

# 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

# Resumen

- 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

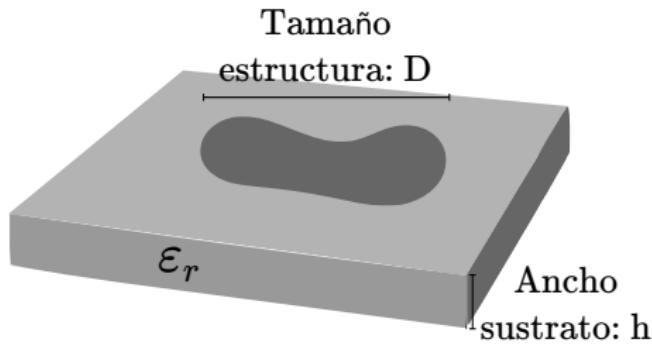
# Objetivo

- 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.

# Reseña histórica

- 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.

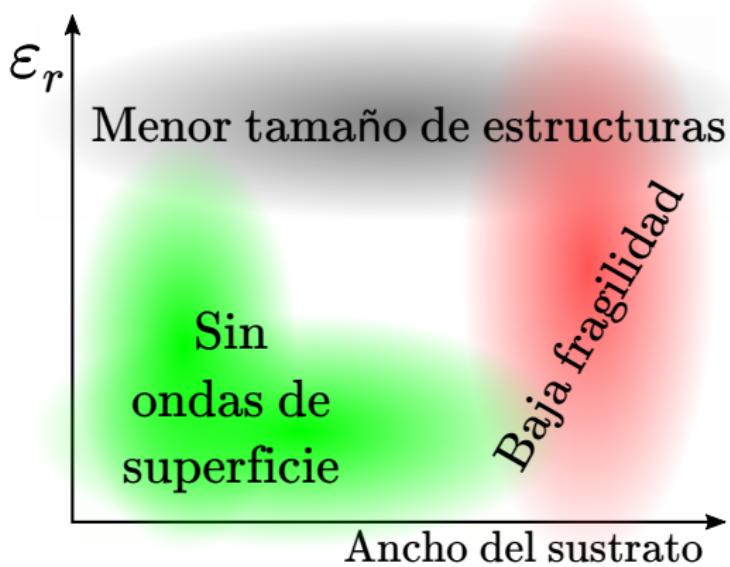
# Problemas de las estructuras *microstrip*

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

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

Las ondas de superficie:

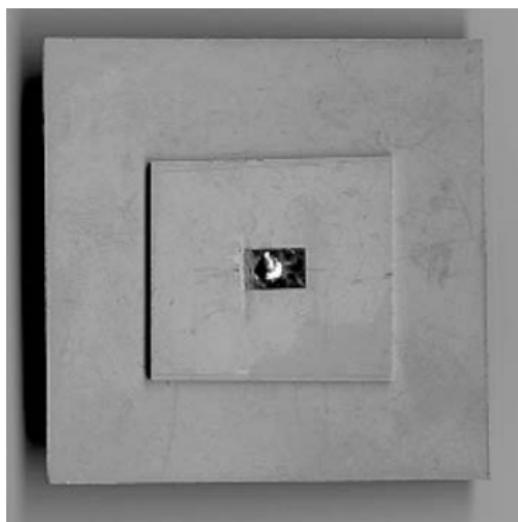
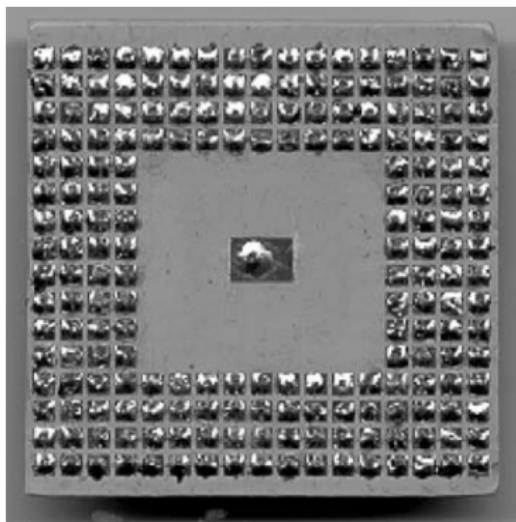
- $\downarrow$  potencia radiada.
- $\uparrow$  acoplamiento.
- Diagrama de radiación:  
 $\uparrow$  lóbulos secundarios.



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
  - Antenas
  - Ondas de superficie
  - Antenas *microstrip*
- 3 Fundamentos de EBGs
- 4 Modelado
- 5 Análisis y modelado de la celda de Yang

# Ecuaciones de Maxwell

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

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:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}_e = \epsilon_0(1 + \chi_e) \mathbf{E} = \epsilon \mathbf{E} = (\epsilon' - j\epsilon'') \mathbf{E}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{P}_m) = \mu_0(1 + \chi_m) \mathbf{H} = \mu \mathbf{H} = (\mu' - j\mu'') \mathbf{H}.$$

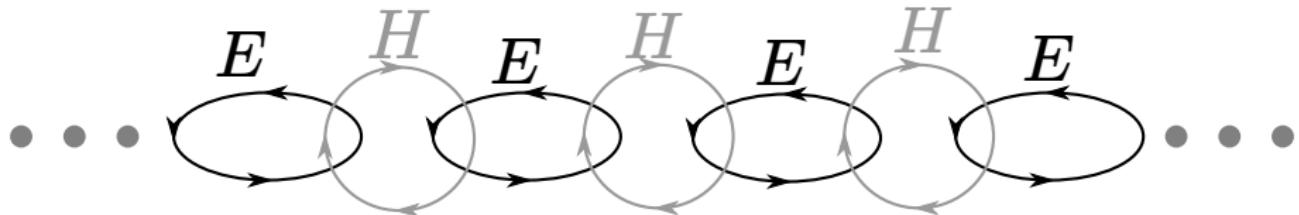
Si el material posee una conductividad  $\sigma$  independiente del campo eléctrico aplicado, se cumple la Ley de Ohm:

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

## 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.

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

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

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

# 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  $z$

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

# Fuentes de ondas electromagnéticas: Antenas

## Antena

Interfaz para las ondas electromagnéticas entre el espacio libre y un dispositivo de guía, generalmente metálico.

**Objetivo:** Recibir y transmitir energía eficientemente.

# Fuentes de ondas electromagnéticas: Antenas

## Antena

Interfaz para las ondas electromagnéticas entre el espacio libre y un dispositivo de guía, generalmente metálico.

**Objetivo:** Recibir y transmitir energía eficientemente.

Se suelen utilizar en conjuntos radiantes, dispuestas geométricamente.

-1926: Yagi-Uda.

-Segunda guerra mundial: Conjuntos de antena de fase variable.

-1950: Desfasadores de ferrita, fase completa.



# Acoplamiento entre antenas

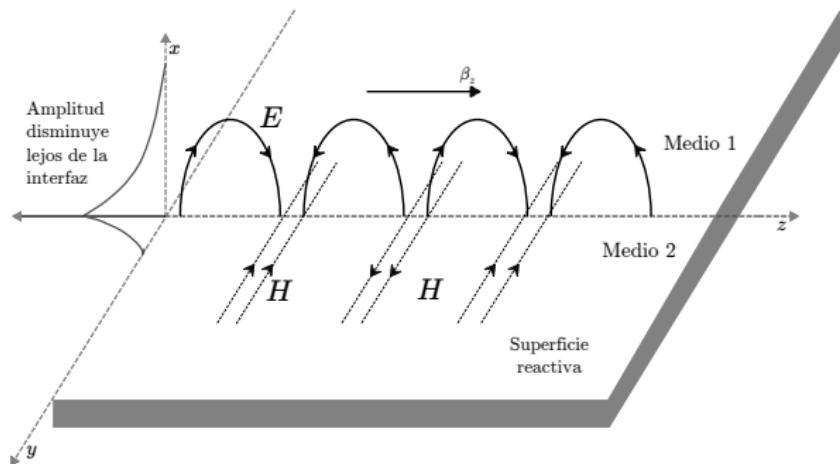
## Responsables

- Acoplamiento espacial entre elementos por onda espacial ( $\downarrow \propto 1/\rho$ ).
- Acoplamiento espacial por onda de superficie ( $\downarrow \propto 1/\sqrt{\rho}$ ).
- Acoplamiento por red de alimentación (alimentación no independiente).

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1N} \\ Z_{12} & Z_{22} & \cdots & Z_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1N} & Z_{2N} & \cdots & Z_{NN} \end{bmatrix}}_Z \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix}$$

# 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.

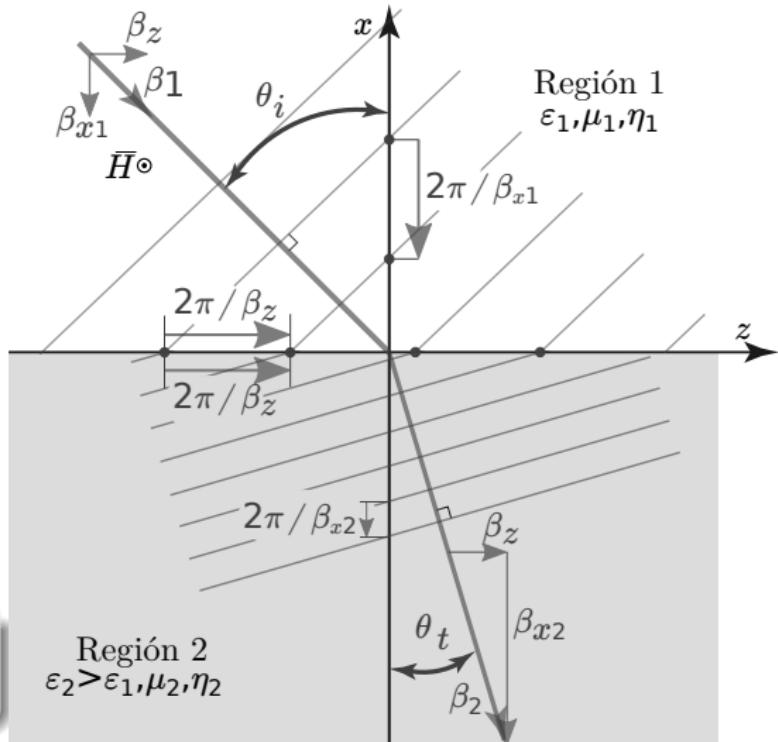
# Ondas de Zenneck

- 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

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

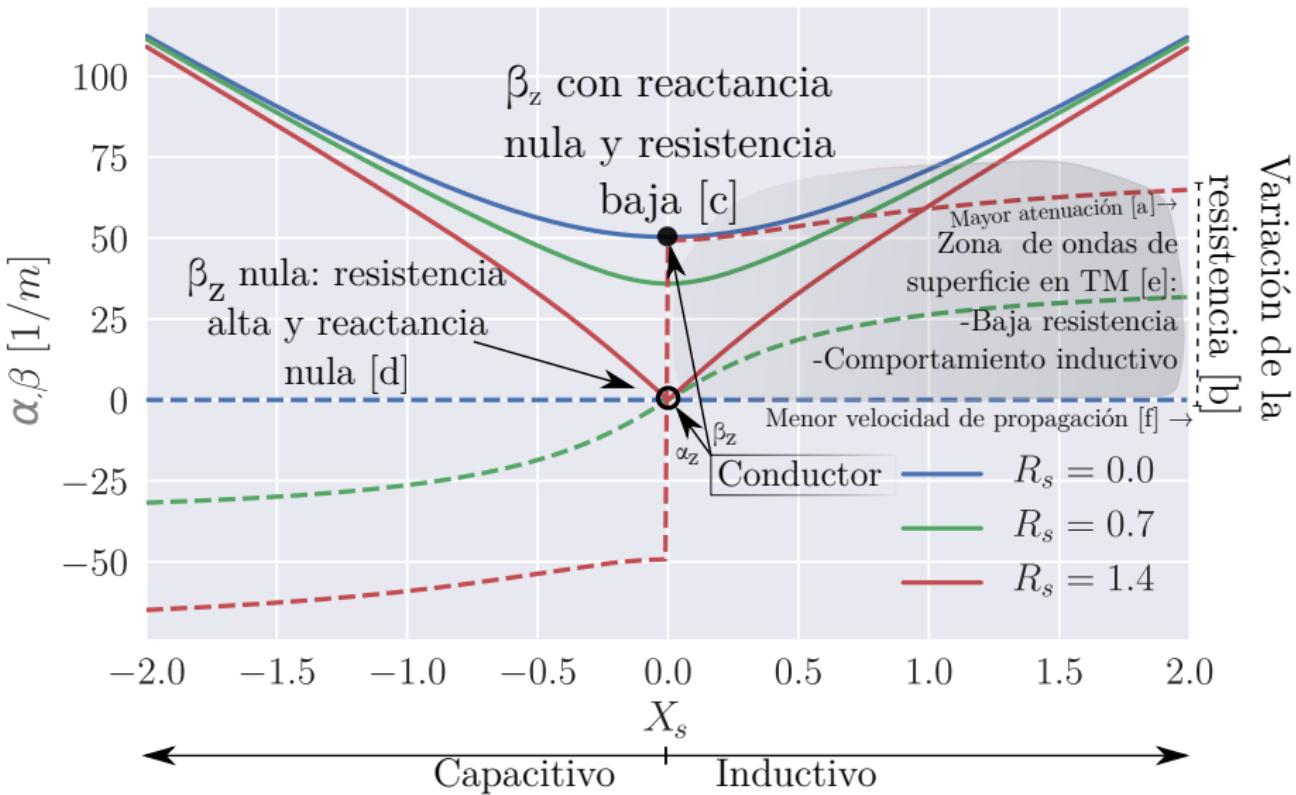
$$\gamma_z = \beta_z - j\alpha_z = \sqrt{(\gamma_1^2 - \gamma_{x_1}^2)} = \gamma_1 \sqrt{1 + X_s^2 - R_s^2 - 2jR_s X_s}.$$

## TE

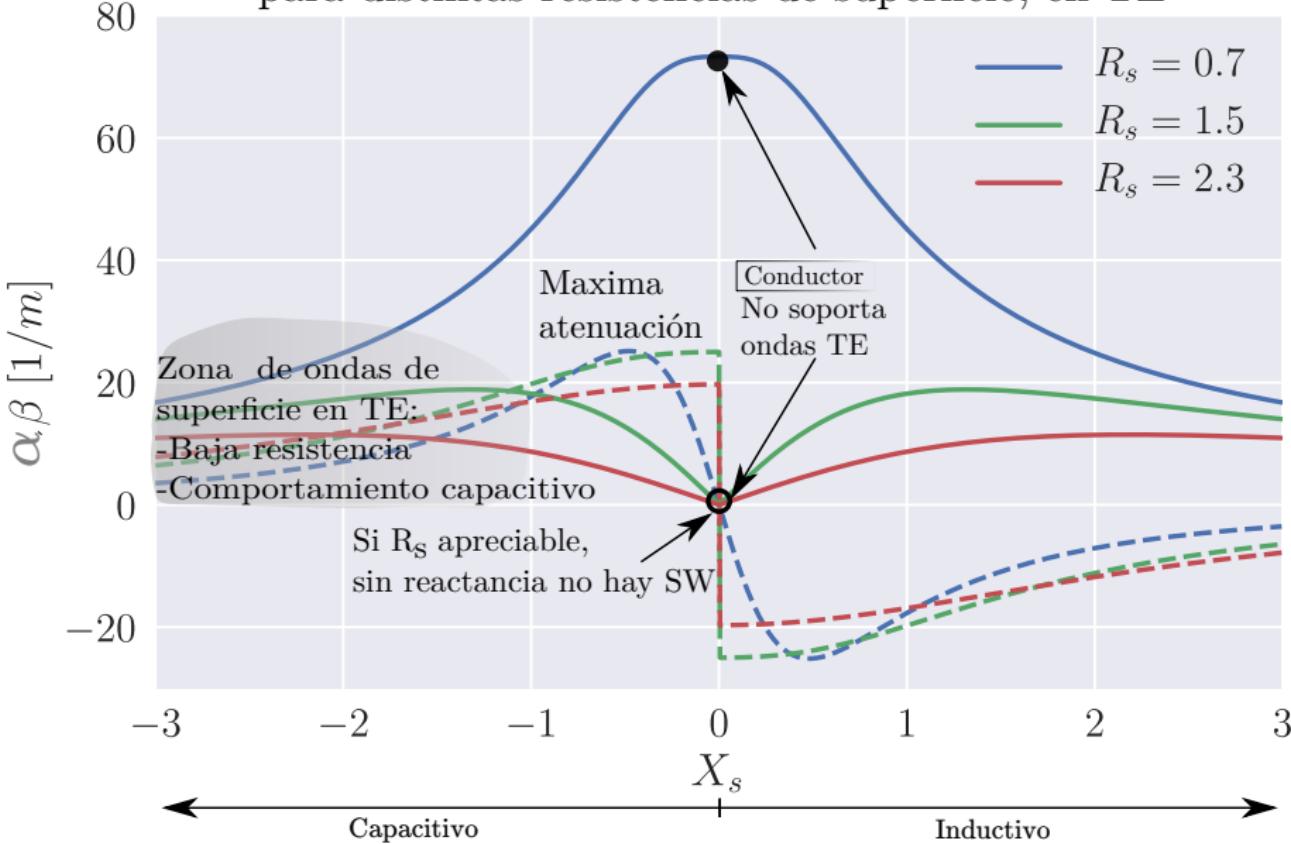
$$\gamma_{x_1} = -\frac{\gamma_1}{Z_s} = -\gamma_1 \frac{R_s}{R_s^2 + X_s^2} - j \frac{X_s}{R_s^2 + X_s^2},$$

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

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

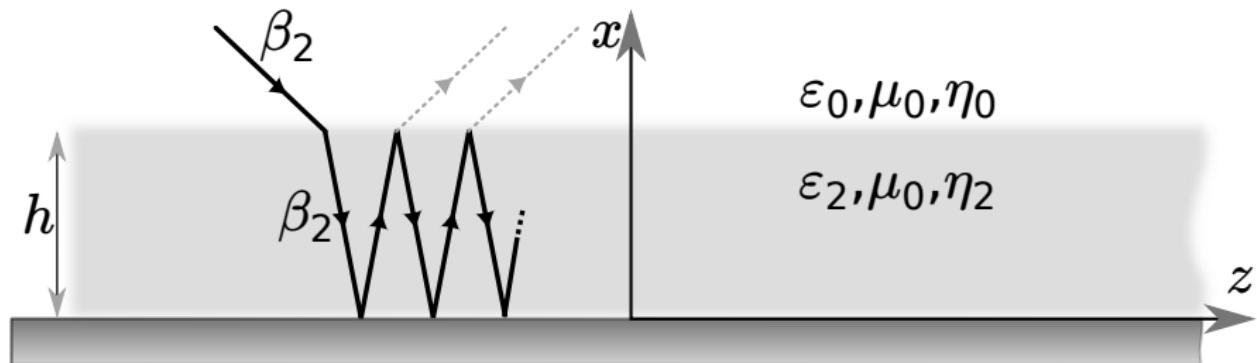
- Comportamiento **inductivo**.
- Resistividad baja.

## 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

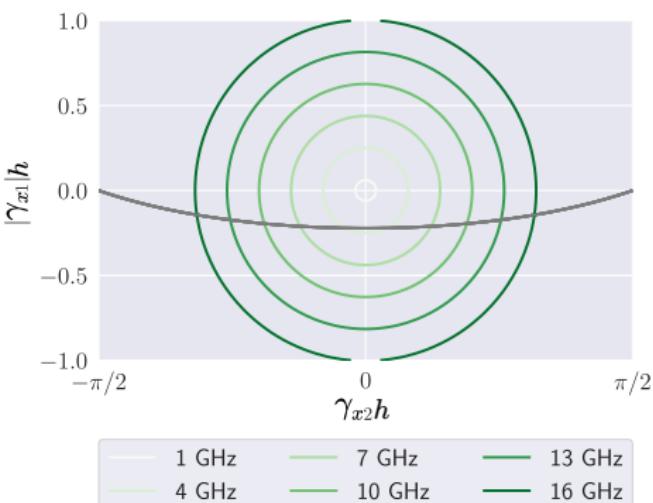
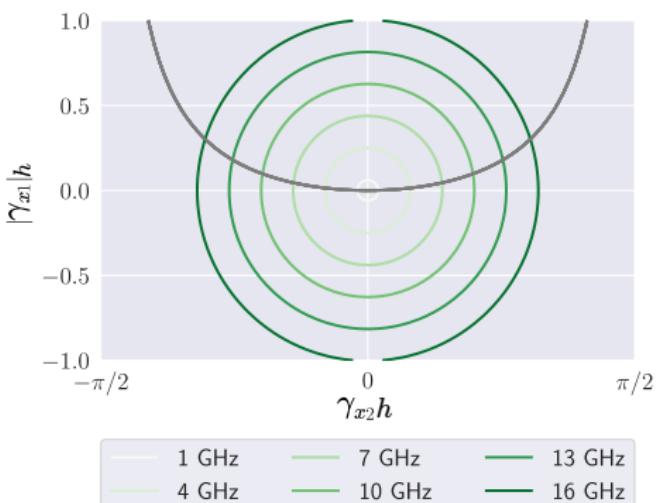
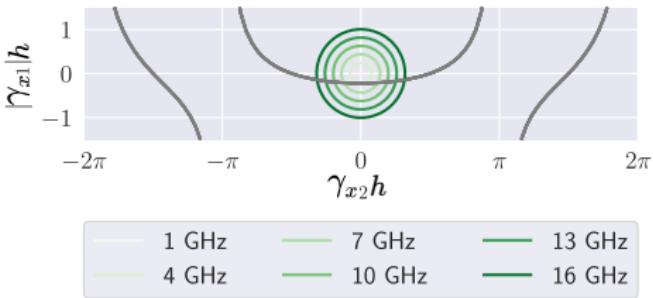
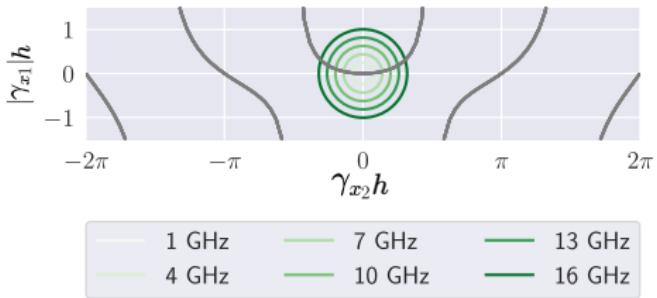


Caso TM:

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

Caso TE:

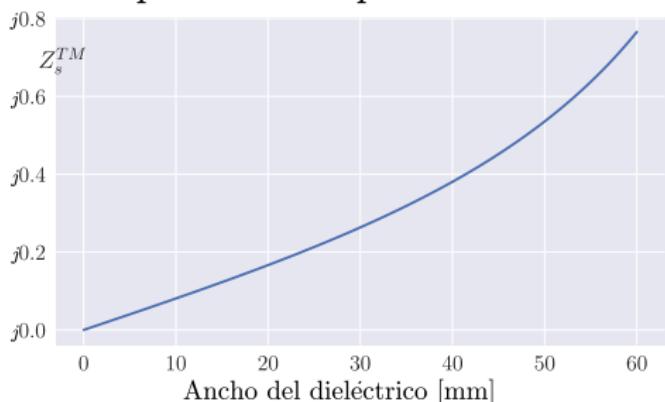
$$\begin{cases} (\gamma_{x_2} h)^2 + (\alpha_{x_1} h)^2 = (\epsilon_{r_2} - 1)(\gamma_1 h)^2 \\ \gamma_{x_2} h \cot(\gamma_{x_2} h) = -|\alpha_{x_1}| \epsilon_{r_2} h. \end{cases}$$



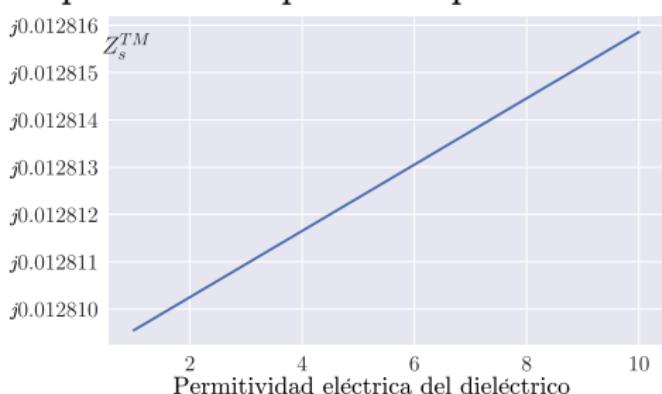
# Impedancia de superficie: GND+FR4

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

Impedancia de superficie vs. ancho



Impedancia de superficie vs. permitividad



## En resumen

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)

# Antenas *microstrip*

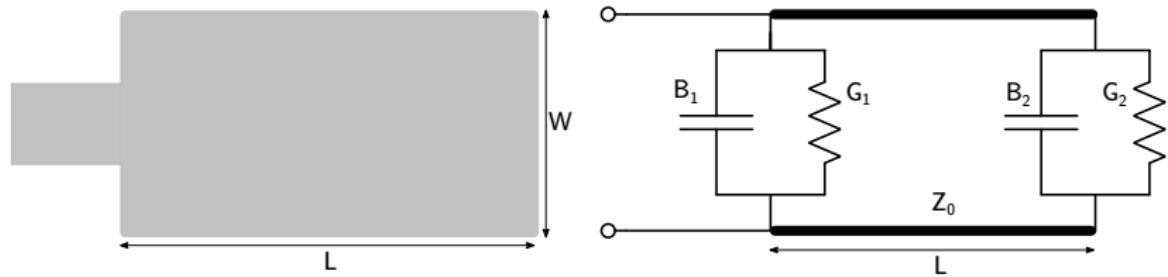
- Bajo costo, peso y perfil.
- Construcción sencilla.
- Alto Q (resonantes).
- **Bajo acoplamiento con elementos cercanos. Campos contenidos en el sustrato.**
- Baja eficiencia.
- Baja potencia.
- Polarización impura.
- **Alto acoplamiento con elementos ubicados sobre la superficie.**

$\uparrow \epsilon_r \Rightarrow \downarrow$  acoplamiento.

$\uparrow \epsilon_r \Rightarrow \uparrow$  acoplamiento.

# Modelo de líneas de transmisión

Antena rectangular: Dos aperturas radiantes de ancho  $W$  y altura  $h$ , separadas una distancia  $L$  por una línea de trasmisión de impedancia característica conocida  $Z_0$ .

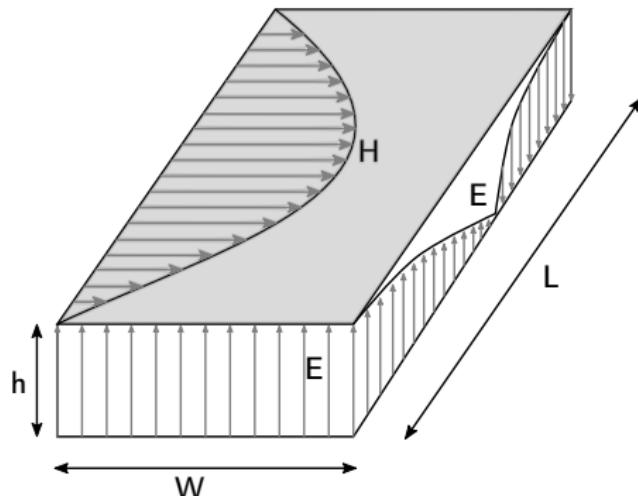


*Fringing:* Considerado mediante el uso de una  $L_{eff} = L + 2\Delta L$ .

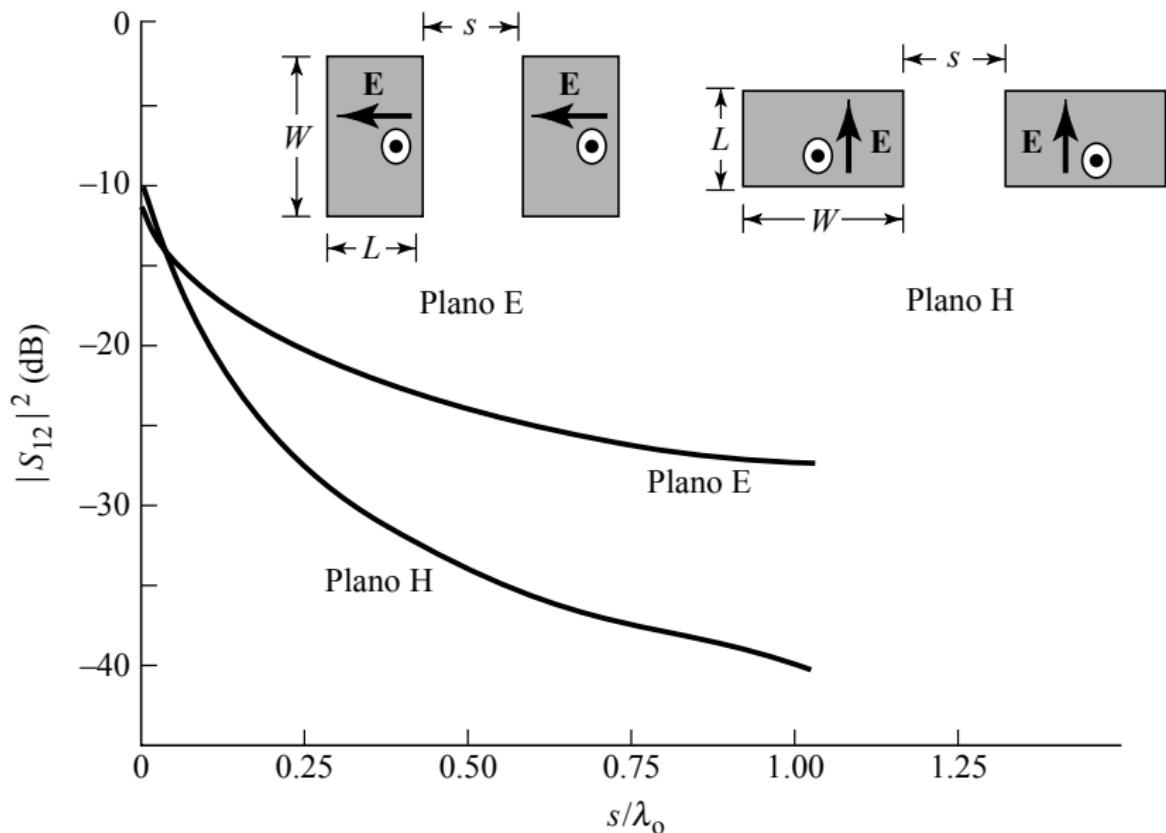
# Modelo de cavidades multimodo

Antena rectangular: Cavidad cargada dieléctricamente, limitada por conductores eléctricos en sus caras superior e inferior, y por conductores magnéticos en sus caras laterales.

$$(f_r)_{nmp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2}$$



# Acoplamiento mutuo en antenas *microstrip*



# 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

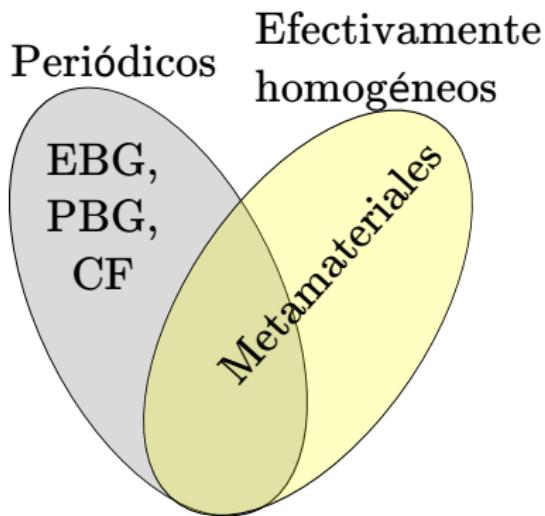
# Metamateriales y EBGs

## Metamateriales

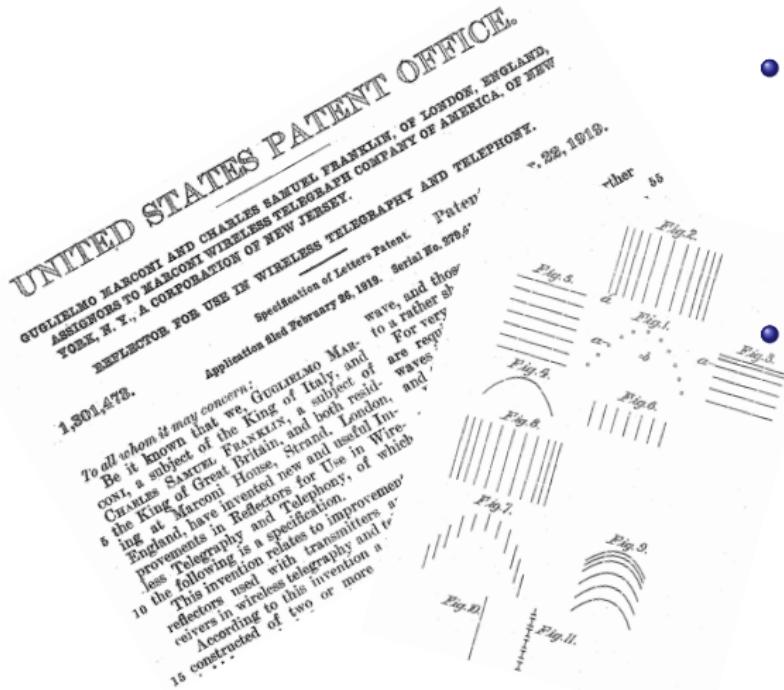
Estructuras artificiales **efectivamente homogéneas** para la longitud de onda de interés, que presentan propiedades electromagnéticas que no se encuentran en la naturaleza.

## 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.



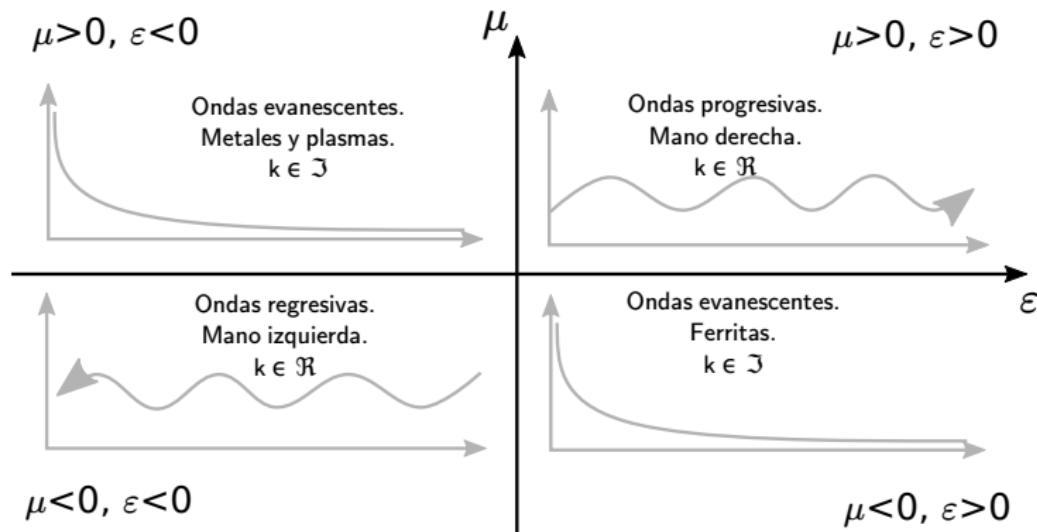
# Reseña histórica



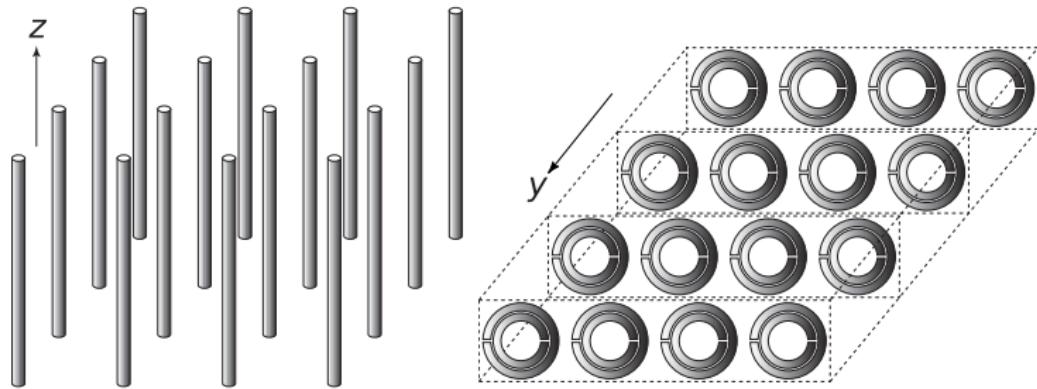
- Fines del siglo XVIII:  
**Rittenhouse** observó que algunos colores desaparecían cuando se veía luz a través de un pañuelo.
- 1919: Guglielmo **Marconi**, Charles Samuel **Franklin**: Conductores horizontales como superficie reflectiva para cierta frecuencia  
(¿Primer FSS?)

# 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.

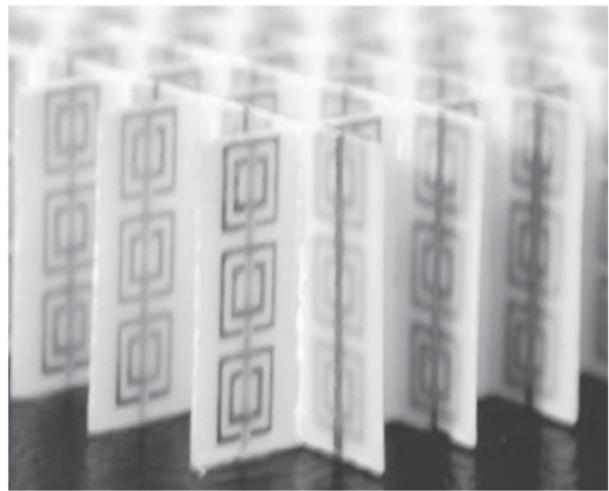
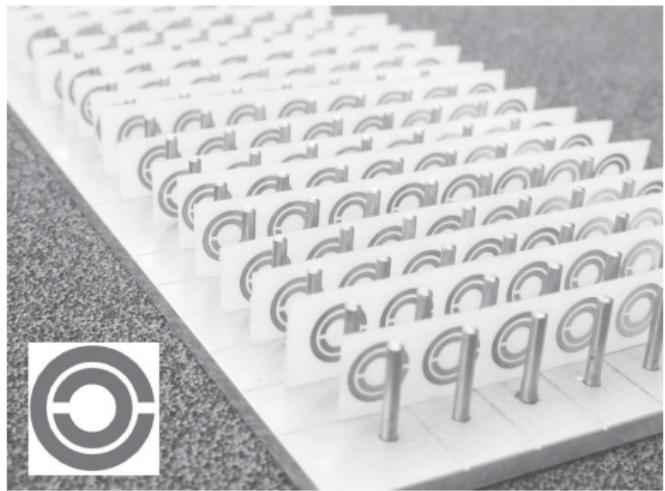


# Reseña histórica



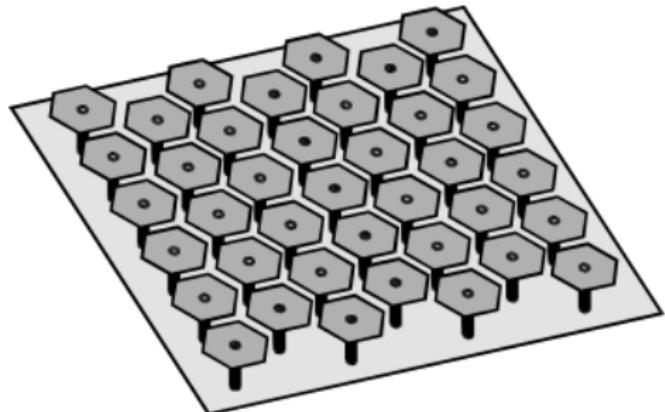
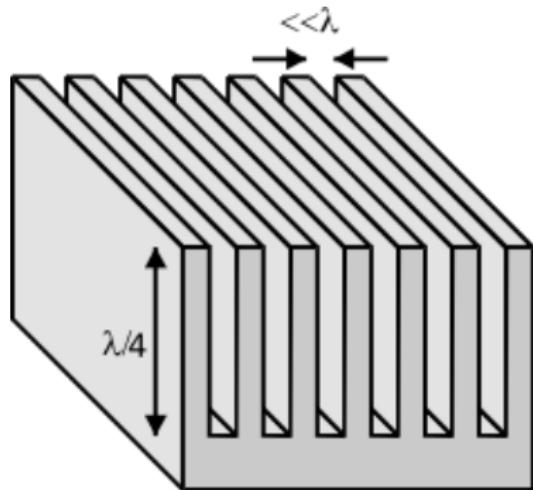
- 1990: **Smith**: Split Ring Resonators en base a los trabajos de Pendry. Se construyó en 2000.
- 1990: **Ho, Chan, Soukoulis**: Conjunto periódico de esferas dieléctricas. Banda prohibida.
- 1990: **Yablonovitch**. Estructura cristalina. Agujeros cilíndricos.

# Reseña histórica

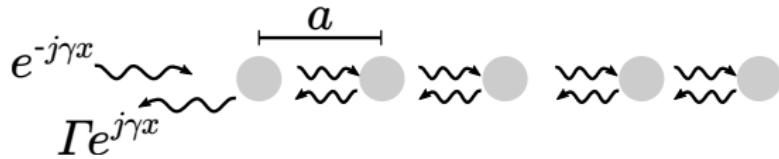


# Reseña histórica

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



# Difracción de Bragg



$$\Gamma_t = \Gamma e^{-j\gamma x} + \Gamma e^{-2j\gamma a} e^{-j\gamma x} + \Gamma e^{-4j\gamma a} e^{-j\gamma x} + \dots = \Gamma e^{-j\gamma x} \frac{1}{1 - e^{-2j\gamma a}},$$

Si  $e^{-2j\gamma a} = 1$ , la expresión diverge.

## Condición de Bragg

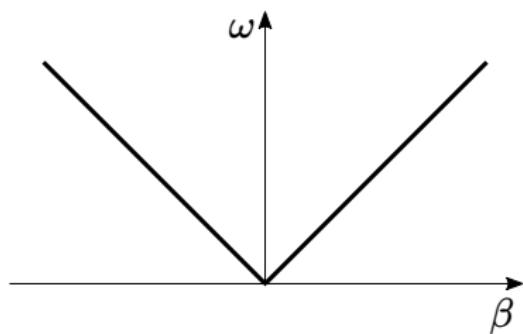
$$\gamma = \frac{n\pi}{a}$$

Y  $\gamma$  está relacionado a la frecuencia, según el material.

# Relación entre $\gamma$ y $\omega$ en el vacío

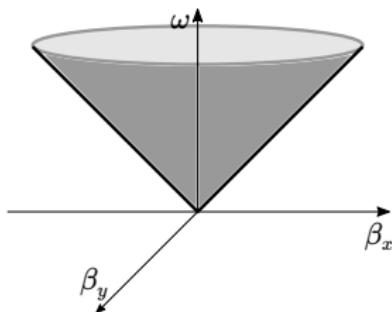
1D

$$\omega = c\beta$$



2D

$$\omega = c\sqrt{\beta_x^2 + \beta_y^2}$$



Si hay números de onda prohibidos, ¿podría haber frecuencias prohibidas?

# Problema de autovalores

Desacoplando las dos ecuaciones del rotor, se obtiene

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\epsilon_r} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) \right) = \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 \mathbf{H}(\mathbf{r}).$$

Se puede considerar un operador  $\Theta$ :

$$\hat{\Theta} = \nabla \times \frac{1}{\epsilon_r} \nabla \times$$

De forma que

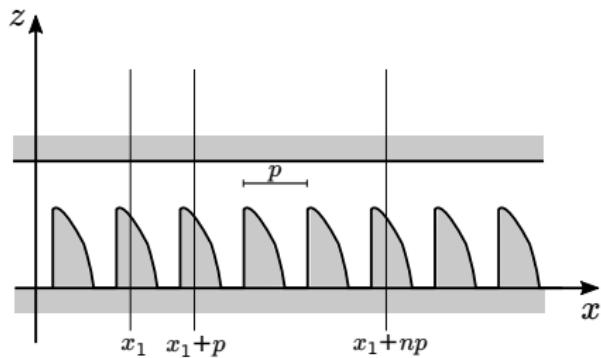
$$\hat{\Theta} \mathbf{H}(\mathbf{r}) = \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 \mathbf{H}(\mathbf{r})$$

# Problema de autovalores: Física cuántica

	Cuántica	Electromagnetismo
Campo	$\Psi(\mathbf{r}, t) = \Psi(\mathbf{r})e^{j\omega t}$	$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}(\mathbf{r})e^{i\omega t}$
Problema de autovalores	$\hat{H}\Psi(\mathbf{r}) = E\Psi(\mathbf{r})$	$\hat{\Theta}\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \mathbf{H}(\mathbf{r})$
Operador	$\hat{H} = \frac{-\hbar^2\nabla^2}{2m} + V(\mathbf{r})$	$\hat{\Theta} = \nabla \times \frac{1}{\epsilon_r} \nabla \times$

Además, al igual que el Hamiltoniano, el operador  $\Theta$  es hermítico.

# Teorema de Bloch-Floquet y armónicos espaciales



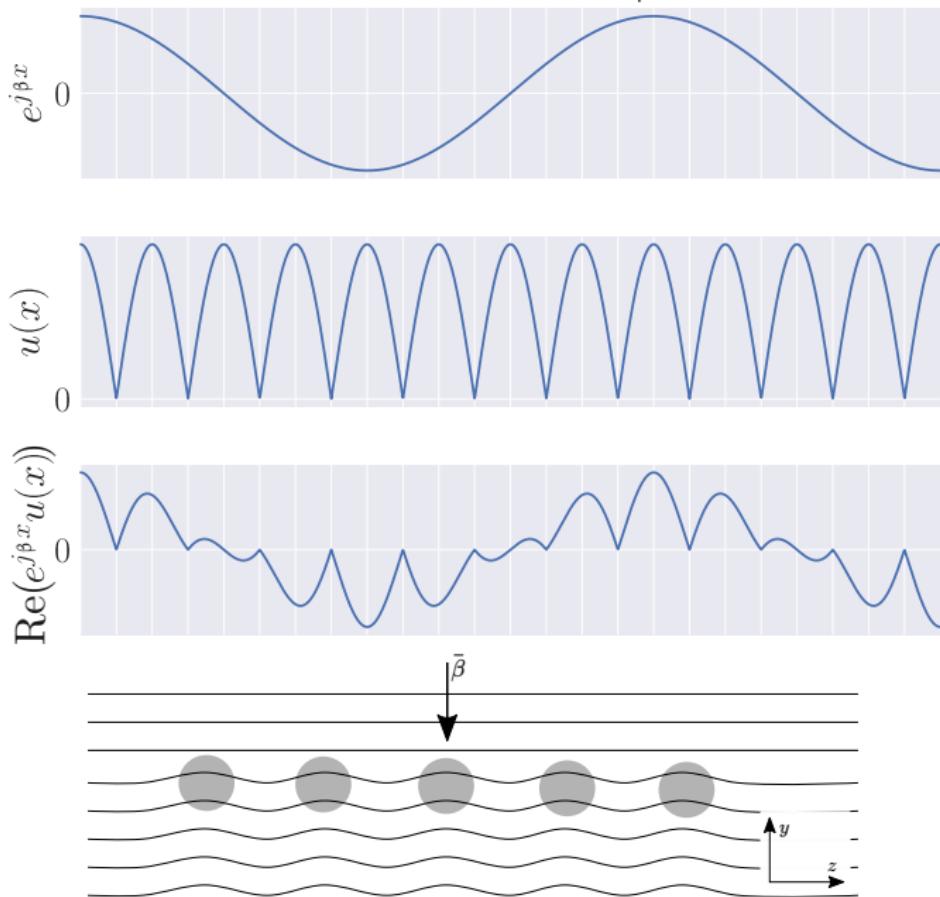
Gaston Floquet, 1883.

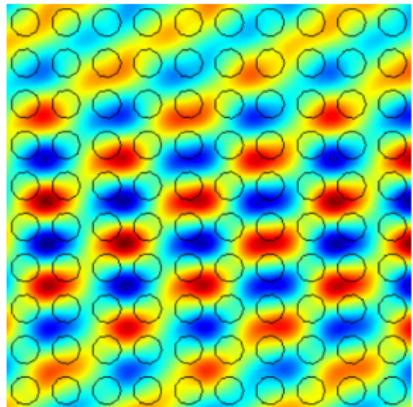
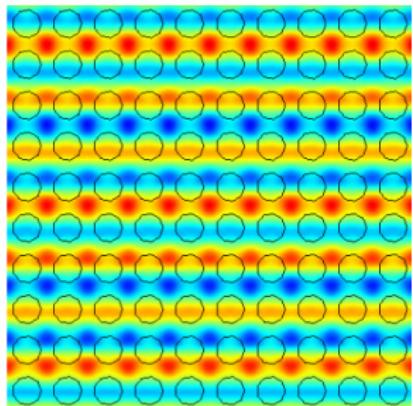
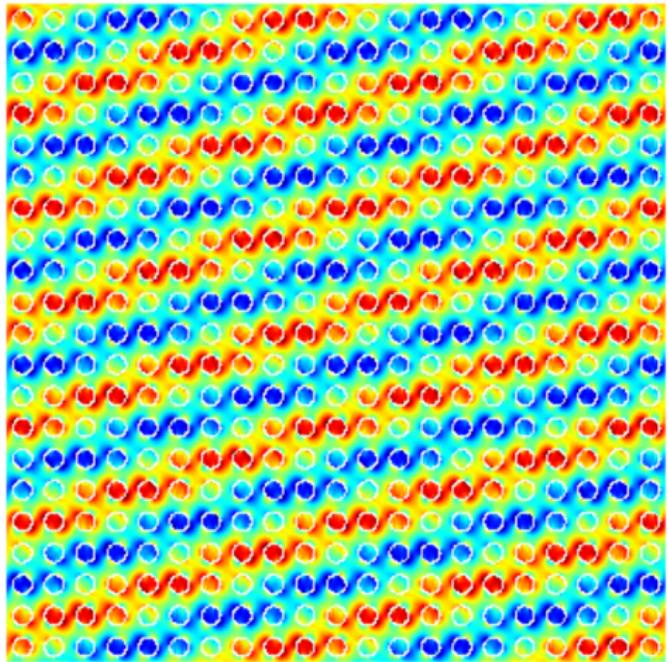
**Teorema de Bloch:**  
Soluciones a la función de onda de un electrón en un cristal.

$$\phi(\mathbf{r}) = e^{j\gamma \cdot \mathbf{r}} u(\mathbf{r})$$

$$E(x + d, y, z) = e^{-j\beta d} E(x, y, z),$$

### Efecto del teorema de Bloch-Floquet





# Espacio recíproco

# Dispersión en materiales comunes

# Representación de la dispersión en 2D

# Bandgap electromagnético

# Table

<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)

$$E = mc^2$$

# Verbatim

## 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.

# Citation

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

This statement requires citation [Smith, 2012].

# References



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

# Métodos numéricos

# 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

# Celda de Yang

# Comportamiento

# Modelo I

# Modelo I: Resultados

# Modelo II

## Modelo II: Resultados

## Modelo II: Diagrama de dispersión

# Modelo III

# Modelo III: Resultados

## Modelo III: Diagrama de dispersión

# Comportamiento de una fila

# Comportamiento de una estructura

# Definiciones

# Resultados