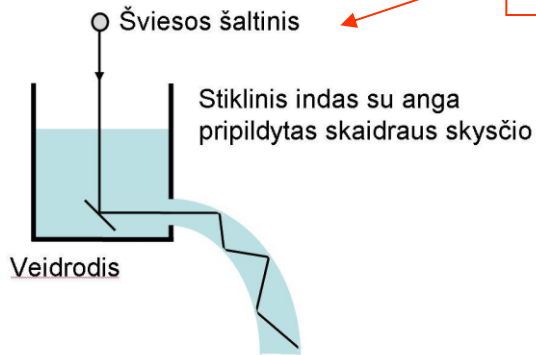


## *Šviesolaidžių optika: spindulių optikos modelis*

# Šviesolaidžių optika II

1841 m. – šveicaras Danielis Colladon  
1870 m. – anglas Tindall

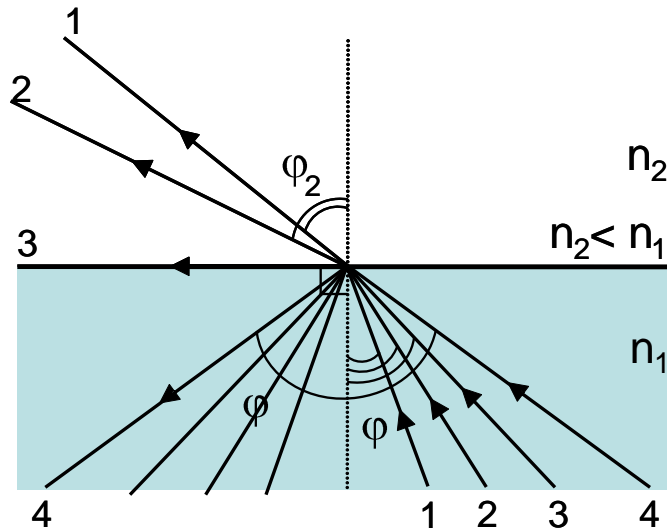


Bangolaidinis šviesos sklidimas vandens čiurkšlėje

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{Snelijaus dėsnis}$$

$$\text{Kai } \varphi_2 = 90^\circ \quad \sin \varphi_2 = 1$$

$$\text{Tada Snelijaus dėsnis bus: } \sin \varphi_{krit} = n_2 / n_1$$



Taip yra kai neįskaitoma šviesos poliarizacija

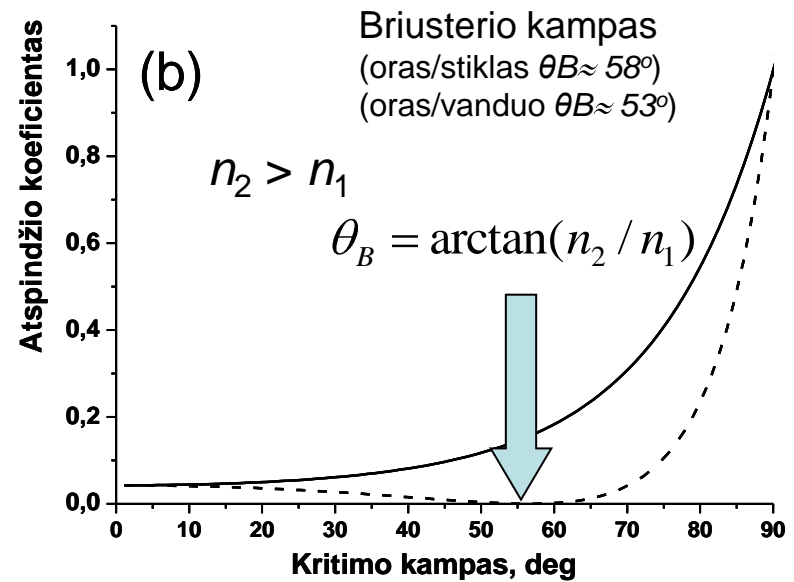
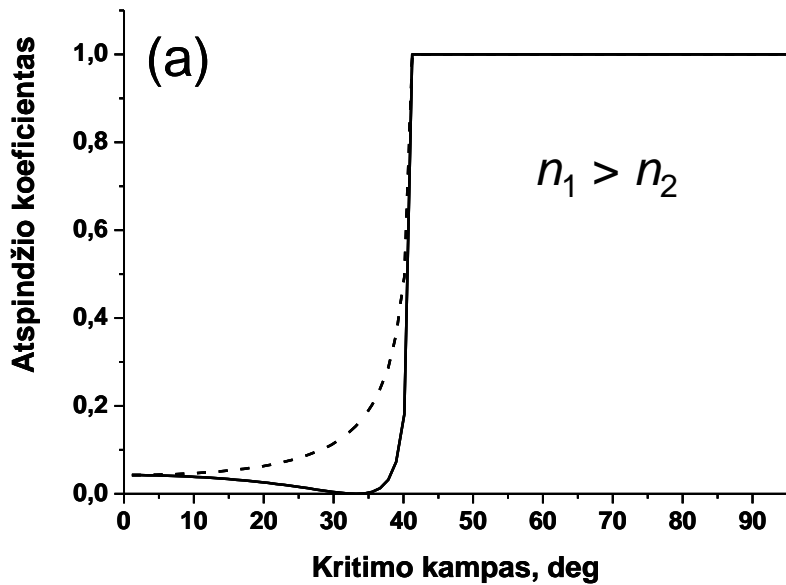
# Šviesolaidžių optika II

Frenelis analizuodamas šviesos sklidimą Islandiško špato kristale ir pastebėjęs dvejojo lūžio fenomeną, susimąstė ir įvedė šviesos poliarizacijos sąvoką ir išvedė šviesos lūžio ir atspindžio dėsnį skirtingos šviesos poliarizacijoms. Tai klasikinės Frenelio formulės galiojančios iki šiol (tai kruopštaus pasiaukojančio nuoseklaus darbo rezultatas:

$$R_{\parallel} = \frac{E_{10}^{\parallel}}{E_{00}^{\parallel}} = \frac{\operatorname{tg}(\varphi - \varphi_2)}{\operatorname{tg}(\varphi + \varphi_2)} = \frac{\sin 2\varphi - \sin 2\varphi_2}{\sin 2\varphi + \sin 2\varphi_2} = \frac{\sin 2\varphi \cos \varphi - \sin 2\varphi_2 \cos \varphi_2}{\sin 2\varphi \cos \varphi + \sin 2\varphi_2 \cos \varphi_2},$$

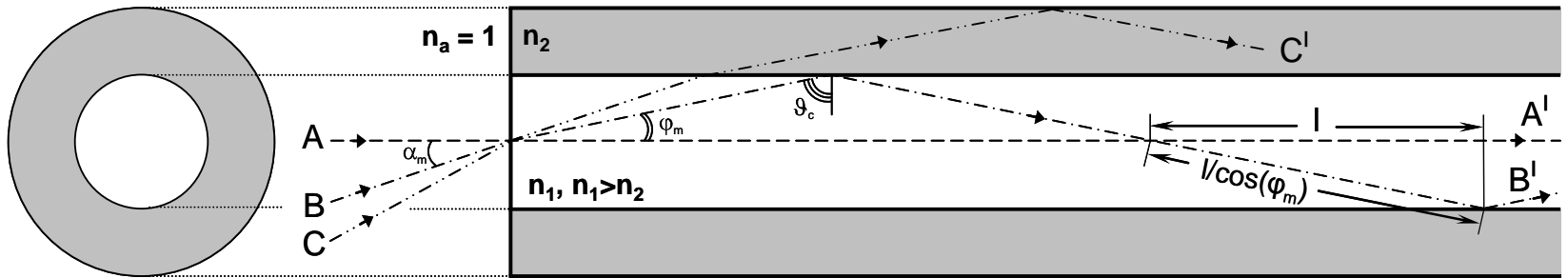
$$R_{\perp} = \frac{E_{10}^{\perp}}{E_{00}^{\perp}} = -\frac{\sin(\varphi - \varphi_2)}{\sin(\varphi + \varphi_2)} = -\frac{\sin \varphi \cos \varphi_2 - \sin \varphi_2 \cos \varphi}{\sin \varphi \cos \varphi_2 + \sin \varphi_2 \cos \varphi}$$

# Šviesolaidžių optika II



Atspindžio koeficiento priklausomybės nuo dviejų skaidrių terpių ribos dviem skirtingų poliarizacijų bangoms (a – kai  $n_1 > n_2$  stiklas–oras; b –  $n_1 < n_2$  oras–stiklas). Ištisa linija atitinka  $\perp$  poliarizacijos bangą, punktyrinė – II bangą.

# Šviesolaidžių optika II



Kai,  $\varphi = \varphi_{krit}$ ,

$$\sin \alpha_m = n_1 \sin \varphi_m = n_1 \sin \varphi_{krit}$$

$$n_1 \sin \varphi_{krit} = n_2$$

$$\cos \varphi_{krit} = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1}$$

$$\sin \alpha_m = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

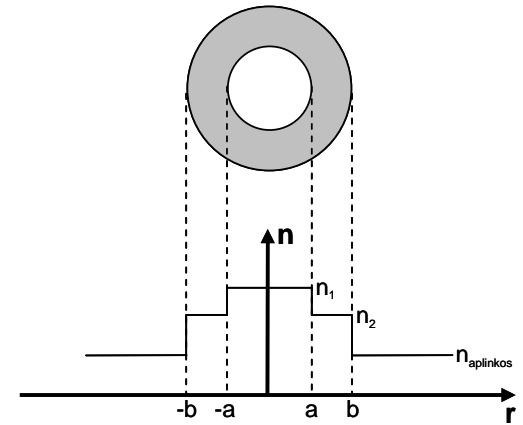
Pažymime

$$\Delta n = n_1 - n_2$$

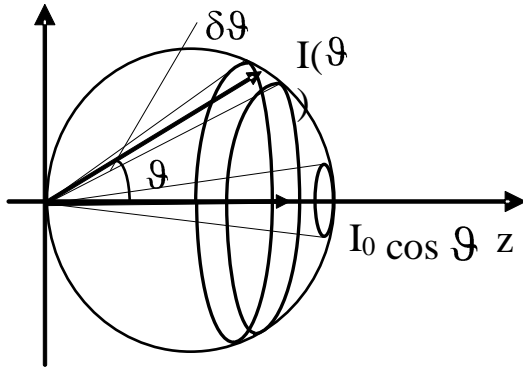
$$n = n_1 + n_2 / 2$$

$$\sin \alpha_m = \sqrt{2n\Delta n}$$

$$(NA) = \sin \alpha_m = (2n\Delta n)^{1/2} \quad \text{- Skaitinė apertūra}$$



# Šviesolaidžių optika II



Difuzinio šaltinio spinduliuotės dalis, proporcinga  $NA^2$ , gali būti įvesta į šviesolaidį

$$I(\vartheta) = I_0 \cos \vartheta$$

5 pav. Difuzinis šviesos šaltinis

$$\Phi_0 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_0 \cos \vartheta \cdot 2\pi \sin \vartheta \, d\vartheta = -2\pi I_0 \left[ \cos^2 \frac{\vartheta}{2} \right]_{\vartheta=0}^{\frac{\pi}{2}} = \pi I_0$$

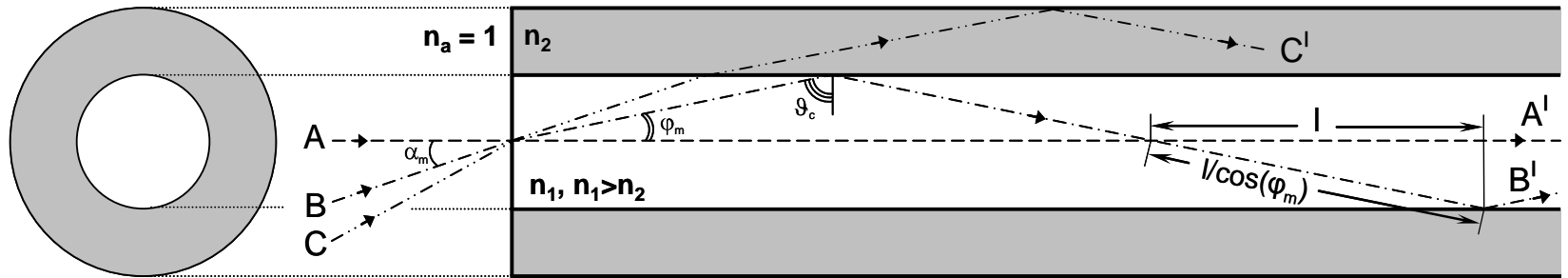
$$\Phi = \int_0^{\alpha_m} I_0 \cos \vartheta \cdot 2\pi \sin \vartheta \, d\vartheta = -2\pi I_0 \left[ \cos^2 \frac{\vartheta}{2} \right]_{\vartheta=0}^{\alpha_m} = \pi I_0 \sin^2 \alpha_m = \Phi_0 \left( NA \right)^2$$

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \left( NA \right)^2 = 2n\Delta n$$

Pastaroji išraiška rodo, kad norint įvesti į šviesolaidį daugiau šviesos reikia didinti dydžių  $\Delta n$  ir  $n$  vertes. Tai galima pasiekti gaminant šviesolaidį be apvalkalo ir naudojant šerdžiai stiklą su dideliu lūžio rodikliu. Toks problemos sprendimas turi du esminius

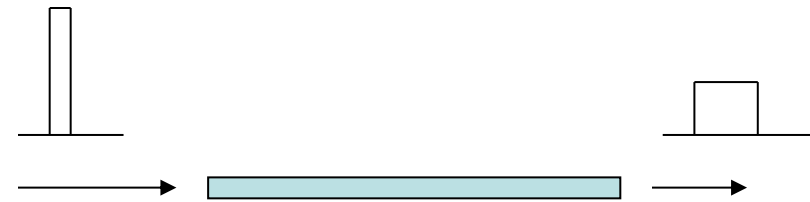
1. Gaminant šviesolaidinius kabelius su oriniu apvalkalu šviesolaidžio šerdis neišvengiamai liesis su kitais kabelyje esančiais šviesolaidžiais ir apsaugine danga, ir sąlyčio vietose bus žymūs nuostoliai.
2. Šviesos impulsas, įvestas į šviesolaidį, sklinda jame įvairiais kampais – ir optine ašimi, ir trajektorijomis, sudarančiomis įvairius kampus su ja, t.y. atstumai kuri šviesolaidyje nueis šviesa skirtingomis trajektorijomis skirsis – impulsinis signalas neišvengiamai plis.

# Šviesolaidžių optika II



Ašinis spindulys nueis kelią  $l$  per laiką  $- n_1 l/c$

Periferinis spindulys per laiką  $- n_1 l/c \cos \varphi_m$

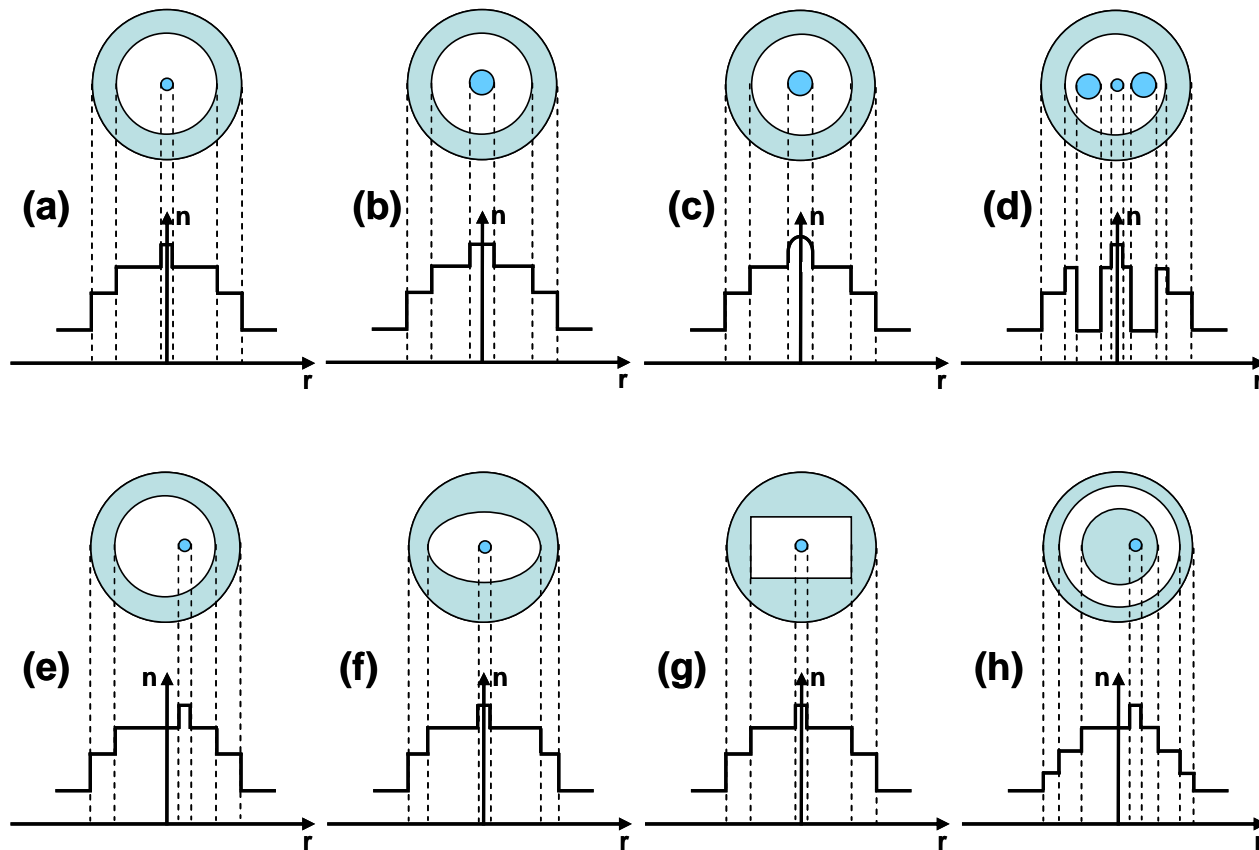


$$\Delta T = \left( \frac{n_1}{n_2} \right) \left( \frac{l}{c} \right) \Delta n \quad - \text{Modų dispersija } \Delta T/l$$

Kai  $n_1 = 1,5$ ;  $n_2 = 1$ ;  $\Delta n = 0,5$ ;  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s;  $\Delta T/l = 2,5 \mu\text{s/km}$  (šviesolaidis be apvalkalo)

Kai  $n = 1,5$ ,  $\Delta n = 0,01$ ;  $\Delta T/l = 3,4 \times 10^{-10}$  s/m = 34ns/km.

# Šviesolaidžių optika II

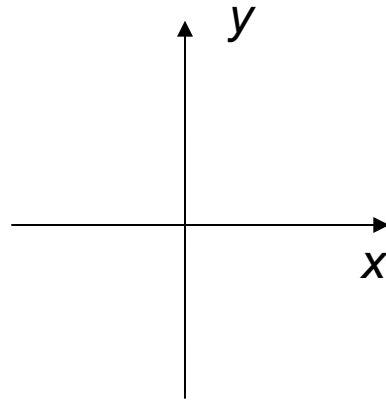
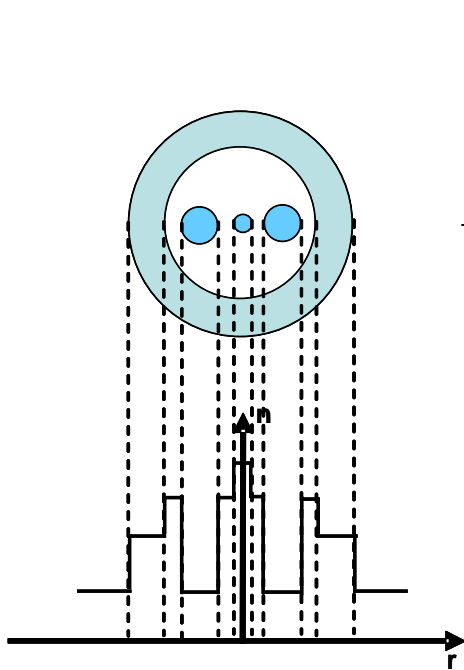


Pramonės gaminamų šviesolaidžių skerspjūviai ir lūžio rodiklio profiliai (a – vienmodis, b – daugiamodis, c – gradientinis, d – išlaikantis poliarizaciją (PANDA), e–h – asimetriniai, išlaikantys poliarizaciją)

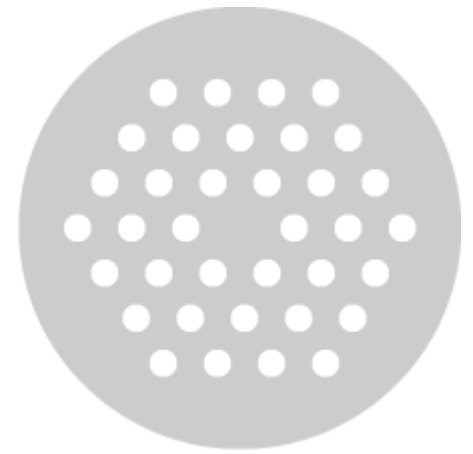


# Šviesolaidžių optika II

PANDA tipo poliarizacija išlaikantis šviesolaidis



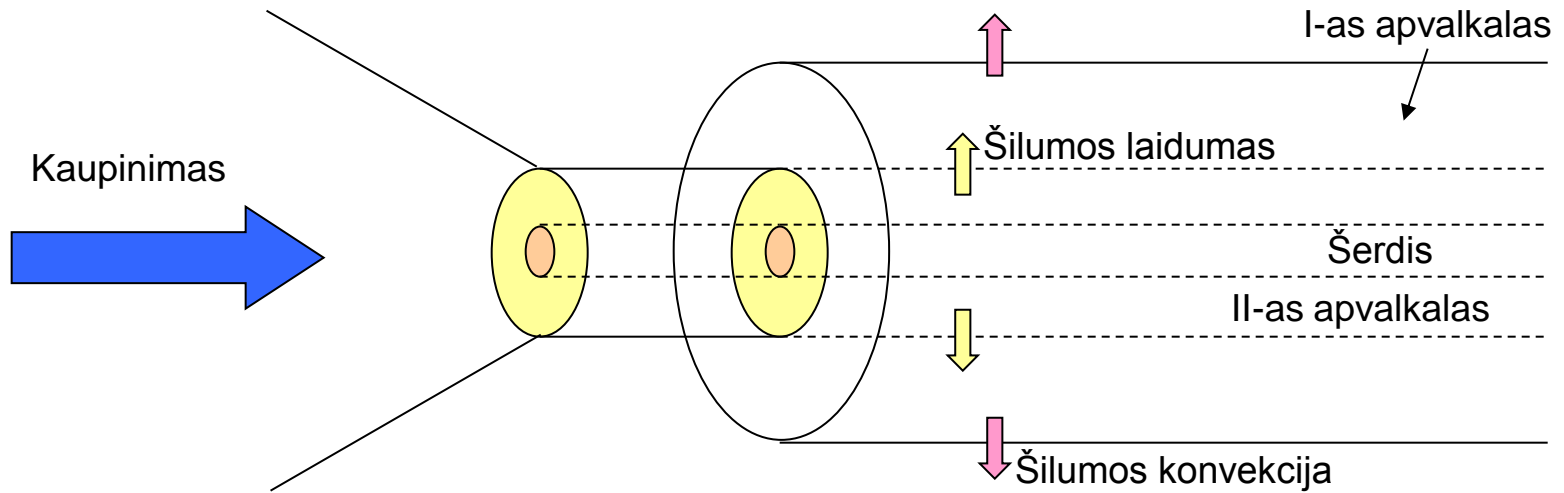
Skirtingi nuostoliai  $x$  ir  $y$  kryptim



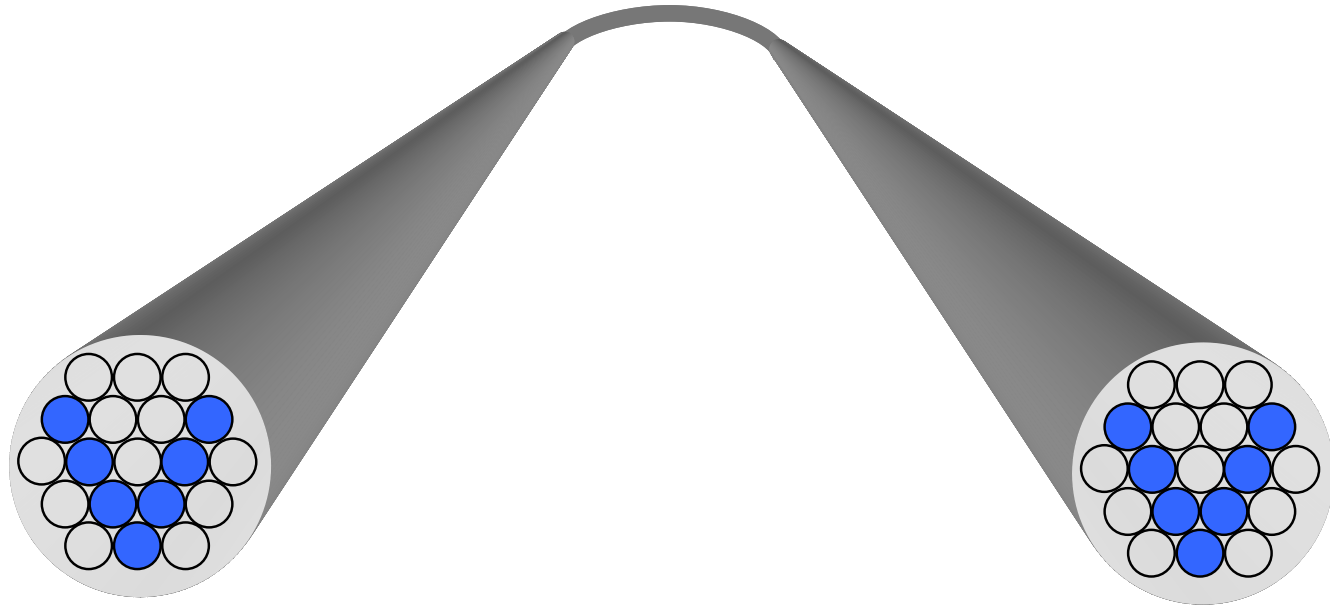
Fotoninių kristalų  
šviesolaidis

# Šviesolaidžių optika II

## Dvigubo apvalkalo šviesolaidis



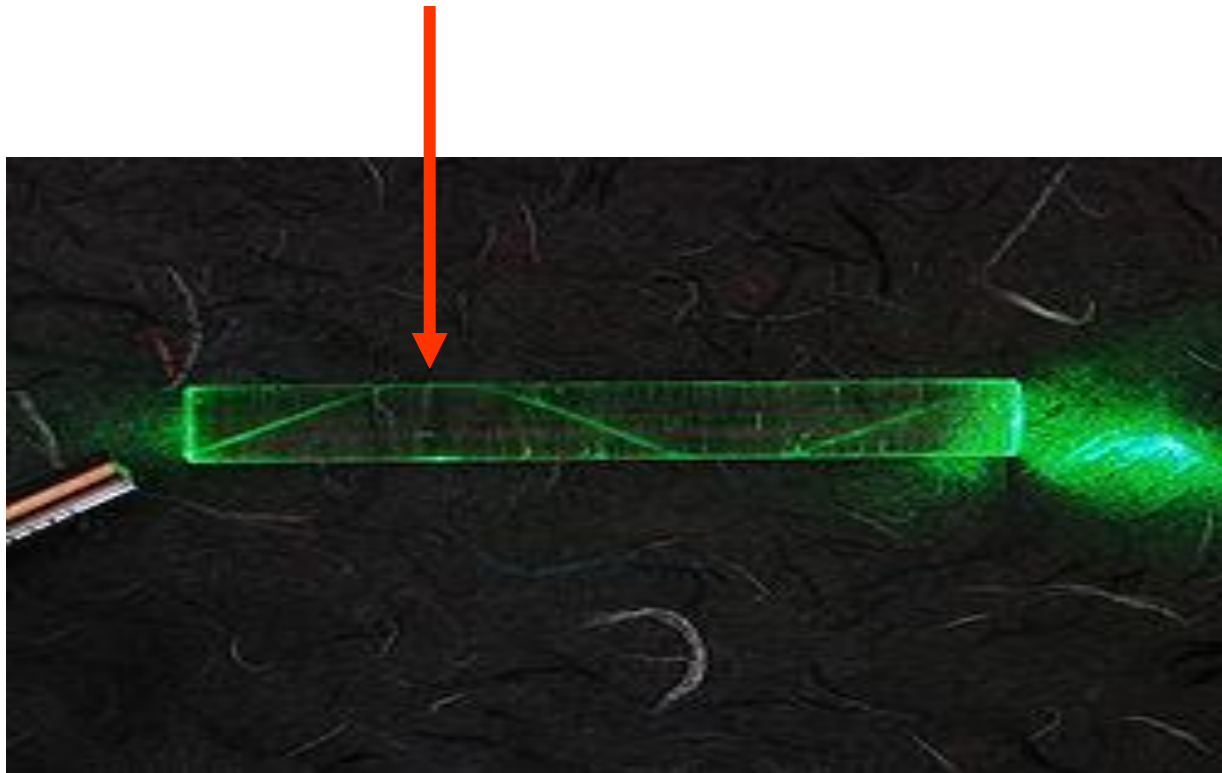
# Šviesolaidžių optika II



Šviesolaidinės pynės maketas

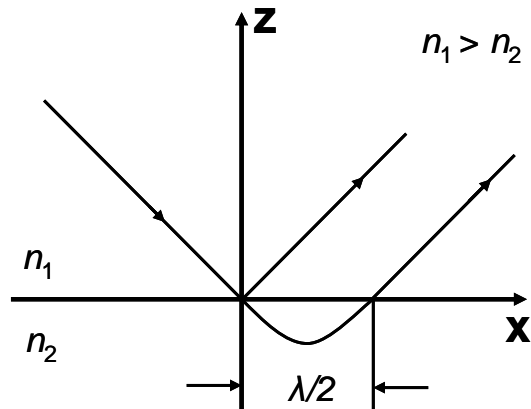
# Šviesolaidžių optika II

Eksperimentinė nuotrauka rodanti, kad spindulių modelis visišką šviesos atspindžio reiškinį paaiškinti negali?



# Šviesolaidžių optika II

## Skersinių modų formavimas laipteliniuose šviesolaidžiuose



Fazės poslinkis, atsirandantis visiškojo vidaus atspindžio metu dėl elektromagnetinės bangos sklidimo antroje terpėje

$$\varphi_2 = \pi/2, \quad n_1 \sin \varphi_{krit} = n_2$$

Įskaitant, kad  $\sin \varphi_2 = \sin \varphi / n_{12}$ , gauname

$$\cos \varphi_2 = \pm i \sqrt{\left(\frac{\sin \varphi}{n_{12}}\right)^2 - 1} \quad - \text{ (menamas dydis) Tai reiškia, kad}$$

pakito ne tik atspindėtos bangos amplitudė, bet ir fazė; atsiranda papildomas fazės poslinkis  $\delta$ .  $\cos \varphi_2$  negali būti teigiamas, nes tada antroje terpėje elektromagnetinės bangos amplitudė turėtų didėti iki begalybės.  $\cos \varphi_2$  – visada teigiamas.

$$R_{II} = \frac{E_{10}^{II}}{E_{00}^{II}} = \frac{n_{12} \cos \varphi + i \sqrt{\sin^2 2\varphi - n_{12}^2}}{n_{12} \cos \varphi - i \sqrt{\sin^2 2\varphi - n_{12}^2}}$$

$$R_{\perp} = \frac{E_{10}^{\perp}}{E_{00}^{\perp}} = \frac{\cos \varphi + i \sqrt{\sin^2 2\varphi - n_{12}^2}}{\cos \varphi - i \sqrt{\sin^2 2\varphi - n_{12}^2}} \quad . \text{ Kai } \varphi \geq \varphi_{rib}$$

$$R = \left| \frac{E_{10}^{II}}{E_{00}^{II}} \right| = \left| \frac{E_{10}^{\perp}}{E_{00}^{\perp}} \right| = 1$$

$$z = a_0 \exp \left( -\delta_0 \right) \exp \left[ i \left( \omega t + \delta \right) \right] = a_0 \exp \left[ i \left( \omega t + \delta + \delta_0 \right) \right]$$

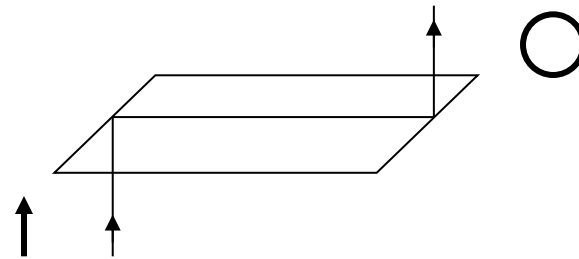
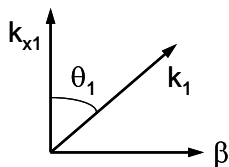
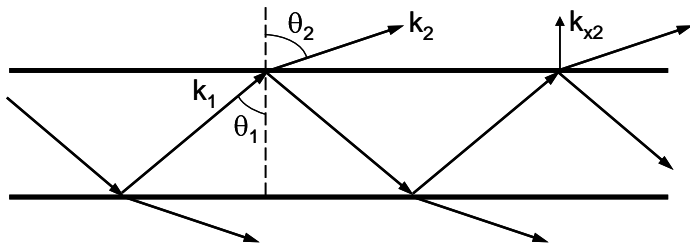
# Šviesolaidžių optika II

$$\operatorname{tg} \frac{\delta}{2} = \frac{\cos \varphi \sqrt{\sin^2 \varphi - n_{12}^2}}{\sin \varphi}$$

Atspindėtos bangos fazės priklausomybė nuo kritimo kampo.

Kai  $\operatorname{tg} \frac{\delta}{2} = 0$ , tai  $\varphi = \varphi_{rib}$  (nes  $\sin \varphi_{rib} = n_{12}$ ). Kritusi į dviejų skaidrių aplinkų ribą tiesiškai poliarizuota.

Kai  $\operatorname{tg} \delta/2 \neq 0$   $\delta = 0 \div \pi/2$  (Frenelio rombas)



$$R_{\perp} = \frac{k_{x1} - k_{x2}}{k_{x1} + k_{x2}} = \frac{n_1 \cos \varphi - n_2 \cos \varphi_2}{n_1 \cos \varphi + n_2 \cos \varphi_2}$$

$$R_{\parallel} = \frac{n_2^2 k_{x1} - n_1^2 k_{x2}}{n_2^2 k_{x1} + n_1^2 k_{x2}} = \frac{n_2 / \cos \varphi - n_1 / \cos \varphi_2}{n_2 / \cos \varphi + n_1 / \cos \varphi_2}$$

# Šviesolaidžių optika II

Bangolaidinis sklidimas bus realizuotas, kai spinduliuotės kritimo kampas į dviejų skaidrių aplinkų ribą ( $n_1 > n_2$ ) bus  $\varphi \leq \varphi_{\text{krit}}$ .

Šiuo atveju elektrinis laukas antroje terpėje (apvalkale) bus:

$$E_2 = E_{20} \exp(-ik_{x2}x) \exp(-ik_{z1}z)$$

Kai  $\varphi > \varphi_{\text{krit}}$   $k_{x2} = -i\gamma_2$  ir  $E_2 = E_{20} \exp(-\gamma_2x) \exp(-ik_{z1}z)$

↑ - Menamas dydis

$$\gamma_2 = ik_{x2} = in_2k_0 \cos \varphi_2 = in_2k_0 \left[ i \left[ \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \varphi - 1 \right]^{1/2} \right] = \left[ k_{z1}^2 - n_2^2 k_0^2 \right]^{1/2}$$

$$k_1^2 = n_1^2 k_0^2 = k_{x1}^2 + k_{z1}^2$$

Bangolaidinis sklidimas bus, kai

$$k_{x1} = \left[ n_1^2 k_0^2 - k_{z1}^2 \right]^{1/2}$$

$$n_2 k_0 < k_{z1} < n_1 k_0$$

# Šviesolaidžių optika II

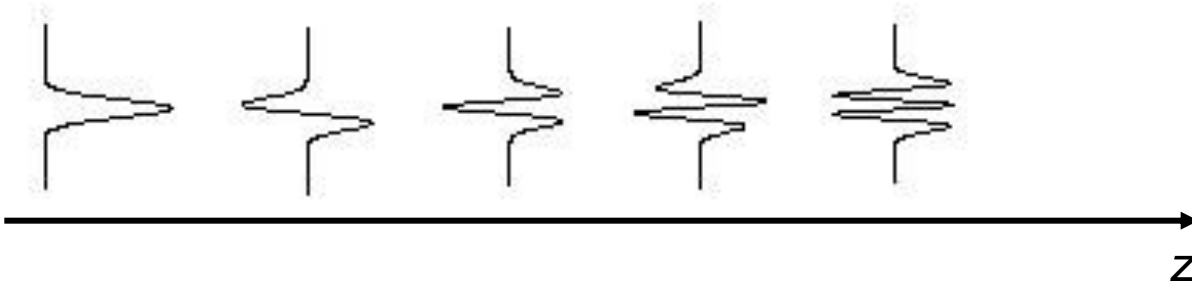
$$R_{TE} = \left[ \frac{k_{x1} + i\gamma_2/k_{x1} - i\gamma_2}{k_{x1} + i\gamma_2/k_{x1} + i\gamma_2} \right] \text{ arba } R_{TE} = Z/Z^* = \exp(2\delta_{TE})$$

$$Z = k_{x1} + i\gamma_2$$

$$\delta_{TE} = \arctg\left(\frac{\gamma_2}{k_{x1}}\right) = \arctg\left[\frac{n_1^2 \sin^2 \varphi - n_2^2}{n_1 \cos \varphi}\right]$$

$$4\delta - k_{x1}d = 2m\pi$$

$$\delta_{TM} = \arctg\left(\frac{\gamma_2}{k_{x1}}\right) = \arctg\left[\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \frac{n_1^2 \sin^2 \varphi - n_2^2}{n_1 \cos \varphi}\right]$$

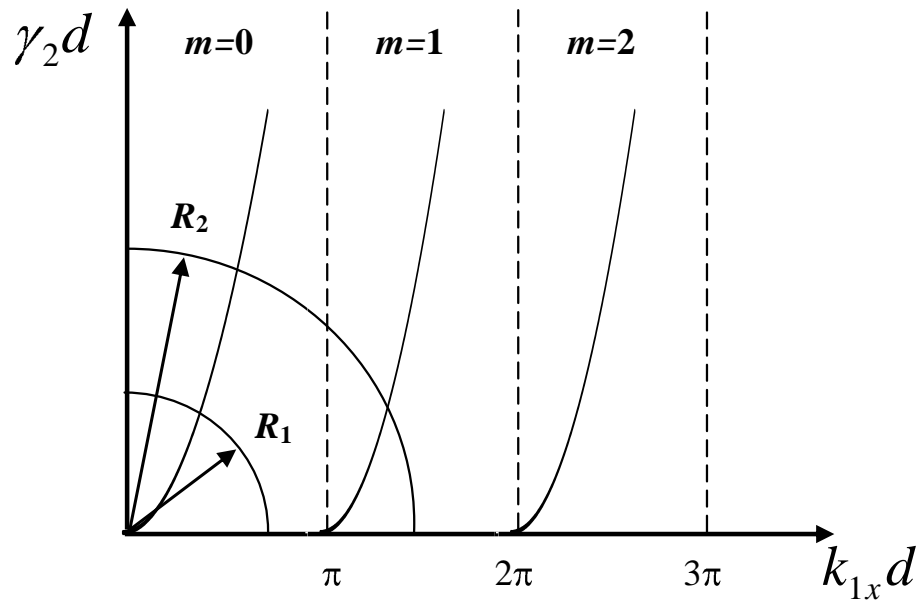




# Šviesolaidžių optika II

$$\arctg \left( \frac{\gamma}{k_{x1}} \right) = \left( k_{x1} d + m\pi \right) / 2$$

$$\frac{\gamma}{k_{x1}} = \operatorname{tg} \left( \frac{k_{x1} d + m\pi}{2} \right) = \begin{cases} \operatorname{tg} \left( \frac{k_{x1} d}{2} \right), & m = 0, 2, 4, \dots \\ \operatorname{ctg} \left( \frac{k_{x1} d}{2} \right), & m = 1, 3, 5, \dots \end{cases}$$



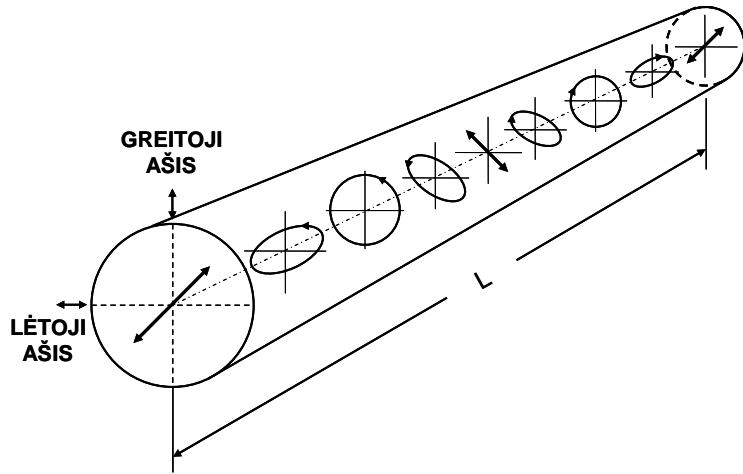
$$V = \pi d NA / \lambda < 2,405$$

$$V \leq 2,405$$

$$V > 2,405$$

$$N_m = \frac{1}{2} V^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi d}{\lambda} NA \right)^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 \left( n_1^2 - n_2^2 \right)$$

# Šviesolaidžių optika II



$$B = |n_x - n_y|$$

$$L_B = \lambda / B$$

$$B \sim 10^{-7}$$

# Šviesolaidžių optika II

1.1 lentelė. Telekomunikacijos sistemose vartojamų šviesolaidžių pagrindiniai parametrai bei normuotojo dažnio vertės

%	n <sub>1</sub>	Šviesolaidis λ, nm			
		Tipas (diametras, μm)	1550	1310	850
1	Step MMF 200 / 240	-	-	-	0.39
	V=158.09	187.06	288.29		
2	Step MMF 100 / 140	-	-	-	0.29
	58.77	69.54	107.18		
3	Grad MMF 62,5 / 125	2.1	1.47		0.28
	35.46	41.96	64.67		
4	Grad MMF 50 / 125	1.25	1.46		0.20
	20.26	23.98	36.95		
5	Step MMF 8,3 / 125	0.36	1.468		0.13
	2.187	2.588	3.990		

Step MMF (multi mode fiber) – daugiamodis šviesolaidis su laipteliniu lūžio rodiklio profiliu;

Grad MMF – daugiamodis šviesolaidis su gradientiniu lūžio rodiklio profiliu;

Step SMF – (single mode fiber) – vienamodis šviesolaidis su laipteliniu lūžio rodiklio profiliu.

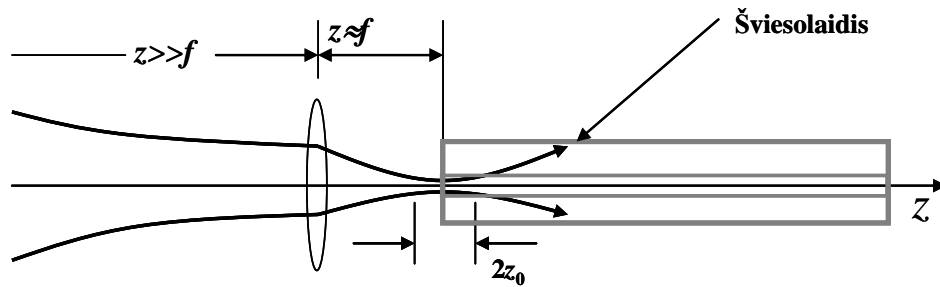
Pagal kompanijos „CORNING“ informaciją.

# Šviesolaidžių optika II

Telekomunikacijos sistemose vartojamų šviesolaidžių pagrindiniai parametrai bei normuotojo dažnio vertės							
	Šviesolaidis				λ, nm		
	Tipas (diametras, μm)	%	n <sub>1</sub>	NA	1550	1310	850
1	Step MMF 200 / 240	- $\Delta = \left[ \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \right]$	-	0.39	V=158.09	187.06	288.29
2	Step MMF 100 / 140	-	-	0.29	58.77	69.54	107.18
3	Grad MMF 62,5 / 125	2.1	1.47	0.28	35.46	41.96	64.67
4	Grad MMF 50 / 125	1.25	1.46	0.20	20.26	23.98	36.95
5	Step MMF 8,3 / 125	0.36	1.468	0.13	2.187	2.588	3.990

# Šviesolaidžių optika II

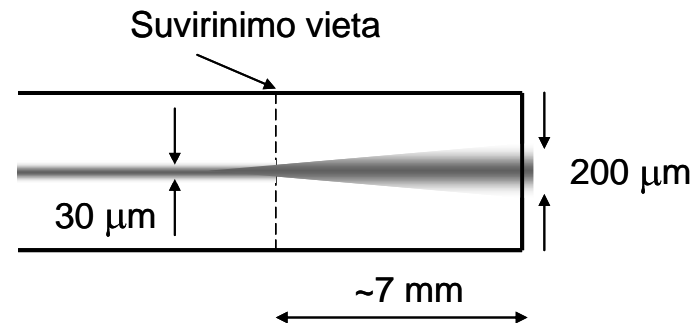
## Šviesos įvedimas į šviesolaidžius



$$2w'_0 \approx \frac{4}{\pi} \lambda F_*$$

$$F_* = \frac{f}{2w_0} = \frac{f}{D}$$

$$2z_0 = \frac{2\pi W_0^2}{\lambda}$$



# Šviesolaidžių optika II

# Šviesolaidžių optika II