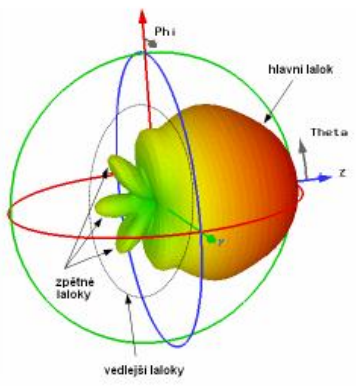
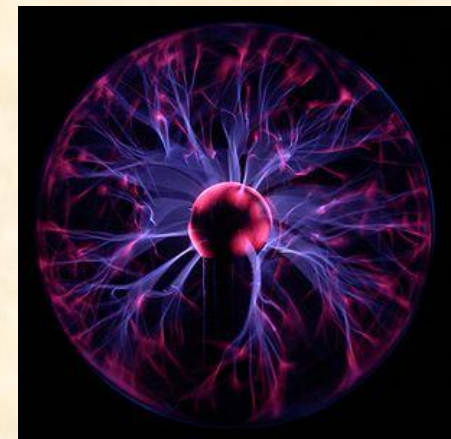
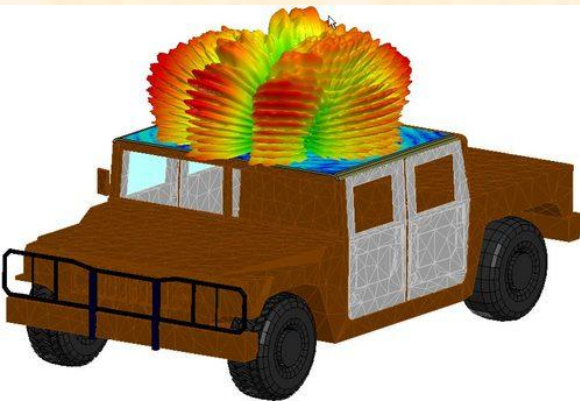




Vysoké frekvence a mikrovlny



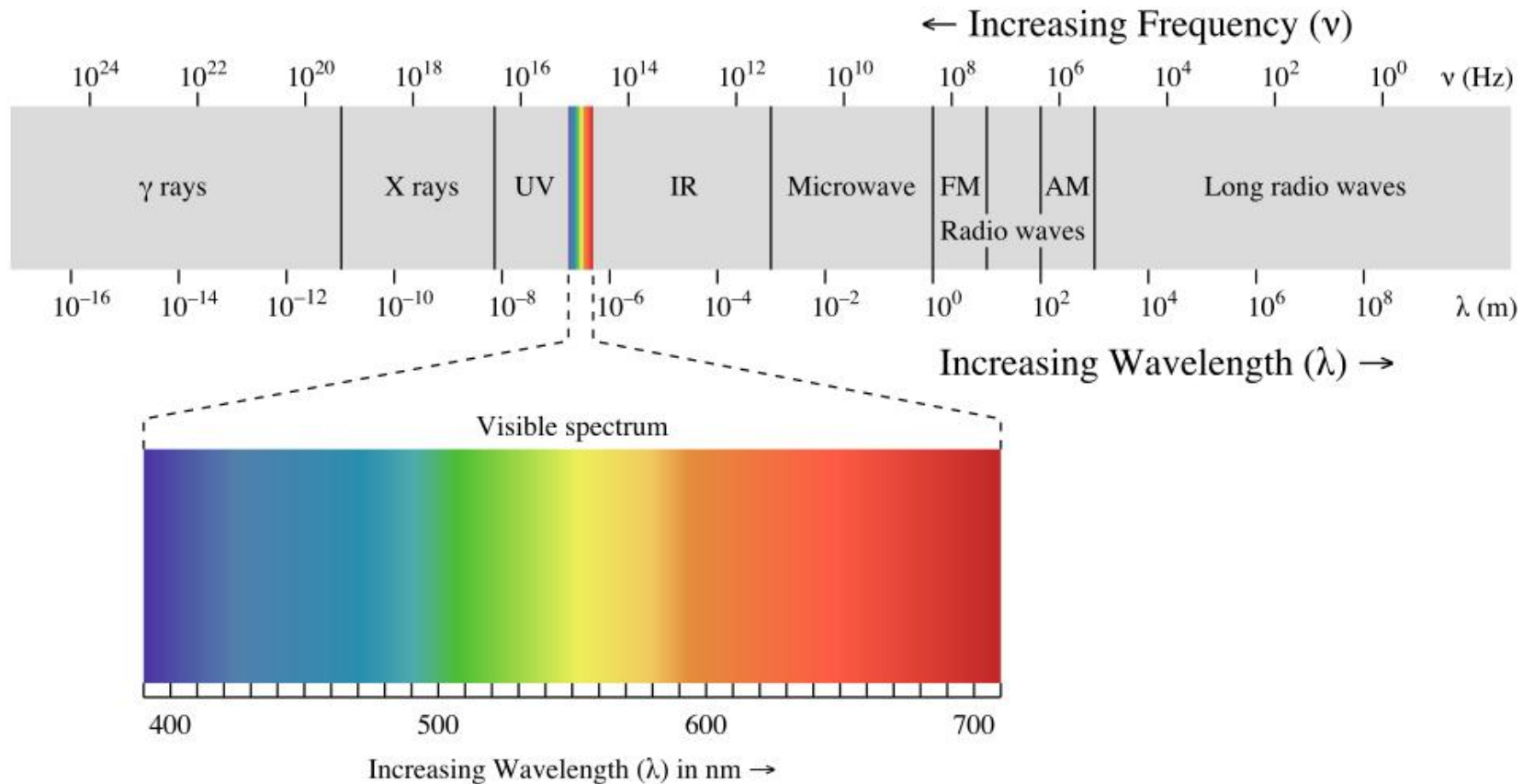
Osnova

- Úvod
- Maxwellovy rovnice
- Typy mikrovlnného vedení
- Použití ve fyzice plazmatu

Úvod

- Mikrovlny** – jsou elektromagnetické vlny o vlnové délce větší než 1mm a menší než 1m, což odpovídá frekvencím 300GHz resp. 300MHz
- elmag. záření o větší frekvenci (kratší vlnové délce) jsou Terahertzové vlny, vlny s delšími vlnovými délkami jsou radiové vlny
 - dělení na milimetrové, centimetrové a decimetrové vlny
 - teoretický popis elmag. záření vytvořil J.C. Maxwell (1886)
 - experimentálně potvrdil H.Hertz (1888), sestavil aparaturu, která produkovala a detekovala mikrovlny

Úvod



Úvod

Soustředěné parametry

- Rozměry obvodu jsou alespoň o dva řády menší než je délka vlny, která jím prochází – signál se šíří nekonečnou rychlostí, tj. ve stejném čase je všude stejná hodnota signálu
- Při studiu obvodů se soustředěnými parametry mají základní význam veličin jako jsou napětí a proud. Při řešení obvodů se pak také využívá Kirchhoffových zákonů.

Úvod

Rozložené parametry

- Délka vlny je srovnatelná s délkou obvodu.
- Výpočty obvodů s rozloženými parametry se provádí řešením Maxwellových rovnic a z nich odvozenými vlnovými rovnicemi – je třeba znát elektromagnetické pole, přesněji jeho elektrickou a magnetickou složku a s nimi vázanou impedanci. Jen studie prostorově-časová konfigurace těchto polí umožňuje popsat toky elektromagnetického výkonu.

V pásmech kolem stovek MHz se mohou oba typy obvodů prolínat. Obvody velmi vysokých frekvencí můžeme považovat za elektrické obvody s rozloženými parametry.

- PŘ: Rozvodná síť v Rusku

Typ	λ	f	Použití	Vlastnosti
Dlouhé vlny	1-10km	300 – 30kHz	radionavigace, rozhlas (DV-AM)	snadný ohyb, překonání velkých vzdáleností i členitých povrchů, rušeny atmosférickými poruchami a jiskřením
Střední vlny	100 – 1000m	3 – 0,3 MHz	rozhlas (SV-AM)	menší dosah, menší rušení než u DV
Krátké vlny	10-100m	30-3MHz	rozhlas (AM)	šířeny prostorovými vlnami, možné zachycovat i ionosférické, povrchové krátký dosah a tlumí se již v poměrně krátké vzdálenosti od vysílače. kolísání kvality kvůli změnám v ionosféře
Velmi krátké vlny	10 – 100m	300 - 30 MHz	rozhlasové VKV I a II pásmo (FM), televizní I a II a III pásmo	čistota a věrnost přenosu tlumeny členitostí zemského povrchu nejsou odráženy ionosférou ale touto pronikají dále do kosmu Přijímání na přímou viditelnost
Ultra krátké vlny	1 – 10dm	3 – 0,3 GHz	4 a 5 TV pásmo, radiolokace, a kosmické spoje	
Centimetrové Vlny	1 – 10 cm	30 – 3 GHz	radio-releové spoje, družicová telekomunikace	
Milimetrové vlny	1-10mm	300 – 30 GHz	přístavací a řídicí radiolokátory, výškoměry, mikrovlnný ohřev	
Deci-milimetrové vlny (DMM)	0,1 – 1mm	3000 – 300 GHz	telekomunikace,	hraničí se světelným zářením, k přenosu použito vláknový světlovod

Maxwellovy rovnice

Ampérův zákon

$$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}_V$$

Faradaův zákon
(Elmag. Indukce)

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

Gaussův zákon
(Elektrina)

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho$$

Gaussův zákon
(Magnetismus)

$$\text{div } \mathbf{B} = 0$$

$\mathbf{H}$ – vektor intenzity magnetického pole [A/m]

$\mathbf{E}$ – vektor intenzity elektrického pole [V/m]

$\mathbf{D}$ – vektor elektrické indukce [C/m²]

$\mathbf{B}$ – vektor magnetické indukce [T]

$\mathbf{J}_V$ – vektor hustoty vodivého proudu [A/m²]

t – čas [s]

ρ – hustota volného prostorového náboje [C/m³]

$$\mathbf{D} = \varepsilon * \mathbf{E}$$

$$\mathbf{B} = \mu * \mathbf{H}$$

$$\mathbf{J}_V = \sigma * \mathbf{E}$$

ε – permitivita prostředí [F/m]

μ – permeabilita prostředí [H/m]

σ – měrná elektrická vodivost prostředí [S/m]

Vlnová rovnice

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{\partial D}{\partial t} + \mathbf{J}_V = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$



$$\Delta \vec{E} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\Delta \vec{H} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0$$

Typy vln ve vlnovodu

Elektrické vlny (E-vlny) neboli transverzálně-magnetické vlny (TM-vlny)

- $E_z \neq 0$, $H_z = 0$
- podélná složka magnetického pole je nulová

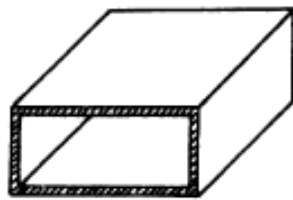
Magnetické vlny (H-vlny) neboli transverzálně-elektrické vlny (TE-vlny)

- $H_z \neq 0$, $E_z = 0$
- podélná složka elektrického pole je nulová

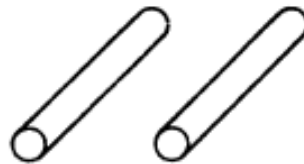
Transverzálně elektromagnetické vlny (TEM vlny)

- $E_z = 0$ i $H_z = 0$
- mohou se šířit pouze ve vybraných typech vlnovodů – dvou a více-vodičových vlnovodech

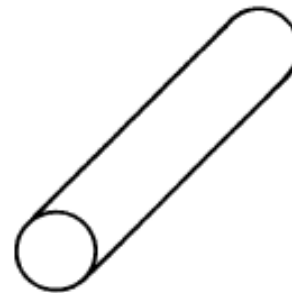
Typy vlnovodů



a)



e)



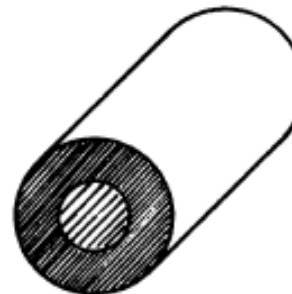
i)



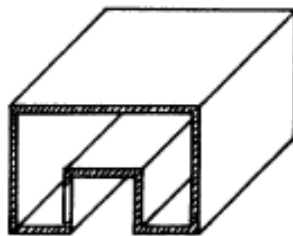
b)



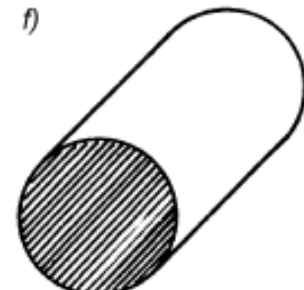
f)



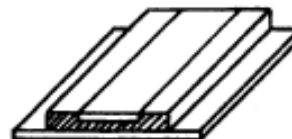
j)



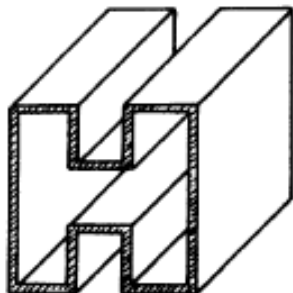
c)



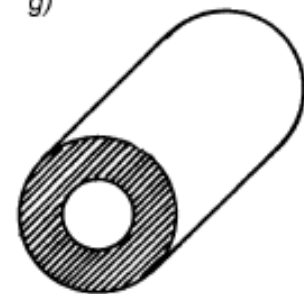
g)



k)



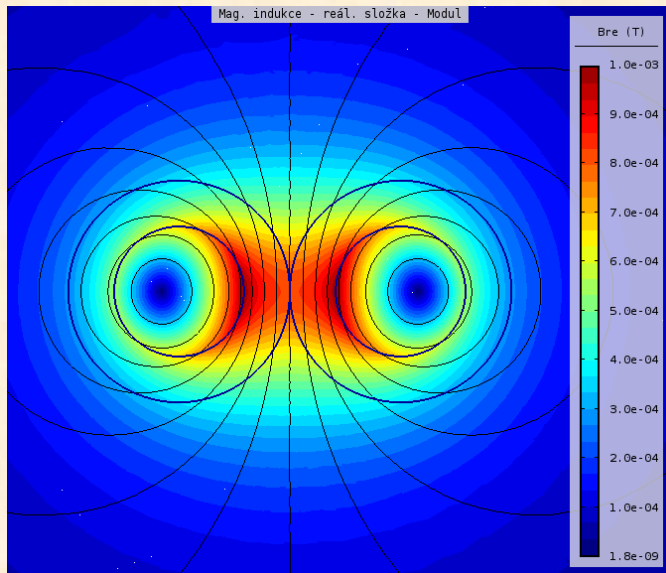
d)



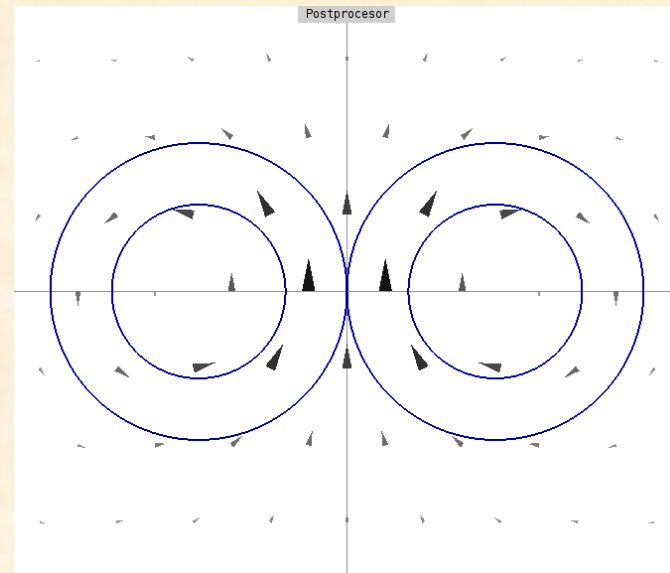
h)

Dvojlinka

- tzv. Lecherovo vedení
- přenáší metrové vlny
- při zvyšování frekvence rostou ztráty vyzařováním, protože je to otevřené vedení
- energie se šíří mezi vodiči
- snadno ovlivnitelné vnějšími poli



Siločáry magnetického pole

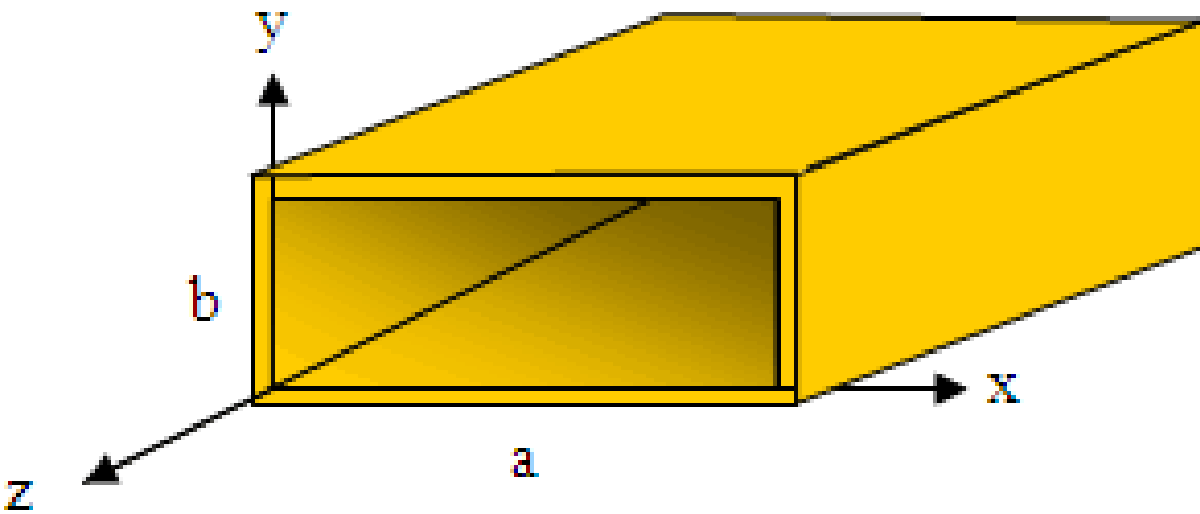


Vektory magnetické indukce

Vlnovod

- slouží k přenosu vysokofrekvenční energie s malými ztrátami
- ve VF a MW technice se používají převážně vícevidové vlnovody, tj. kovové trubky obdélníkového nebo kruhové průřezu, případně H nebo PI vlnovody
- vede elmag. vlnění až od **kritické frekvence**, vlnění nižší frekvence do vlnovodu nevstoupí
- ve vlnovodech se šíří vidy TE a TM, vid TEM ne
- kritická frekvence a pásmo jednovidovosti závisí na rozměrech
- materiály jsou mosaz, měď, hliník

Pravoúhlý vlnovod



Pravoúhlý vlnovod – řešení vlnové rovnice

E - vlny

$$E_x = -\frac{j\beta}{k^2} \frac{m\pi}{a} A \cos \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$E_y = -\frac{j\beta}{k^2} \frac{n\pi}{b} A \sin \frac{m\pi}{a} x \cos \frac{n\pi}{b} y e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$E_z = A \sin \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$H_x = \frac{j\omega\epsilon}{k^2} \frac{n\pi}{b} A \sin \frac{m\pi}{a} x \cos \frac{n\pi}{b} y e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$H_y = -\frac{j\omega\epsilon}{k^2} \frac{m\pi}{a} A \cos \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$H_z = 0$$

H - vlny

$$E_x = \frac{j\omega\mu}{k^2} \frac{n\pi}{b} B \cos \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y e^{j(\omega t - \beta z)}$$

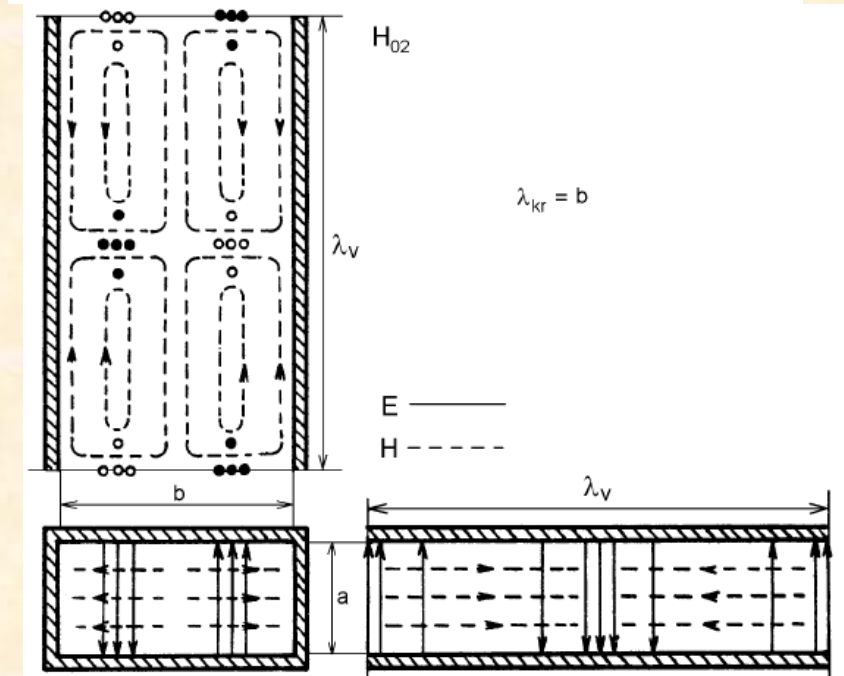
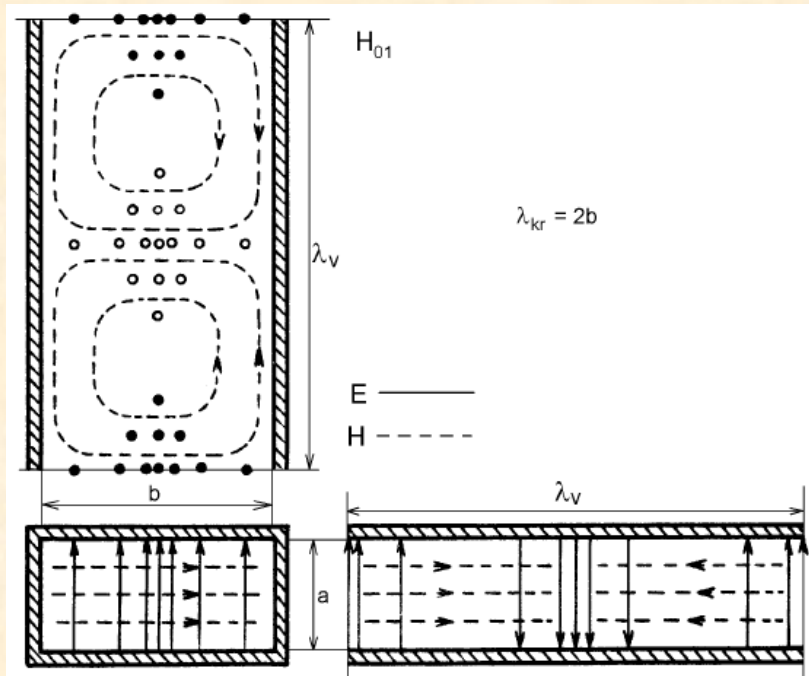
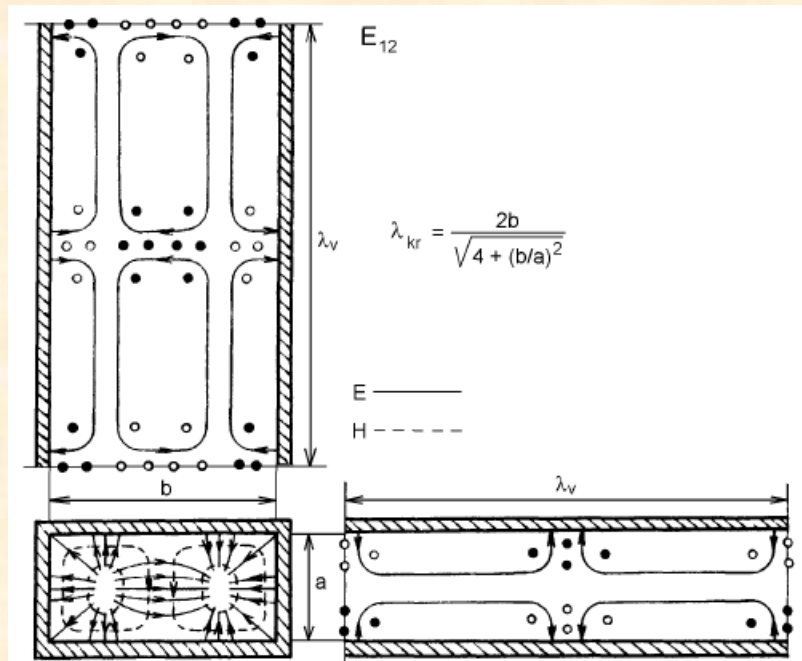
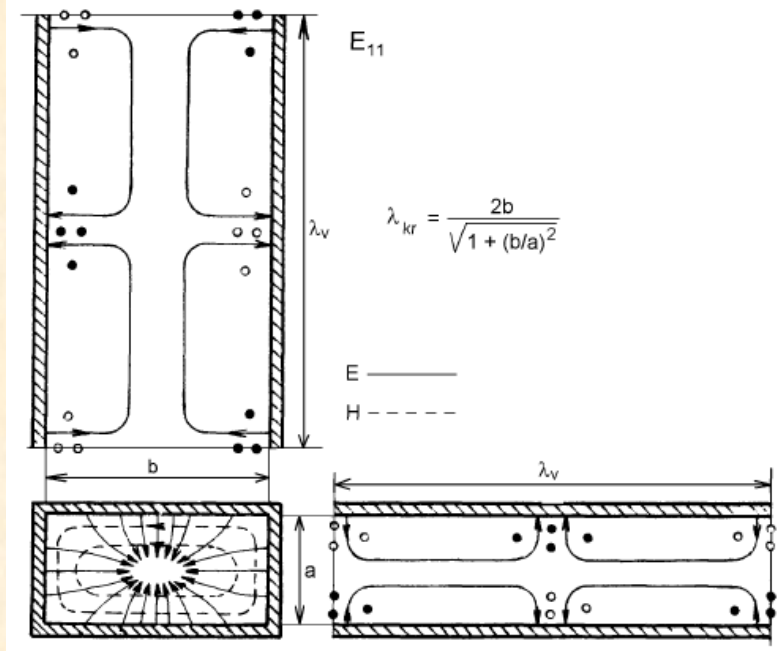
$$E_y = -\frac{j\omega\mu}{k^2} \frac{m\pi}{a} B \sin \frac{m\pi}{a} x \cos \frac{n\pi}{b} y e^{j(\omega t - \beta z)}$$

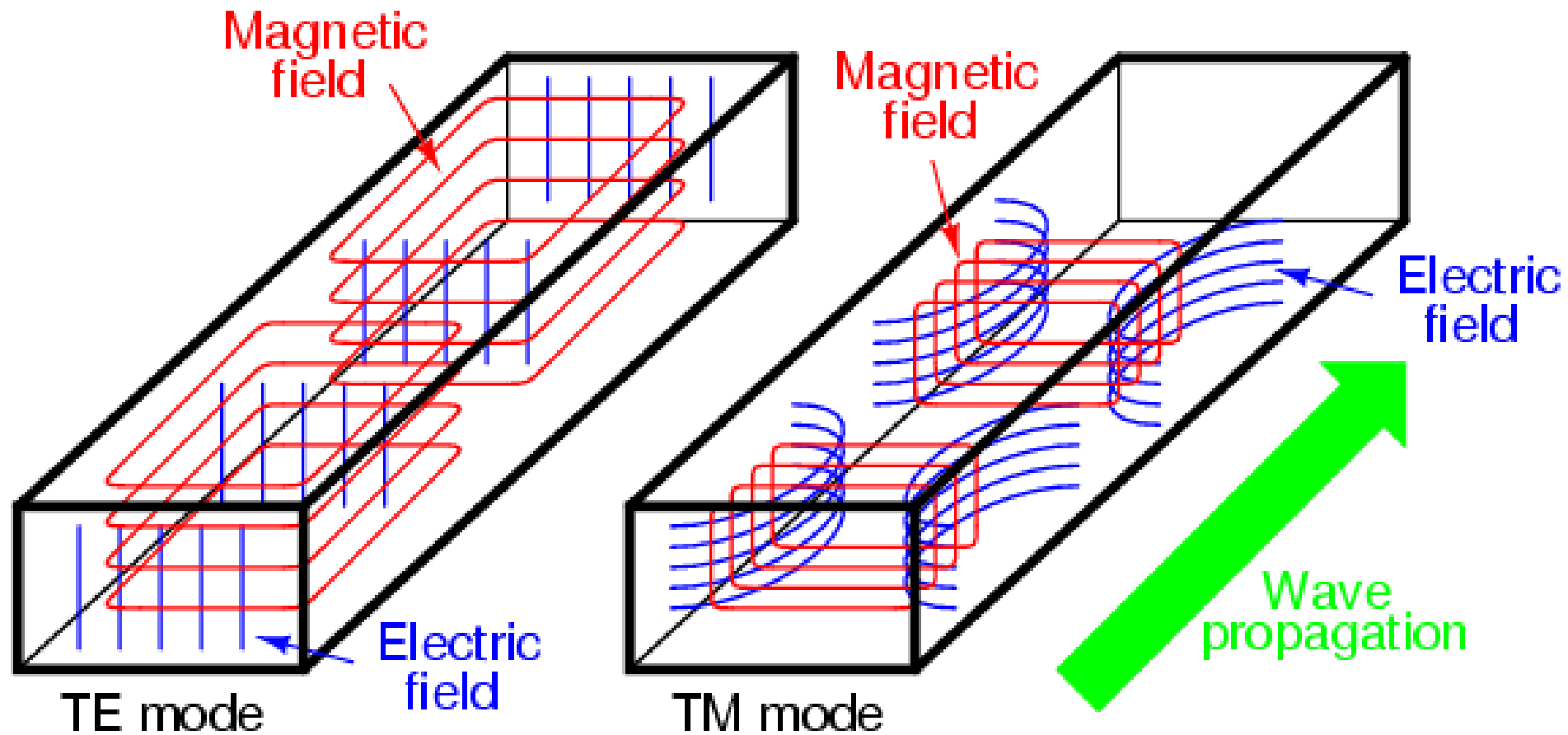
$$E_z = 0$$

$$H_x = \frac{j\beta}{k^2} \frac{m\pi}{a} B \sin \frac{m\pi}{a} x \cos \frac{n\pi}{b} y e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$H_y = \frac{j\beta}{k^2} \frac{n\pi}{b} B \cos \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y e^{j(\omega t - \beta z)}$$

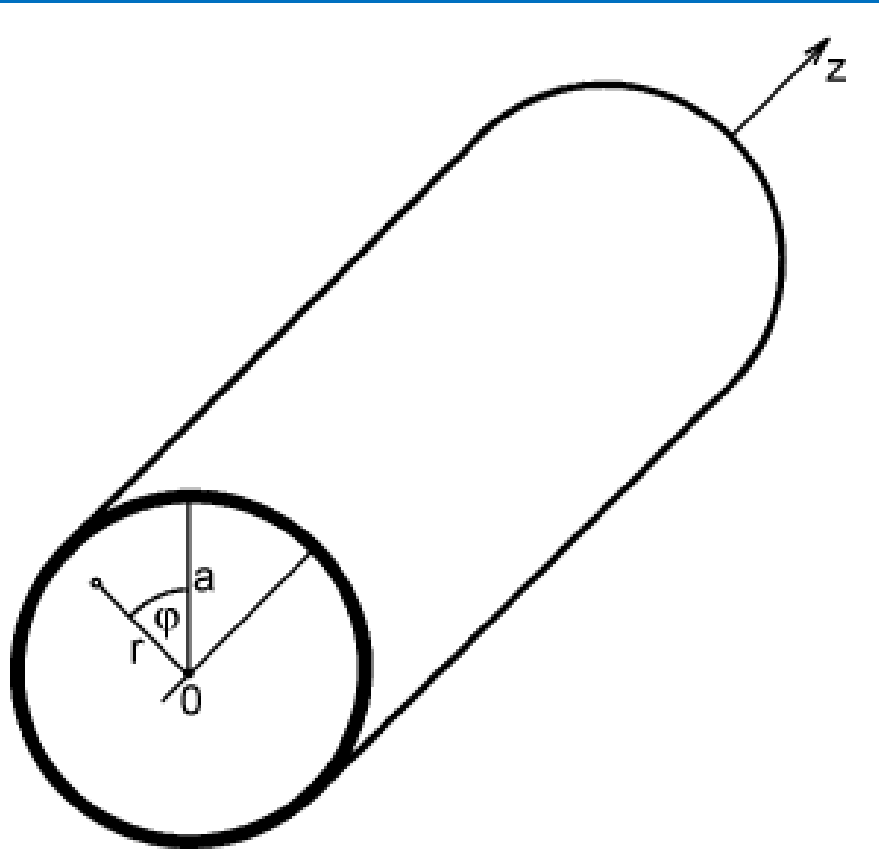
$$H_z = B \cos \frac{m\pi}{a} x \cos \frac{n\pi}{b} y e^{j(\omega t - \beta z)}$$





Magnetic flux lines appear as continuous loops
Electric flux lines appear with beginning and end points

Kruhový vlnovod



Kruhový vlnovod – řešení vlnové rovnice

E - vlny

$$E_r = -\frac{j\beta}{k} B J'_m(kr) \cos m\varphi e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$E_\varphi = \frac{j m \beta}{k} B \frac{J_m(kr)}{kr} \sin m\varphi e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$E_z = B J_m(kr) \cos m\varphi e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$H_r = -\frac{j m \omega \epsilon}{k} B \frac{J_m(kr)}{kr} \sin m\varphi e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$H_\varphi = -\frac{j \omega \epsilon}{k} B J'_m(kr) \cos m\varphi e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$H_z = 0;$$

H - vlny

$$E_r = \frac{j m \omega \mu}{k} A \frac{J_m(kr)}{kr} \sin m\varphi e^{j(\omega t - \beta z)}$$

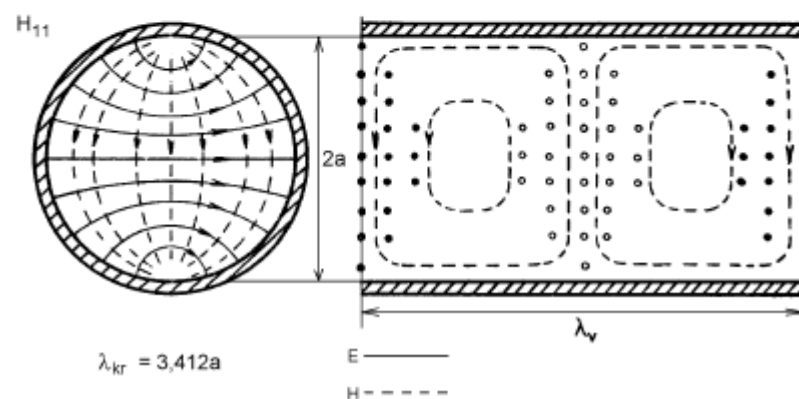
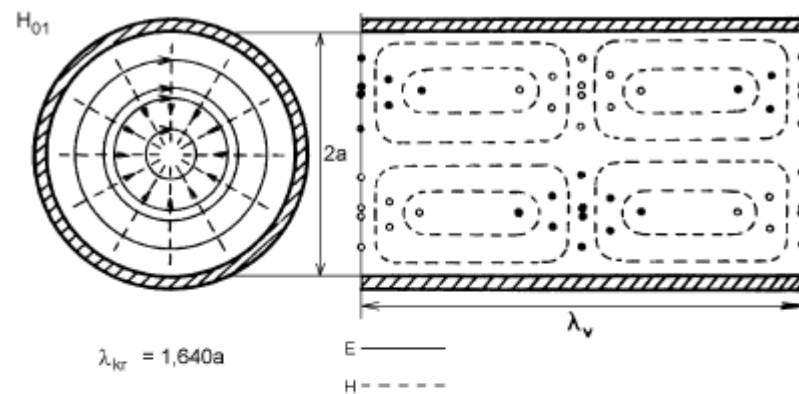
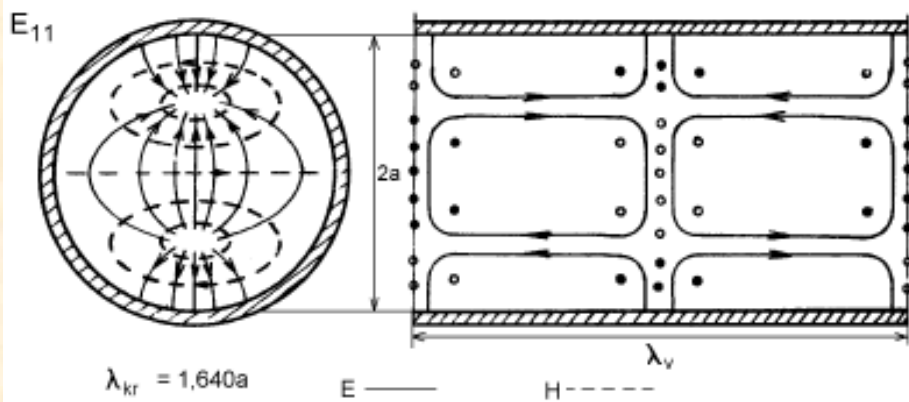
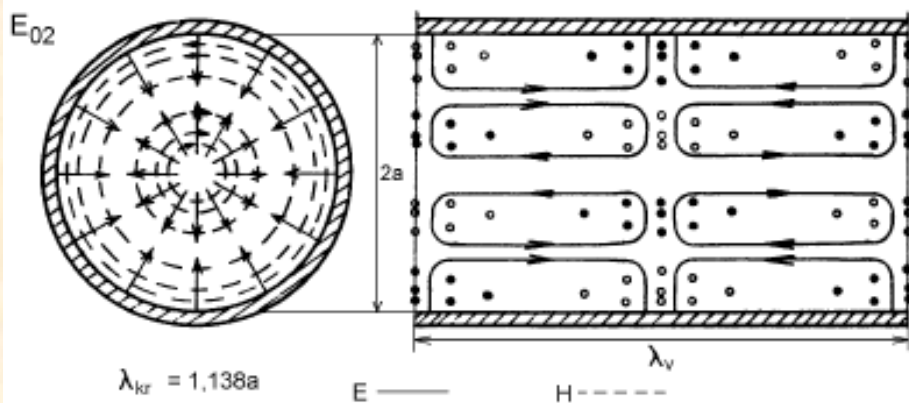
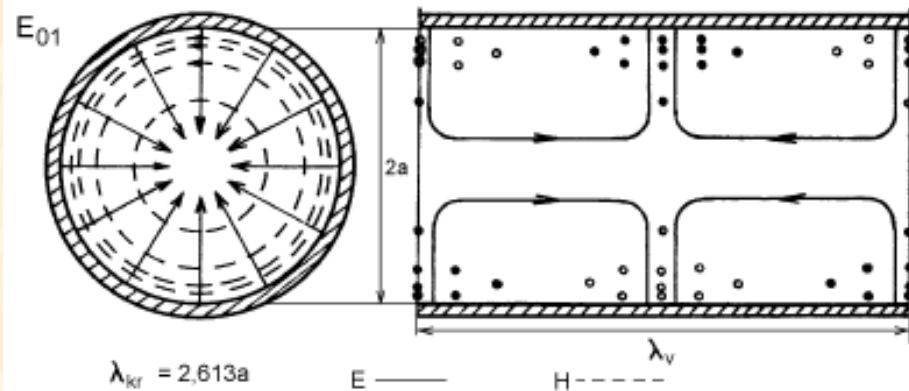
$$E_\varphi = \frac{j \omega \mu}{k} A J'_m(kr) \cos m\varphi e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$E_z = 0$$

$$H_r = -\frac{j\beta}{k} A J'_m(kr) \cos m\varphi e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$H_\varphi = -\frac{j m \beta}{k} A \frac{J_m(kr)}{kr} \sin m\varphi e^{j(\omega t - \beta z)}$$

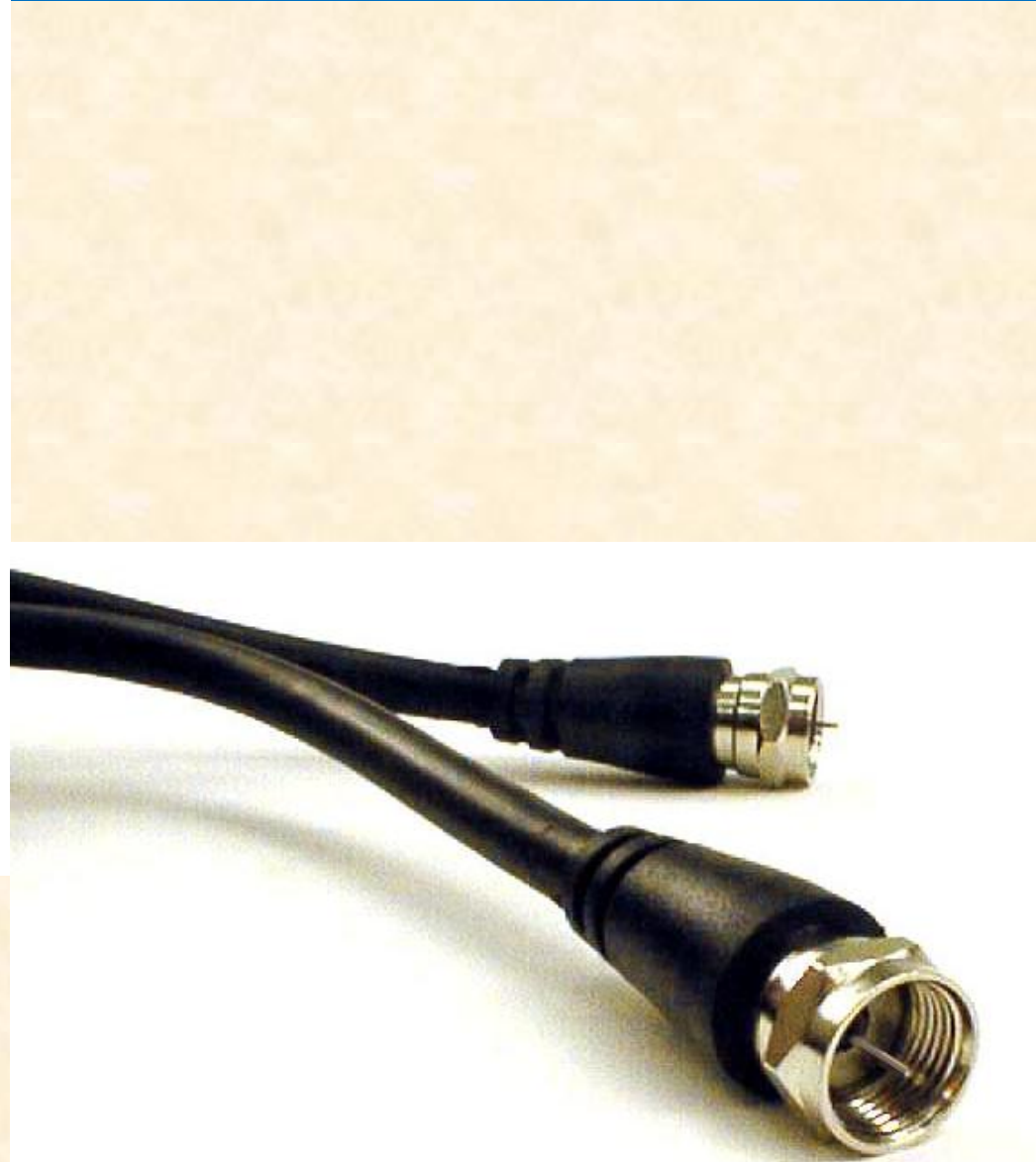
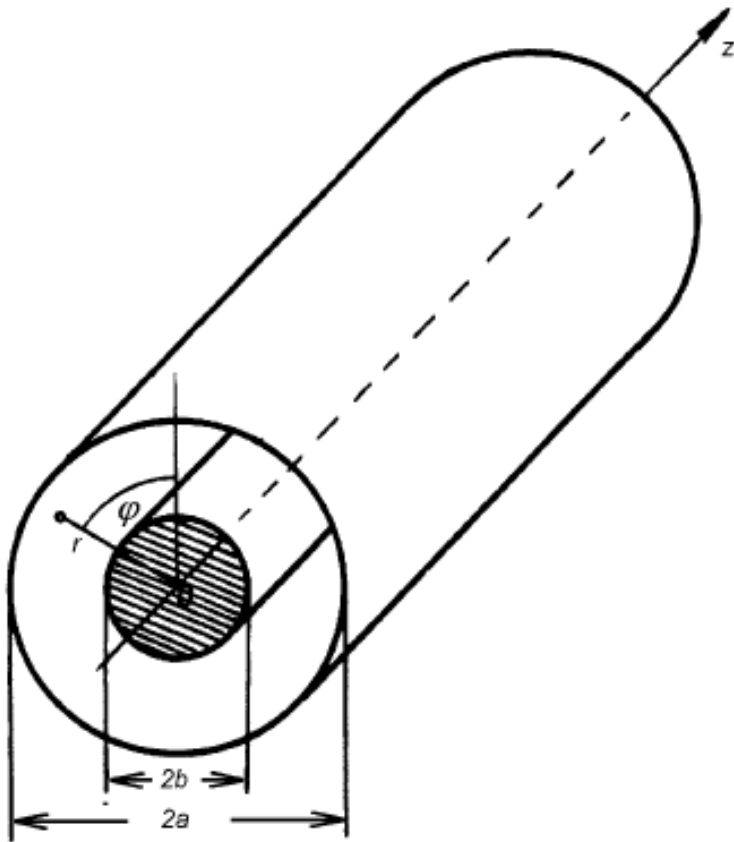
$$H_z = A J_m(kr) \cos m\varphi e^{j(\omega t - \beta z)}$$

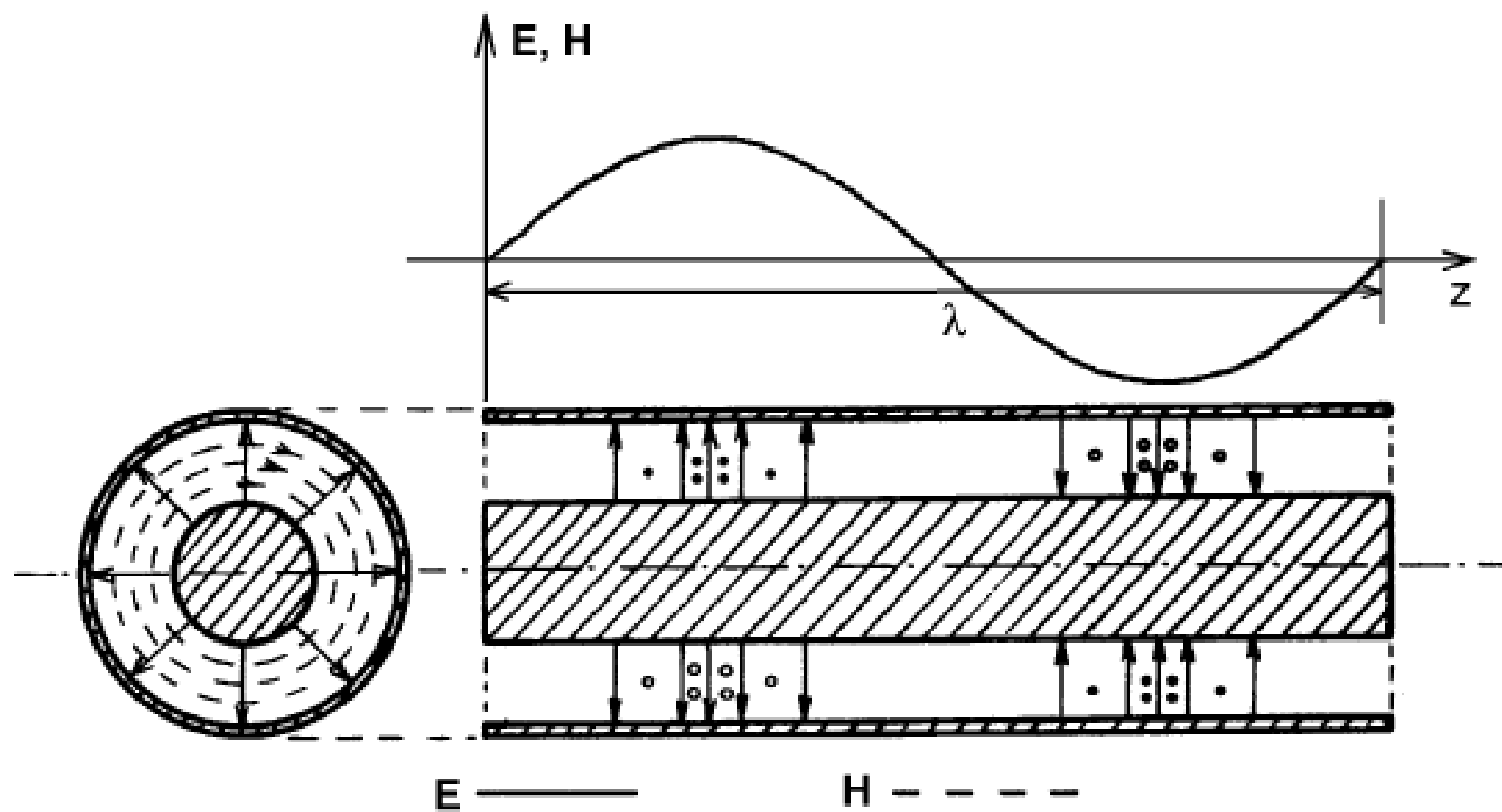


Koaxiální vedení

- přenáší decimetrové vlny
- výhodou je ohebnost, používá se na propojování
- vnitřní a vnější vodič jsou odděleny dielektrickou vrstvou
- vně není elmag. pole – nedá se ovlivnit vnějším polem
- obecně je pásmo použitelnosti shora ohraničeno mezní frekvencí dominantního vlnovodového vidu TE_{11} , jehož šíření ve vlnovodu je nežádoucí
- typická impedance je 50Ω a 75Ω
- speciální typy koaxiálů přenáší i milimetrové vlny

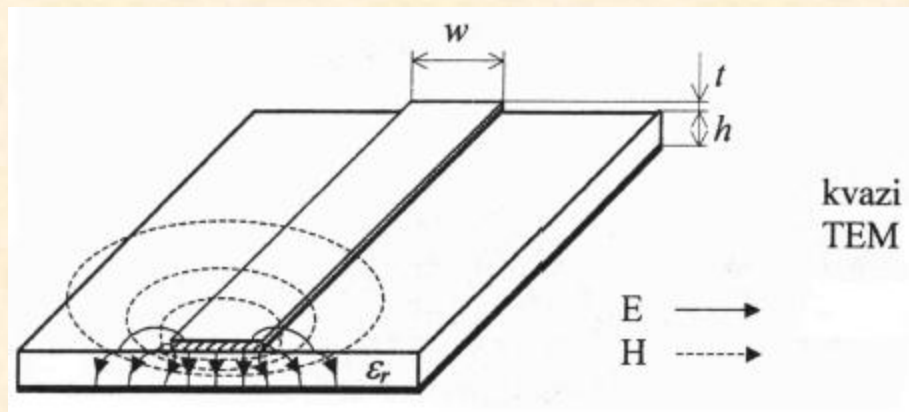
Koaxiální vedení





Mikropáskové vedení

- snadno se vyrábí a osazuje součástkami
- dielektrická destička vyrobená ze substrátu (teflon, laminát) s kovovým proužkem navrchu, spodní část destičky je pokovená
- šíří se po něm vlna podobná TEM, ale s rostoucí frekvencí přibývají složky E a H i ve směru šíření – tzv. *kvazi* TEM
- elmag. pole se šíří vzduchem i dielektrickým substrátem destičky



Mikrovlny a fyzika plazmatu

Mikrovlenné plazma

- Bezelektrodové – čisté
- Velké rozměry, relativně homogenní
- Hoří za různých tlaků – za nízkého tlaku i za atmosféry
- (Nízké pořizovací náklady)

Diagnostika plazmatu

Mikrovlenná interferometrie, EPR – diagnostika

Základní a aplikovaný výzkum

- Urychlovač částic – lineární, kruhový
- Zažehnutí fúze – přehřívání plazmatu – 100GHz
- Radiometrie v astronomii
- Dálkový průzkum země

vlnová délka (nm) viditelné spektrum

