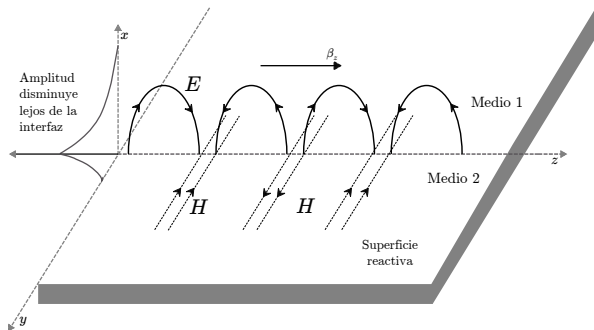
$$v_g = d\omega/d\beta.$$

Componentes del campo eléctrico que se desplaza en dirección  $z$

$$E_i(z) = E_i e^{-j\gamma z} = E_i e^{-\alpha z} e^{-j\beta z}, \quad i = x, y.$$

# Ondas de superficie

Se propagan en un plano.  
Comportamiento evanescente en la dirección normal.



- Planos conductores.
- Planos conductores recubiertos de dieléctrico.
- Planos corrugados.
- Interfaz entre dos medios distintos.

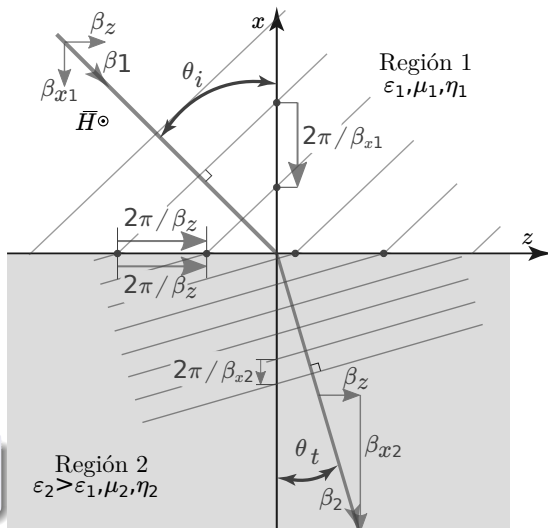
# Ondas de Zenneck

- TM.
- Bajas pérdidas.
- Ángulo de Brewster:  
 $Z_1 = Z_2$

$$Z_1 = \frac{E_{z1}}{H_{y1}} = \eta_0 \cos \theta_i = \frac{\gamma_{x1}}{\gamma_1} \eta_0$$

$$Z_2 = \frac{E_{z2}}{H_{y2}} = \eta_2 \cos \theta_t = \frac{\gamma_{x2}}{\gamma_2} \eta_2$$

$\gamma$  a uno y otro lado de la interfaz es complejo.



# Impedancia de superficie y constante de propagación (TM)

Si se asume una impedancia de superficie  $Z_s = R_s + jX_s$ , al igualar la impedancia de onda a la de superficie:

TM

$$\gamma_{x_1} = \gamma_1 \frac{Z_1}{\eta_0} = \gamma_1 Z_s = \gamma_1 R_s + j\gamma_1 X_s,$$

$$\gamma_z = \beta_z - j\alpha_z = \sqrt{(\gamma_1^2 - \gamma_{x_1}^2)} = \gamma_1 \sqrt{1 + X_s^2 - R_s^2 - 2jR_s X_s}.$$

- $X_s > 0$ : Reactancia inductiva:
  - $\uparrow \alpha_x$ : Decrecimiento exponencial en  $x$ .
  - $\alpha_z > 0$ : Decrecimiento exponencial en  $z$ .
  - Menor  $v_p$ .
- Si  $R_s X_s$  es pequeño: Baja atenuación en  $z$ .

Para ondas de superficie TM:

- $\uparrow X_s$
- $\downarrow R_s$ .

# Impedancia de superficie y constante de propagación (TM)

Si se asume una impedancia de superficie  $Z_s = R_s + jX_s$ , al igualar la impedancia de onda a la de superficie:

TM

$$\gamma_{x_1} = \gamma_1 \frac{Z_1}{\eta_0} = \gamma_1 Z_s = \gamma_1 R_s + j\gamma_1 X_s,$$

$$\gamma_z = \beta_z - j\alpha_z = \sqrt{(\gamma_1^2 - \gamma_{x_1}^2)} = \gamma_1 \sqrt{1 + X_s^2 - R_s^2 - 2jR_sX_s}.$$

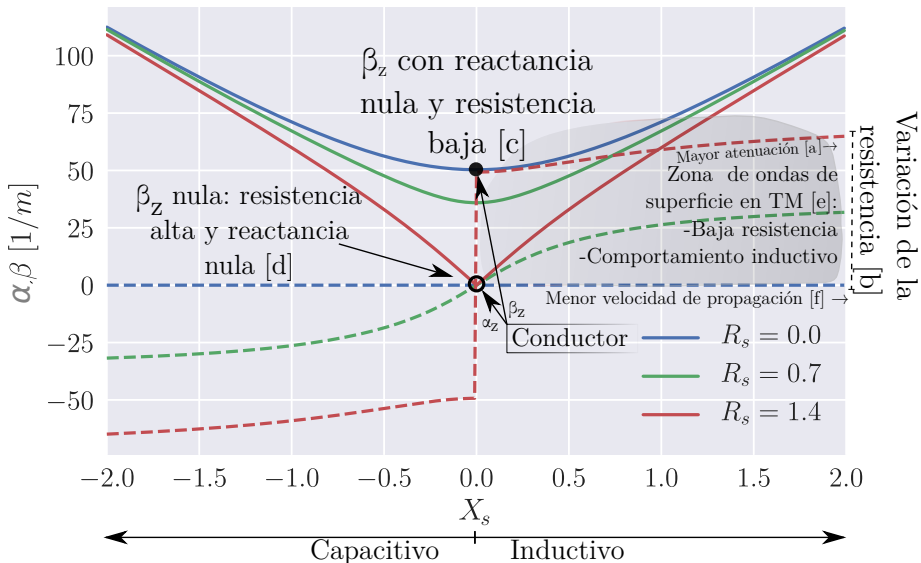
TE

$$\gamma_{x_1} = -\frac{\gamma_1}{Z_s} = -\gamma_1 \frac{R_s}{R_s^2 + X_s^2} - j\frac{X_s}{R_s^2 + X_s^2},$$

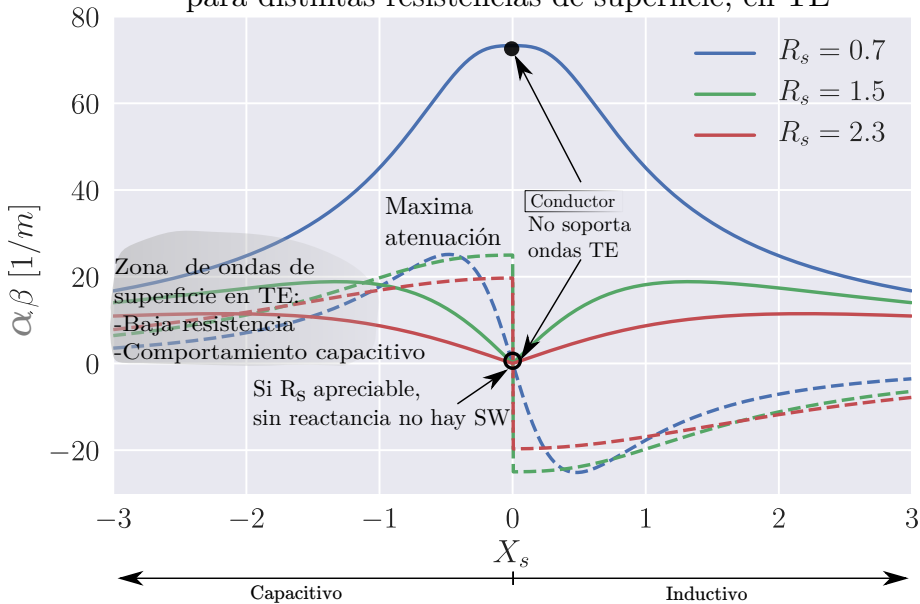
$$\gamma_z = \beta_z - j\alpha_z = \sqrt{(\gamma_1^2 - \gamma_{x_1}^2)} = \frac{\gamma_1}{R_s^2 + X_s^2} \sqrt{1 + X_s^2 - R_s^2 + 2jR_sX_s}.$$



Valor de  $\gamma_z = \beta_z - ja_z$  en función de la reactancia de superficie para distintas resistencias de superficie, en TM



Valor de  $\gamma_z = \beta_z - j\alpha_z$  en función de la reactancia de superficie para distintas resistencias de superficie, en TE



# Condiciones para la propagación sobre un plano conductor

## Polarización TM

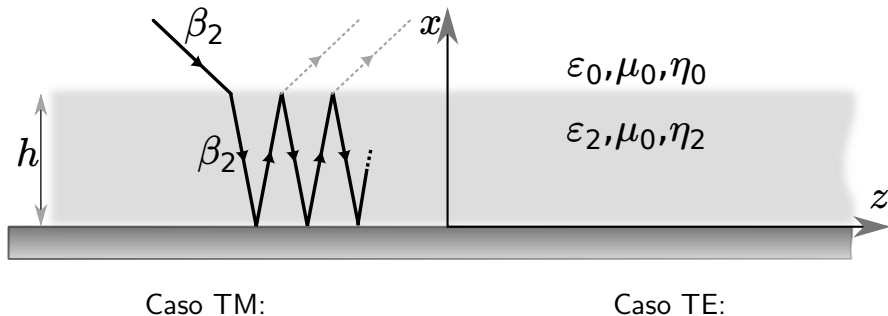
- Comportamiento **inductivo**.
- Resistividad baja.

## Polarización TE

- Comportamiento **capacitivo**.
- Resistividad baja.

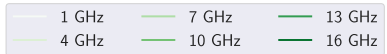
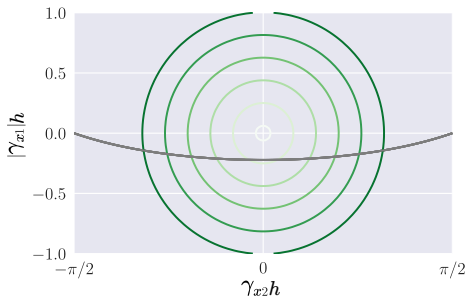
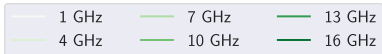
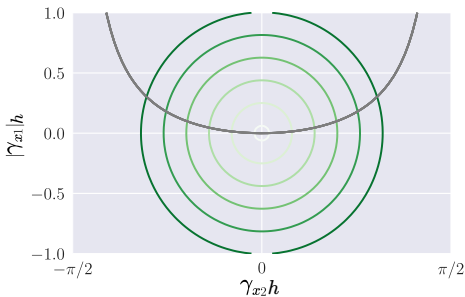
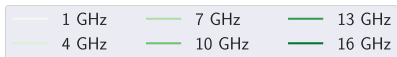
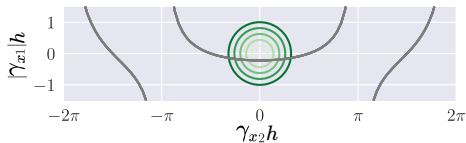
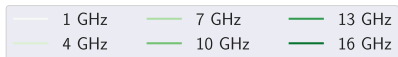
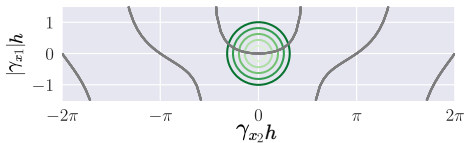
Para volver más inductiva a la superficie, se puede recubrir al plano conductor con un dieléctrico.

# Comportamiento para plano de tierra cubierto por un dieléctrico fino



$$\begin{cases} (\gamma_{x_2} h)^2 + (\alpha_{x_1} h)^2 = (\epsilon_{r_2} - 1)(\gamma_1 h)^2 \\ \gamma_{x_2} h \tan(\gamma_{x_2} h) = |\alpha_{x_1}| \epsilon_{r_2} h. \end{cases}$$

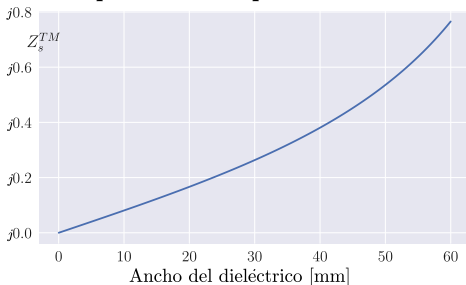
$$\begin{cases} (\gamma_{x_2} h)^2 + (\alpha_{x_1} h)^2 = (\epsilon_{r_2} - 1)(\gamma_1 h)^2 \\ \gamma_{x_2} h \cot(\gamma_{x_2} h) = -|\alpha_{x_1}| \epsilon_{r_2} h. \end{cases}$$



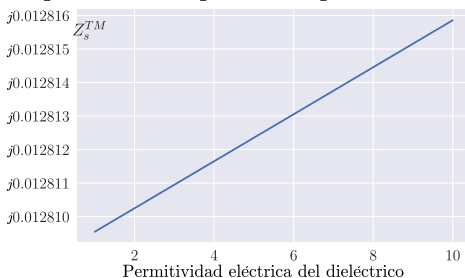
# Impedancia de superficie: GND+FR4

$$Z_s^{TM} = j \frac{\cos \theta_t}{\sqrt{\epsilon_{r2}}} \tan(\gamma_2 h \cos \theta_t) = j \frac{\cos \theta_t}{\sqrt{\epsilon_{r2}}} \tan(\omega \sqrt{\epsilon_{r2} \mu_0 \epsilon_0} h \cos \theta_t)$$

Impedancia de superficie vs. ancho



Impedancia de superficie vs. permitividad



No existirán ondas de superficie de polarización TE en el plano de tierra recubierto por 1.6 mm de espesor de FR4, hasta los 25 GHz.

↑ ancho del sustrato  $\Rightarrow$  ↑ ondas de superficie (TM)

↑ permitividad eléctrica del sustrato  $\Rightarrow$  ↑ ondas de superficie (TM)

# Fundamentos básicos de EBGs

- 1 Presentación del problema
- 2 Conceptos básicos de electromagnetismo
- 3 Fundamentos de EBGs
  - Bragg, Bloch-Floquet y espacio recíproco
  - Dispersión
- 4 Modelado
- 5 Análisis y modelado de la celda de Yang
- 6 Construcción del algoritmo de simulación en el dominio del tiempo

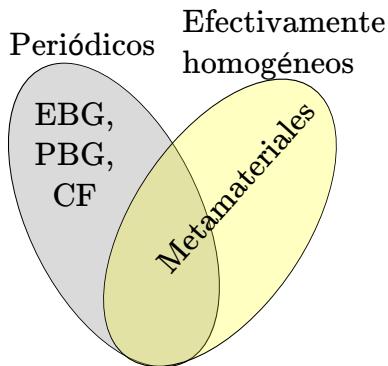


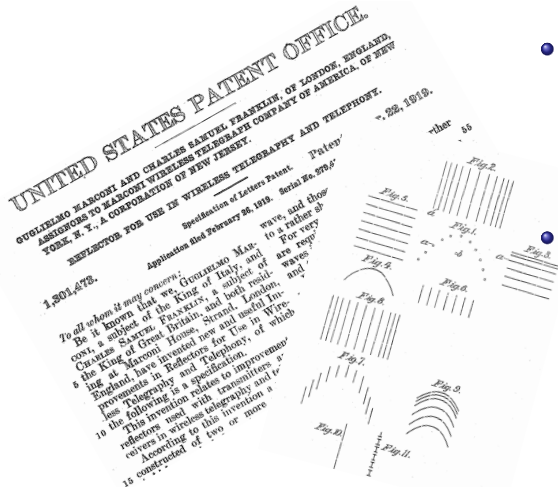
## Metamateriales

Estructuras artificiales **efectivamente homogéneas** para la longitud de onda de interés, que presentan propiedades electromagnéticas que no se encuentran en la naturaleza.

## EBGs, PBGs, cristales fotónicos

Estructuras artificiales con capacidades para controlar (en general, atenuar) ondas electromagnéticas a partir de la **variación periódica** en el espacio de las propiedades del medio respecto de la propagación electromagnética.

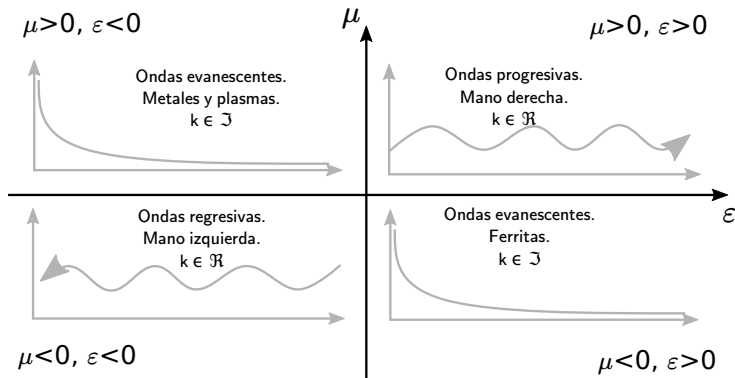


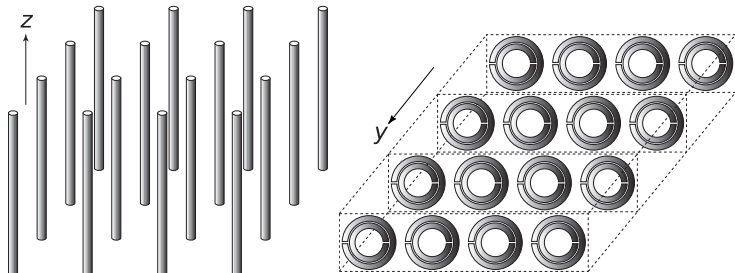


- Fines del siglo XVIII:  
**Rittenhouse** observó que algunos colores desaparecían cuando se veía luz a través de un pañuelo.
- 1919: Guglielmo **Marconi**, Charles Samuel **Franklin**: Conductores horizontales como superficie reflectiva para cierta frecuencia (¿Primer FSS?)

# Reseña histórica

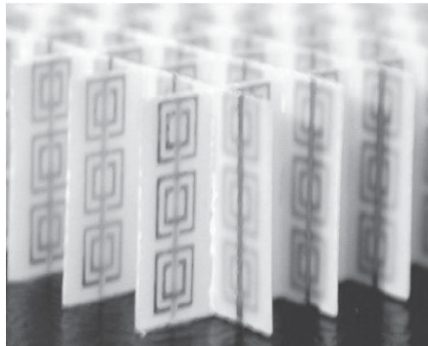
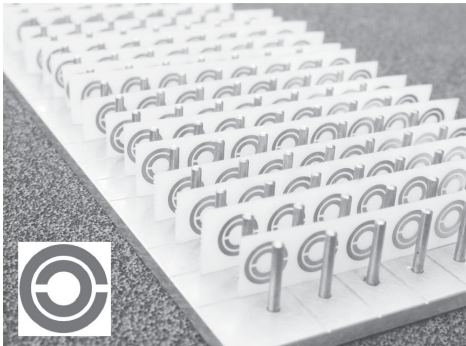
- 1946: Louis **Brillouin**: *Wave propagation in periodic structures: Electric filters and crystal lattices*. Restricciones a los vectores de onda  $\gamma$  en un medio periódico.
- 1968: Viktor **Veselago**: Descripción teórica de LHS, velocidad de grupo antiparalela a la velocidad de fase.



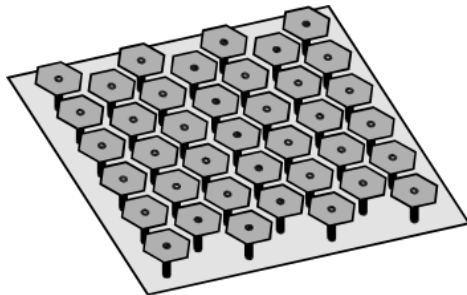
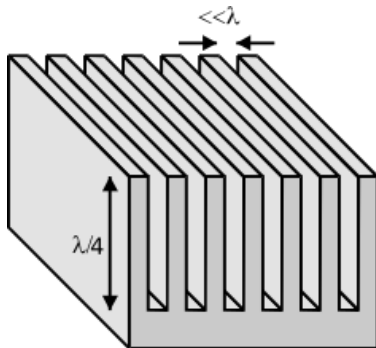


- 1990: **Smith**: Split Ring Resonators en base a los trabajos de Pendry. Se construyó en 2000.
- 1990: **Ho, Chan, Soukulis**: Conjunto periódico de esferas dieléctricas. Banda prohibida.
- 1990: **Yablonovitch**. Estructura cristalina. Agujeros cilíndricos.

# Reseña histórica



- 1999: **Sievenpiper**: HIS. Mushrooms. AMC + EBG.
- 2001: **Yang**: Uniplanar EBG (¿FSS o EBG?)





# Teorema de Bloch y armónicos espaciales





# Dispersión en materiales comunes

# Representación de la dispersión en 2D

# Bandgap electromagnético

<b>Treatments</b>	<b>Response 1</b>	<b>Response 2</b>
Treatment 1	0.0003262	0.562
Treatment 2	0.0015681	0.910
Treatment 3	0.0009271	0.296

Cuadro: Table caption

# Theorem

Theorem (Mass–energy equivalence)

$$E = mc^2$$

## Example (Theorem Slide Code)

```
\begin{frame}  
\frametitle{Theorem}  
\begin{theorem}[Mass--energy equivalence]  
$E = mc^2$  
\end{theorem}  
\end{frame}
```

# Figure

Uncomment the code on this slide to include your own image from the same directory as the template .TeX file.



An example of the `\cite` command to cite within the presentation:

This statement requires citation [Smith, 2012].



John Smith (2012)

Title of the publication

*Journal Name* 12(3), 45 – 678.

# The End

# Ecuación de dispersión partir de una línea de transmisión

# Diagrama de dispersión



# Resultados de simulaciones para celda sencilla

# Análisis de diagrama de dispersión típico



# Variación del ancho del puente

# Variación del tamaño de la celda unitaria

# Variación del lado del parche

# Variación del ancho del sustrato







# Modelo I: Resultados





# Modelo II: Resultados

## Modelo II: Diagrama de dispersión



# Modelo III: Resultados

# Modelo III: Diagrama de dispersión

# Comportamiento de una fila

# Comportamiento de una estructura





