

Metamateriales

Jaume Anguera Pros
Aurora Andújar Linares

PID_00210808



Los textos e imágenes publicados en esta obra están sujetos –excepto que se indique lo contrario– a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 España de Creative Commons. Podéis copiarlos, distribuirlos y transmitirlos públicamente siempre que citéis el autor y la fuente (FUOC. Fundació para la Universitat Oberta de Catalunya), no hagáis de ellos un uso comercial y ni obra derivada. La licencia completa se puede consultar en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.es>

Índice

Introducción.....	5
Objetivos.....	6
1. Orígenes.....	7
2. Medios zurdos.....	9
3. Aplicaciones.....	12
Resumen.....	14
Bibliografía.....	15

Introducción

Los **metamateriales** se definen como estructuras periódicas (o cuasiperiódicas) fabricadas con unas propiedades electromagnéticas controlables, diferentes de las de los componentes que lo constituyen, que en ocasiones no existen en la naturaleza. El nombre proviene del griego *meta* que significa ‘más allá’.

Recientemente se ha abierto un nuevo campo de investigación en el área del electromagnetismo aplicado y de la ingeniería de microondas basado en el control de las propiedades electromagnéticas de ciertas estructuras periódicas artificiales, conocidas con el nombre de *metamateriales*.

El presente módulo se divide en cuatro apartados. En el primero se realiza una breve introducción histórica. En el segundo se presentan las propiedades de los medios zurdos. En el tercero se ilustran algunas aplicaciones de los metamateriales. Finalmente, el último apartado resume y presenta las conclusiones del módulo.

Lecturas complementarias

Podéis profundizar más sobre los metamateriales en las obras siguientes:

G. V. Eleftheriades; K. G. Balmain (2005). “Negative-refraction Metamaterials: Fundamental Principles and Applications”. *Wiley- IEEE Press*.

R. Marqués; F. Martín; M. Sorolla (2008). “Metamaterials with Negative Parameters: Theory, Design, and Microwave Applications”. *Wiley Series in Microwave and Optical Engineering*.

N. Engheta; R. W. Ziolkowski (2006). “Metamaterials: Physics and Engineering Explorations”. *Wiley- IEEE Press*.

Objetivos

Con el estudio de este módulo alcanzaréis los objetivos siguientes:

1. Entender qué son los metamateriales.
2. Saber en qué campos se aplican.

1. Orígenes

El concepto se origina en un trabajo del físico ruso Víctor Veselago en 1968. En sus investigaciones especulaba con la posible existencia de un hipotético medio con unas propiedades electromagnéticas únicas. Entre estas propiedades electromagnéticas únicas se encuentran la inversión de la ley de Snell, el efecto Doppler inverso o el efecto de Vavilov-Cerenkov. Veselago demostraba además que las ondas electromagnéticas que se propagan por un medio zurdo (*left handed material*) presentan un antiparalelismo entre la velocidad de grupo y la velocidad de fase, efecto que se conoce como *backward wave*. Para entender mejor este fenómeno se presenta un esquema en la figura 1.

Figura 1. Cuadro con las posibles combinaciones de permitividad eléctrica (ϵ) frente a la permeabilidad magnética (μ) y su correspondiente índice de refracción (n)

	$\epsilon < 0$	$\epsilon > 0$	
$\mu > 0$	n es imaginario Ondas evanescentes	$n > 0$ y real Materiales diestros	
$\mu < 0$	$n < 0$ y real Materiales zurdos	n es imaginario Ondas evanescentes	

Fuente: Bonache, 2006; Falcone, 2005

Habría que esperar 30 años desde el artículo de Veselago hasta que se produjera la siguiente cita histórica en la investigación de los metamateriales. Eran finales de los años noventa del siglo XX cuando J. B. Pendry fue el primero en teorizar una manera práctica de construir un material zurdo.

Un **material zurdo** (*left handed material*) en este contexto significa un material en el que la regla de la mano derecha no se cumple, lo que permite que una onda electromagnética transmita energía (con una velocidad de grupo) en la dirección opuesta a su velocidad de fase.

Lectura complementaria

Sobre los orígenes del concepto *metamateriales*, podéis consultar la obra siguiente:

V. G. Veselago (1968). "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ". *Sov. Phys. Uspekhi* (vol 10 (4), pág. 509-514).

Lecturas complementarias

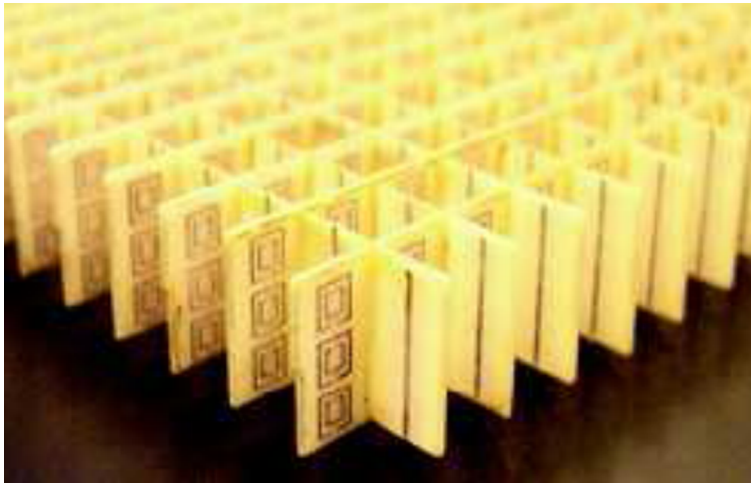
J. Bonache (2006). *Filtros de microondas basados en metamateriales y en resonadores concentrados*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona.

F. J. Falcone (2005). *Synthesis and applications of Microwave Metamaterials in Planar Circuit Technology from Electromagnetic Bandgaps to Left Handed Materials*. Tesis Doctoral. Universidad Pública de Navarra.

La idea inicial de J. B. Pendry era que una distribución de hilos conductores alineados a lo largo de la dirección de propagación de la onda dan lugar a una permitividad efectiva negativa ($\epsilon < 0$). Sin embargo, existen materiales naturales (como ferroeléctricos) con permitividad negativa: el reto era construir un material que tuviera al mismo tiempo una permeabilidad negativa ($\mu < 0$).

En 1999, Pendry propuso una estructura de conductores de hilo finos que presentan permitividad eléctrica negativa, y posteriormente describe una partícula denominada *resonador de anillos cortados* (SRR, de *split ring resonator*), que presentaba permeabilidad magnética negativa. En el año 2000, Smith combina los anillos SRR ($\mu < 0$) y los hilos metálicos paralelos de Pendry con una $\epsilon < 0$ para fabricar la primera estructura “zurda” (*left handed*) de la historia (figura 2).

Figura 2. Estructura periódica que combina efectos de los SRR y los hilos finos para conseguir comportamiento zurdo



Fuente: Shelby, Smith y Schultz (2001)

En resumen, los metamateriales se pueden clasificar según las estructuras siguientes:

- **DNG** (*double negative materials*): estructuras con $\epsilon < 0$ y $\mu < 0$.
- **LH** (*left-handed materials*): estructuras donde la dirección del campo \vec{E} , \vec{H} y la dirección de propagación sigue una relación a izquierdas (figura 4b).
- **CRLH** (*composite right/left-handed*): estructuras que combinan propiedades de medios diestros (convencionales) con medios zurdos.
- **AMC** (*artificial magnetic conductors*): estructuras que presentan las propiedades de conductores magnéticos perfectos.
- **EBG** (*electromagnetic band gap*): estructuras con bandas prohibidas que evitan la propagación de ondas.

El apartado siguiente describe medios zurdos, y en el apartado 3 se ilustran algunas aplicaciones de los metamateriales. Las conclusiones se recogen en el resumen.

Lecturas complementarias

J. B. Pendry; A. J. Holden; D. J. Robbins; W. J. Stewart (1999). “Magnetism from conductors and enhanced linear media”. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* (vol. 47, núm. 11, pág. 2075-2084).

R. A. Shelby; D. R. Smith; S. Schultz (2001). “Experimental verifications of a negative index of refraction”. *Science* (vol. 292, pág. 77-79).

Lectura complementaria

Sobre la clasificación de los metamateriales, podéis consultar la obra siguiente:

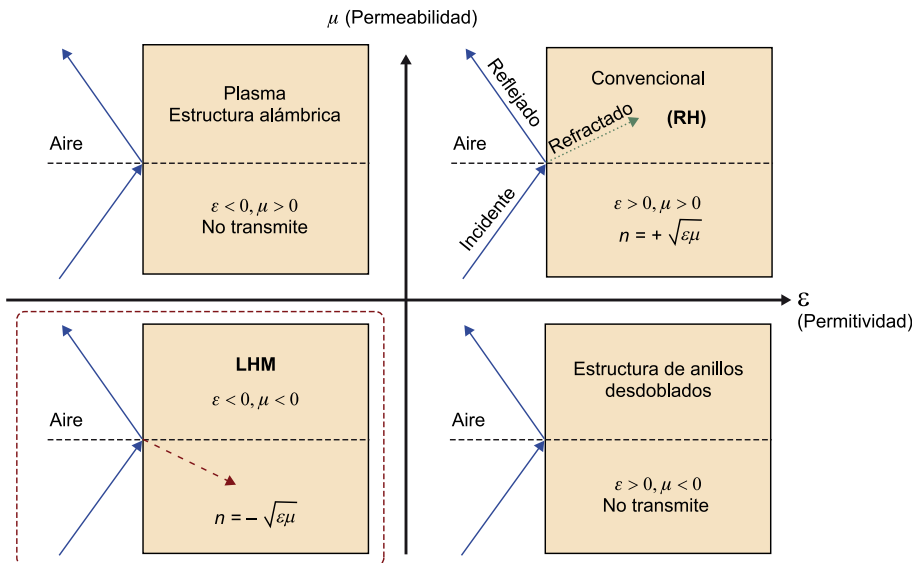
F. Yang; Y. Rahmat-Samii (2009). *Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering*. The Cambridge RF and Microwave Engineering Series, Cambridge University Press.

2. Medios zurdos

Dado que los medios zurdos fueron uno de los primeros metamateriales teorizados por Veselago, es interesante presentar alguna de sus propiedades.

En un medio efectivo, la celda base o diseño base que compone el medio tiene unas dimensiones mucho menores que la longitud de onda en dicho medio, de manera que la señal que viaja a través de él lo percibe como un medio homogéneo, siempre hablando en términos de propiedades electromagnéticas. Por este motivo, para este tipo de medios, se definirán magnitudes electromagnéticas efectivas, tales como la permeabilidad magnética efectiva μ_{eff} y la permitividad dieléctrica efectiva ϵ_{eff} . Por medio de estas se diseñará una celda base del medio efectivo, ajustando unos valores adecuados, como la impedancia característica Z_0 y la velocidad de fase. En concreto, se pueden distinguir cuatro posibles medios o escenarios (figura 3), cuatro cuadrantes o casos divididos según el signo de la permitividad dieléctrica (ϵ_{eff}) frente a la permeabilidad magnética (μ_{eff}).

Figura 3. Escenarios electromagnéticos según la permeabilidad magnética y la permitividad dieléctrica



Fuente: Bonache, 2006; Falcone, 2005

En el primero de los cuadrantes se halla el caso en el que ϵ_{eff} y μ_{eff} son positivos, situación que se corresponde a la de un medio convencional (dieléctrico). Entre los otros cuadrantes, existen dos donde la propagación no está permitida, es decir, la constante de propagación es compleja y la estructura solo admite modos evanescentes; son aquellos donde ϵ_{eff} o μ_{eff} es positivo y la otra negativa. Por último, existe otro cuadrante donde la propagación es posible y corresponde a cuando ϵ_{eff} y μ_{eff} son negativas. Esta combinación no aparece de forma espontánea en la naturaleza, pero presenta importantes características

Lectura complementaria

Sobre los materiales zurdos, podéis consultar la obra siguiente:

V. G. Veselago (1968). "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ". *Sov. Phys. Uspekhi* (vol 10 (4), pág. 509-514).

Lectura complementaria

J. Bonache (2006). *Filtros de microondas basados en metamateriales y en resonadores concentrados*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona.

F. J. Falcone (2005). *Synthesis and applications of Microwave Metamaterials in Planar Circuit Technology from Electromagnetic Bandgaps to Left Handed Materials*. Tesis Doctoral. Universidad Pública de Navarra.

para ser estudiadas y aplicadas. Los parámetros ε y μ son unas magnitudes fundamentales que determinan la propagación de las ondas electromagnéticas, ya que aparecen en la relación de dispersión que relaciona la pulsación de la radiación ω y el vector de onda k .

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} n^2 \rightarrow n = \pm \sqrt{\varepsilon \cdot \mu} \quad 4.1$$

Aparentemente, para un medio sin pérdidas, estos parámetros son números reales, y por consiguiente un cambio simultáneo en los valores ε y μ no implicaría cambios en la relación de dispersión. Sin embargo, para demostrar la consecuencia de los cambios, es necesario analizarlos en aquellas expresiones donde aparecen por separado.

A partir de las ecuaciones de Maxwell:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad 4.2$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = -\varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad 4.3$$

donde \vec{E} es el campo eléctrico y \vec{H} el campo magnético. Si suponemos la propagación de una onda plana donde todas las cantidades son proporcionales a $e^{-j(kz-\omega t)}$, las expresiones 4.2 y 4.3 se simplifican a:

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega \mu \cdot \vec{H} \quad 4.4$$

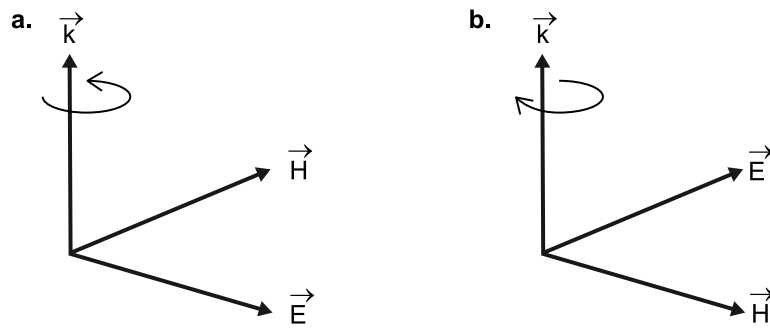
$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega \varepsilon \cdot \vec{E} \quad 4.5$$

A partir de estas relaciones se puede ver que si $\varepsilon > 0$ y $\mu > 0$, \vec{E} , \vec{H} y \vec{k} forman un triplete diestro que se muestra en la figura 4a, mientras que si por el contrario, $\varepsilon < 0$ y $\mu < 0$, \vec{E} , \vec{H} y \vec{k} forman un triplete zurdo que se muestra en la figura 4b (de ahí su denominación de *left handed*).

El vector de Poynting $\vec{\mathcal{P}}$ se define según la expresión siguiente:

$$\vec{\mathcal{P}} = \vec{E} \times \vec{H} \quad 4.6$$

donde se puede observar que siempre es perpendicular a \vec{E} y \vec{H} , por lo que el vector de onda tendrá la misma dirección que el vector Poynting, formando otro triplete diestro como en el caso del medio convencional. Así pues, en un medio zurdo sus direcciones serán opuestas. Y de esta manera la velocidad de fase y la velocidad de grupo tendrán signos opuestos. Otra característica de estos medios es que presentan un índice de refracción negativo.

Figura 4. Relación \vec{E} , \vec{H} y \vec{k} (dirección de propagación)a. Para un medio convencional (*right handed*). b. Para un medio zurdo (*left handed*).

En conclusión, este tipo de materiales con medios zurdos se denominan **zurdos**, o *left-handed*, por la orientación que toman \vec{E} y \vec{H} con respecto al vector de onda \vec{k} . No obstante, también reciben el nombre de **materiales backward, negative-index** o *negative-refractive index (NRI)*.

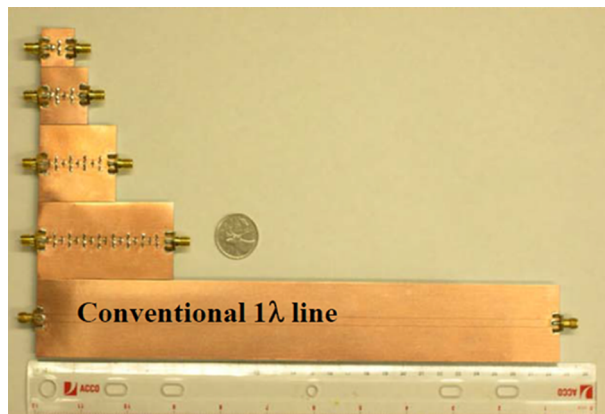
3. Aplicaciones

Mucho es lo que se ha avanzado en el ámbito de los metamateriales, tanto a nivel teórico como en aplicaciones. En la siguiente clasificación se resumen algunas de las aplicaciones de los metamateriales en el campo de antenas y circuitos de microondas:

1) Algunos ejemplos de la aplicación de los metamateriales en el diseño de circuitos de microondas para agrupaciones de antenas:

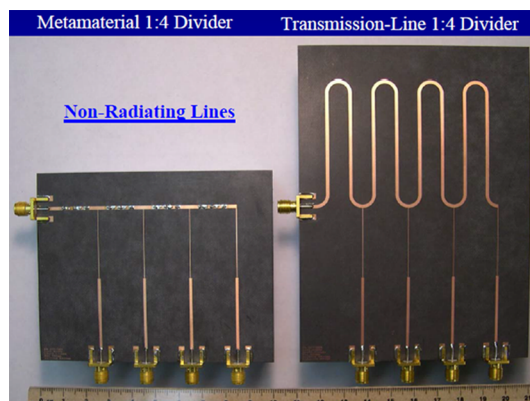
a) Desfasadores miniatura basados en estructuras zurdas para agrupaciones de antenas.

Figura 5. Desfasadores miniatura basados en estructuras *left-handed* para agrupaciones de antenas



b) Divisores miniatura sintetizados mediante estructuras zurdas para agrupaciones de antenas.

Figura 6. Divisores miniatura sintetizados mediante estructuras zurdas para agrupaciones de antenas



Lecturas complementarias

Sobre los avances en el ámbito de los metamateriales:

G. V. Eleftheriades; K. G. Balmain (2005). "Negative-refraction Metamaterials: Fundamental Principles and Applications". *Wiley - IEEE Press*.

R. Marqués; F. Martín; M. Sorolla (2008). "Metamaterials with Negative Parameters: Theory, Design, and Microwave Applications". *Wiley Series in Microwave and Optical Engineering*.

N. Engheta; R. W. Ziolkowski (2006). "Metamaterials: Physics and Engineering Explorations". *Wiley- IEEE Press*.

Lectura complementaria

Sobre los desfasadores miniatura basados en estructuras zurdas:

M. Antoniades; G. V. Eleftheriades (2003). "Compact, Linear, Lead/Lag Metamaterial Phase Shifters for Broadband Applications". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 2, núm. 7, pág. 103-106).

Lectura complementaria

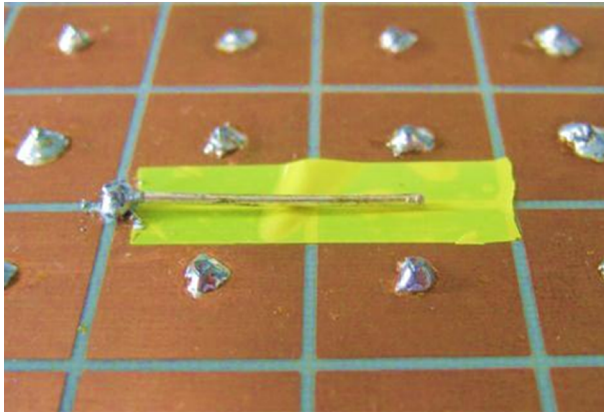
Sobre los divisores miniatura sintetizados mediante estructuras zurdas:

G. V. Eleftheriades; M. Antoniades; A. K. Iyer; R. Islam (2004). *Proceedings of the 27th ESA Antenna Technology Workshop*. Santiago de Compostela, España, 9-11 de marzo.

2) Algunos ejemplos de aplicación de los metamateriales en el campo del diseño de antenas

a) *Artificial magnetic conductors*: posibilidad de colocar antenas de hilo muy cerca de un conductor eléctrico sobre el cual existe una estructura periódica que se comporta como un conductor magnético para un cierto margen frecuencial.

Figura 7. Monopolo sobre estructura AMC



b) Antena basada en estructuras CRLH, que poseen, entre otras, las siguientes ventajas: miniaturización y menor dependencia frecuencial de la dirección del máximo de radiación en agrupaciones de antenas.

Figura 8. Antena basada en estructuras CRLH



Lectura complementaria

Sobre las antena basada en estructuras CRLH, podéis consultar la obra siguiente:

R. Siragusa; E. Perret; P. Lemaitre-Auger; H. Van Nguyen; S. Tedjini; C. Caloz (2012). "A Tapered CRLH Interdigital/Stub Leaky-Wave Antenna With Minimized Sidelobe Levels". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 11, pág. 1214-1217).

Resumen

Mediante estructuras periódicas es posible sintetizar los denominados *meta-materiales*, que abren un nuevo campo de aplicación en el diseño de circuitos de microondas y antenas. Entre sus propiedades más significativas se encuentran la miniaturización de dispositivos, las superficies magnéticas –que permiten diseñar antenas con perfiles muy delgados– y las estructuras de banda prohibida –que permiten desacoplar antenas y diseñar filtros.

Bibliografía

- Antoniades, M.; Eleftheriades, G. V.** (2003). "Compact, Linear, Lead/Lag Metamaterial Phase Shifters for Broadband Applications". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 2, núm. 7, pág. 103-106).
- Bonache, J.** (2006). *Filtros de microondas basados en metamateriales y en resonadores concentrados*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Eleftheriades, G. V.; Antoniades, M.; Iyer, A. K.; Islam, R.** (2004). *Proceedings of the 27th ESA Antenna Technology Workshop*. Santiago de Compostela, España, 9-11 de marzo.
- Eleftheriades, G. V.; Balmain, K. G.** (2005). "Negative-refraction Metamaterials: Fundamental Principles and Applications". *Wiley- IEEE Press*.
- Engheta, N.; Ziolkowski, R. W.** (2006). "Metamaterials: Physics and Engineering Explorations". *Wiley- IEEE Press*.
- Falcone, F. J.** (2005). *Synthesis and applications of Microwave Metamaterials in Planar Circuit Technology from Electromagnetic Bandgaps to Left Handed Materials*. Tesis Doctoral. Universidad Pública de Navarra.
- Marqués, R.; Martín, F.; Sorolla, M.** (2008). "Metamaterials with Negative Parameters: Theory, Design, and Microwave Applications". *Wiley Series in Microwave and Optical Engineering*.
- Pendry, J. B.; Holden, A. J.; Robbins, D. J.; Stewart, W. J.** (1999). "Magnetism from conductors and enhanced linear media". *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* (vol. 47, núm. 11, pág. 2075-2084).
- Shelby, R. A.; Smith, D. R.; Schultz, S.** (2001). "Experimental verifications of a negative index of refraction". *Science* (vol. 292, pág. 77-79).
- Siragusa, R.; Perret, E.; Lemaître-Auger, P.; Nguyen, H. van; Tedjini, S.; Caloz, C.** (2012). "A Tapered CRLH Interdigital/Stub Leaky-Wave Antenna With Minimized Sidelobe Levels". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 11, pág. 1214-1217).
- Veselago, V. G.** (1968). "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ". *Sov. Phys. Uspekhi* (vol 10 (4), pág. 509-514).
- Yang, F.; Rahmat-Samii, Y.** (2009). *Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering*. The Cambridge RF and Microwave Engineering Series, Cambridge University Press.

