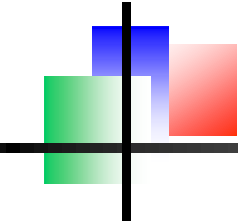


Podstawy Fizyki III

Optyka z elementami fizyki współczesnej

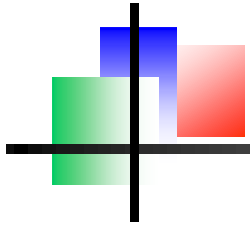
wykład 12, 10.11.2017

wykład:	Czesław Radzewicz
pokazy:	Mateusz Winkowski, Łukasz Zinkiewicz
ćwiczenia:	Radosław Łapkiewicz

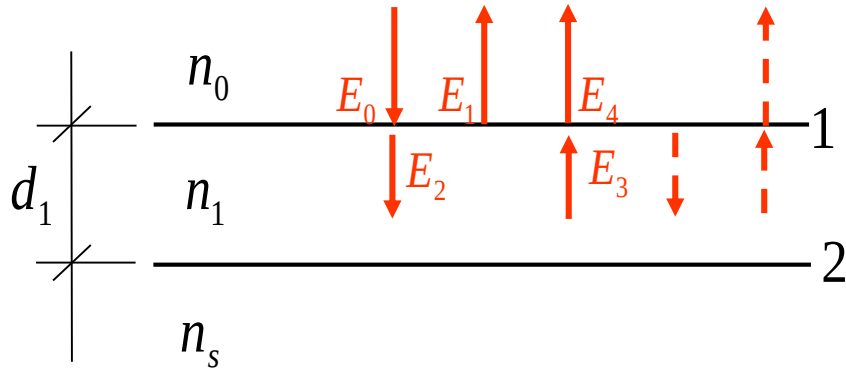


Wykład 11 - przypomnienie

- superpozycja fal EM
- interferencja 2 fal płaskich monochromatycznych
- zastosowania pola prążków
- doświadczenie Younga
- spójność przestrzenna, interferometr gwiazdowy Michelsona
- interferencja na błonach
- interferometr Michelsona, spójność czasowa
- spektrometr fourierowski
- interferencja spektralna
- interferometr Macha-Zehndera oraz Sagnaca



Powłoki dielektryczne – prosty przykład



wszystkie materiały to idealne dielektryki
znamy falę padającą szukamy fali obitej

$$\text{wykład 5: } r = \frac{E_r}{E_i} = \frac{n_i - n_t}{n_i + n_t}$$

$$t = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2n_i}{n_i + n_t}$$

zatem:

$$E_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} E_0, \quad E_2 = \frac{2n_0}{n_0 + n_1} E_0$$

$$E_3 = \frac{n_1 - n_s}{n_1 + n_s} e^{i2k_1 d_1} E_2, \quad E_4 = \frac{2n_1}{n_0 + n_1} E_3$$

przybliżenie:

$$E_r \cong E_1 + E_4 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} E_0 + \frac{4n_0 n_1}{(n_0 + n_1)^2} \frac{n_1 - n_s}{n_1 + n_s} e^{i2k_1 d_1} E_0 \cong$$

$$\cong \left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} + \frac{n_1 - n_s}{n_1 + n_s} e^{i2k_1 d_1} \right) E_0$$

$$\text{warstwa ćwierćfalowa: } k_1 d_1 = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} = \pi/2$$

daje

$$e^{i2k_1 d_1} = -1 \text{ i } r = \frac{E_r}{E_0} = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} - \frac{n_1 - n_s}{n_1 + n_s}$$

$$\text{Żądamy: } \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} - \frac{n_1 - n_s}{n_1 + n_s} = 0 \Rightarrow n_1 = \sqrt{n_0 n_s}$$

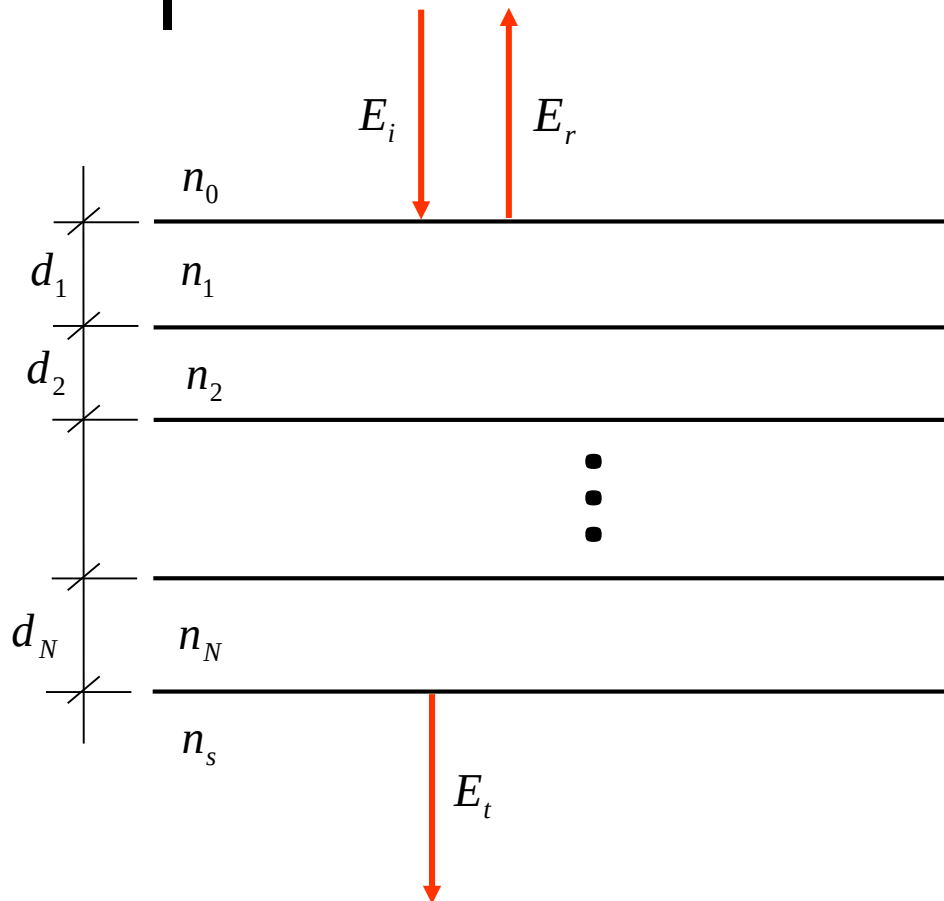
Ostatecznie: $r = 0$

$$\text{dla } d_1 = \lambda/4n_1$$

ćwierćfalowa warstwa
antyrefleksyjna

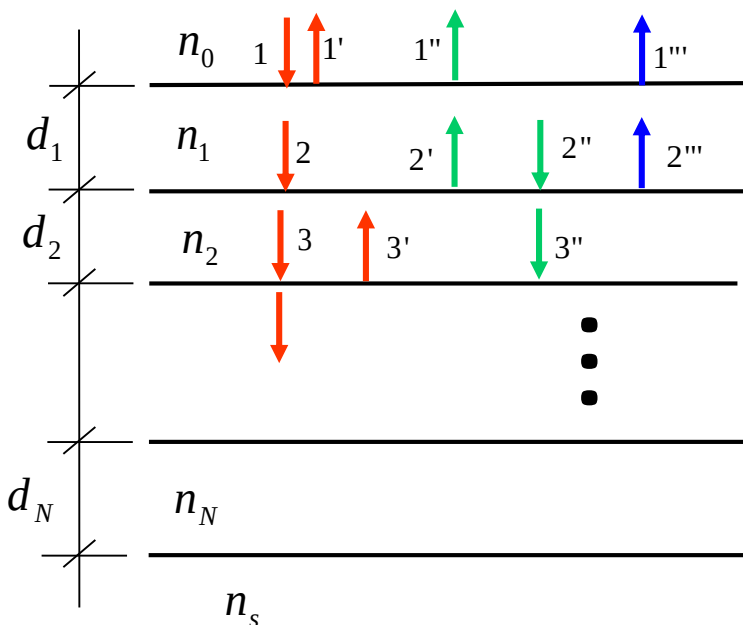
$$\text{oraz } n_1 = \sqrt{n_0 n_s}$$

Powłoki dielektryczne - wersja dla dorosłych



wszystkie warstwy to idealne dielektryki
znamy falę padającą
szukamy fali obitej i przechodzącej i fali odbitej

Powłoki dielektryczne, 2



W obu ośrodkach i każdej warstwie mamy:

- nieskończenie wiele fal propagujących się w dół
- nieskończenie wiele fal propagujących się w górę

Przypomnienie, wykład 1

$$\psi_1(x, t) = A_1 e^{i(kx - \omega t + \varphi_1)}$$

$$\psi_2(x, t) = A_2 e^{i(kx - \omega t + \varphi_2)}$$

$$\psi_1(x, t) + \psi_2(x, t) = A e^{i(kx - \omega t + \varphi)}$$

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

$$\tan \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}$$

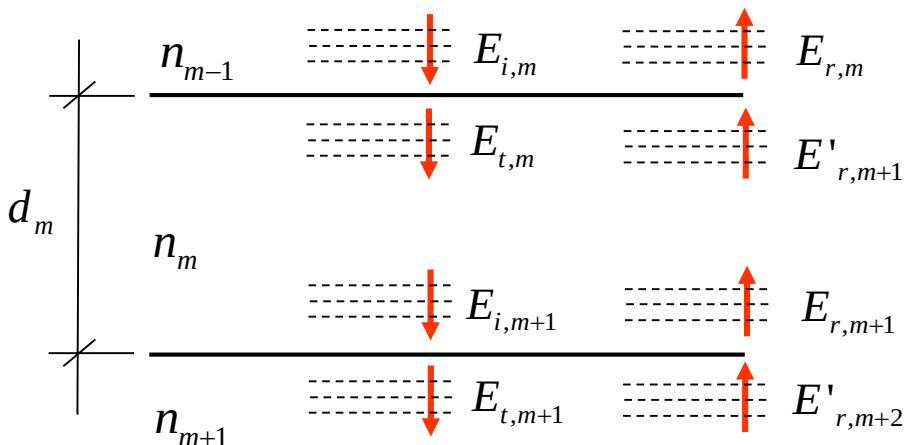
Stosujemy indukcję matematyczną:

Dodajemy falę 2 i falę 2'', do wyniku dodajemy inną falę, do niej dodajemy 2''', ...

Rezultat: **w każdej warstwie są dwie fale: jedna w dół i jedna do góry**

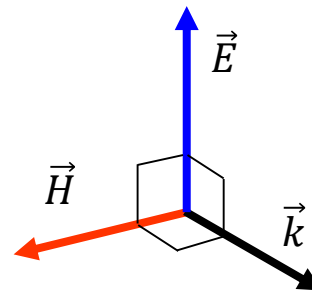
Powłoki dielektryczne, 3

W warstwie o indeksie m rozważamy pola na granicach.



Korzystamy z ciągłości składowych stycznych pola elektrycznego i magnetycznego przy przejściu przez granicę

Przypomnienie fale TEM, wykład 2 (dla próżni):



$$B = \frac{1}{c} E$$

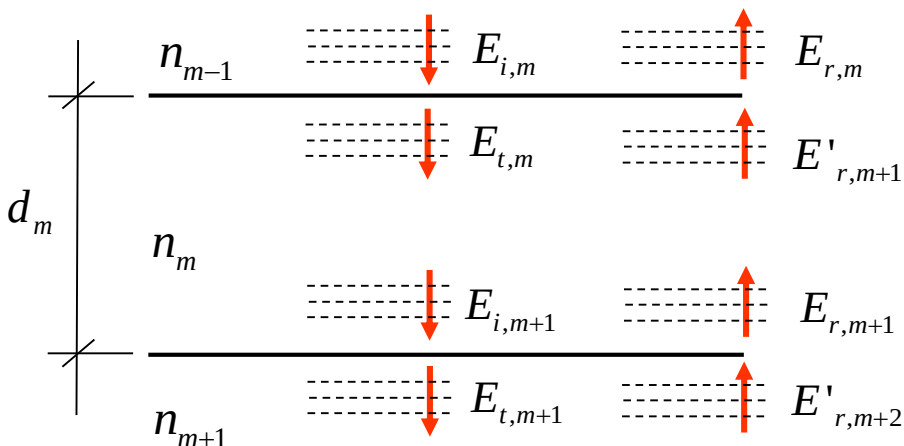
$$\vec{k} \parallel \vec{E} \times \vec{H}$$

analogicznie, dla niemagnetycznego dielektryka izotropowego mamy:

$$B = \frac{n}{c} E$$

$$\vec{k} \parallel \vec{E} \times \vec{B}$$

Powłoki dielektryczne, 4



Na górnej granicy warstwy o indeksie m :

$$E_m = E_{t,m} + E'_{r,m+1}$$

$$B_m = \frac{n_m}{c} (E_{t,m} - E'_{r,m+1}) \quad (1)$$

Na dolnej granicy tej warstwy:

$$E_{m+1} = E_{i,m+1} + E_{r,m+1}$$

$$B_{m+1} = \frac{n_m}{c} (E_{i,m+1} - E_{r,m+1}) \quad (2)$$

propagacja:

$$\begin{aligned} E_{i,m+1} &= E_{t,m} e^{-ik_m d_m} \\ E_{r,m+1} &= E'_{r,m+1} e^{ik_m d_m} \end{aligned} \quad (3)$$

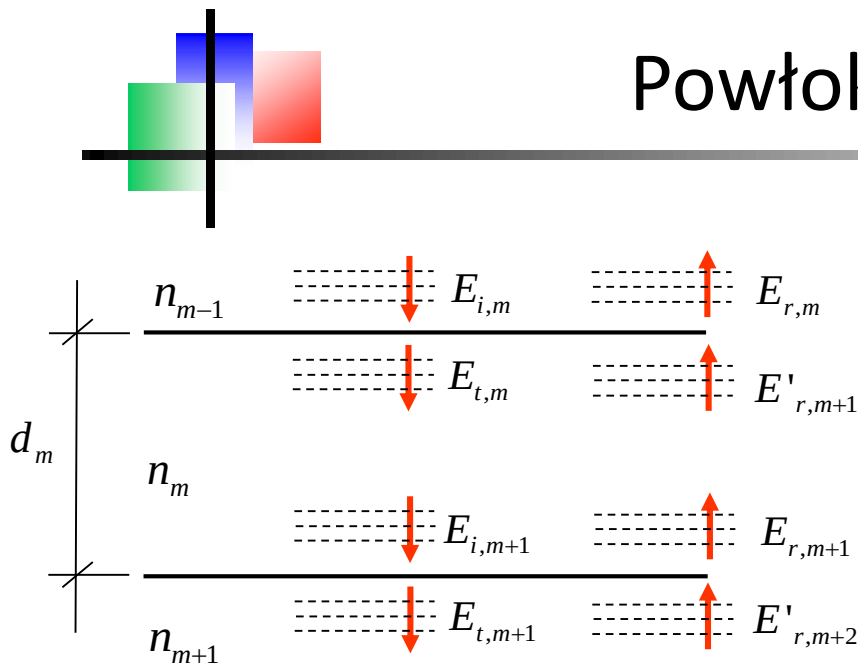
wstawiamy (3) do (2)

$$\begin{aligned} E_{m+1} &= E_{t,m} e^{-ik_m d_m} + E'_{r,m+1} e^{ik_m d_m} \\ B_{m+1} &= \frac{n_m}{c} (E_{t,m} e^{-ik_m d_m} - E'_{r,m+1} e^{ik_m d_m}) \end{aligned} \quad (4)$$

wyliczamy:

$$\begin{aligned} E_{t,m} &= \frac{1}{2} \left(E_{m+1} + \frac{c}{n_m} B_{m+1} \right) e^{ik_m d_m} \\ E'_{r,m+1} &= \frac{1}{2} \left(E_{m+1} - \frac{c}{n_m} B_{m+1} \right) e^{-ik_m d_m} \end{aligned} \quad (5)$$

Powłoki dielektryczne, 4



(5) wstawiamy do (1):

$$E_m = \frac{1}{2} \left(E_{m+1} + \frac{c}{n_m} B_{m+1} \right) e^{ik_m d_m} + \frac{1}{2} \left(E_{m+1} - \frac{c}{n_m} B_{m+1} \right) e^{-ik_m d_m}$$

$$= \cos(k_m d_m) E_{m+1} + i \frac{c}{n_m} \sin(k_m d_m) B_{m+1}$$

podobnie

$$B_m = i \frac{n_m}{c} \sin(k_m d_m) E_{m+1} + \cos(k_m d_m) B_{m+1}$$

macierz dla warstwy m

$$M_m = \begin{bmatrix} \cos \delta_m & i \frac{c}{n_m} \sin \delta_m \\ i \frac{n_m}{c} \sin \delta_m & \cos \delta_m \end{bmatrix}$$

gdzie

$$\delta_m = k_m d_m = \frac{2\pi n_m d_m}{\lambda}$$

to zmiana fazy przy propagacji przez warstwę m

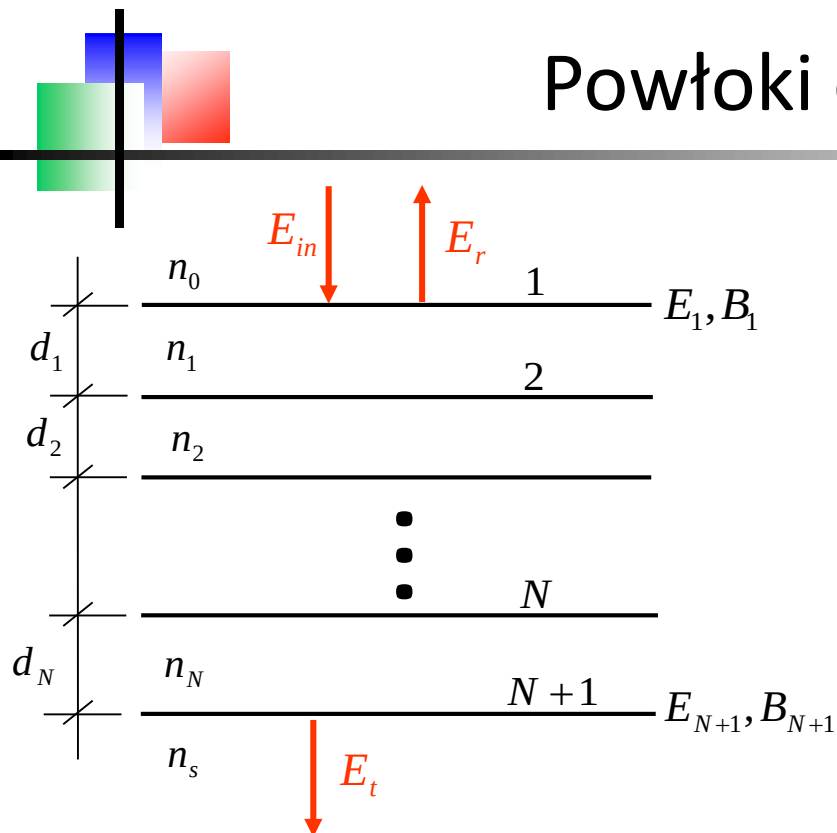
Ostatecznie, dostajemy liniowy związek pomiędzy wektorami

$\begin{bmatrix} E_m \\ B_m \end{bmatrix}$ oraz $\begin{bmatrix} E_{m+1} \\ B_{m+1} \end{bmatrix}$ i definiujemy macierz dla warstwy m :

$$\begin{bmatrix} E_m \\ B_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_m & i \frac{c}{n_m} \sin \delta_m \\ i \frac{n_m}{c} \sin \delta_m & \cos \delta_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{m+1} \\ B_{m+1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} E_m \\ B_m \end{bmatrix} = M_m \begin{bmatrix} E_{m+1} \\ B_{m+1} \end{bmatrix}$$

Powłoki dielektryczne, 5



Propagujemy pole od granicy $N + 1$ do granicy 1:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \dots M_N \begin{bmatrix} E_{N+1} \\ B_{N+1} \end{bmatrix}$$

czyli

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_{N+1} \\ B_{N+1} \end{bmatrix}$$

gdzie

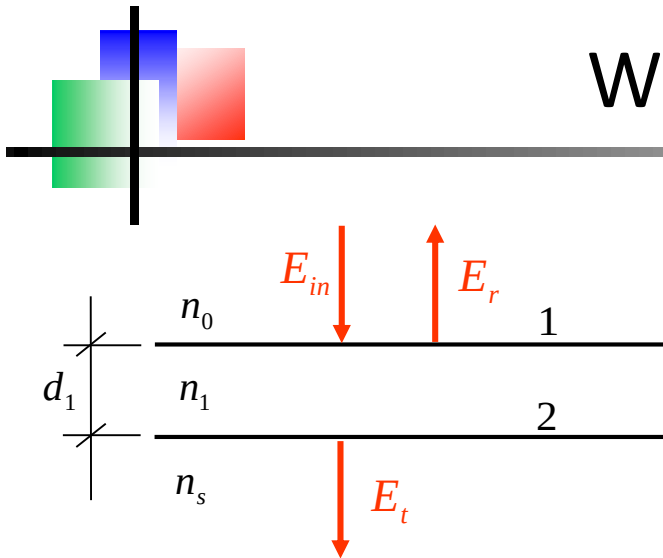
$$M = M_1 M_2 \dots M_N$$

$$\begin{bmatrix} E_i + E_r \\ \frac{n_0}{c} (E_i - E_r) \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_t \\ \frac{n_s}{c} E_t \end{bmatrix}$$

$$r = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\frac{n_0}{c} M_{11} + \frac{n_0 n_s}{c^2} M_{12} - M_{21} - \frac{n_s}{c} M_{22}}{\frac{n_0}{c} M_{11} + \frac{n_0 n_s}{c^2} M_{12} + M_{21} + \frac{n_s}{c} M_{22}}$$

$$t = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2 \frac{n_0}{c}}{\frac{n_0}{c} M_{11} + \frac{n_0 n_s}{c^2} M_{12} + M_{21} + \frac{n_s}{c} M_{22}}$$

Warstwa ćwierćfalowa



$$n_1 d_1 = \lambda/4 \Rightarrow \delta_1 = k_1 d_1 = \pi/2$$

macierz struktury = macierz warstwy

$$M = M_1 = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & i \frac{c}{n_1} \sin \delta_1 \\ i \frac{n_1}{c} \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & i \frac{c}{n_1} \\ i \frac{n_1}{c} & 0 \end{bmatrix}$$

amplitudowy współczynnik odbicia

$$r = \frac{\frac{n_0}{c} M_{11} + \frac{n_0 n_s}{c^2} M_{12} - M_{21} - \frac{n_s}{c} M_{22}}{\frac{n_0}{c} M_{11} + \frac{n_0 n_s}{c^2} M_{12} + M_{21} + \frac{n_s}{c} M_{22}}$$

$$= \frac{i \frac{n_0 n_s}{n_1 c} - i \frac{n_1}{c}}{i \frac{n_0 n_s}{n_1 c} + i \frac{n_1}{c}}$$

$$= \frac{n_0 n_s - n_1^2}{n_0 n_s + n_1^2}$$

natężeniowy współczynnik odbicia

$$R = |r|^2 = \left(\frac{n_0 n_s - n_1^2}{n_0 n_s + n_1^2} \right)^2$$

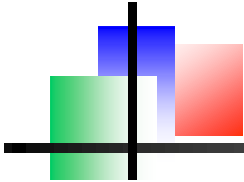
Jeśli $n_1 = \sqrt{n_0 n_s}$ to $R = 0$

ćwierćfalowa warstwa antyrefleksyjna

Liczby:

$$n_0 = 1, n_s = 1.5 \Rightarrow n_1 \cong 1.22$$

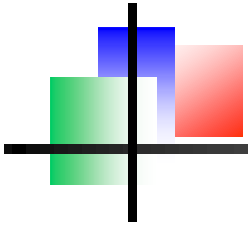
$$n_0 = 1, n_s = 1.8 \Rightarrow n_1 \cong 1.34$$



Dostępne materiały

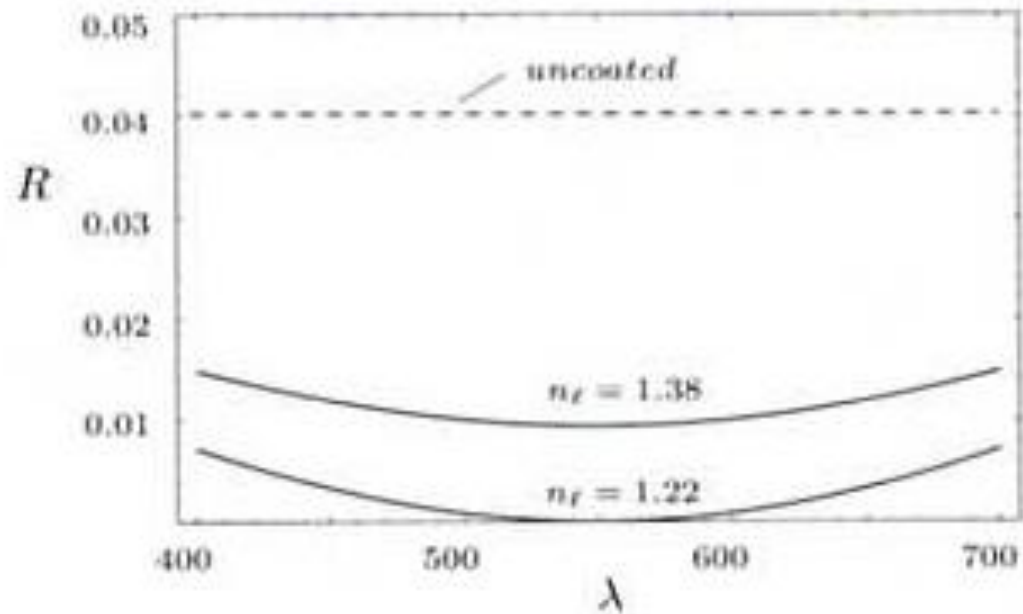
Table 5.2. Selected materials used for optical coatings.

Material	Useful Wavelength Range ^a (μm)	n_r ^a
Aluminum Oxide (Al_2O_3)	0.2 – 5.0	1.62
Barium Fluoride (BaF_2)	0.4 – 12.0	1.48
Calcium Fluoride (CaF_2)	0.13 – 10.0	1.43
Cerium Fluoride (CeF_3)	0.3 – 5.0	1.63
Cerium Oxide (CeO_2)	0.4 – 16.0	2.35
Cryolite (Na_3AlF_6)	0.25 – 14.0	<u>1.33</u>
Hafnium Oxide (HfO_2)	0.23 – 7.0	1.95
Indium-Tin Oxide (ITO)	0.4 – 1.0	2.00
Lanthanum Fluoride (LaF_3)	0.25 – 14.0	1.58
Magnesium Fluoride (MgF_2)	0.12 – 8.0	<u>1.38</u>
Scandium Oxide (Sc_2O_3)	0.35 – 7.0	1.89
Silicon Monoxide (SiO)	0.8 – 8.0	1.55
Silicon Oxide (SiO_2)	0.2 – 9.0	1.46
Tantalum Oxide (Ta_2O_5)	0.35 – 8.0	2.10
Titanium Monoxide (TiO)	0.4 – 10.0	2.35
Titanium(III) Oxide (Ti_2O_3)	0.4 – 12.0	2.4
Yttrium Oxide (Y_2O_3)	0.4 – 8.0	1.87
Zinc Selenide (ZnSe)	0.4 – 14.0	2.4
Zinc Sulfide (ZnS)	0.4 – 14.0	2.39
Zirconium Dioxide (ZrO_2)	0.3 – 8.0	2.40

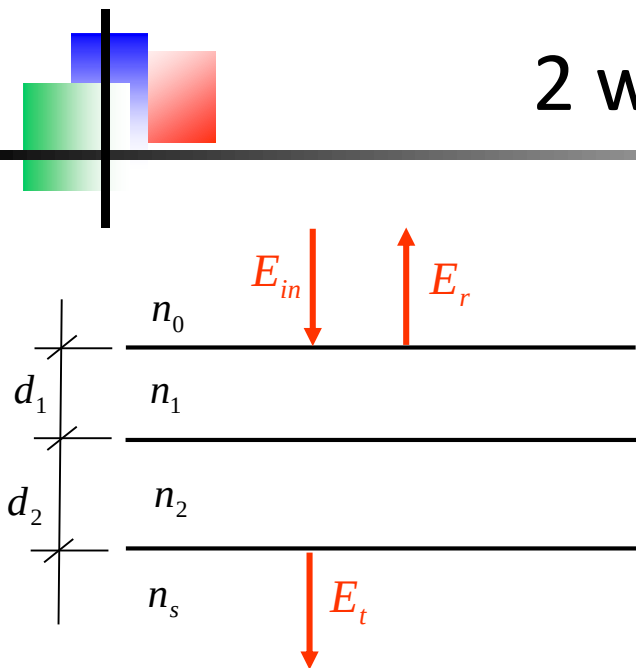


Przykład warstwy ćwierćfalowej AR

$$n_0 = 1, n_s = 1.5$$



2 warstwy ćwierćfalowe



$$n_1 d_1 = \lambda/4 \Rightarrow \delta_1 = k_1 d_1 = \pi/2$$

$$n_2 d_2 = \lambda/4 \Rightarrow \delta_2 = k_2 d_2 = \pi/2$$

Macierz struktury

$$M = M_1 M_2 = \begin{bmatrix} 0 & i \frac{c}{n_1} \\ i \frac{n_1}{c} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & i \frac{c}{n_2} \\ i \frac{n_2}{c} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{n_2}{n_1} & 0 \\ 0 & -\frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}$$

amplitudowy współczynnik odbicia

$$r = \frac{\frac{n_0}{c} M_{11} + \frac{n_0 n_s}{c^2} M_{12} - M_{21} - \frac{n_s}{c} M_{22}}{\frac{n_0}{c} M_{11} + \frac{n_0 n_s}{c^2} M_{12} + M_{21} + \frac{n_s}{c} M_{22}}$$

$$= \frac{n_s n_1^2 - n_0 n_2^2}{n_s n_1^2 + n_0 n_2^2}$$

natężeniowy współczynnik odbicia

$$R = |r|^2 = \left(\frac{n_s n_1^2 - n_0 n_2^2}{n_s n_1^2 + n_0 n_2^2} \right)^2$$

$$\text{Jeśli } \frac{n_2^2}{n_1^2} = \frac{n_s}{n_0} \text{ to } R = 0$$

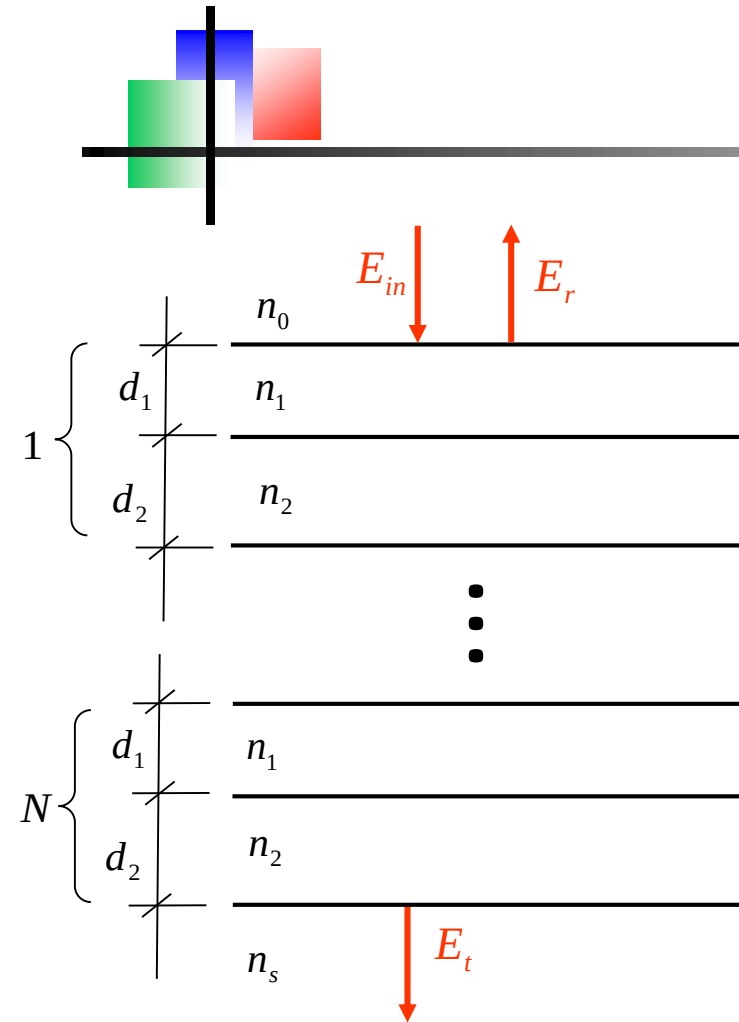
antyrefleks dwuwarstwowy

Ważna kolejność warstw:

$$n_0 = 1, n_s = 1.5, n_1 = 1.38, n_2 = 1.62 \Rightarrow R = |r|^2 \cong 0.002$$

$$n_0 = 1, n_s = 1.5, n_1 = 1.62, n_2 = 1.38 \Rightarrow R = |r|^2 \cong 0.12$$

Stos HR, 1



$$n_1 d_1 = \lambda/4 \Rightarrow \delta_1 = k_1 d_1 = \pi/2$$

$$n_2 d_2 = \lambda/4 \Rightarrow \delta_2 = k_2 d_2 = \pi/2$$

Macierz struktury

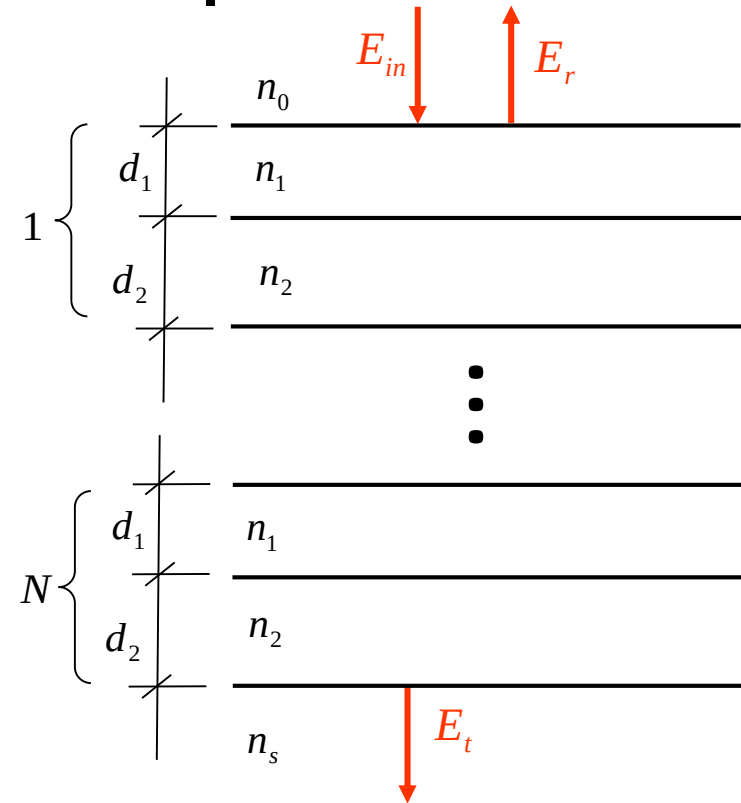
$$M = (M_1 M_2)^N = \begin{bmatrix} -\frac{n_2}{n_1} & 0 \\ 0 & -\frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}^N = \begin{bmatrix} \left(-\frac{n_2}{n_1}\right)^N & 0 \\ 0 & \left(-\frac{n_1}{n_2}\right)^N \end{bmatrix}$$

amplitudowy współczynnik odbicia

$$r = \frac{\frac{n_0}{c} M_{11} + \frac{n_0 n_s}{c^2} M_{12} - M_{21} - \frac{n_s}{c} M_{22}}{\frac{n_0}{c} M_{11} + \frac{n_0 n_s}{c^2} M_{12} + M_{21} + \frac{n_s}{c} M_{22}}$$

$$= \frac{n_0 \left(-\frac{n_2}{n_1}\right)^N - n_s \left(-\frac{n_1}{n_2}\right)^N}{n_0 \left(-\frac{n_2}{n_1}\right)^N + n_s \left(-\frac{n_1}{n_2}\right)^N}$$

Stos HR, 2



amplitudowy współczynnik odbicia

$$r = \frac{n_0 \left(-\frac{n_2}{n_1} \right)^N - n_s \left(-\frac{n_1}{n_2} \right)^N}{n_0 \left(-\frac{n_2}{n_1} \right)^N + n_s \left(-\frac{n_1}{n_2} \right)^N}$$

Lemat:

dla x takiego, że $|x| \neq 1$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \left| \frac{ax^N - bx^{-N}}{ax^N + bx^{-N}} \right| = 1$$

natężeniowy współczynnik odbicia

$$\lim_{N \rightarrow \infty} R = 1$$

stos HR

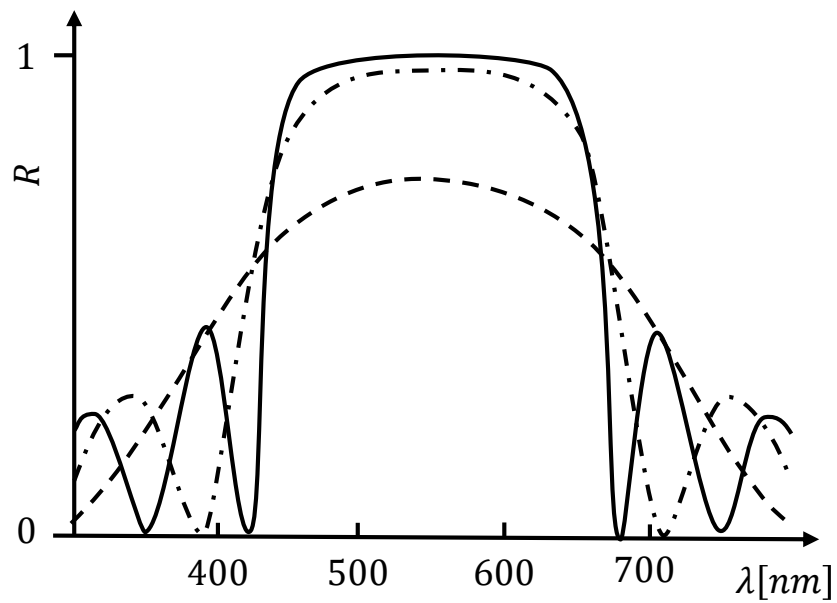
(ang. High Reflectivity coating)

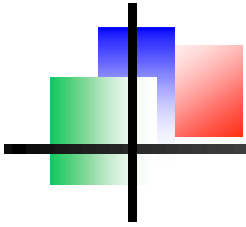
$$n_0 = 1, n_s = 1.5, n_1 = 2.4, n_2 = 1.45$$

N	1	2	3	4	5	6	7	8
R	0.37	0.7	0.88	0.95	0.98	0.994	0.998	0.999

Stos HR, przykład

$$n_0 = 1, n_s = 1.5, n_1 = 2.4, n_2 = 1.45$$





Typy pokryć dielektrycznych

Antyrefleksyjne

HR (lustra)

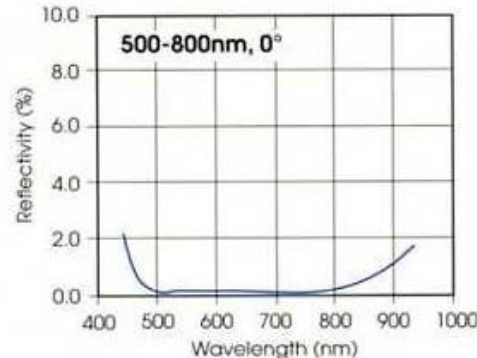
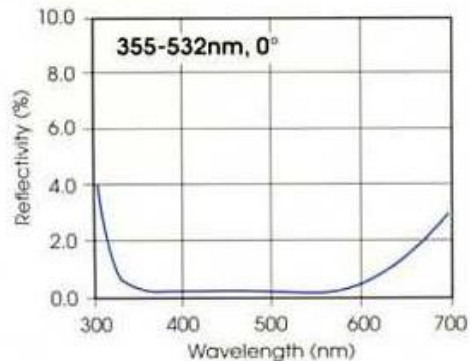
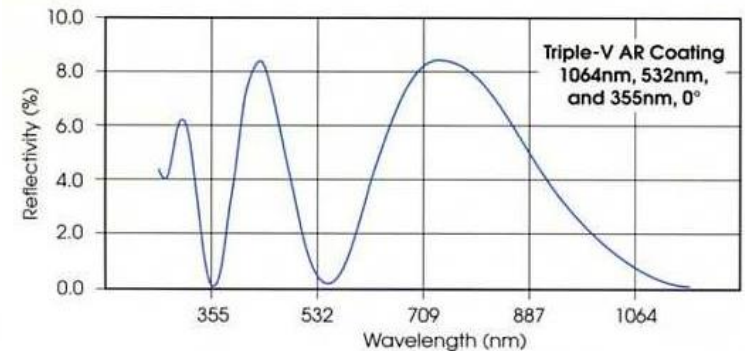
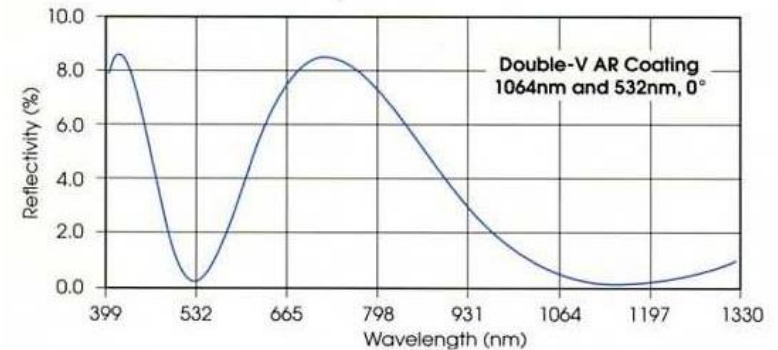
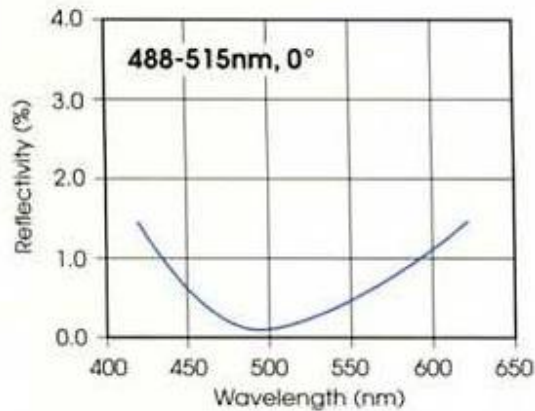
Dichroiczne

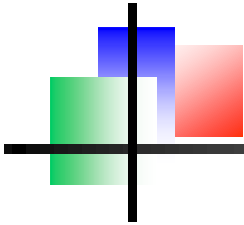
Polaryzacyjne

Ultraszybkie

Typy pokryć dielektrycznych

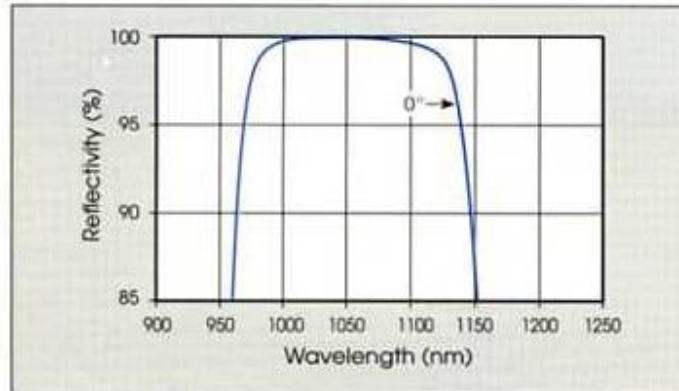
Antyrefleksyjne: 1, 2, 3 długości fali, szerokopasmowe



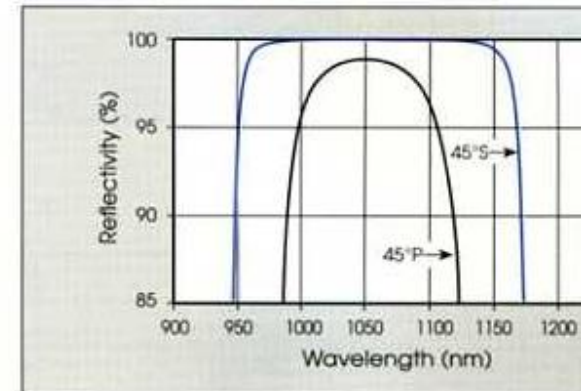


Typy pokryć dielektrycznych

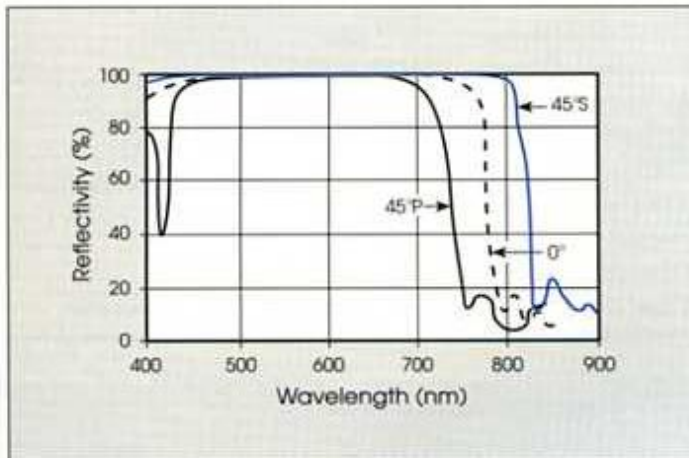
HR, laserowe (wąskie pasmo), szerokopasmowe



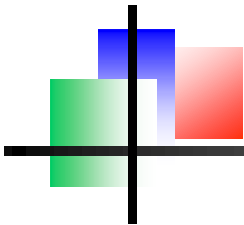
Reflectivity vs. Wavelength of YL1 Series 1047, 1053nm Nd:YAG Laser Mirror at 0° incidence angle.



Reflectivity vs. Wavelength of YL1 Series 1047, 1053nm Nd:YAG Laser Mirror at 45° incidence angle.



Reflectivity vs. Wavelength of BBD1 488-694nm 0-45° Visible Laser Mirror.



Typy pokryć dielektrycznych

Dichroiczne, ciepłe, zimne

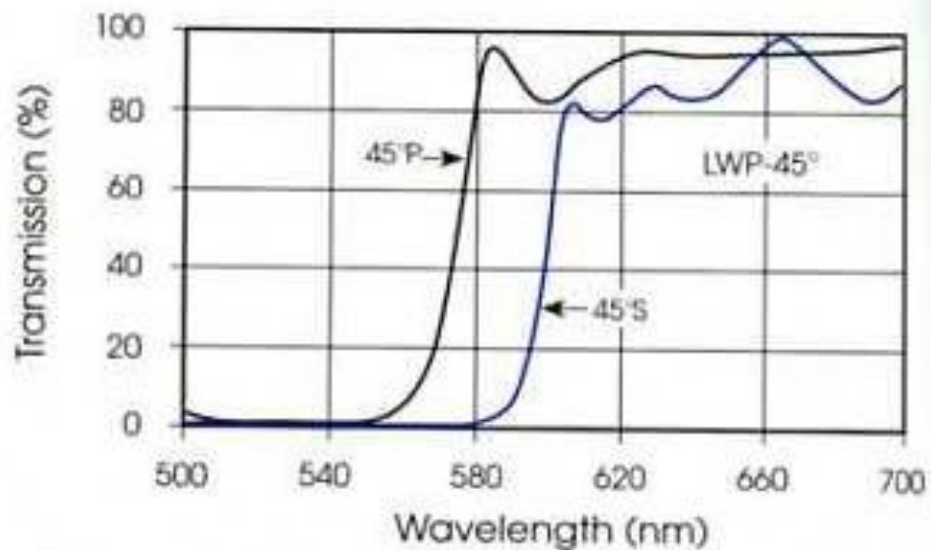
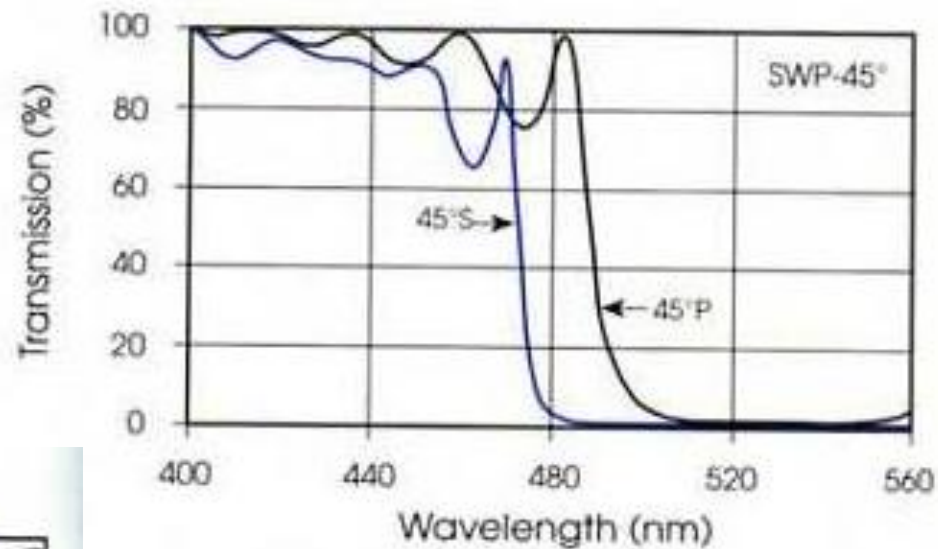
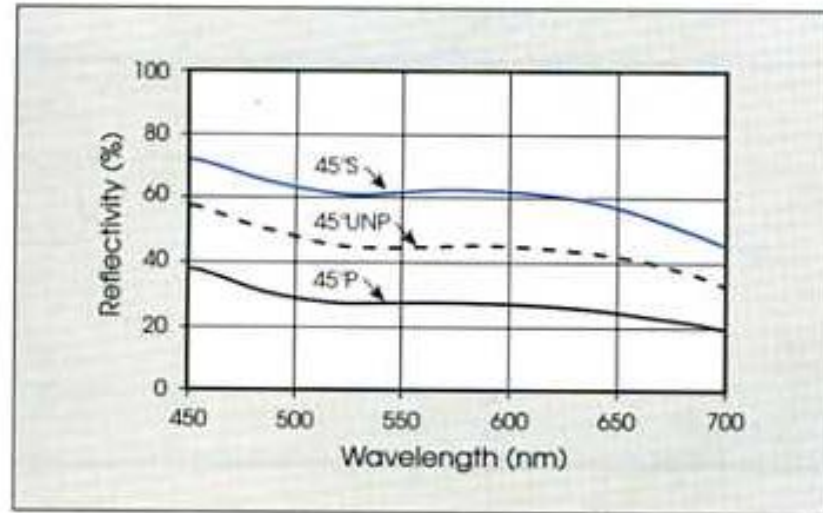


Figure 6. LWP dichroic beamsplitter with transition region near 580nm.



Typy pokryć dielektrycznych

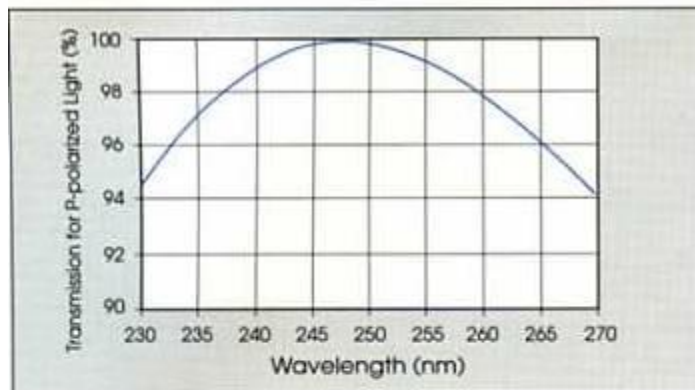
BS



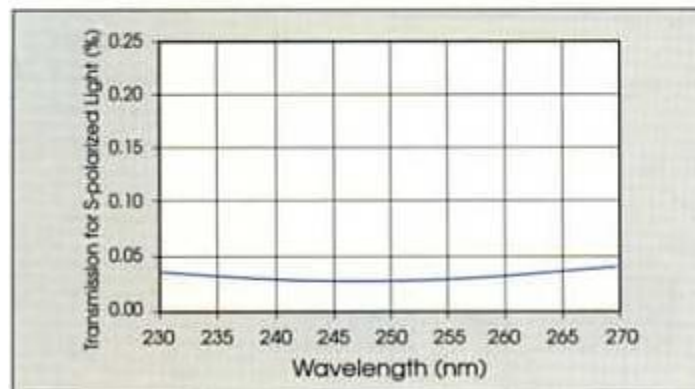
Reflectivity vs. wavelength of BBS-488-694 Broadband Beamsplitter.

Typy pokryć dielektrycznych

Polaryzacyjne



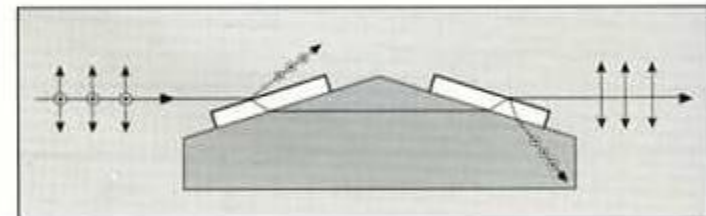
Transmission vs. Wavelength for P-polarization of UV Thin Film Polarizer TFK2-248-6.0



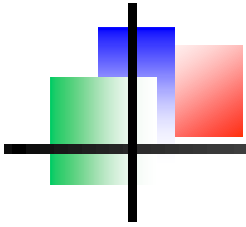
Transmission vs. Wavelength for S-polarization of UV Thin Film Polarizer TFK2-248-6.0

SPECIFICATIONS

Substrate Material:	VUV MgF ₂ or fused silica
Angle of Incidence:	68° ± 2°
Housing Width:	33.0mm
Housing Height:	23.6mm
Housing Length:	55.9mm for 193nm, 63.5mm for other wavelengths
Damage Threshold:	1J/cm ² , 8nsec pulse at 248nm typical

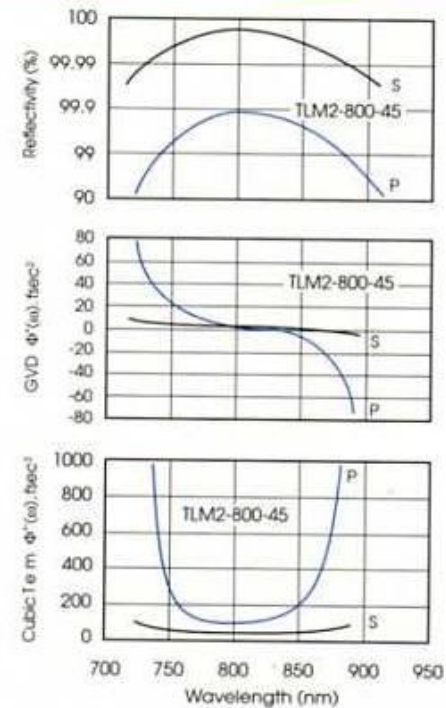
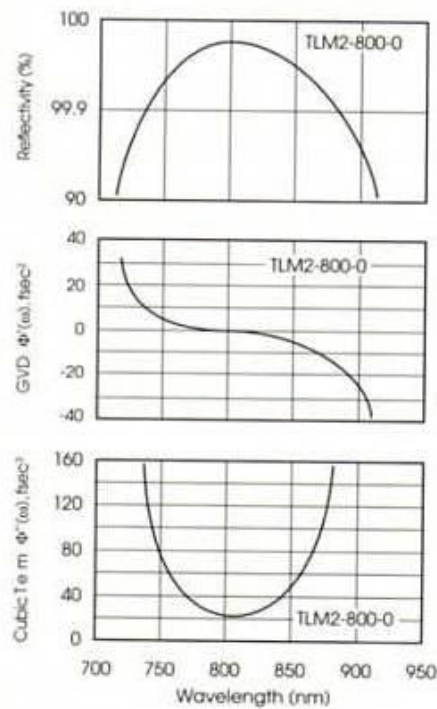


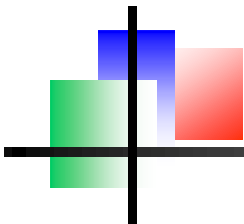
- 1J/cm², 8nsec pulse at 248nm typical
- Transmission efficiency > 95% at 248nm
- Largest bandwidth of any UV dielectric polarizer



Typy pokryć dielektrycznych

Z kontrolowaną dyspersją





parametry pokryć dielektrycznych

$$R(\lambda, \theta, p)$$

$$\varphi(\lambda, \theta, p)$$

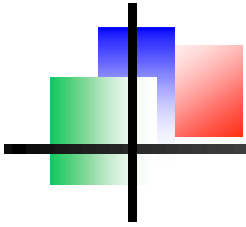
odporność mechaniczna

odporność chemiczna

próg zniszczenia optycznego

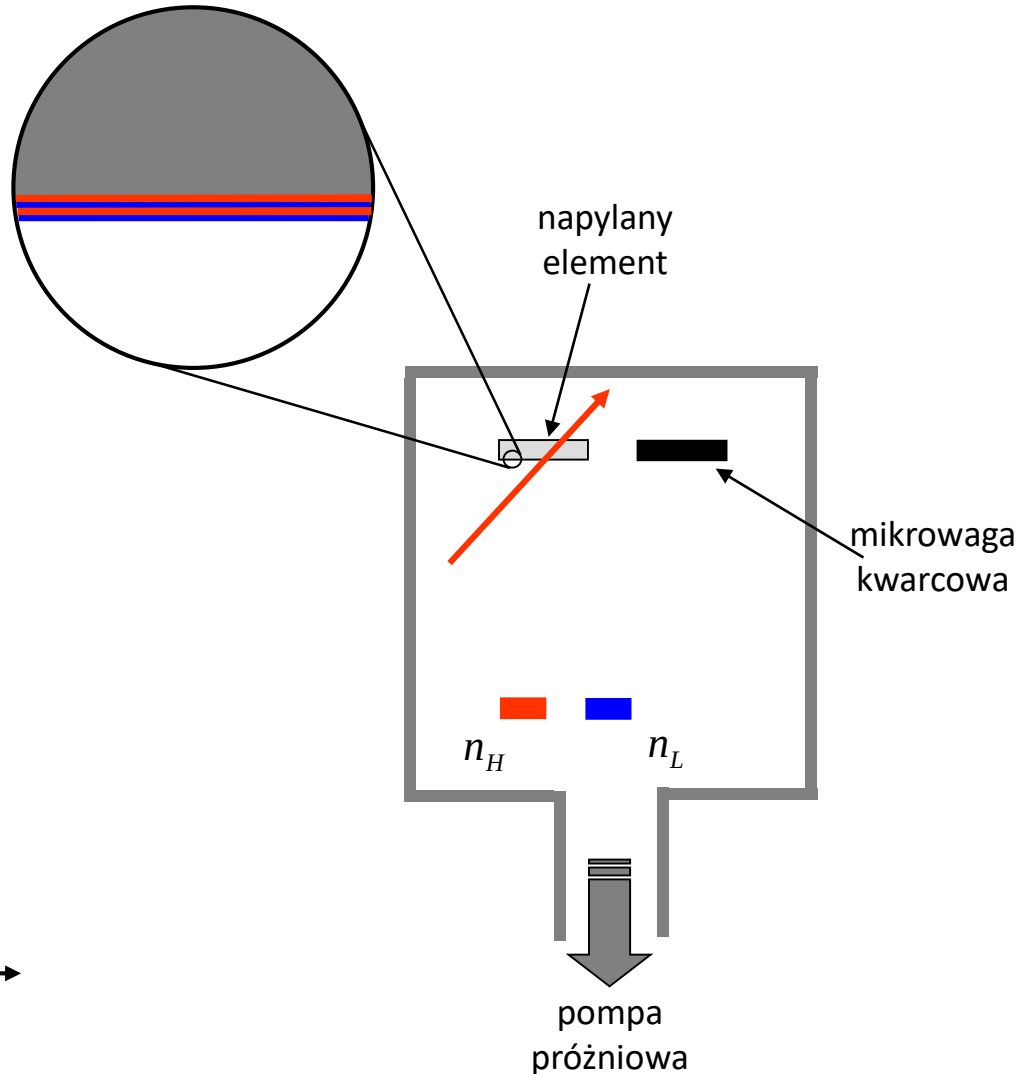
SPECIFICATIONS

Substrate Material:	UV grade fused silica or BK7 glass
S1 Surface Figure:	$\lambda/10$ at 633nm
S1 Surface Quality:	10-5 laser quality
S2 Surface Quality:	Commercial polish
Bandwidth Tolerance:	+ 0%, - 10% typical
λ_c Tolerance:	$\pm 3\%$
Diameter Tolerance:	+ 0.00mm, - 0.25mm
Thickness Tolerance:	± 0.25 mm
Wedge:	≤ 5 minutes
Chamfer:	0.35mm at 45° typical
Concentricity:	≤ 0.05 mm
Radius Tolerance:	$\pm 0.5\%$
Coating Technology:	Electron beam multilayer dielectric
Adhesion and Durability:	Per MIL-C-675A. Insoluble in lab solvents.
Clear Aperture:	Exceeds central 85% of diameter
Damage Threshold:	10J/cm ² , 8nsec pulse; 1MW/cm ² , CW at 1064nm typical. Contact CVI for damage certification up to 40J/cm ² .

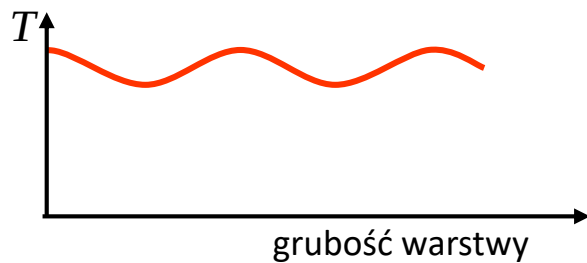


wytwarzanie pokryć dielektrycznych

1. „Spin coating”
2. Napylanie próżniowe

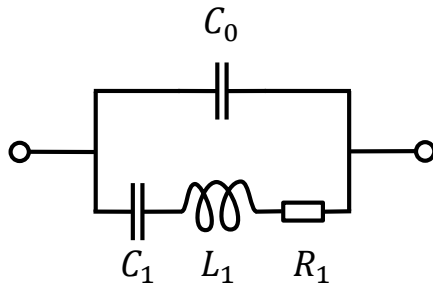
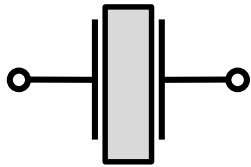


optyczny pomiar grubości

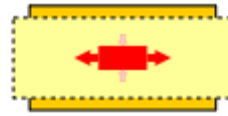


mikrowaga kwarcowa

rezonator kwarcowy – drgania
elektromechaniczne krystalicznego kwarcu
efekt piezoelektryczny



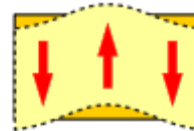
$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}, \quad \omega_p = \sqrt{\frac{C_0 + C_1}{L_1 C_0 C_1}}$$



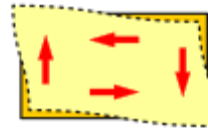
Longitudinal mode



Thickness shear mode



Flexural mode



Face shear mode



Tuning fork

