

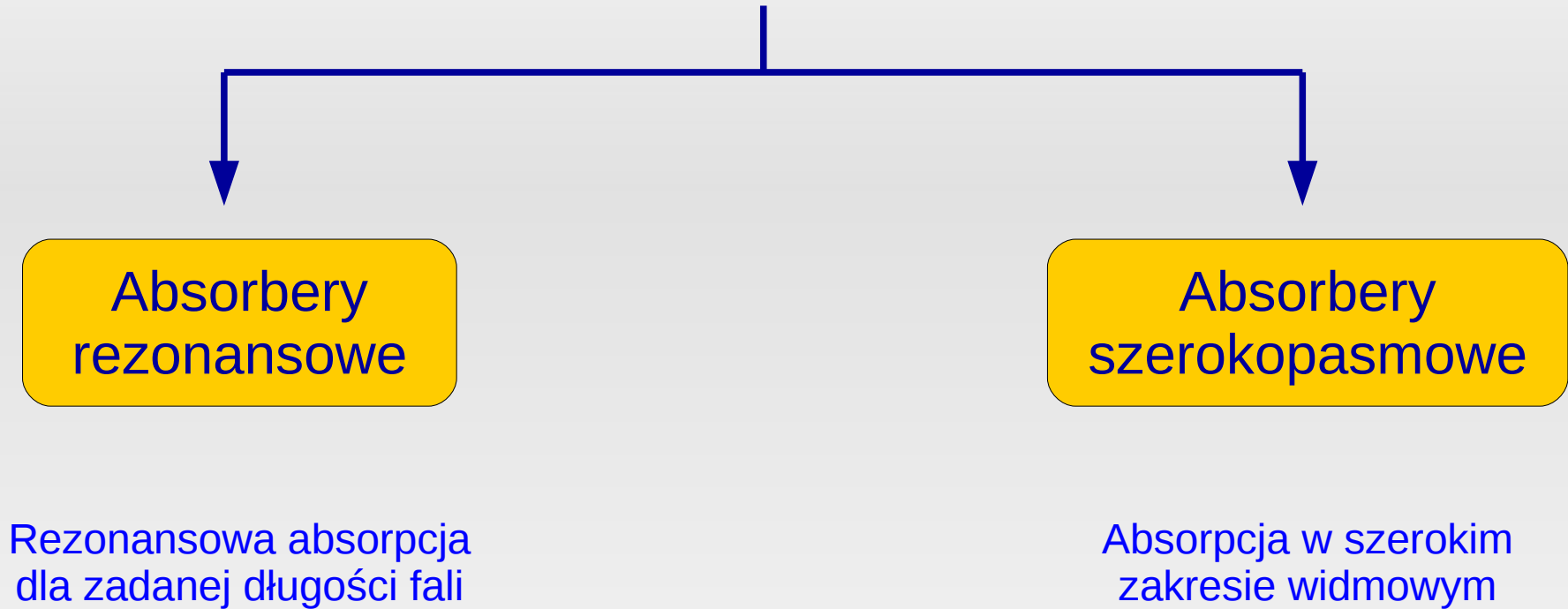


Warstwowe absorbery elektromagnetyczne

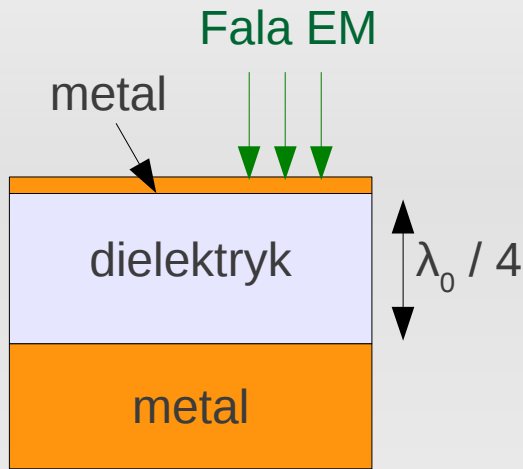
dr Anna Pastuszczak

Zakład Optyki Informacyjnej
Wydział Fizyki UW

Absorbery elektromagnetyczne

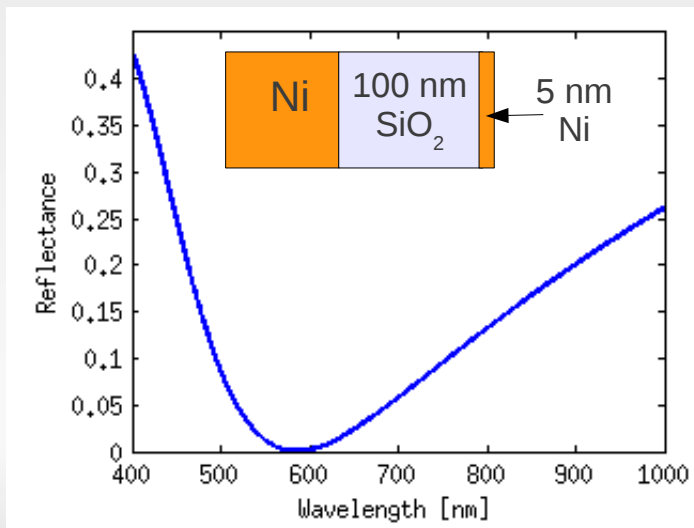


Absorbory rezonansowe interferencyjne

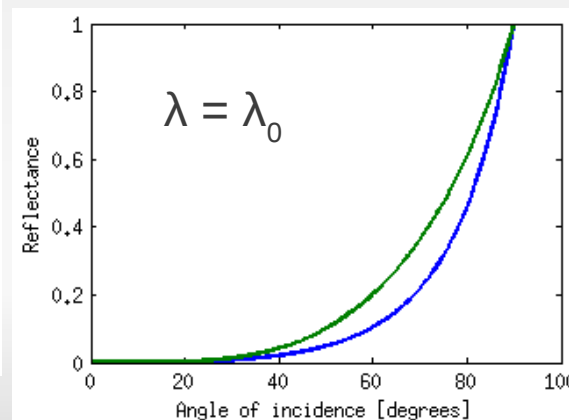


Absorber Salisbury'ego

- Rezonansowa absorpcja dla $\lambda = \lambda_0$
- Wykorzystuje zjawisko destruktywnej interferencji

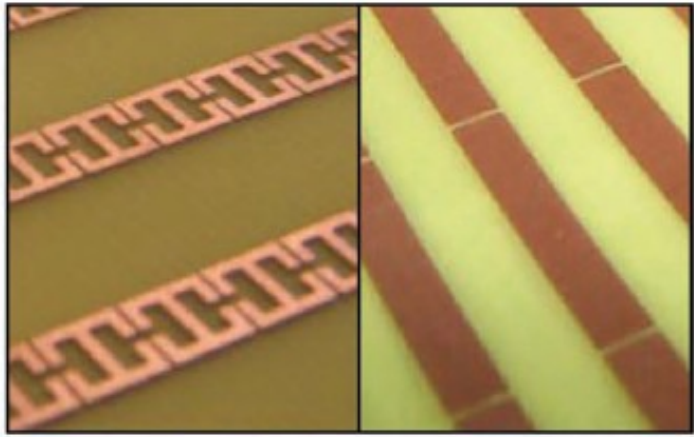


Poszerzenie pasma absorpcji jest możliwe przez zwiększenie liczby warstw



Absorber stanie się gruby

Absorbory rezonansowe z metamateriału

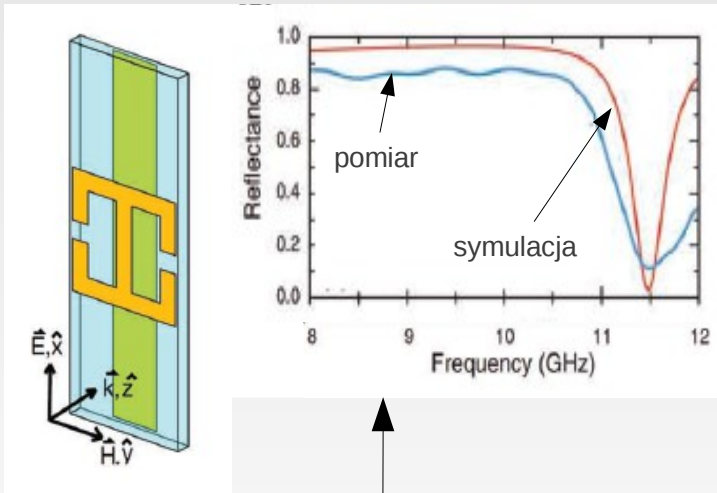
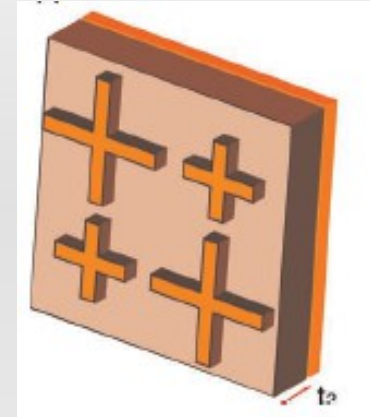


Rezonansowe dopasowanie impedancji

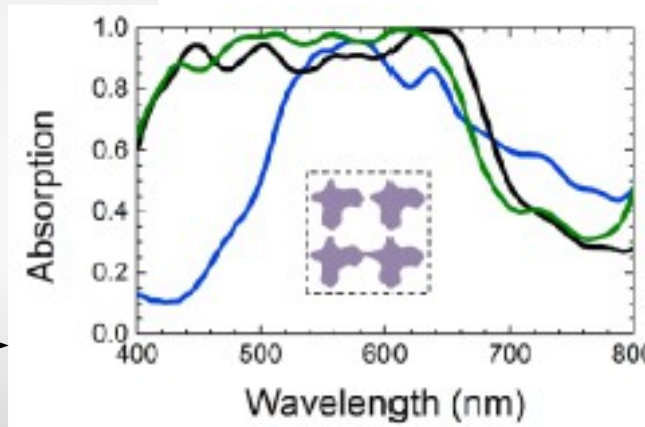
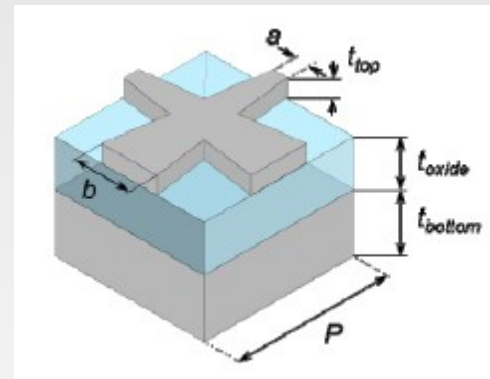
$$Z(\omega \rightarrow \omega_0) = \sqrt{\tilde{\mu}(\omega) / \tilde{\epsilon}(\omega)} \rightarrow 1$$



Brak odbić

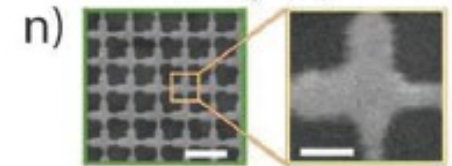
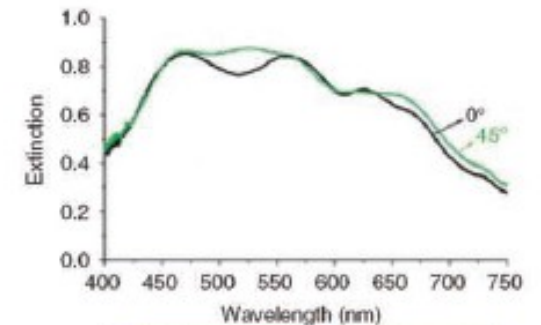


N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, W. J. Padilla, *Phys. Rev. Lett.* **2008**, *100*, 207402



S. Butun, K. Aydin, *Optics Express* **22**, 194557, **2014**.

X. Liu, T. Tyler, T. Starr, A. Starr, N. M. Jokerst, W. J. Padilla, *Phys. Rev. Lett.* **2011**, *107*, 045901.

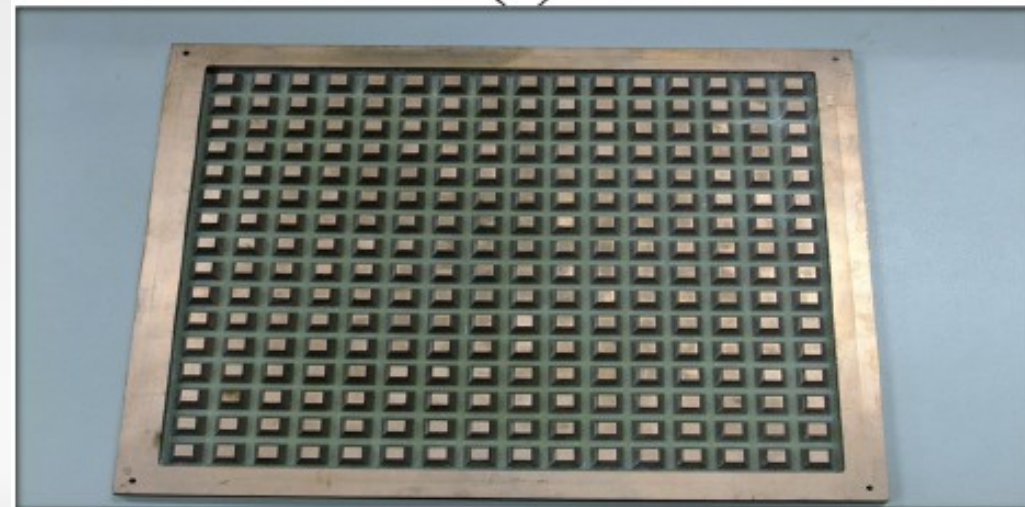
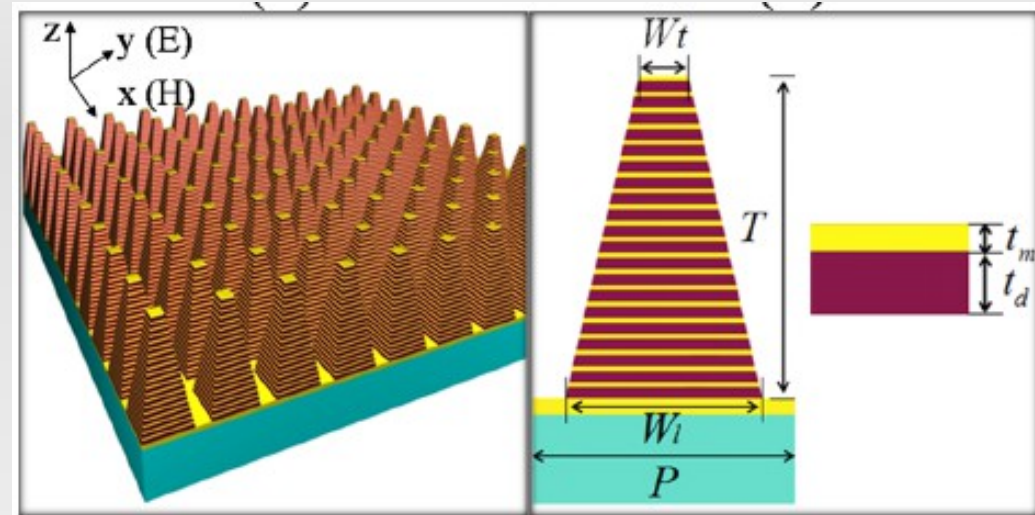
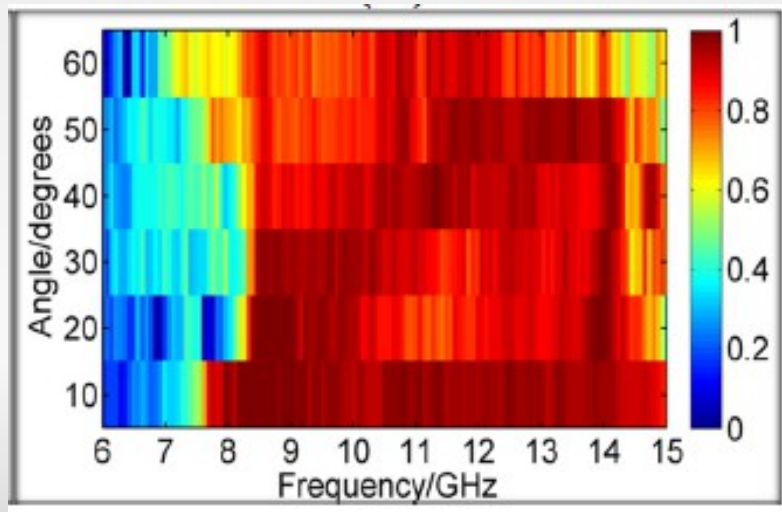
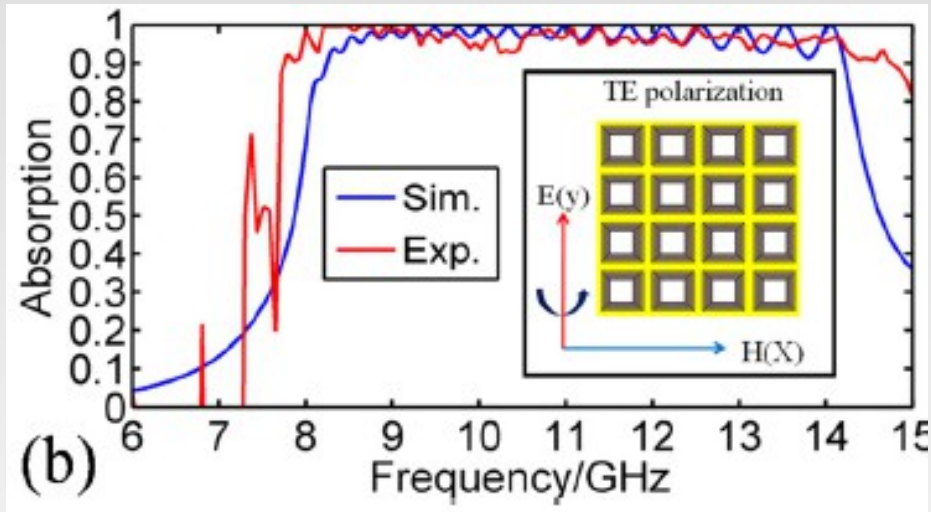


K. Aydin, V. E. Ferry, R. M. Briggs, H. A. Atwater, *Nat. Comm.* **2011**, *2*, 517.

Absorbery szerokopasmowe

Powolne przejście pomiędzy przestrzenią swobodną a ośrodkiem stratnym

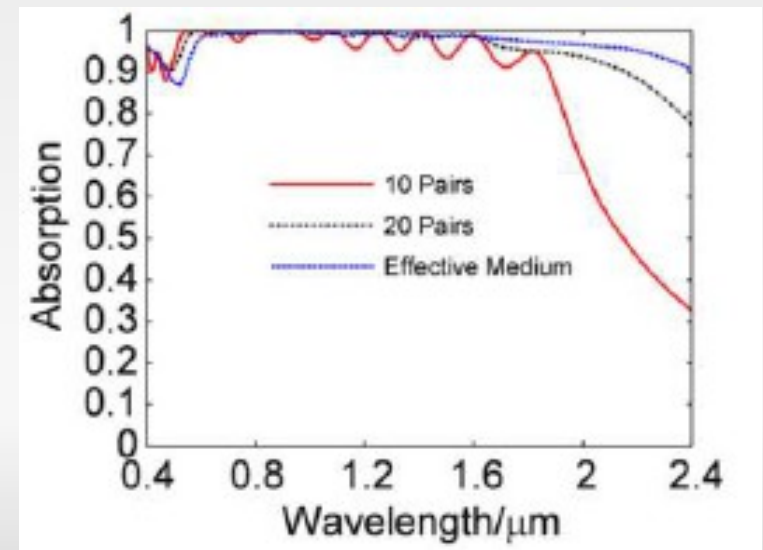
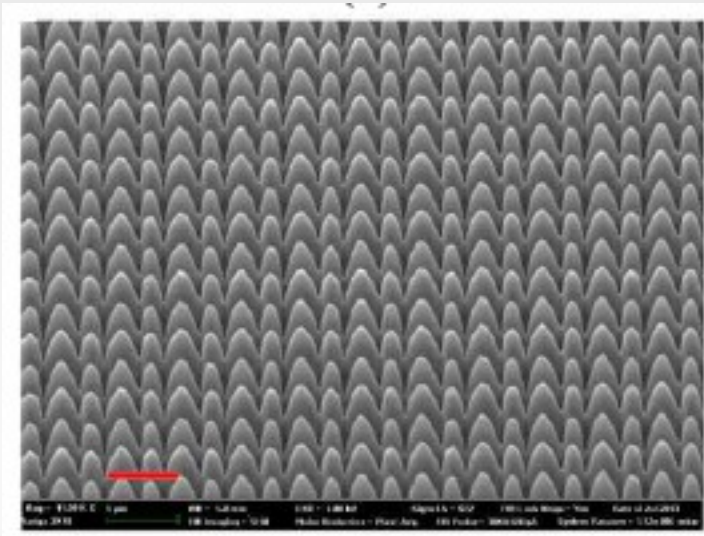
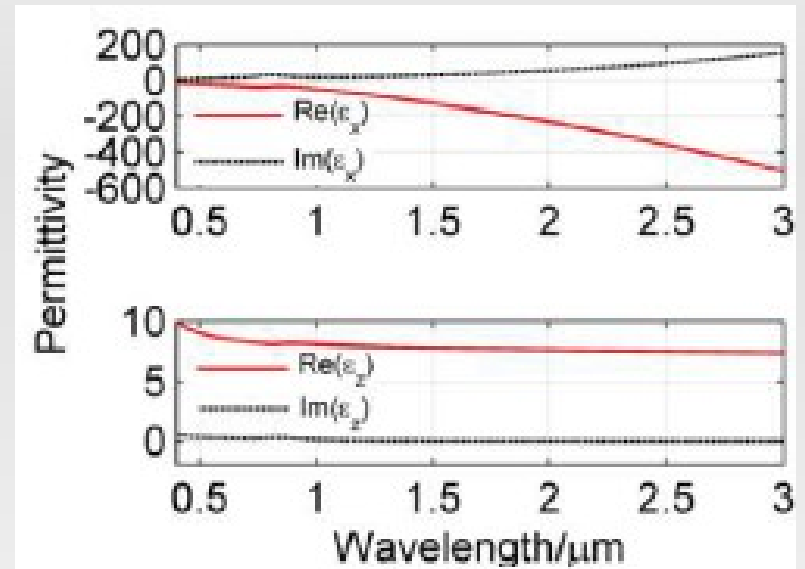
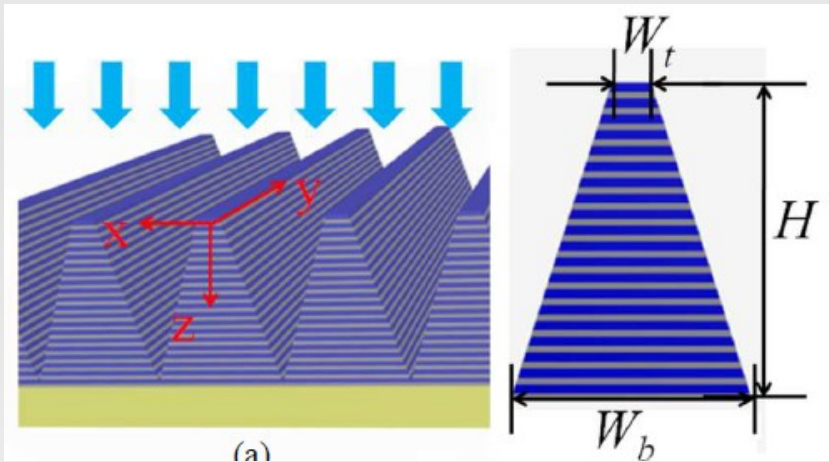
Absorber mikrofalowy



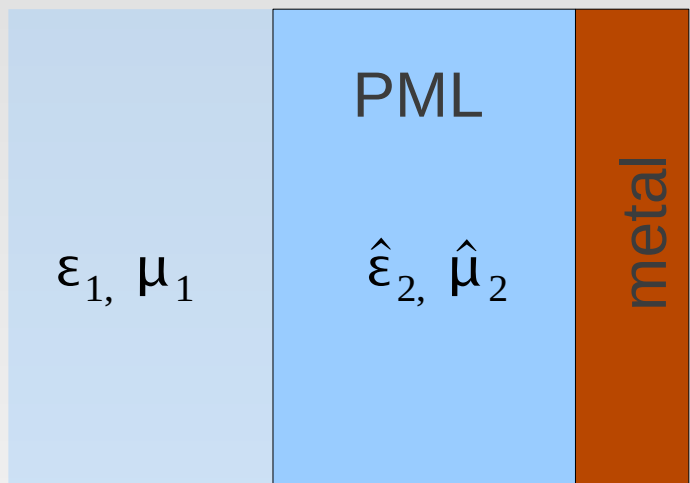
F. Ding, Y. Cui, X. Ge, Y. Jin, S. He, "Ultra-broadband microwave metamaterial absorber," Appl. Phys. Lett. 100, 103506, 2012

Absorbery szerokopasmowe

Absorber podczerwieni z warstwowego metamateriału hiperbolicznego (Ag / SiO₂)



Doskonale dopasowana warstwa (UPML)



$$\hat{\epsilon}_2 = \begin{bmatrix} s\epsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & s\epsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & s^{-1}\epsilon_1 \end{bmatrix}$$

$$\hat{\mu}_2 = \begin{bmatrix} s\mu_1 & 0 & 0 \\ 0 & s\mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & s^{-1}\mu_1 \end{bmatrix}$$

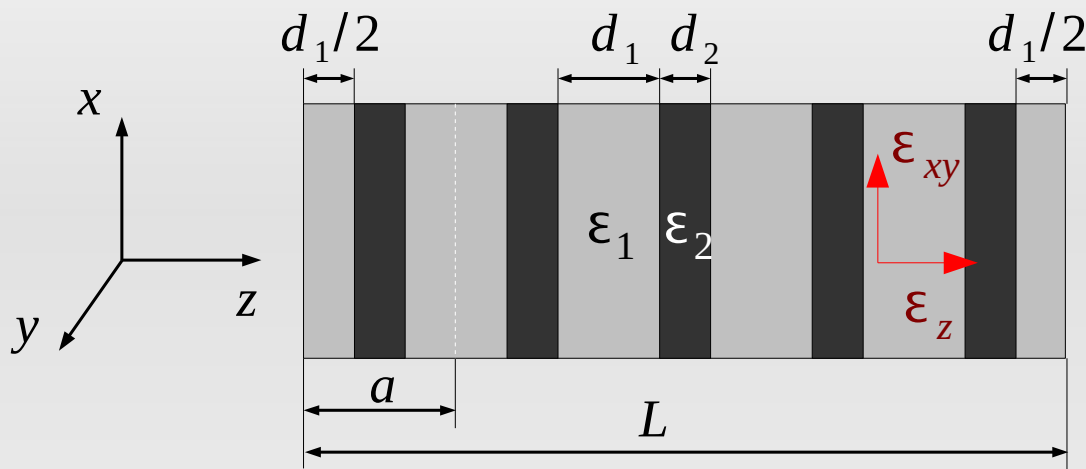
Współczynnik odbicia:

$$R(k_x/k_0) \equiv 0$$

$$s = 1 + \alpha i$$

Niezależnie od kąta padania fali i polaryzacji

Model ośrodka efektywnego



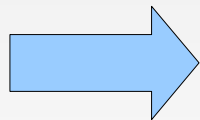
$$\epsilon_{x,y} = \frac{\epsilon_1 d_1 + \epsilon_2 d_2}{d_1 + d_2}$$

$$\epsilon_z = \frac{d_1 + d_2}{\epsilon_1^{-1} d_1 + \epsilon_2^{-1} d_2}$$

$$d_1, d_2 \ll \lambda$$

Ekstremalna efektywna anizotropia:

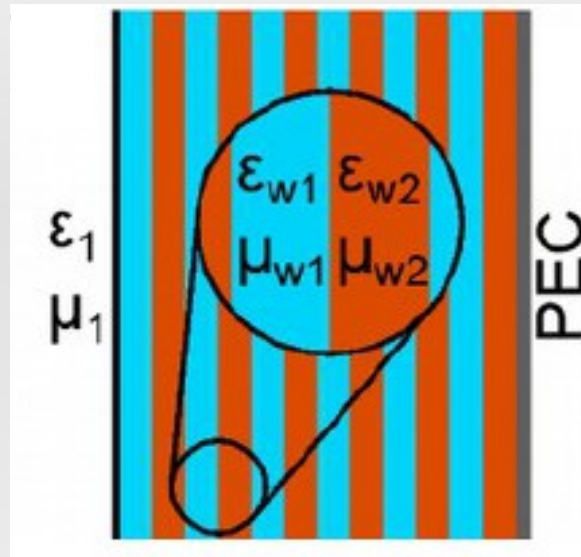
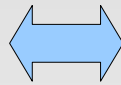
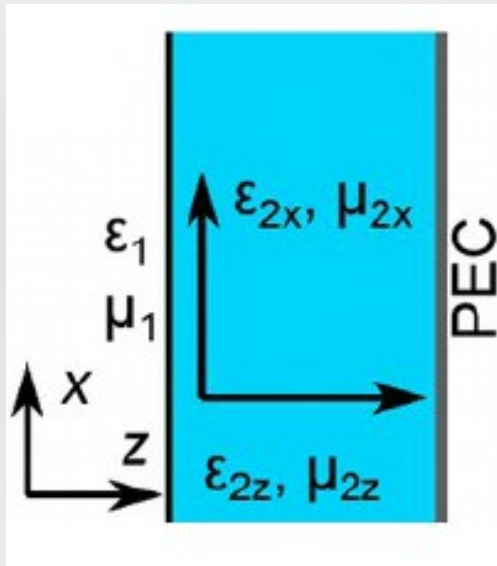
$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_1 + \epsilon_2 = 1 \\ \frac{d_1}{d_2} = -\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_{x,y} = 1 \\ \epsilon_z \rightarrow \infty \end{array} \right.$$

$$k_z(k_x) = \sqrt{\epsilon_{eff_x} \frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\epsilon_{eff_x}}{\epsilon_{eff_z}} k_x^2} \rightarrow const$$

Absorbery elektromagnetyczne zainspirowane UPML



Pastuszczak, A., Stolarek, M.,
Antosiewicz, T. J., Kotyński, R.,
Optical and Quantum Electronics
47(1), 89-97 (2015).

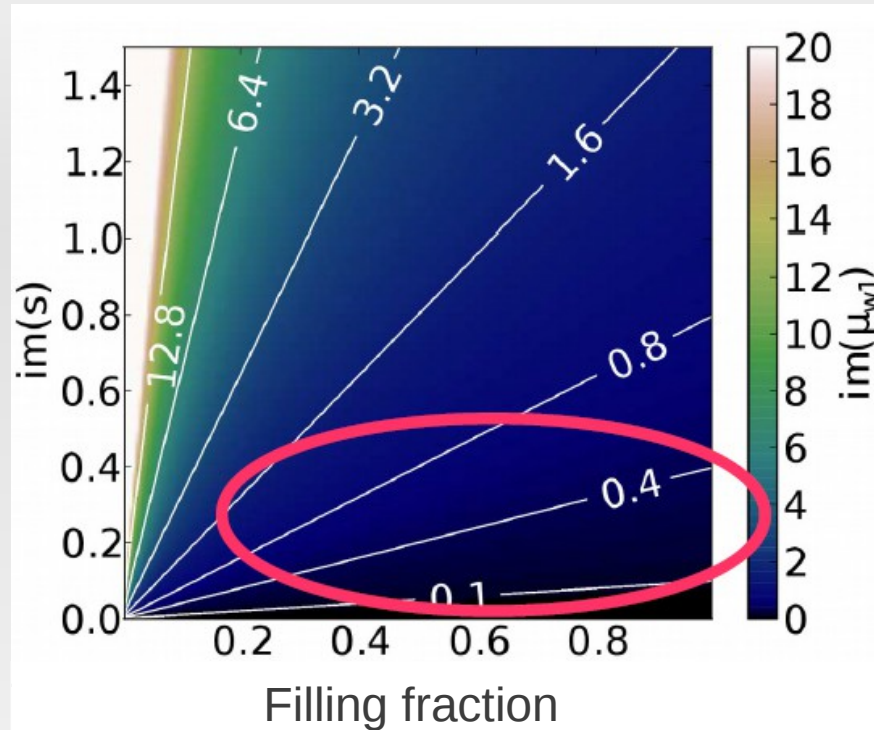
Przenikalności elektryczne i magnetyczne warstw:

$$\epsilon_{w1} = \rho \cdot \frac{\epsilon_1 \cdot s}{f \cdot \rho + (1 - f)}, \quad \epsilon_{w2} = \frac{\epsilon_1 \cdot s}{f \cdot \rho + (1 - f)},$$

where:

$$\rho = 1 + \frac{s^2 - 1 \pm \sqrt{(s^2 - 1)(s^2 - (2f - 1)^2)}}{2f(1 - f)}.$$

Absorbery elektromagnetyczne zainspirowane UPML



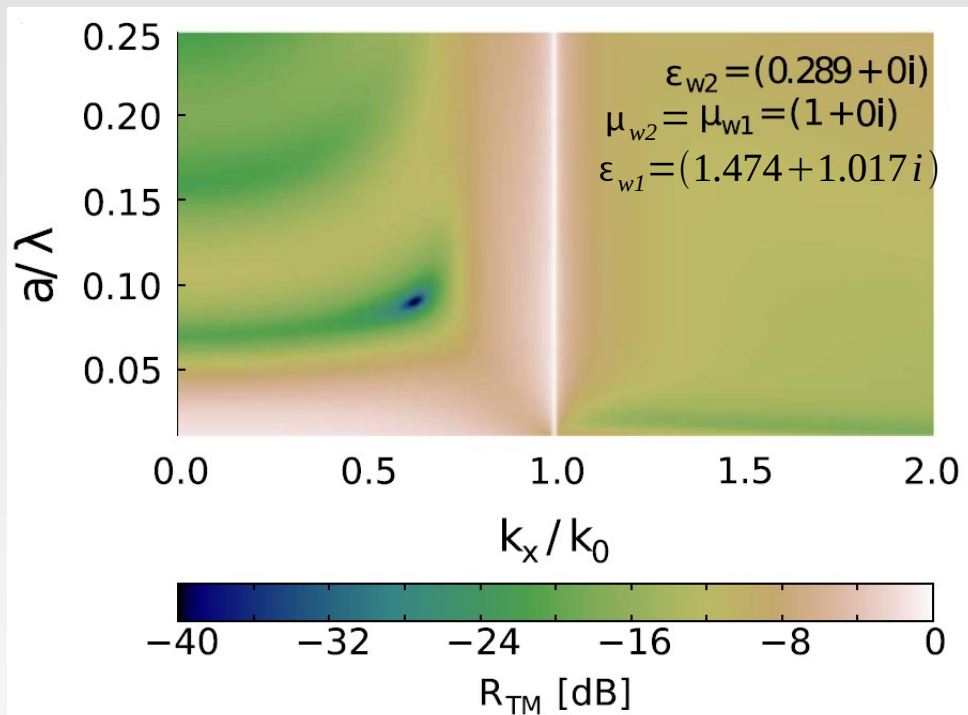
Ograniczając rozważania do jednej polaryzacji światła (TM):

- μ_{w2} może być dowolne
- możliwy jest wybór $\text{Re}(\mu_{w1}) = 1$
- straty magnetyczne mogą być zanedbywalne
- wzmacnienie elektryczne może być zanedbywalne

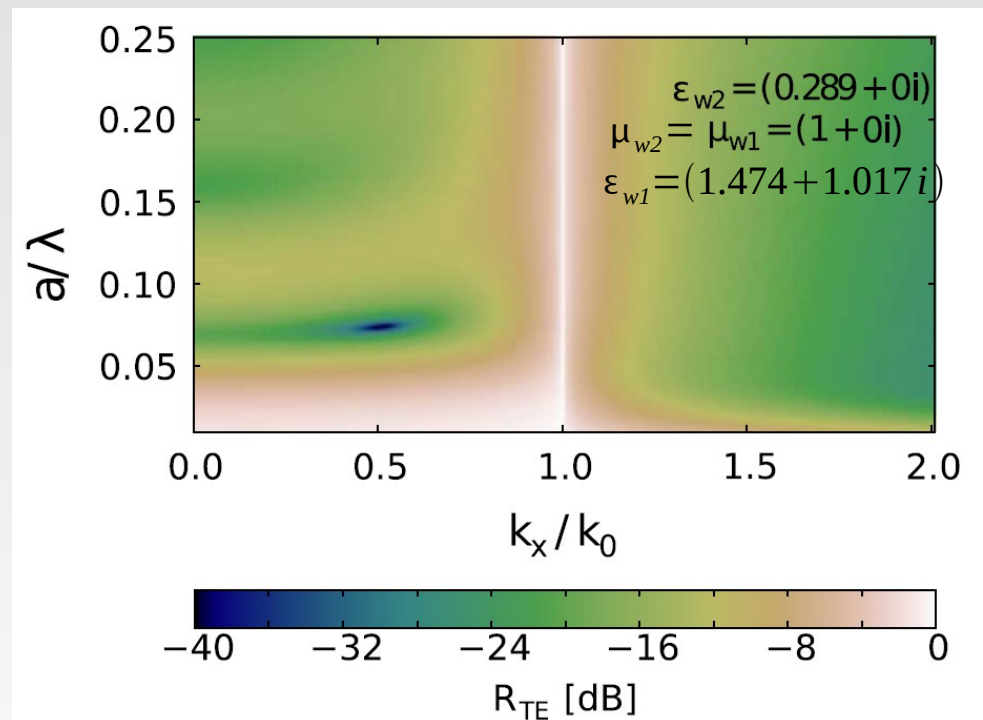
Absorbery elektromagnetyczne zainspirowane UPML

Absorber z materiałów niemagnetycznych bez wzmocnienia

Polaryzacja TM



Polaryzacja TE



- 5 komórek elementarnych o grubości a
- $s = 1 + 0.5i$

Absorbery wielowarstwowe

Napylanie próżniowe wiązką elektronów



Absorber warstwowy
dalekiej podczerwieni

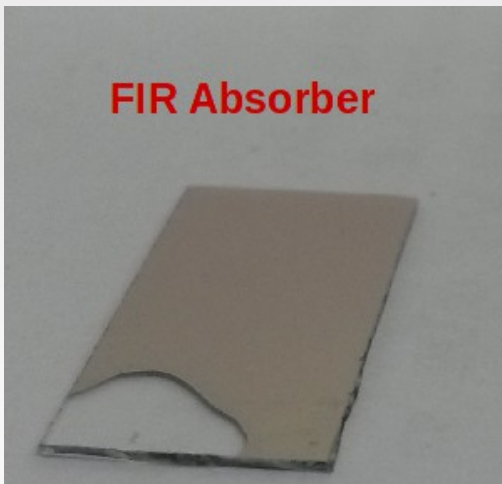
1160 nm Al_2O_3

2 nm Ti

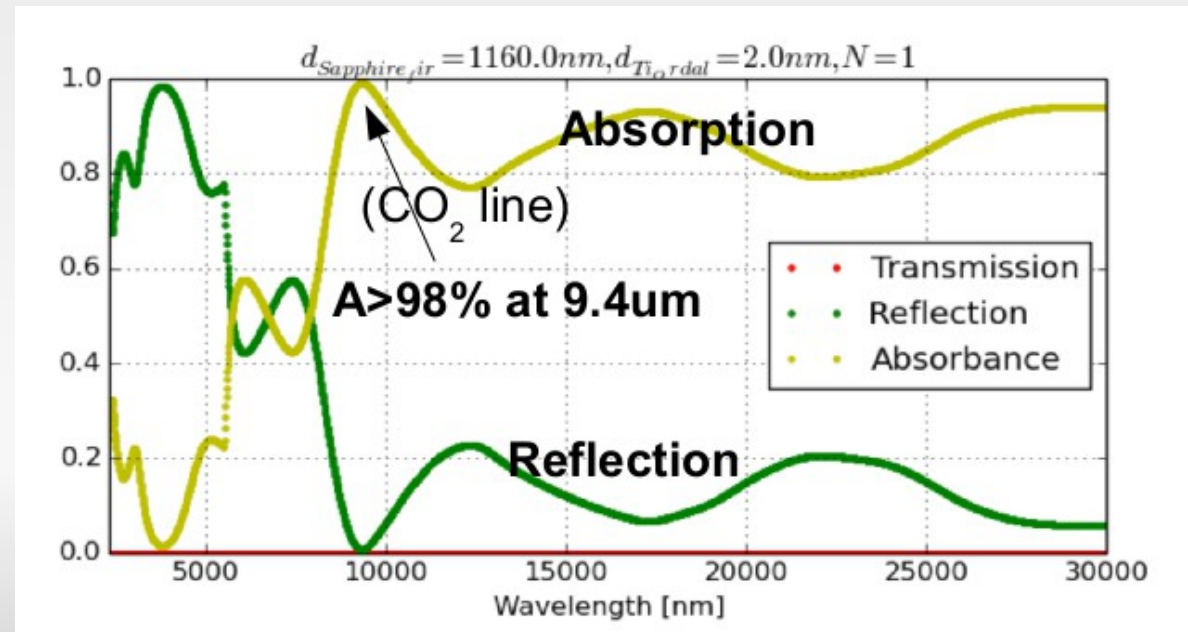
1160 nm Al_2O_3

50 nm Al

Podkład szafirowy

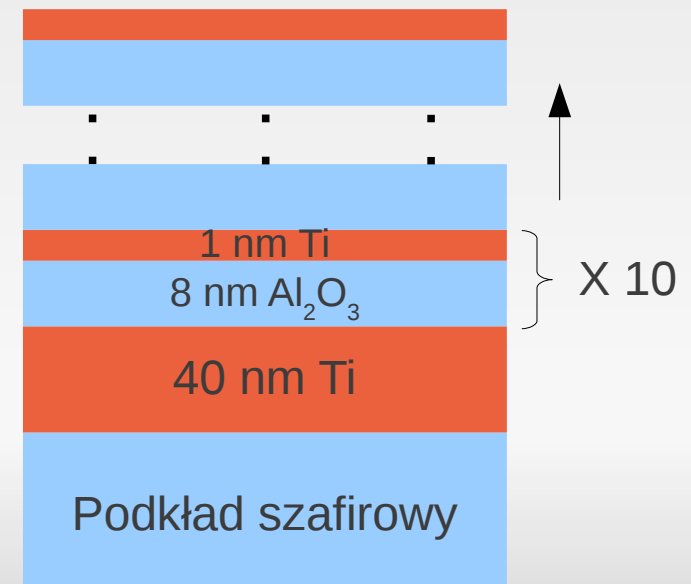
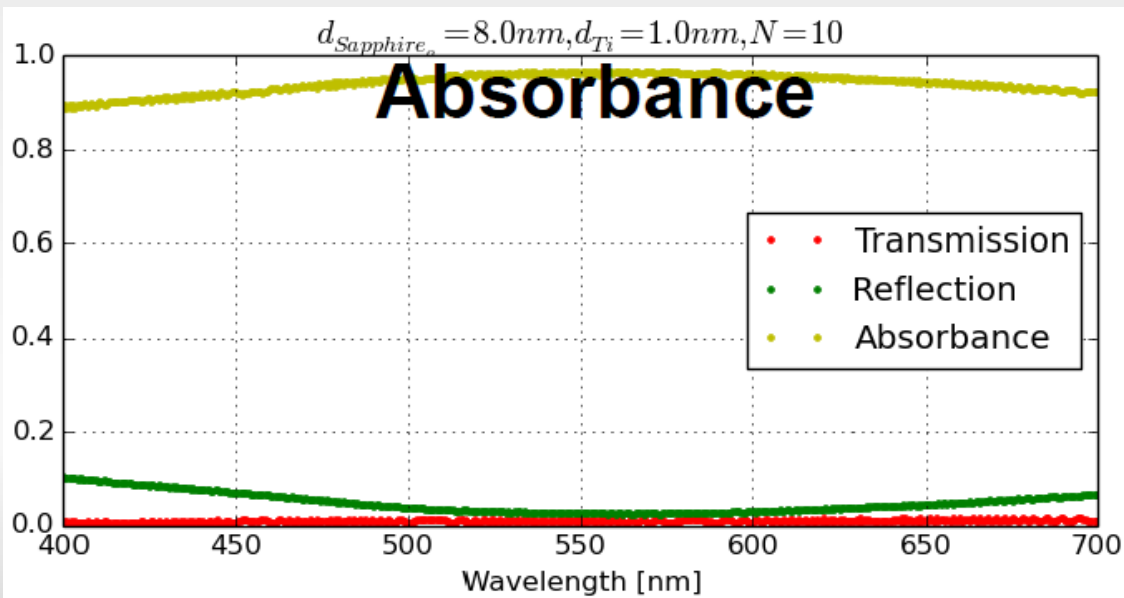
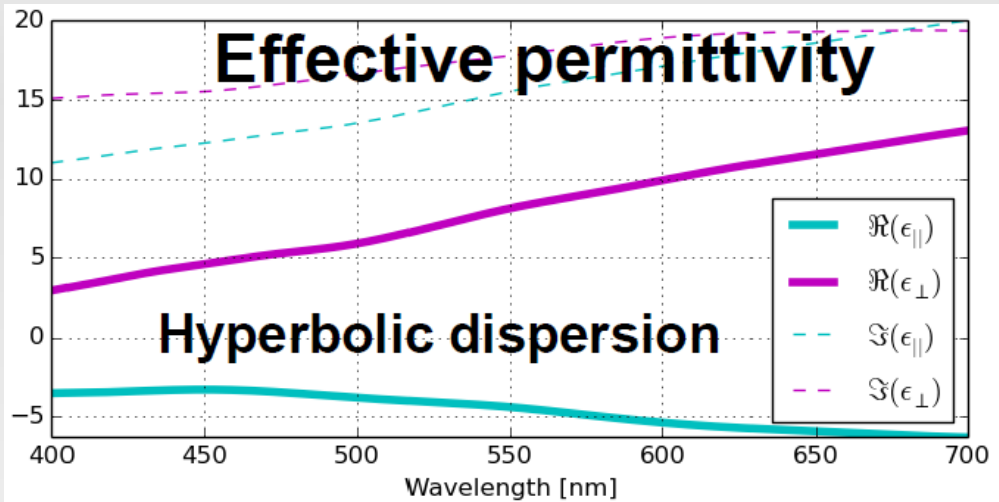


Napylanie struktur wielowarstwowych:
dr Tomasz Stefaniuk
dr Piotr Wróbel

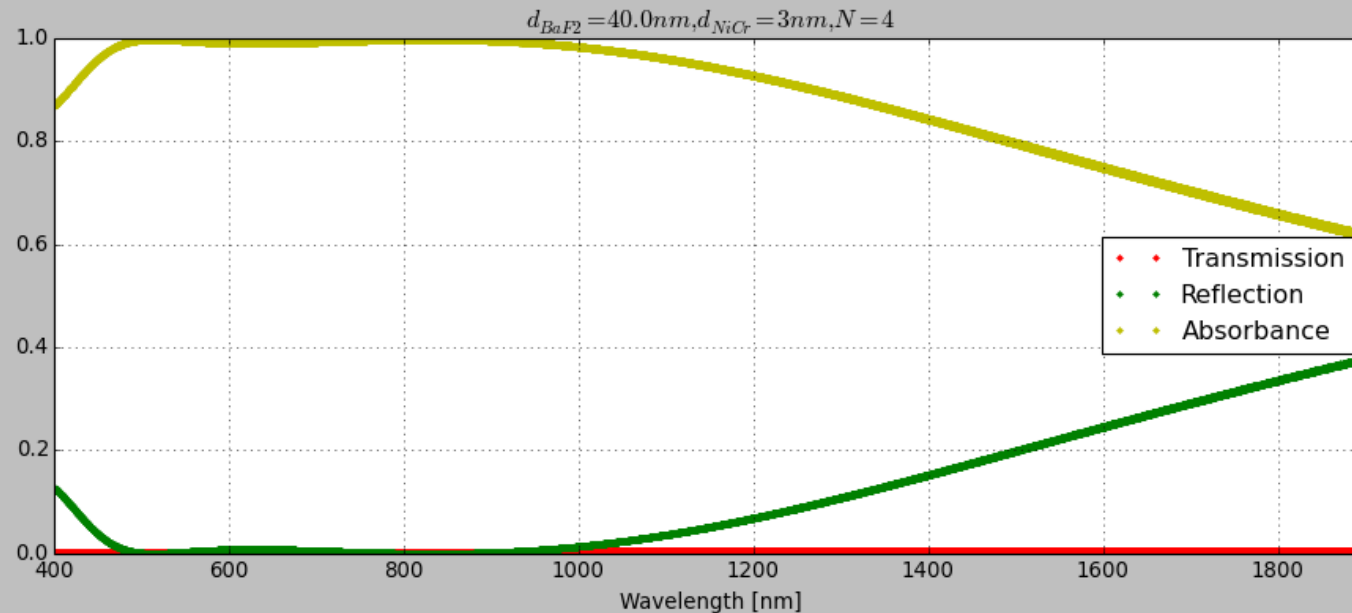


Absorbery wielowarstwowe

Absorber światła widzialnego



Absorbery wielowarstwowe

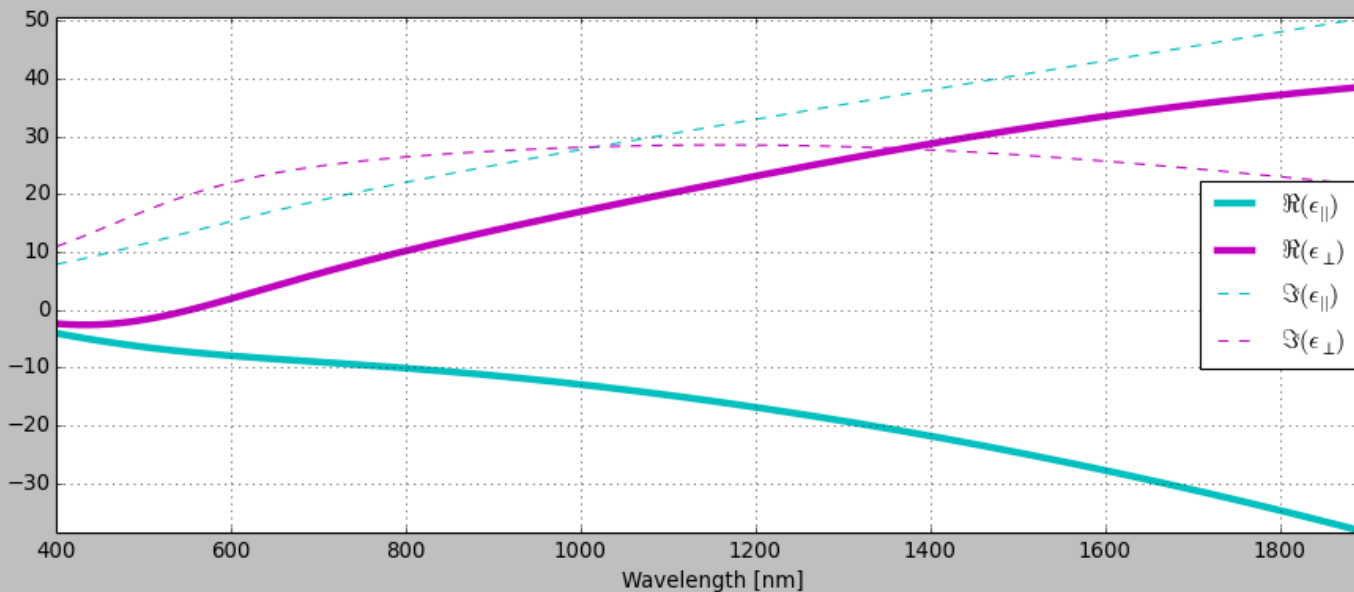


Absorber szerokopasmowy i szerokokątowy zoptymalizowany algorytmem genetycznym dla zakresu **500-1000 nm**

($\text{BaF}_2 + \text{Ni/Cr}$, grubość całkowita ok. 300 nm)

Średni współczynnik absorpcji:

96,4%



Dziękuję za uwagę