

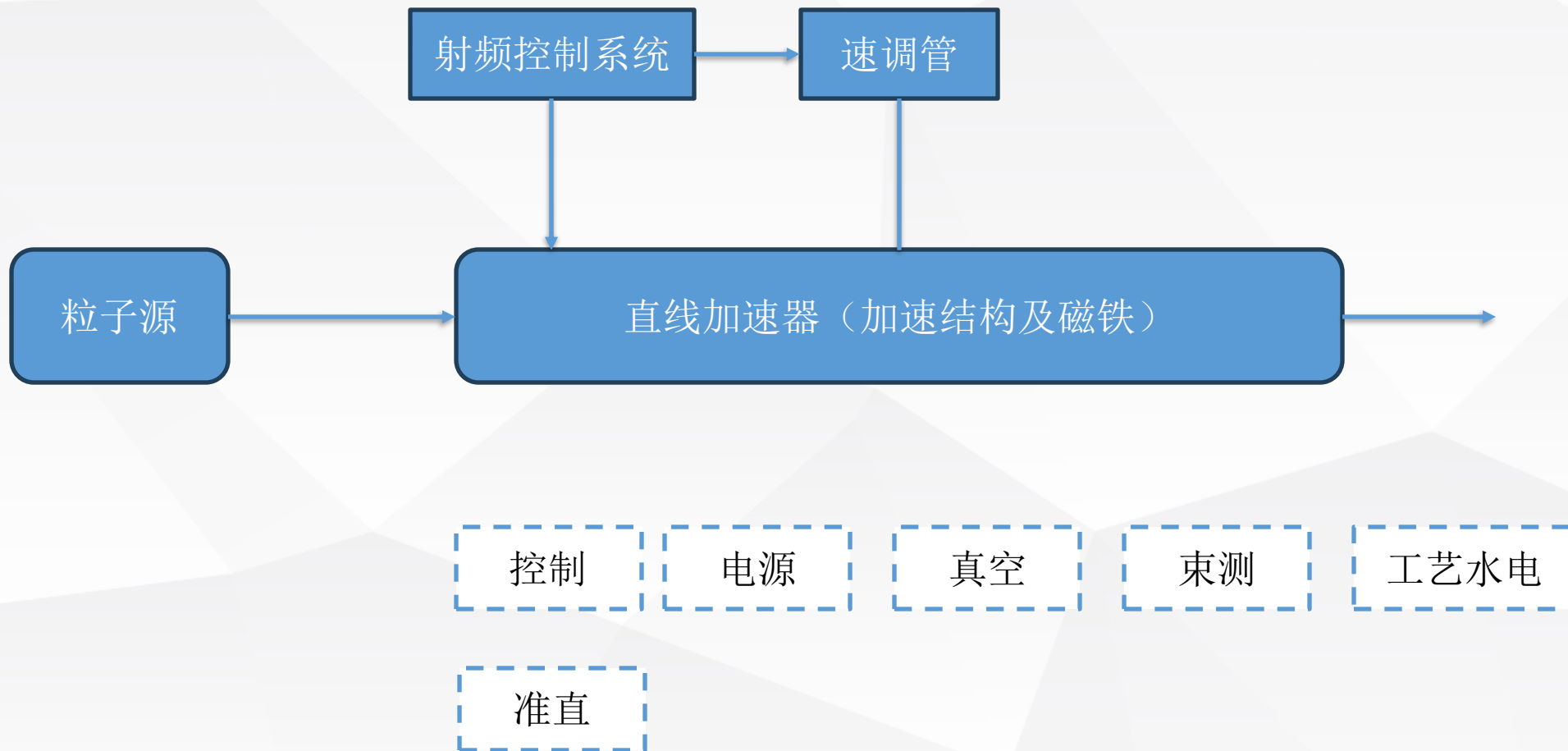
# 射频直线加速器（一）

射频直线加速器基础

刘星光

2024年12月9日

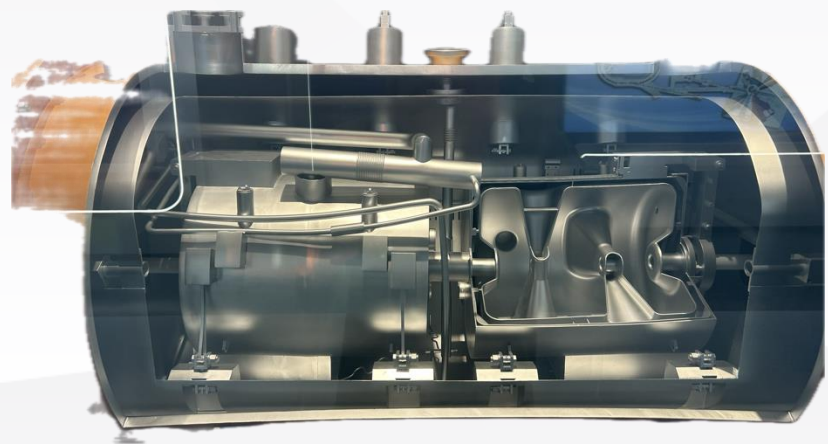
# 射频直线加速器的系统构成



# 加速腔体的选择

- 相互独立的腔体

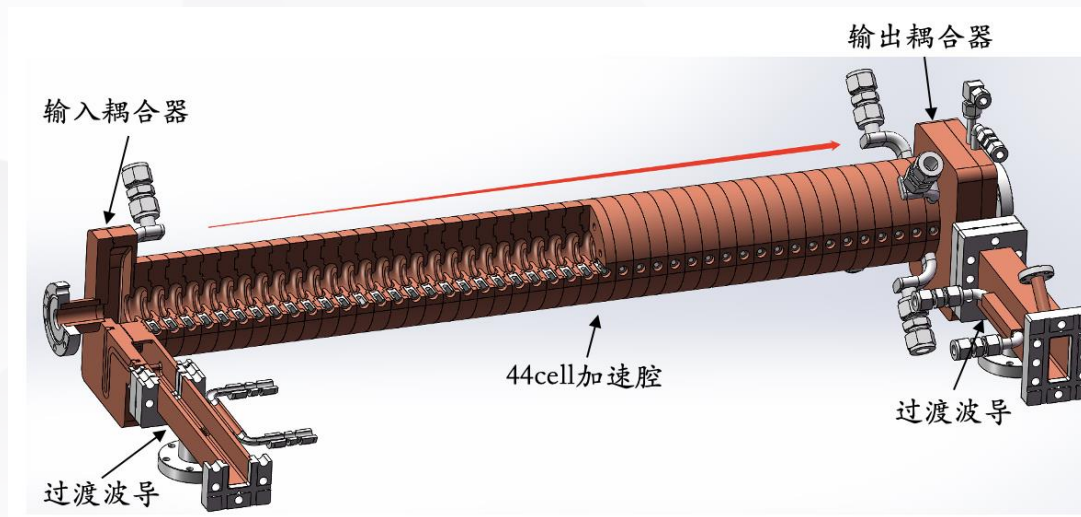
单独调节加速幅值及相位  
常用于低 $\beta$ 超导加速结构



CSNS-II 椭球腔超导加速结构

- 包含多个加速单元的结构

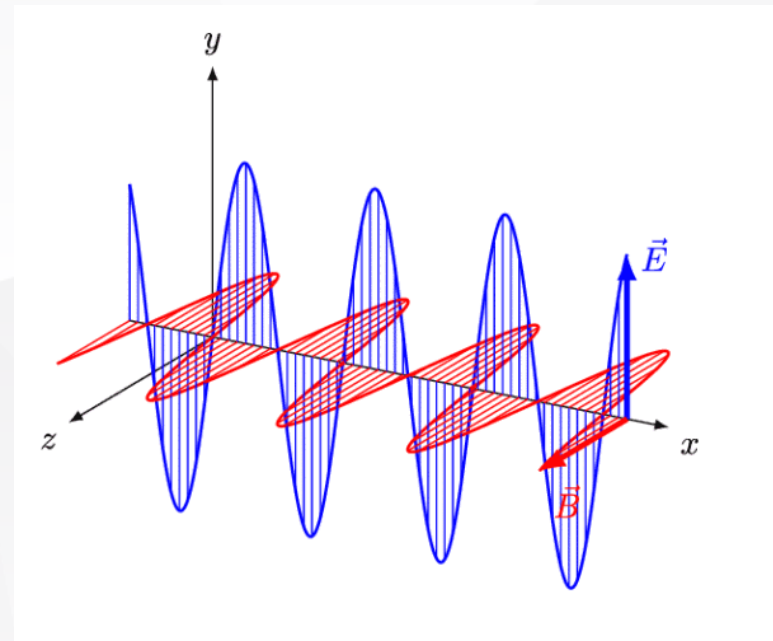
高梯度加速  
例如用于加速电子的行波管



1m长C波段行波管加速结构

# 真空中平面波的主要性质及参数

- 时间参数:  $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$
- 空间参数:  $k = 2\pi/\lambda_z$
- 空间与时间的关系:  $v_{ph} = \frac{\omega}{k_z} = \lambda_z f = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$
- 波阻抗:  $\eta = \frac{E_+}{H_+} = -\frac{E_-}{H_-}$ , 真空中为  $377 \Omega$
- 功率流及储能:  $S_z = \frac{1}{2} E_+^2 / \eta$ ,  $\frac{\epsilon E^2}{2} = \frac{\mu H^2}{2}$



# 圆柱波导内电磁场传播

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 j + \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \vec{E}$$

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{B} = 0$$

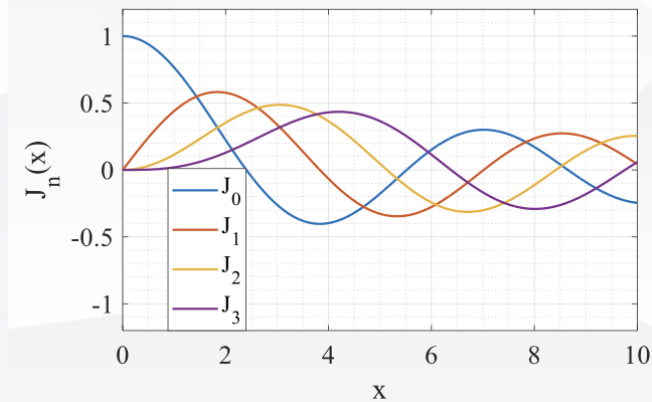
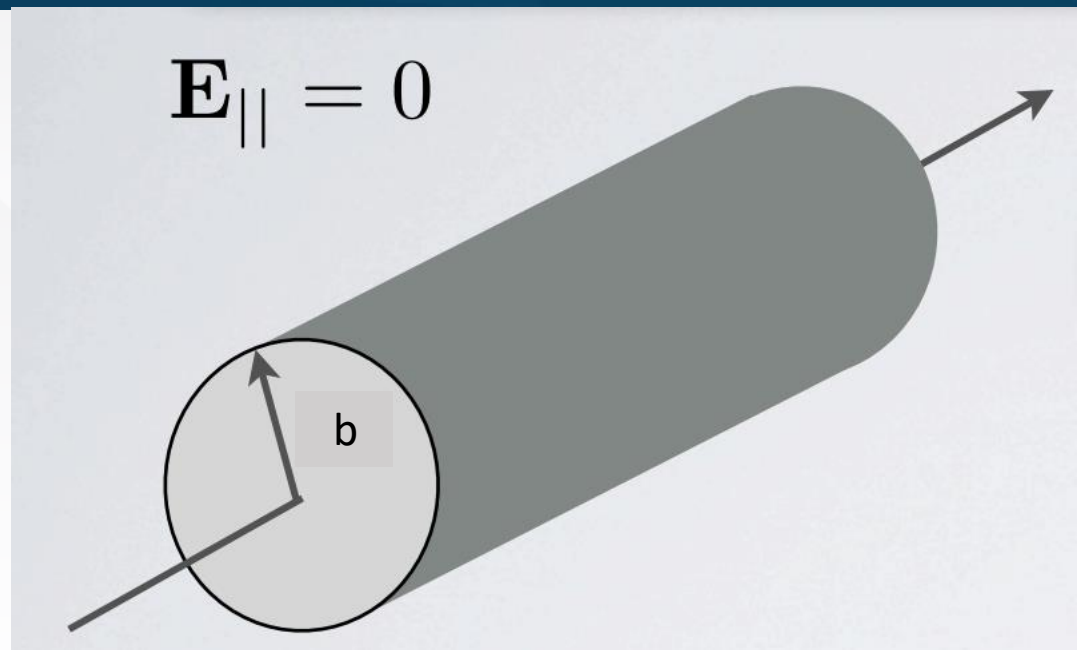
极坐标下令  $E_{||} = 0$

$$E_z = E_0 J_0(k_c r) e^{-jk_z z} e^{j\omega t}$$

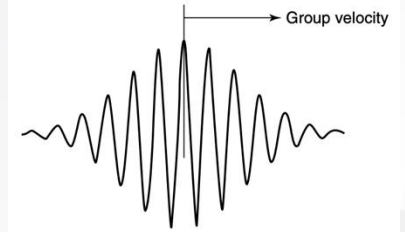
$$E_r = j \frac{k_z}{k_c} E_0 J_1(k_c r) e^{-jk_z z} e^{j\omega t}$$

$$H_\phi = j \frac{k}{Z_0 k_c} E_0 J_1(k_c r) e^{-jk_z z} e^{j\omega t}$$

$$\mathbf{E}_{||} = 0$$



- 与自由真空内不同，多种不同模式（频率等）的电磁场均可在波导内传播
- 可用于加速的模式为中心轴上为电场 $E_z$  (最简单的为TM01模)
- 定义“相速度” ( $v_{ph}$ )，及色散关系

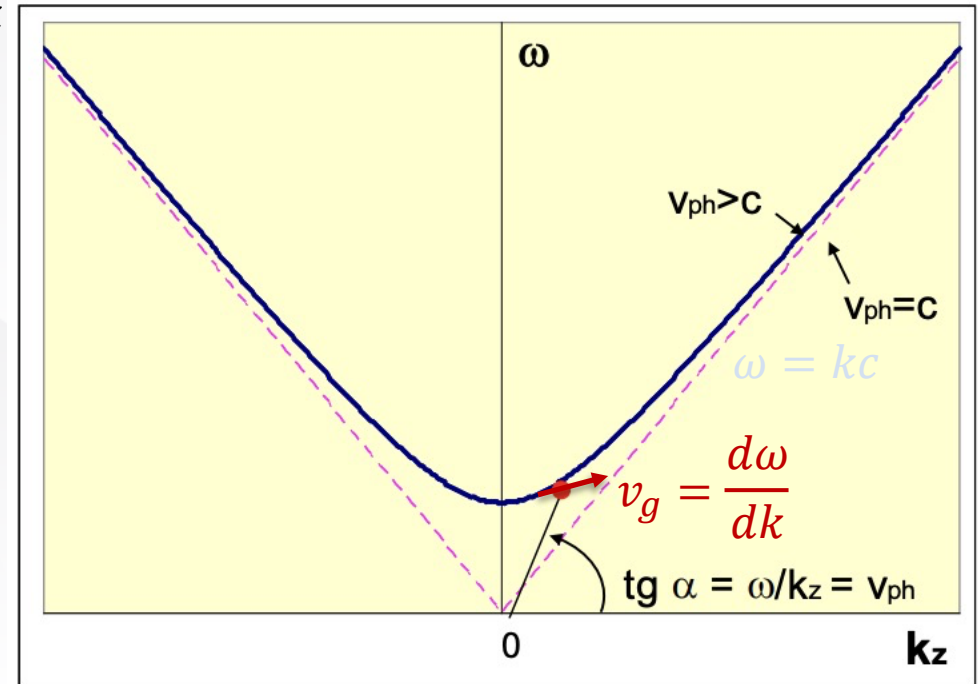
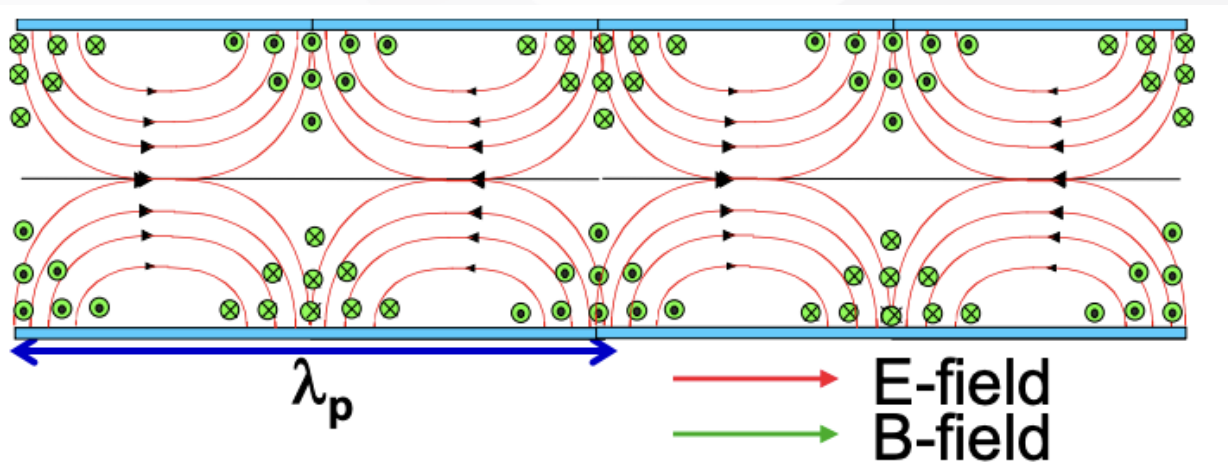


$$\omega^2 = k^2 c^2 + \omega_c^2$$

$$v_{ph} = \lambda_p f = \omega/k$$

其中  $\omega_c$  为截止频率

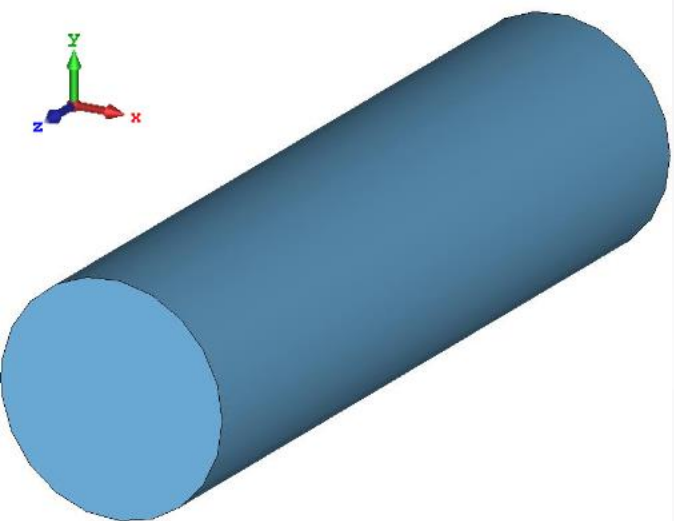
对于圆柱波导，对应的波长  $\lambda_c = 2.61b$ ， $b$  为圆柱波导半径



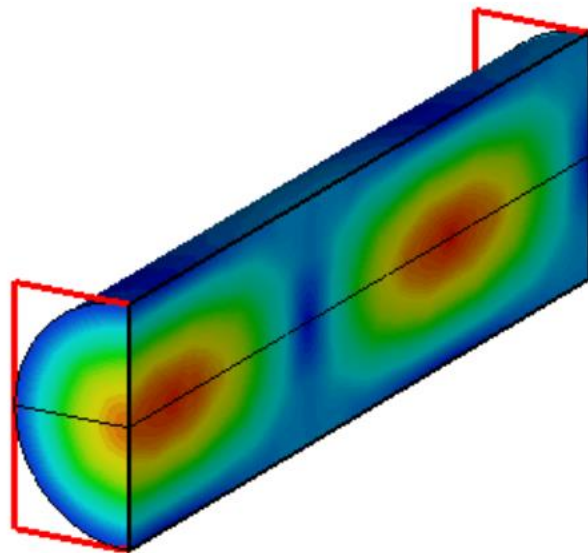
色散关系（传播特性曲线）及相速度

# 圆柱波导中电磁场的传播

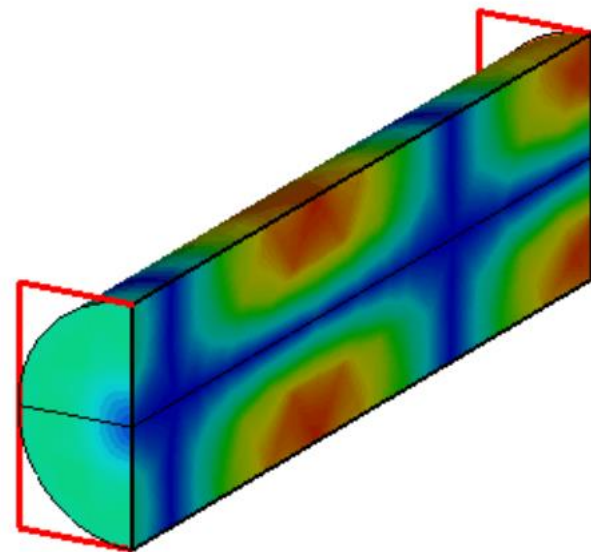
( $\omega > \omega_c$ , 延z方向传播)



$TM_{01} E$



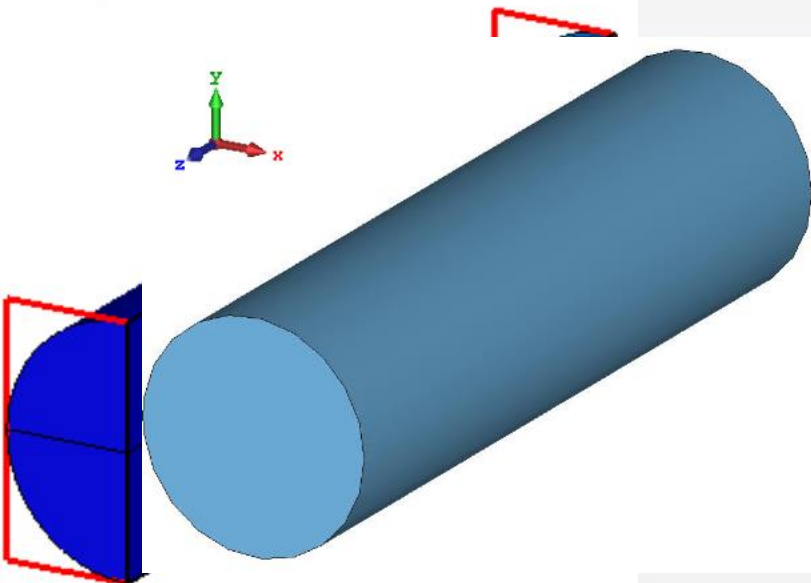
$TM_{01} H$



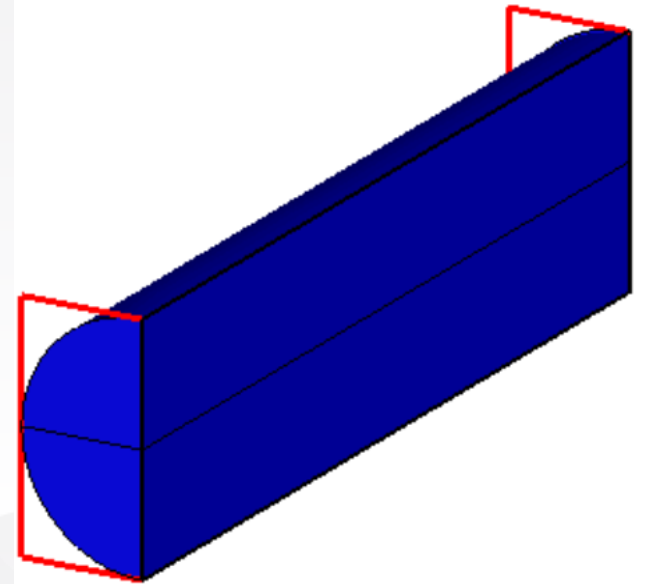
# 圆柱波导中电磁场的传播

( $\omega < \omega_c$ , 迅速衰减)

$TM_{01} E$

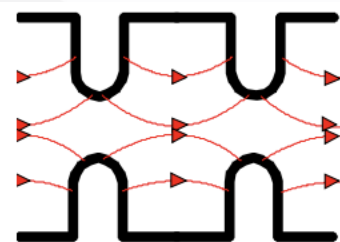
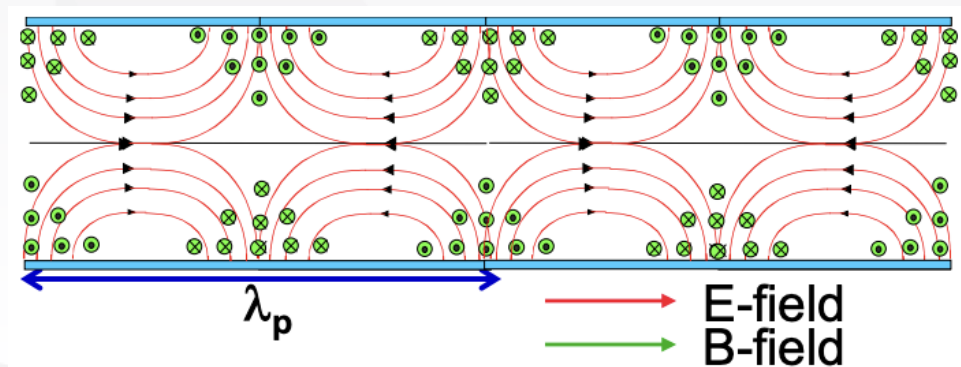
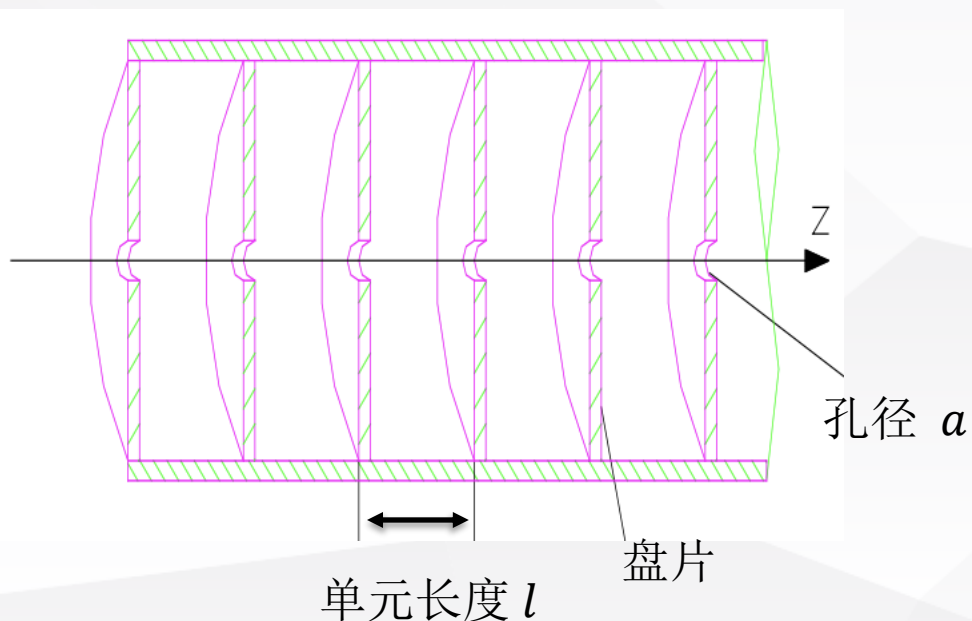


$TM_{01} H$

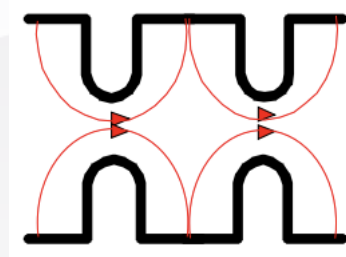


# 用于电子加速的行波管加速结构

- 注意到  $v_{ph} > c$ , 为了能与带电粒子保持同步, 我们需要降低相速度



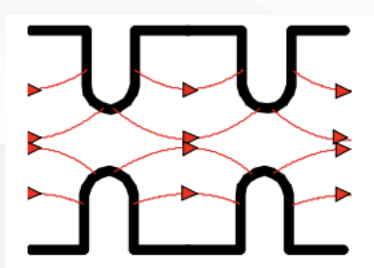
Mode-A



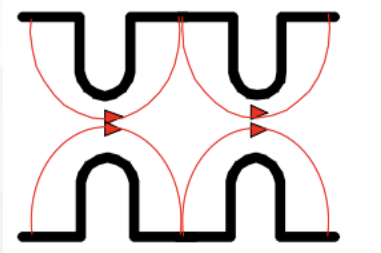
Mode-B

盘片间波的反射大大增加, 不那么容易向下游传播, 达到了降低相速度的目的

# 加入盘片后色散关系（传播特性曲线）的变化



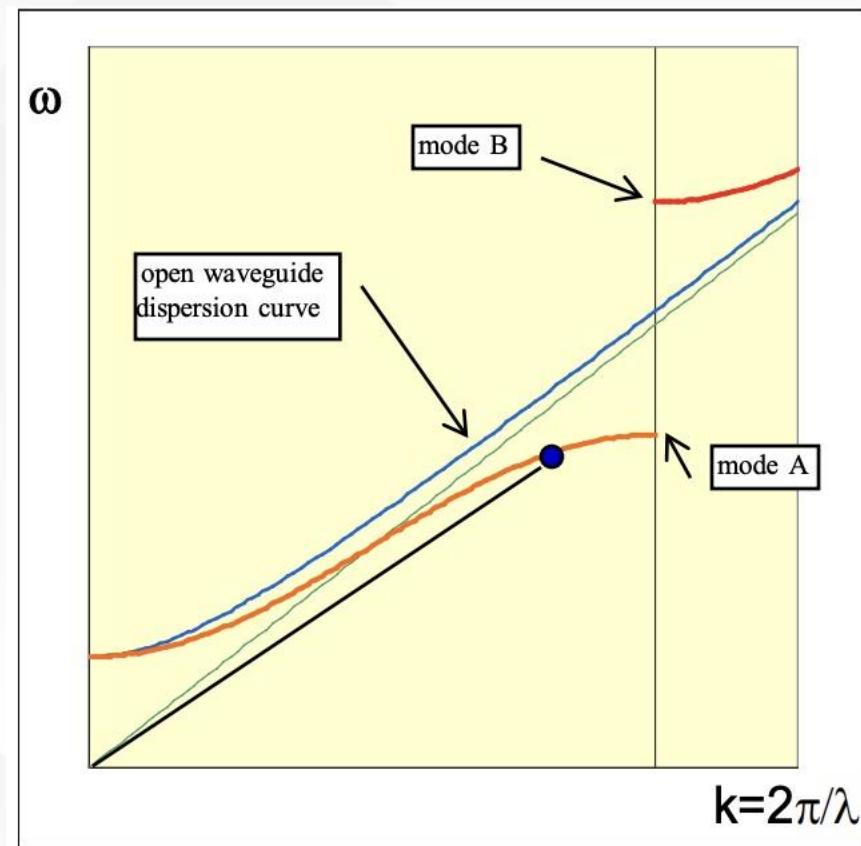
Mode-A



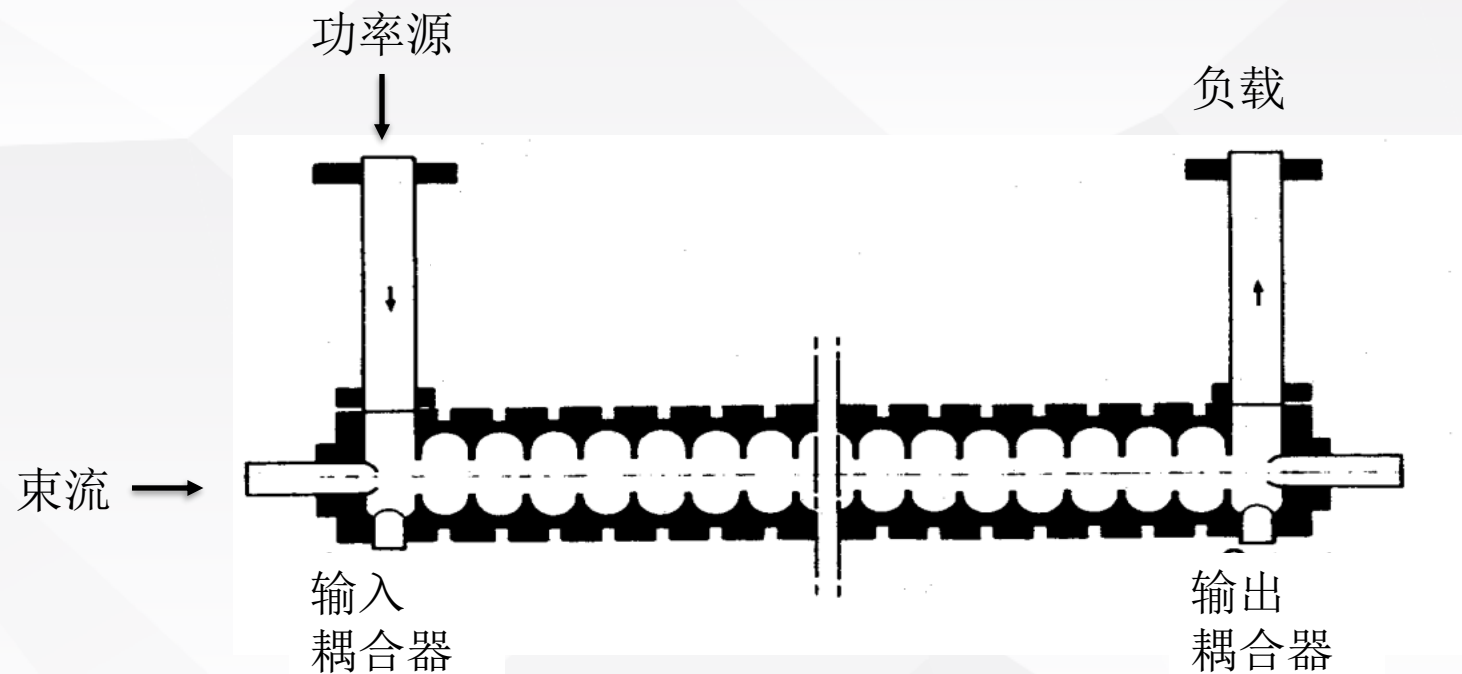
Mode-B

假设按  $l = \lambda_p/2$  设置盘片:

- Mode-A与Mode-B对应的波将出现分离
- Mode-A将有一个特定频率满足  $v_{ph} \sim c$ , 可用于加速电子



# 用于电子的行波管加速结构



- 对于特定的微波频率，设计盘片结构使其 $v_{ph} \sim c$
- 微波通过输入耦合器馈入结构向下游传播并加速电子束流，结构末端配备输出耦合器将多余的功率用负载吸收
- 功率都去哪儿了：
  - 部分在建场时被结构吸收（发热）
  - 部分用于加速束流（束流负载效应）
  - 剩余的输出到负载（一般30%左右）



该种结构可用于加速质子重离子吗？