

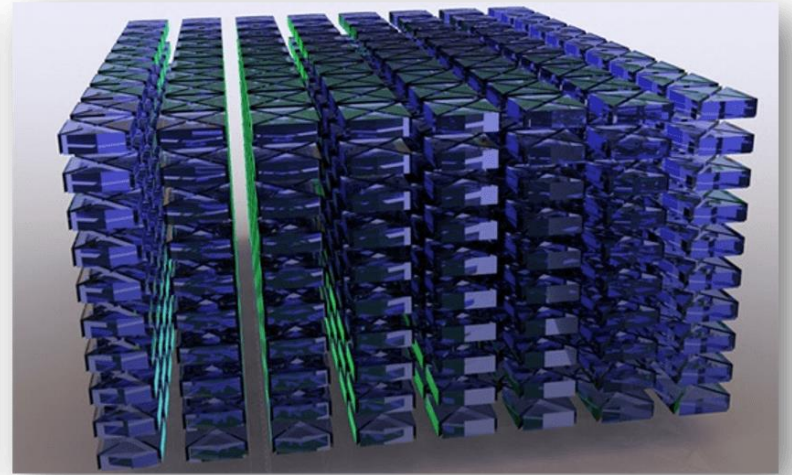
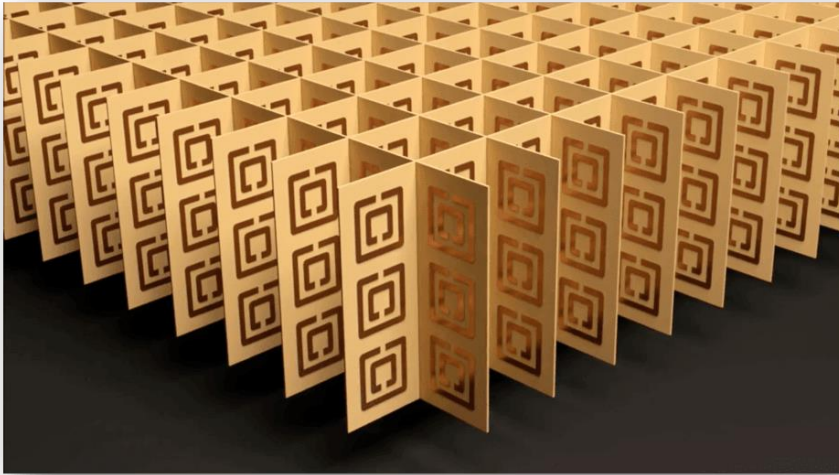
METAMATERIAŁY - STEROWANIE ŚWIATŁEM PRZY POMOCY MATERII

Owidiusz Makuta

Plan

- **Metamateriały: czym są i jak działają?**
- **Typy metamateriałów**
- **Zastosowania**

Metamateriały

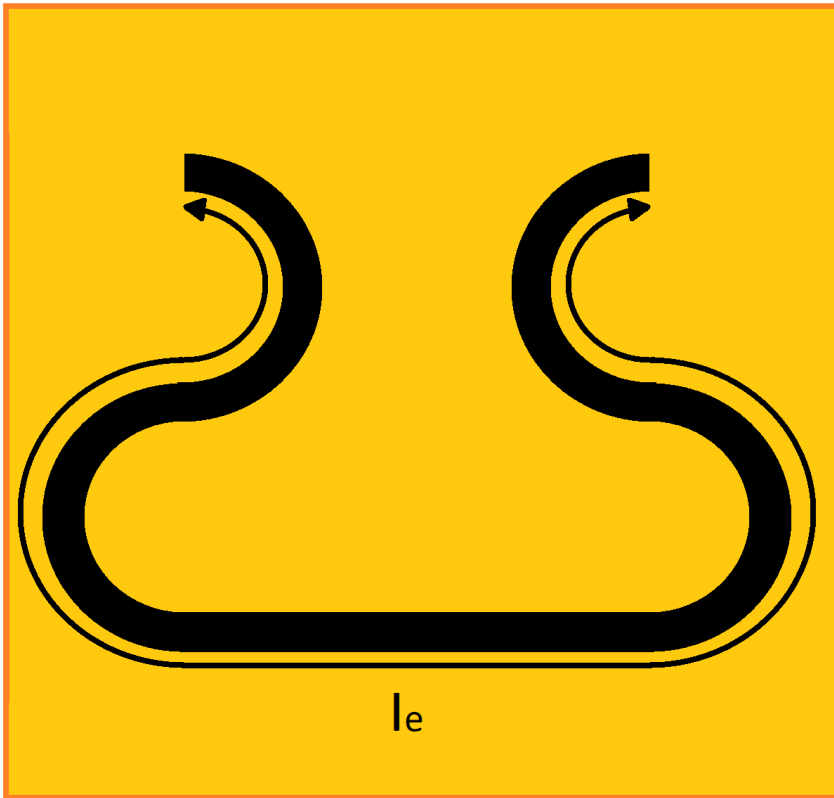


Źródło: [10]

Wewnętrzna struktura metamateriałów



Metamolekuły



$$\lambda_0 \approx \sqrt{\epsilon} \frac{2l_e}{n}$$

λ_0 - długość fali rezonansowej

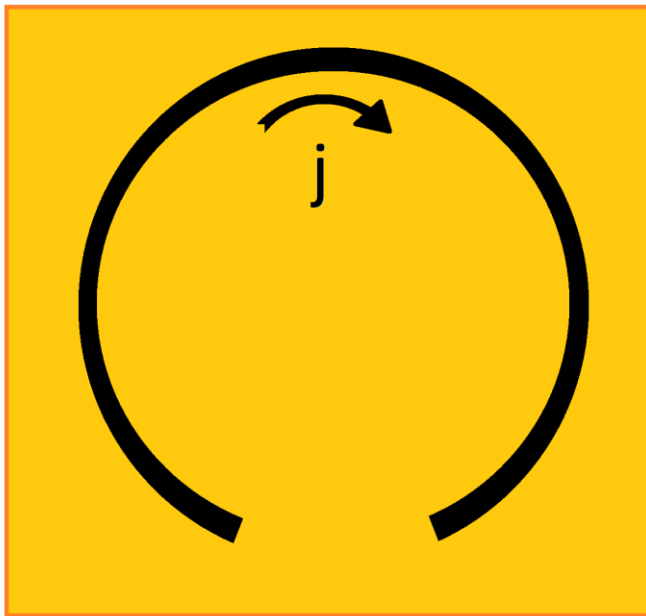
l_e - długość przewodnika

ϵ - przenikalność elektryczna

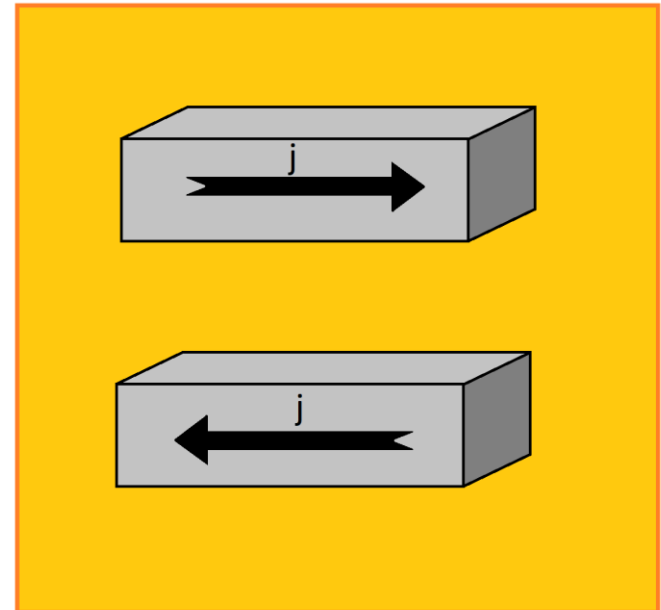
n - liczba naturalna większa od 0

Magnetyczne metamateriały

Pierścień



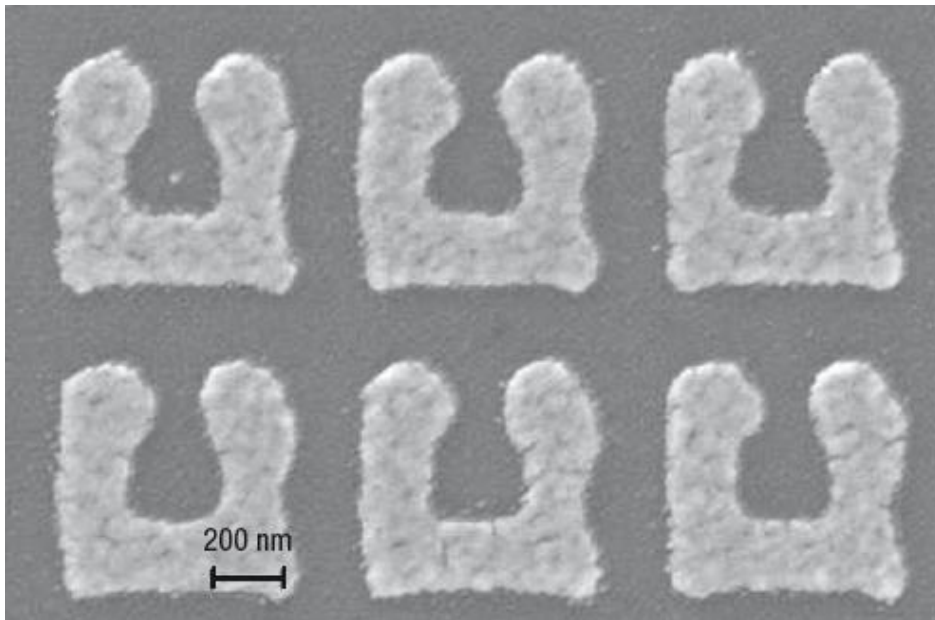
Dwie kolumny



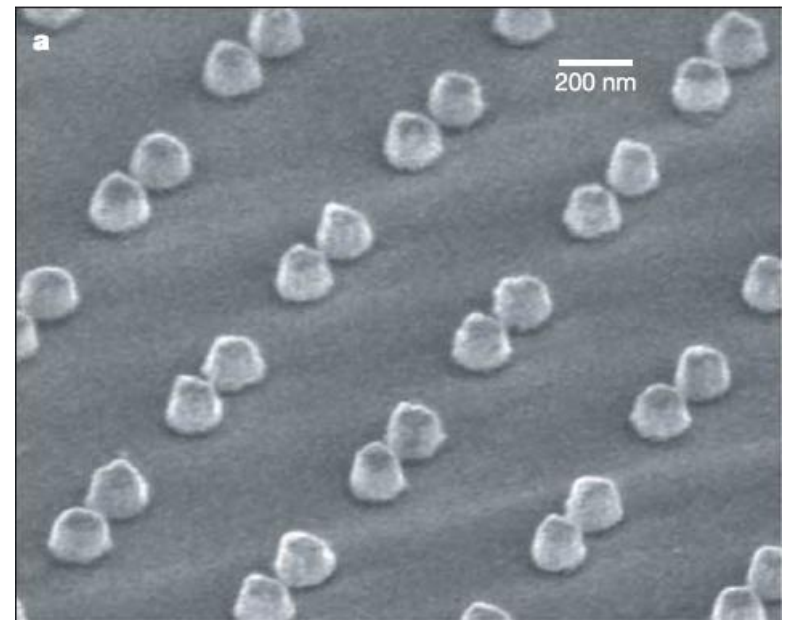
Magnetyczne metamateriały

$$\lambda \approx 3,5 \mu\text{m}$$

$$\lambda \approx 0,5 \mu\text{m}$$



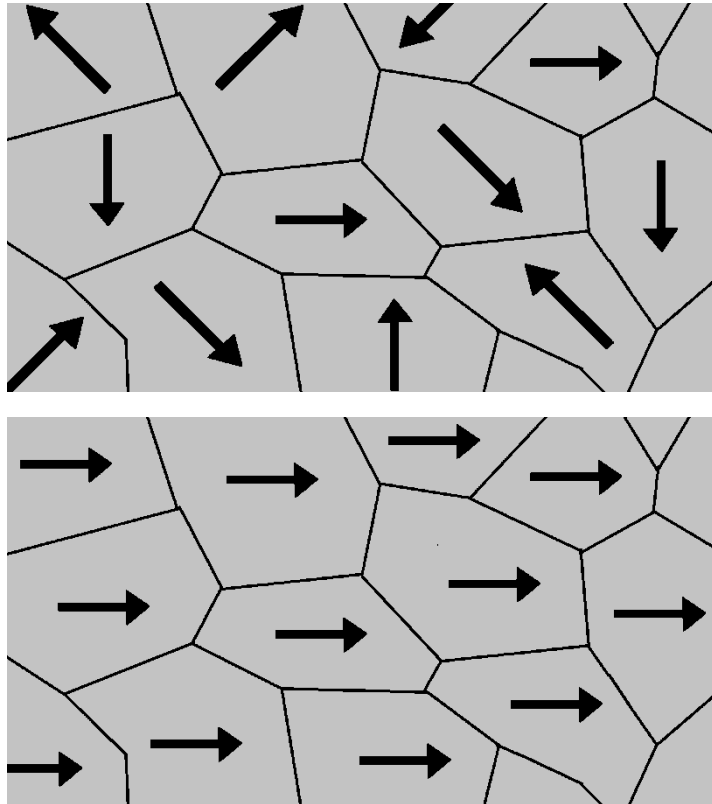
Źródło: [11]



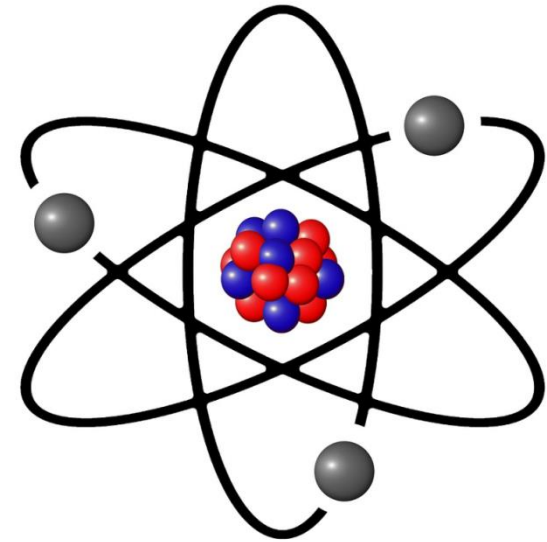
Źródło: [12]

Dlaczego materiały z $\mu \gg 1$ dla wysokich częstotliwości nie występują w naturze?

Ferromagnetyk



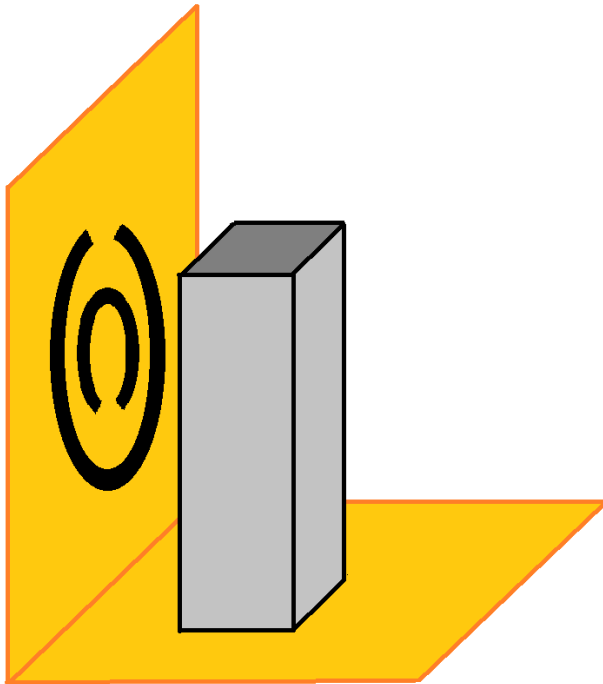
Diamagnetyk



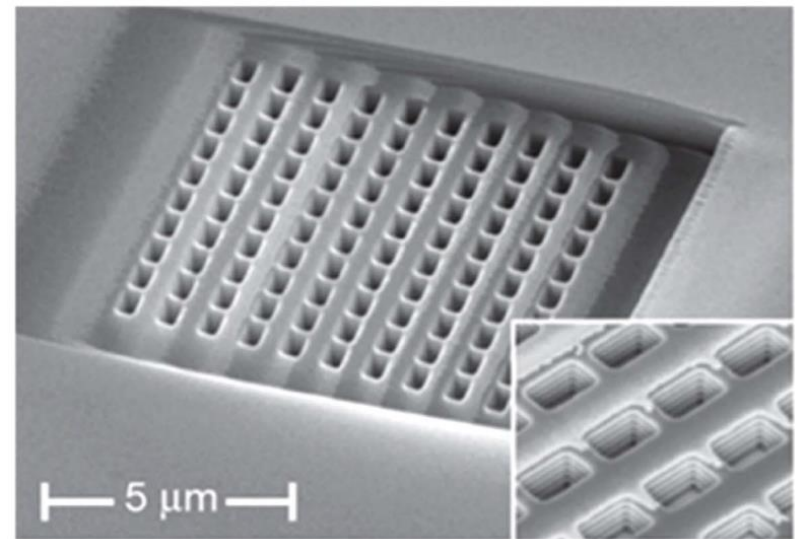
Metamateriały o ujemnym współczynniku załamania

$$n = \sqrt{\varepsilon\mu} = \sqrt{(-1)^2|\varepsilon||\mu|} = -\sqrt{|\varepsilon||\mu|}$$

Metamolekuła dla niskich częstotliwości



Metamateriał dla bliskiej podczerwieni



Źródło: [9]

Metamateriały o ujemnym współczynniku załamania

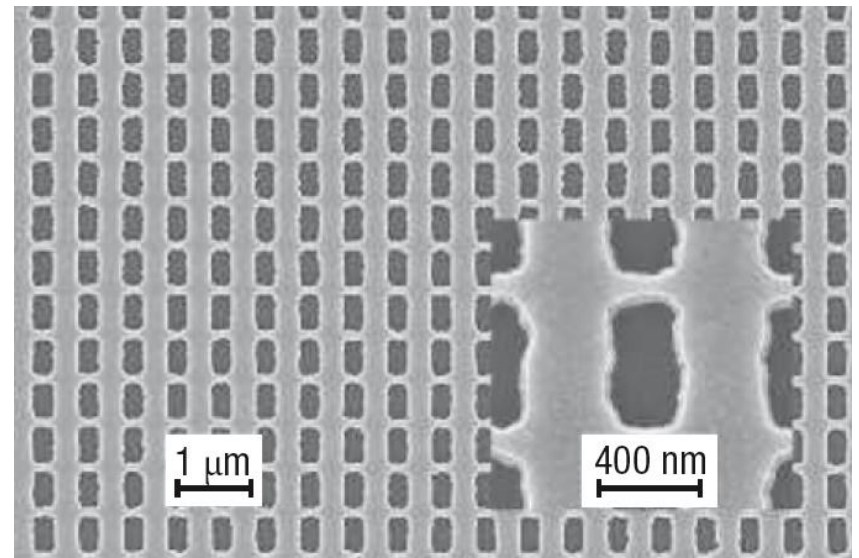
$$\lambda \approx 6\text{cm}$$

$$\lambda \approx 1,4\mu\text{m}$$

$$n \approx -2$$



Źródło: [5]

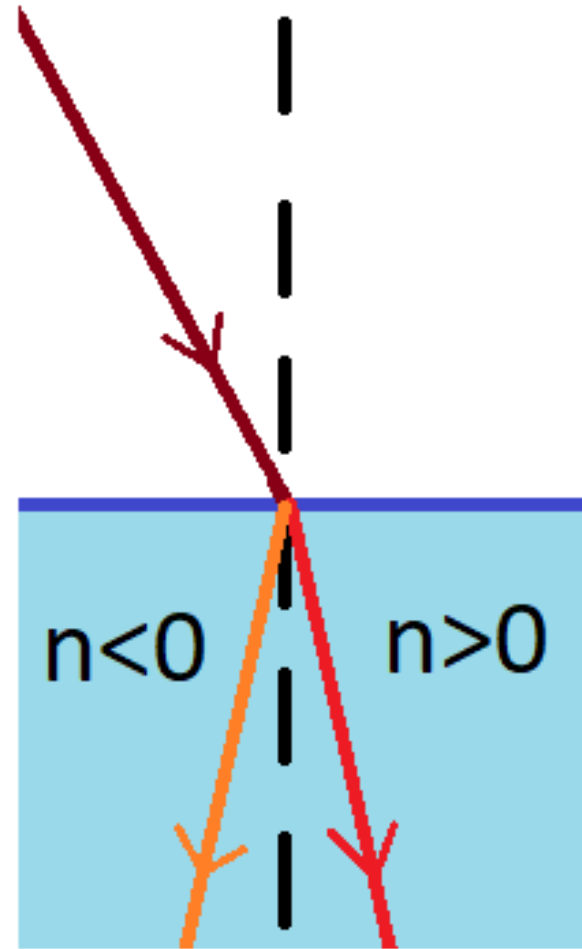


Źródło: [13]

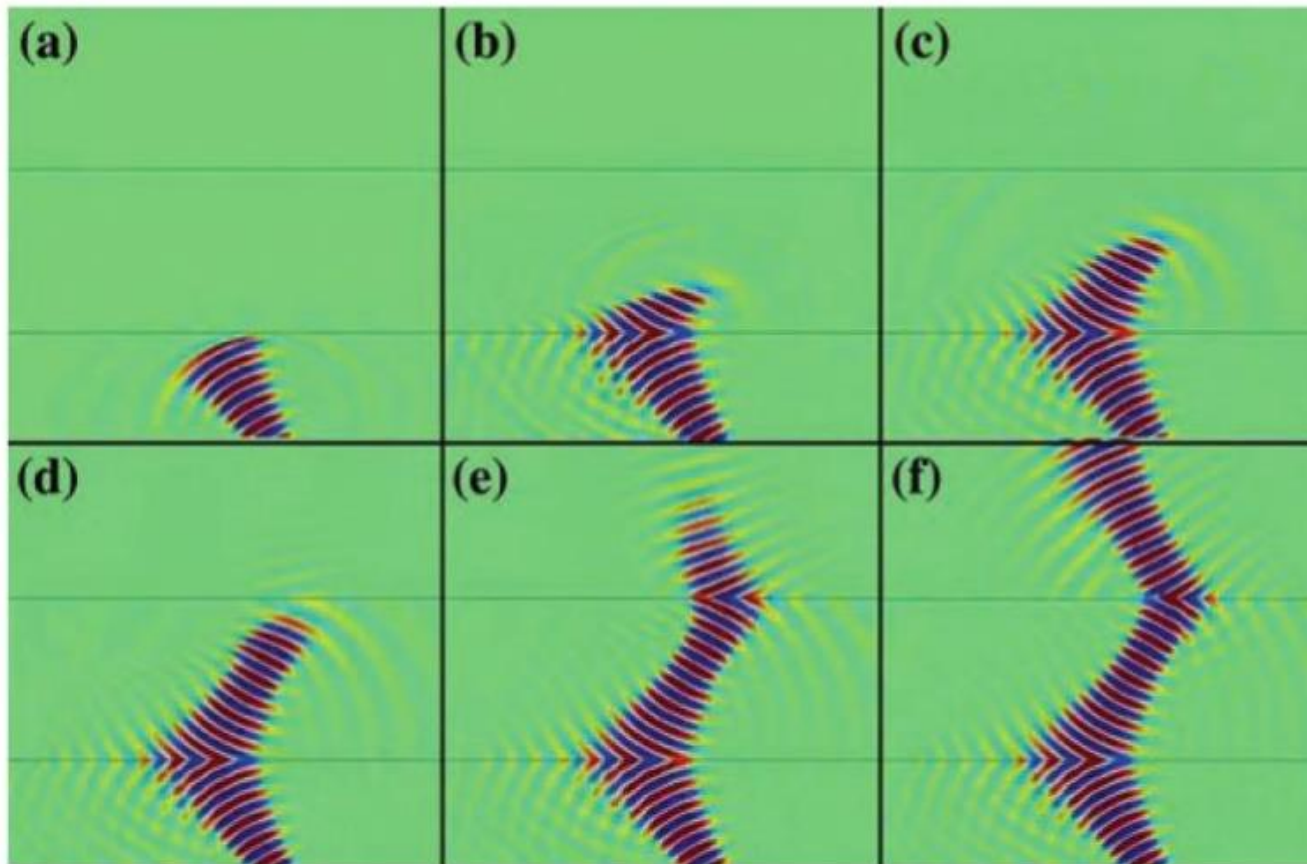
Właściwości materiałów z $n < 0$

Prawo
Snelliusa

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

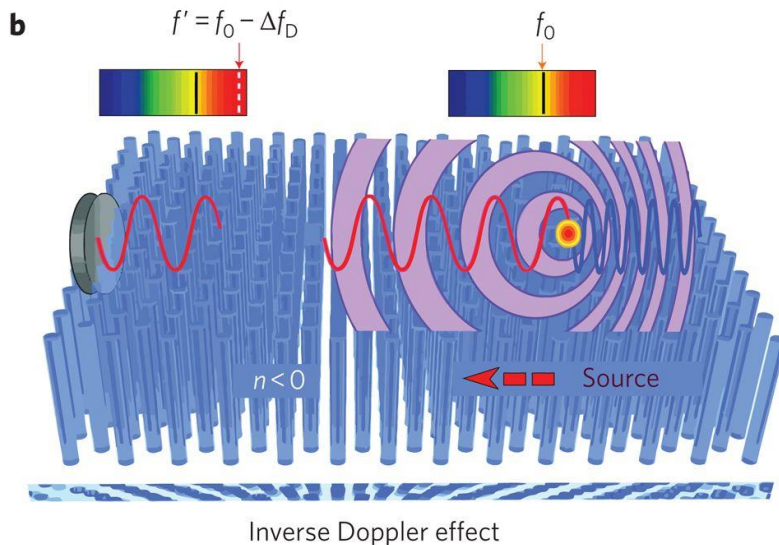
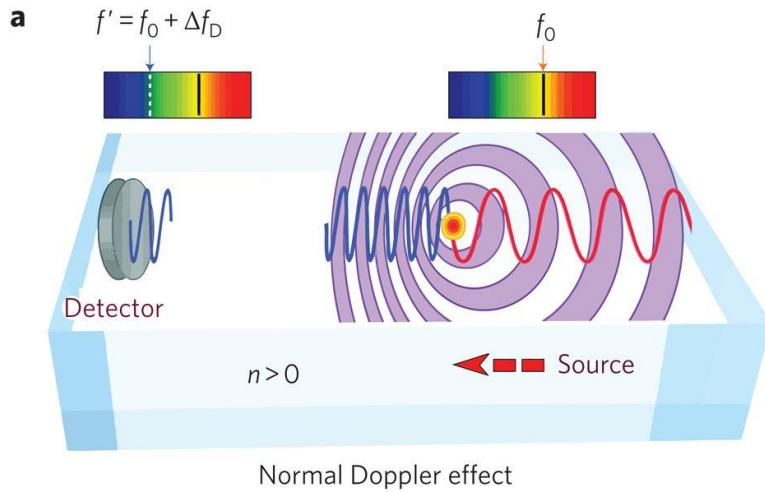


Właściwości materiałów z $n < 0$



Źródło: [4]

Właściwości materiałów z $n < 0$



$$\vec{k} \propto \vec{H} \times \vec{E}$$

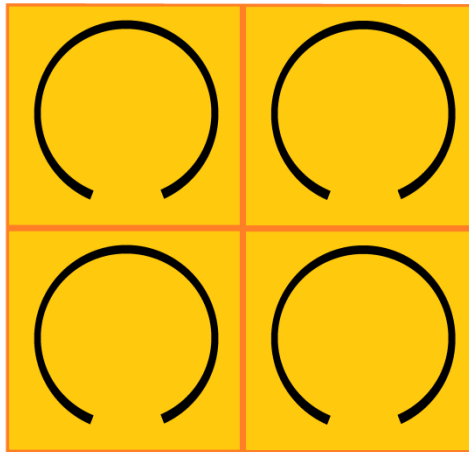
$$\frac{d(\omega\epsilon)}{d\omega} = \omega \frac{d(\epsilon)}{d\omega} + \epsilon > 0$$

$$\frac{d(\omega\mu)}{d\omega} = \omega \frac{d(\mu)}{d\omega} + \mu > 0$$

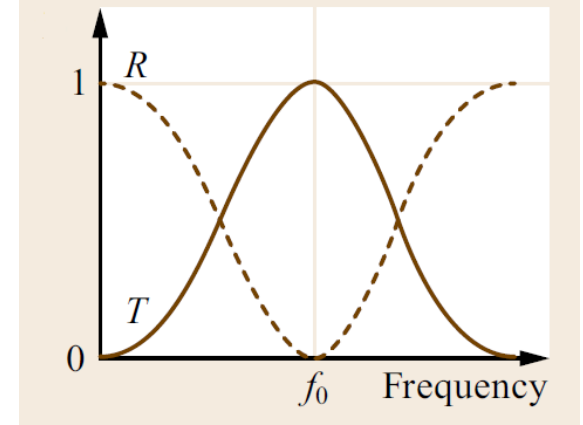
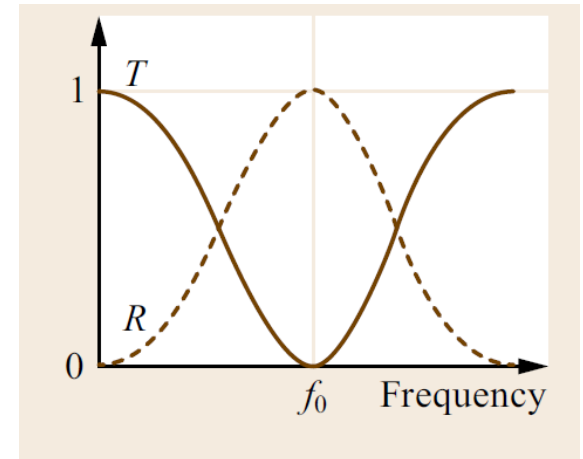
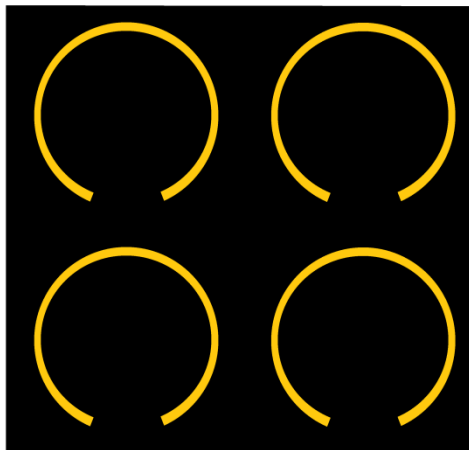
Źródło: [2]

Powierzchnie selektywne

Selektywne odbicie



Selektywna transmisja



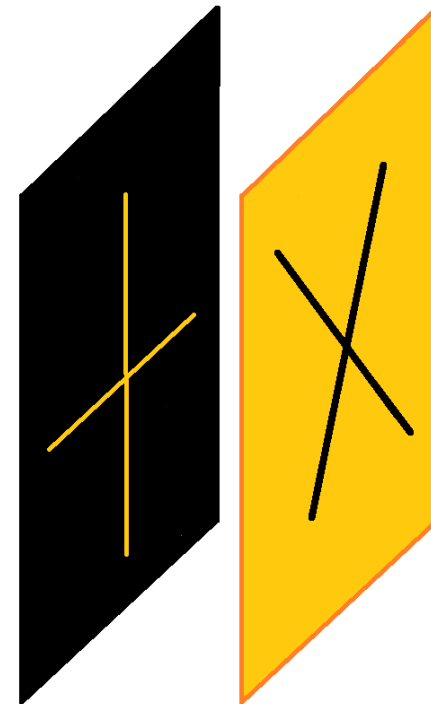
Źródło: [1]

Chiralne metamateriały

$$\Delta\phi = \frac{\Delta nd\pi}{\lambda_0}$$

Najlepsze chiralne metamateriały:
 $2700^\circ / \lambda$

Chiralne metamolekuły



Chiralne metamateriały

Sprzężenie między polem magnetycznym
i elektrycznym

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E} - i\kappa \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \vec{H}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} + i\kappa \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \vec{E}$$

$$n_{\pm} = \sqrt{\epsilon \mu} \pm \kappa$$

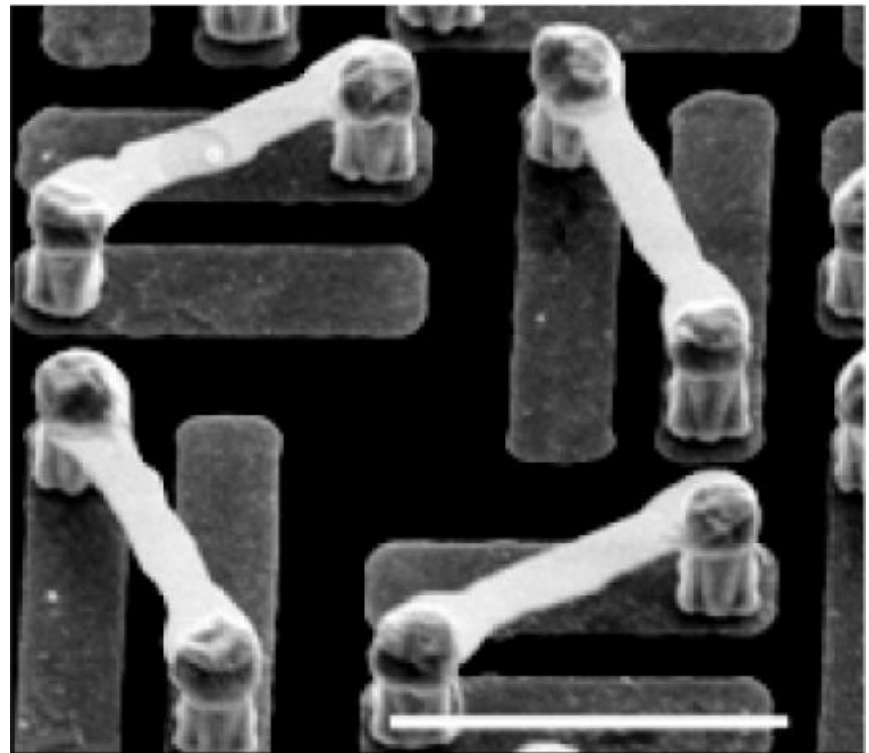
Chiralne metamateriały

Chiralny metamateriał

Skala 20 μm

$$\lambda \approx 0,3\text{mm}$$

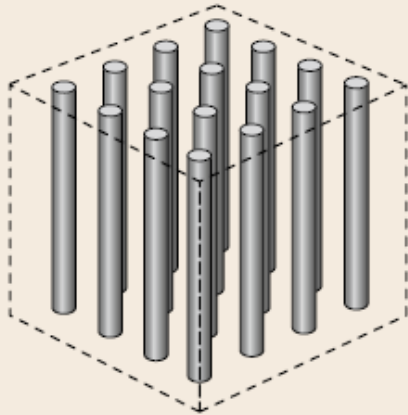
$$n \approx -5$$



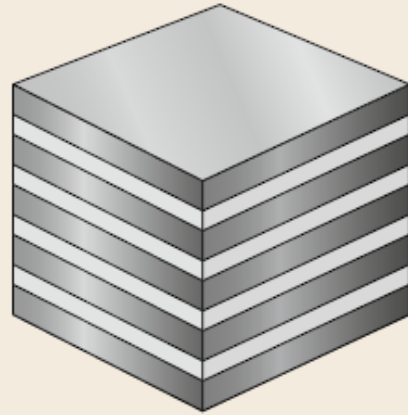
Źródło: [14]

Hiperboliczne metamateriały

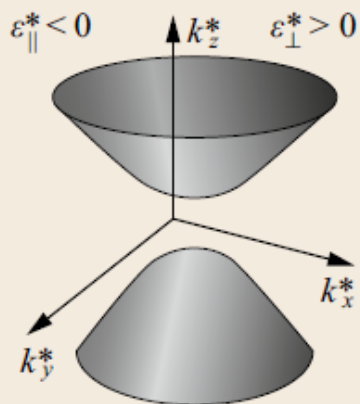
a) Hyperbolic type I



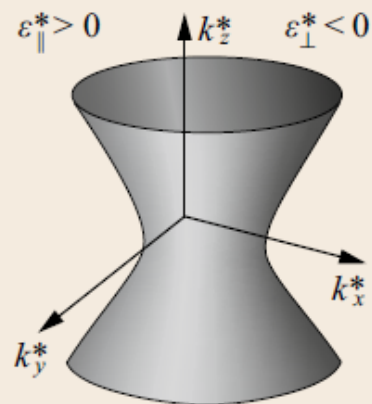
b) Hyperbolic type II



c)



d)



Równania dyspersyjne

$$\frac{k_z^{*2}}{\varepsilon_{\perp}^*} - \frac{k_x^{*2} + k_y^{*2}}{|\varepsilon_{\parallel}^*|} = \frac{\omega^2}{c^2} \quad (\varepsilon_{\parallel}^* < 0, \varepsilon_{\perp}^* > 0)$$

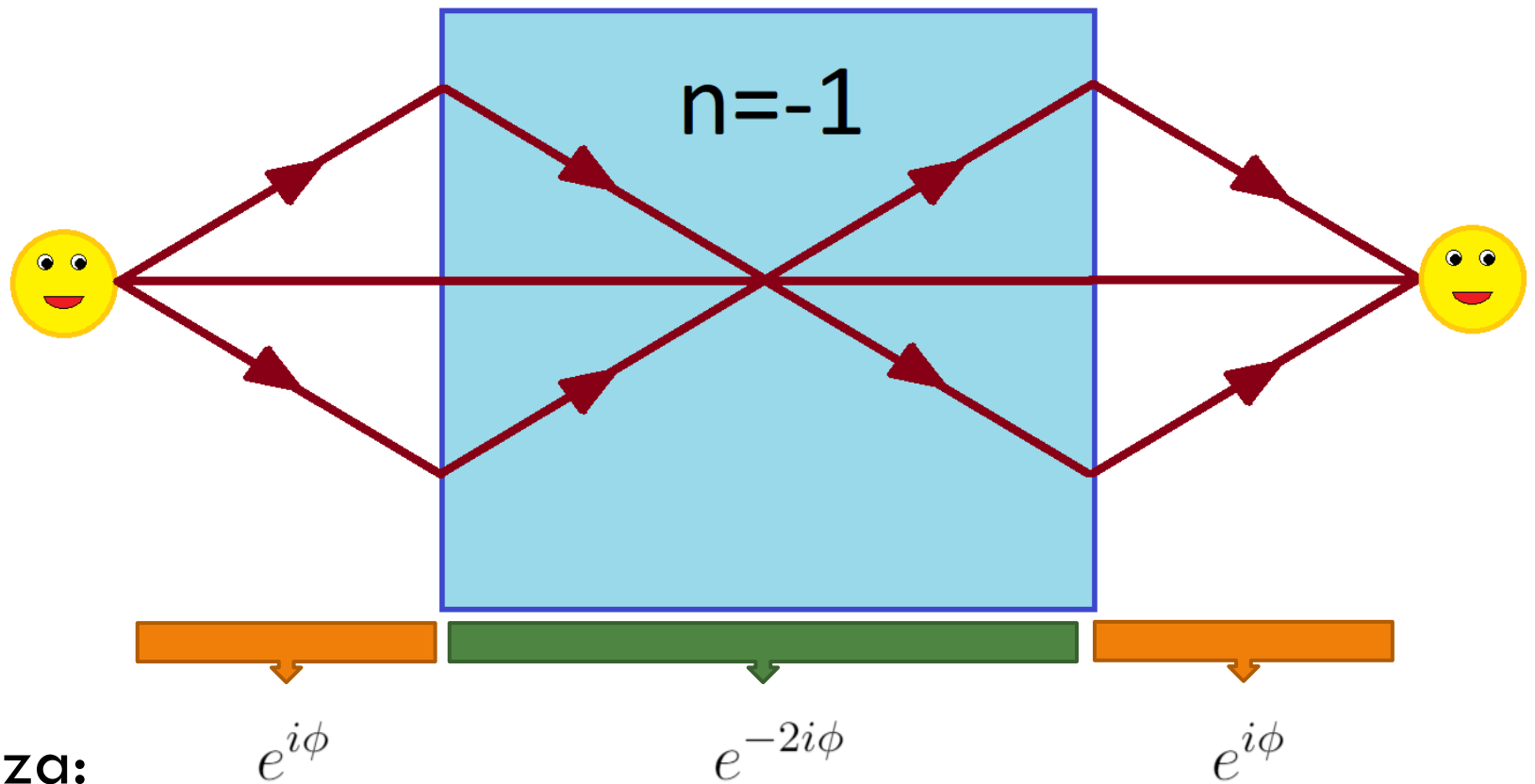
$$\frac{k_x^{*2} + k_y^{*2}}{\varepsilon_{\parallel}^*} - \frac{k_z^{*2}}{|\varepsilon_{\perp}^*|} = \frac{\omega^2}{c^2} \quad (\varepsilon_{\parallel}^* > 0, \varepsilon_{\perp}^* < 0)$$

Źródło: [1]

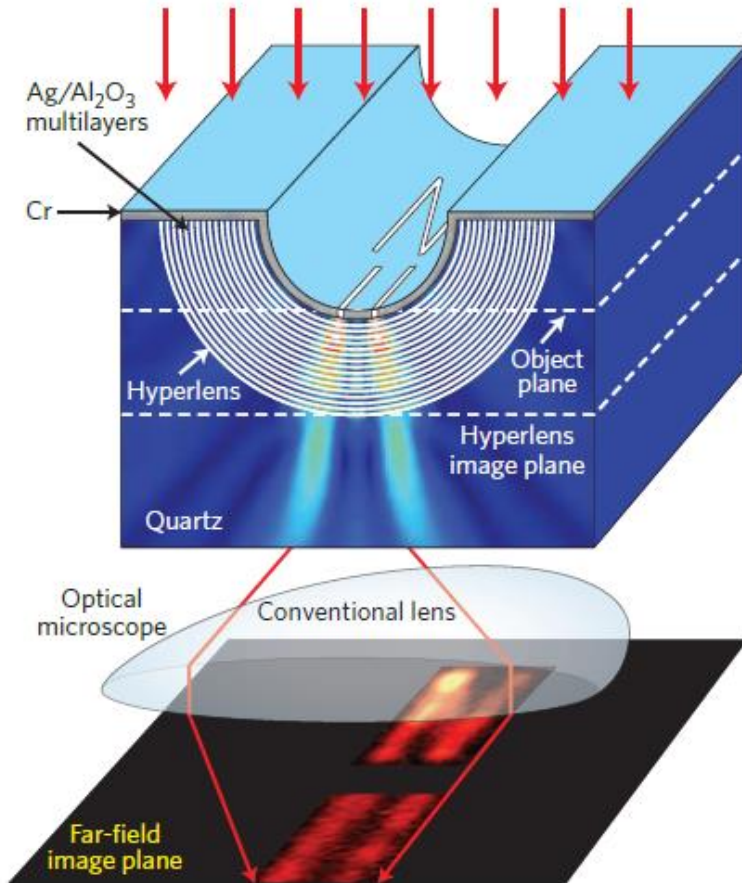


Zastosowania

Idealna soczewka



Hipersoczewka



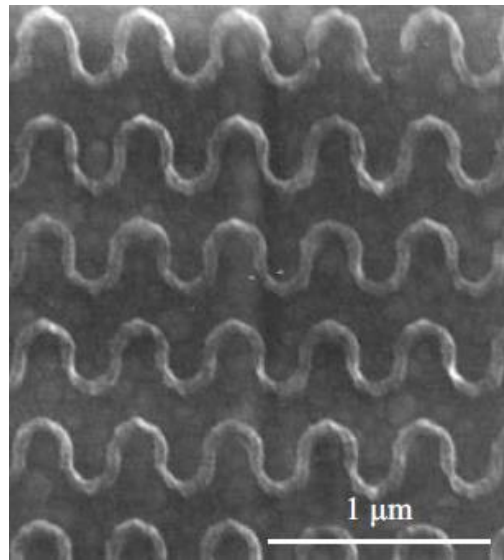
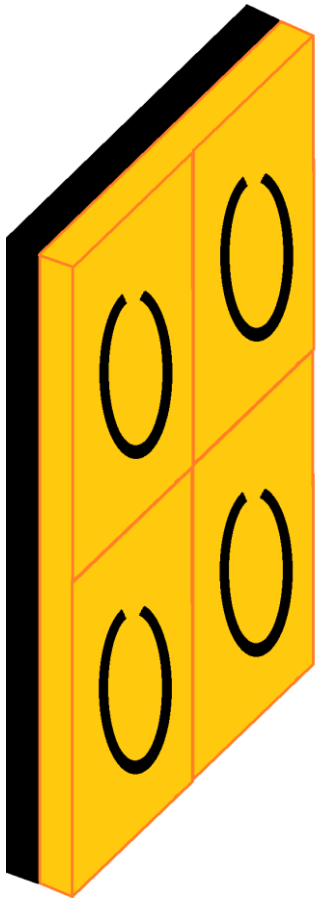
Zachowanie momentu pędu

$$k_{\varphi}^* r = \text{const}$$

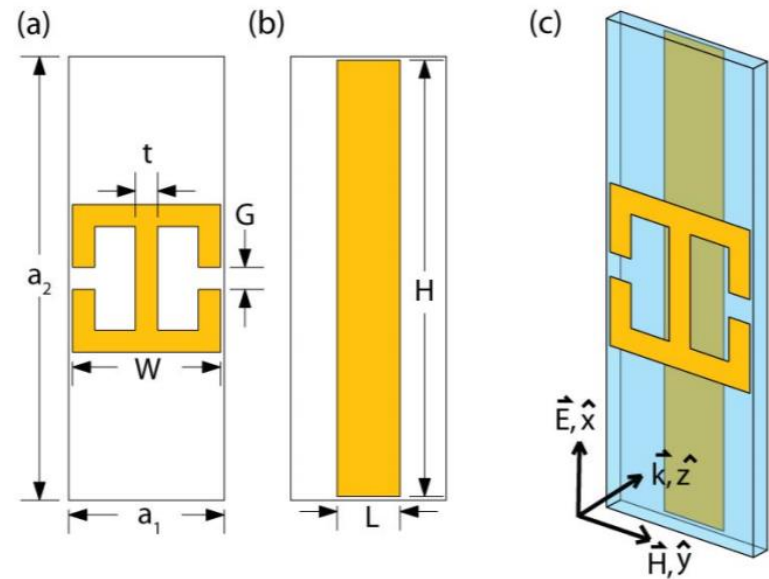
$$k_r = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k_{\varphi}^2}$$

Idealny absorber

Magnetyczne lustro



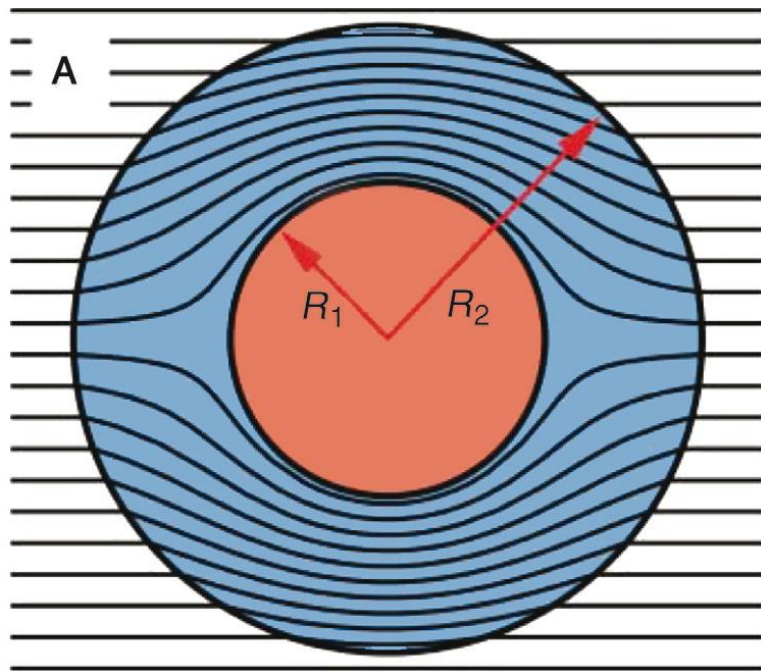
Metamolekuła idealnego absorbera



Źródło: [6]

Maskowanie

Proste urządzenie maskujące



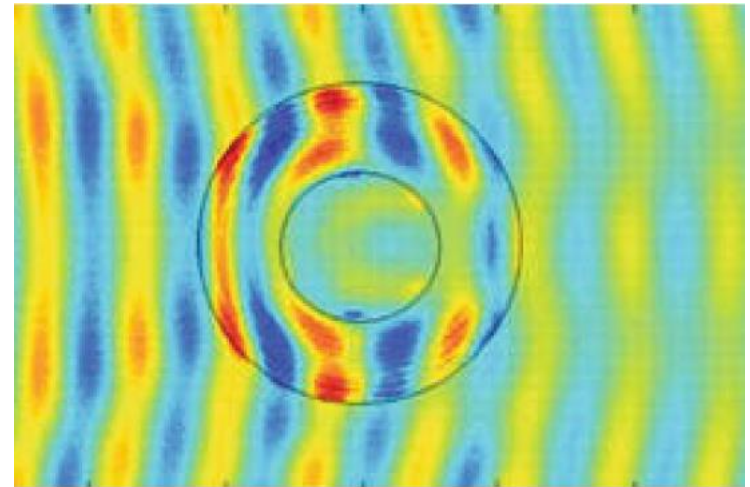
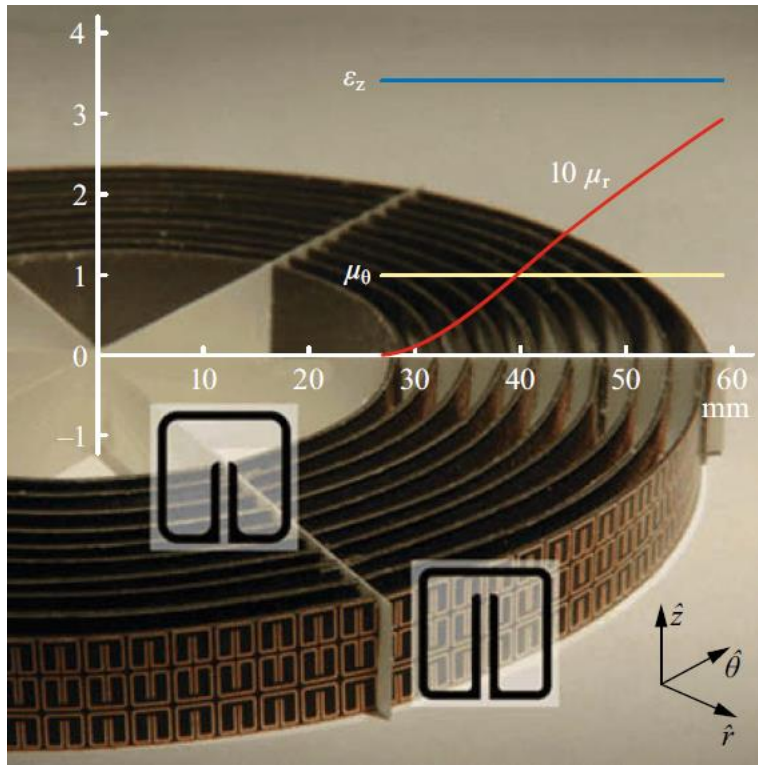
Warunki na przenikalność elektryczną i magnetyczną

$$\varepsilon'_{r'} = \mu'_{r'} = \frac{R_2}{R_2 - R_1} \frac{(r' - R_1)^2}{r'}$$
$$\varepsilon'_{\theta'} = \mu'_{\theta'} = \frac{R_2}{R_2 - R_1}$$
$$\varepsilon'_{\varphi'} = \mu'_{\varphi'} = \frac{R_2}{R_2 - R_1}$$

Źródło: [3]

Maskowanie

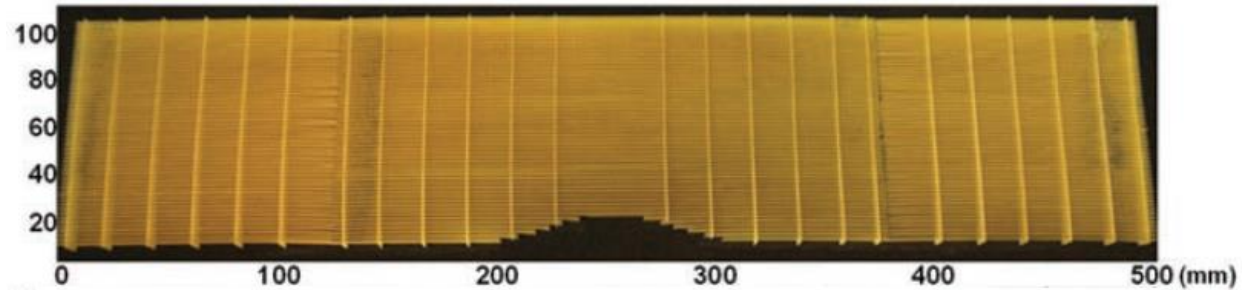
Pierwsze urządzenie maskujące



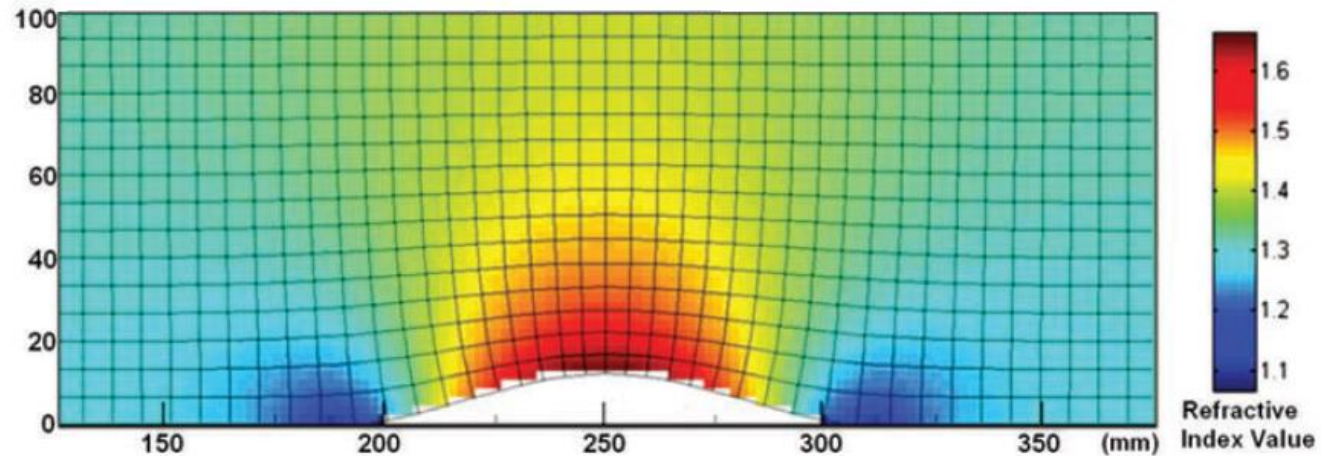
Źródło: [7]

Maskowanie

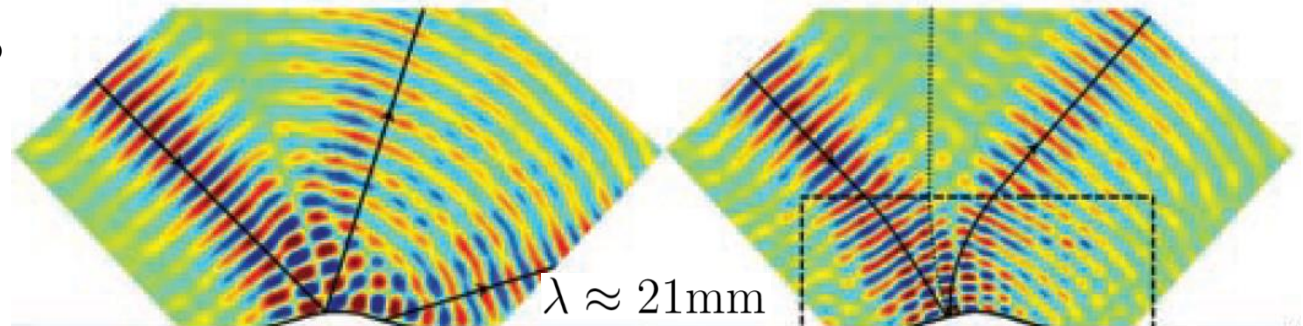
Metamateriał



Współczynnik załamania metamateriału



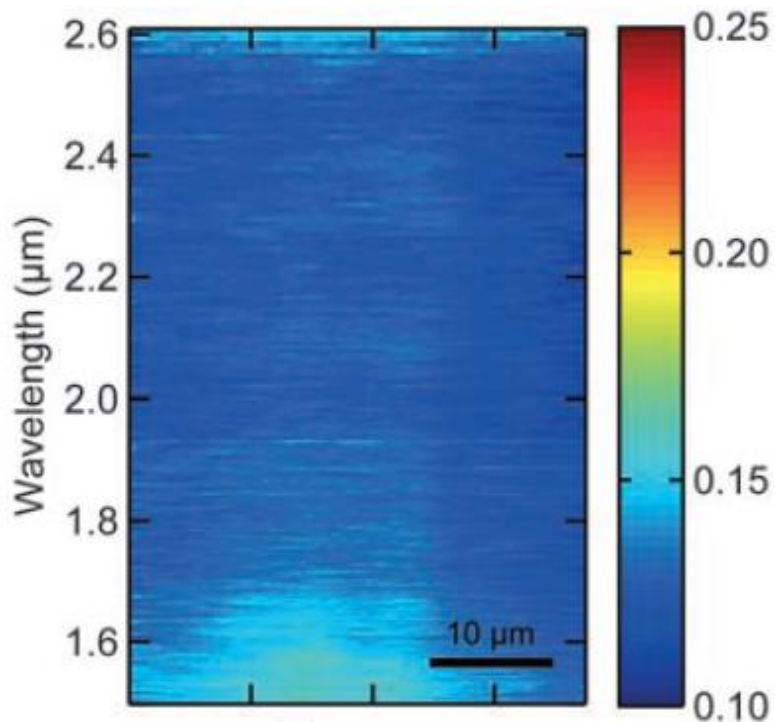
Pomiar pola elektrycznego bez maskowania oraz z maskowaniem



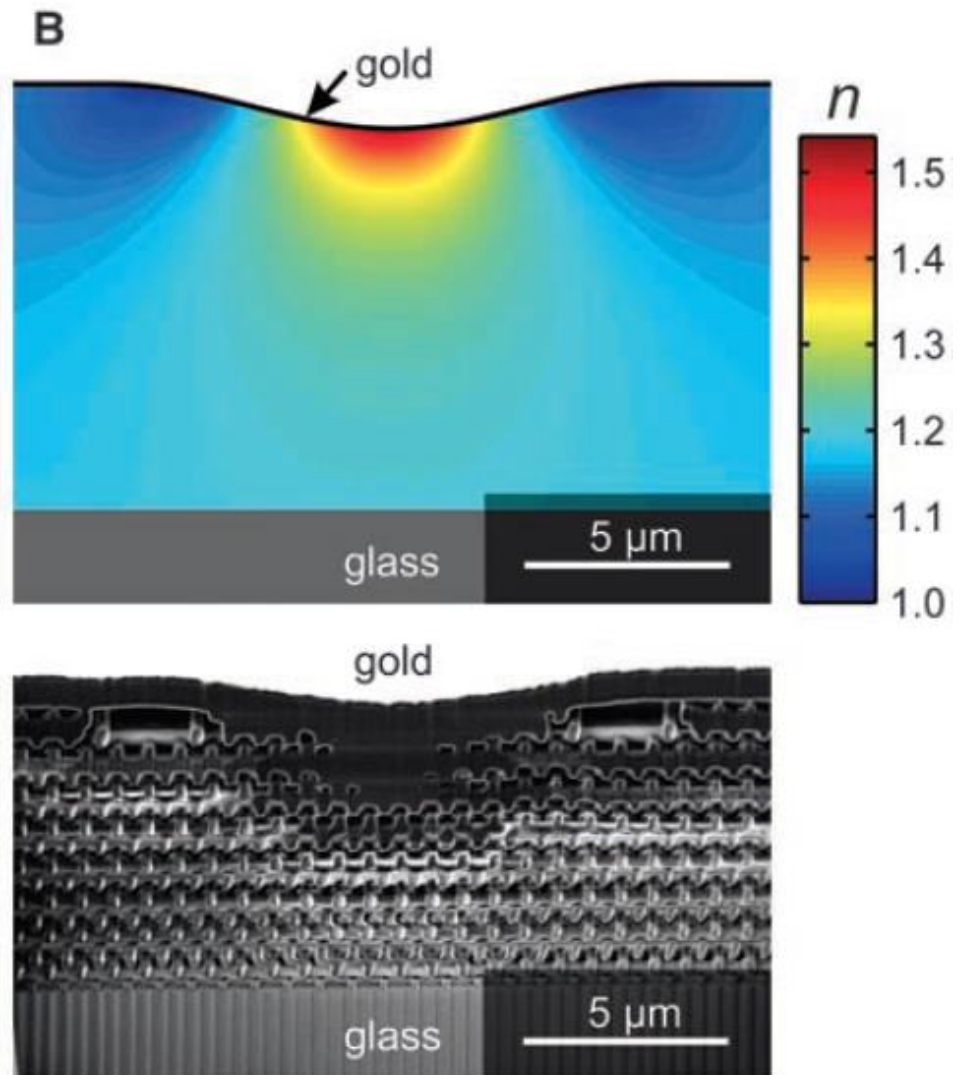
Źródło: [15]

Maskowanie

Maskowanie dla
bliskiej podczerwieni



Źródło: [16]



Podsumowanie

- Metamateriały to sztucznie wytworzone materiały o właściwościach niespotykanych w naturze
- Istnieje wiele typów metamateriałów: magnetyczne, o ujemnym współczynniku załamania, powierzchni selektywne, chiralne, hiperboliczne...
- Przy pomocy metamateriałów można stworzyć idealną soczewkę, materiał o współczynniku absorpcji bliskim 1, urządzenie maskujące i wiele innych

Bibliografia

- [1] S. Kasap and P. Capper: Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials (2017)
- [2] Chen, J., Wang, Y., Jia, B. et al. Observation of the inverse Doppler effect in negative-index materials at optical frequencies. *Nature Photon* 5, 239–242 (2011)
- [3] P. Alitalo, S. Tretyakov: Electromagnetic cloaking with metamaterials, *Materials Today*, Volume 12, Issue 3, (2009)
- [4] Cheng-Chung Lee: The Current Trends of Optics and Photonics (2014)
- [5] R. Fitzgerald: *Physics Today* 53, 5, 17 (2000)
- [6] A.S. Schwanecke, V.A. Fedotov, V.V. Khardikov, S.L. Prosvirnin, Y. Chen, N.I. Zheludev: *J. Opt. A* 9, L1 (2007)
- [7] D. Schurig, J.J. Mock, B.J. Justice, S.A. Cummer, J.B. Pendry, A.F. Starr, D.R. Smith: *Science* 314, 977 (2006)
- [8] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, W. J. Padilla: A Perfect Metamaterial Absorber (2008)
- [9] Yen T-J, Padilla W J, Fang N, Vier D C, Smith D R, Pendry J B, Basov D N and Zhang X: Terahertz magnetic response from artificial materials, *Science*, (2004)
- [10] <http://www.metamaterial.com/metamaterials>
- [11] Linden, S. et al. Magnetic response of metamaterials at 100 terahertz. *Science* 306, 1351–1353 (2004).
- [12] A.N. Grigorenko, A.K. Geim, H.F. Gleeson, Y. Zhang, A.A. Firsov, I.Y. Khrushchev, J. Petrovic: *Nature* 438, 17 (2005)
- [13] Dolling, G. et al. Low-loss negative-index metamaterial at telecommunication wavelengths. *Opt. Lett.* 31, 1800–1802 (2006).
- [14] S. Zhang, Y.-S. Park, J. Li, X. Lu, W. Zhang, X. Zhang: *Phys. Rev. Lett.* 102, 023901 (2009)
- [15] R. Liu, C. Ji, J.J. Mock, J.Y. Chin, T.J. Cui, D.R. Smith: *Science* 323, 366 (2009)
- [16] T. Ergin, N. Stenger, P. Brenner, J.B. Pendry, M. Wegener: *Science* 328, 337 (2010)
- [17] Liu, Z., Lee, H., Xiong, Y., Sun, C. & Zhang, X. Far-field optical hyperlens magnifying sub-diffraction-limited objects. *Science* 315, 1686 (2007).