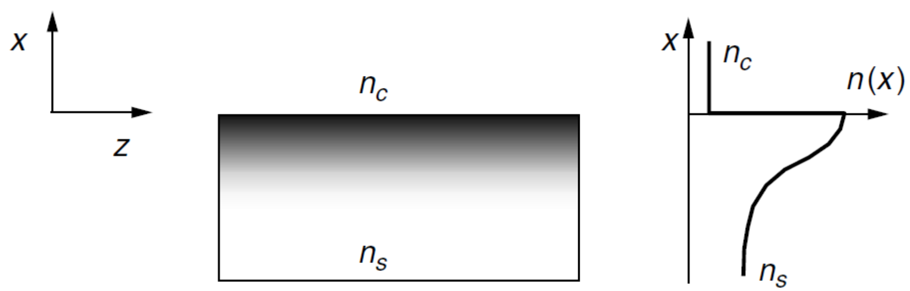
第四章 光波导原理

光波导原理

- 4.1 平板型介质光波导
- 4.2 通道型介质光波导
- 4.3 光纤
- 4.4 新型光波导

4.1 平板型介质光波导

- 平板光波导中的模式类型
- 二维波导中的TE和TM模式
- 导波模式的射线光学分析
- 平板波导中的波动方程及其通解
- 阶跃平板波导中的导波模式
- ✓ 渐变折射率平板波导

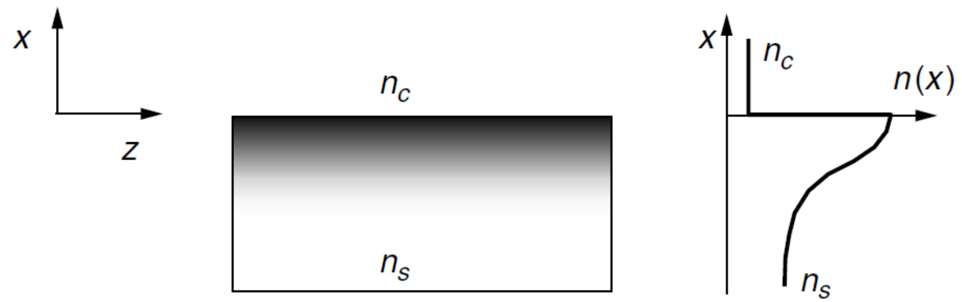


渐变折射率平板波导

渐变折射率平板波导

阶跃折射率波导：沉积技术；n_c, n_f, n_s均为常数.

渐变折射率波导：扩散技术； n_c, n_s为常数，$n_f=n_f(x)$.



渐变折射率平板波导结构示意图及折射率分布

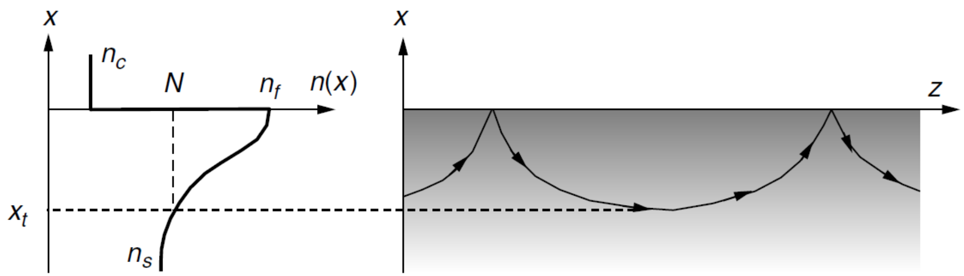
问题：已知折射率分布，如何计算模式的有效折射率以及场分布？

- 光线近似方法
- 多层近似方法

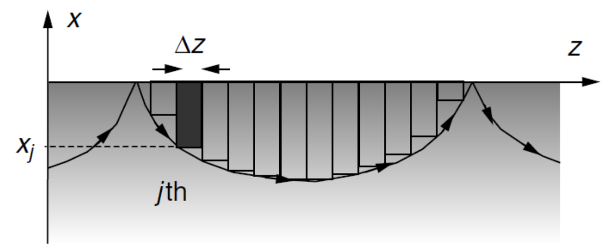
光线近似方法

基本思想

1. 导波模式必须实现相长干涉；
2. 路径决定了相位移（差）；
3. 光线不再遵循曲折路径，而是连续的改变方向.

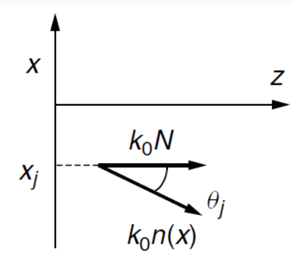


模式有效折射率N对应于最大渗透深度转折点x_t



传输角度 θ_j $\cos\theta_j = \dfrac{N}{n(x_j)}$ $0 \le x_j \le x_t, 0 \le \theta_j \le \pi/2$

沿-x前进Δx_j相位移$\Delta\Phi_j$



$$\Delta\phi_j = \underbrace{k_0 n(x_j)\sin\theta_j}_{k_x}\Delta x_j = k_0\sqrt{n^2(x_j) - N^2}\,\Delta x_j$$

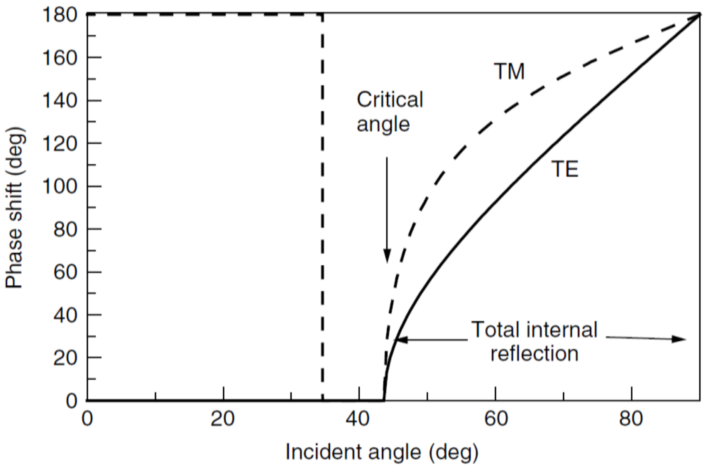
光线近似方法

相长干涉：$\sum\Delta\phi_j-\phi_c-\phi_t=2m\pi$

$$\phi_c(x=0)=\pi;\phi_t(x=x_t)=\frac{\pi}{2}$$

$$\sum\Delta\phi_j=\left(2m+\frac{3}{2}\right)\pi$$

$$\Delta\phi_j=k_0\sqrt{n^2(x_j)-N^2}\Delta x_j$$



$$2k_0\int_0^{x_t}\underbrace{\sqrt{n^2(x)-N^2}}_{?}dx=(2m+\frac{3}{2})\pi$$

$$b\equiv\frac{N^2-n_s^2}{n_f^2-n_s^2}$$

【归一化模式折射率】

$$V_d\equiv k_0d\sqrt{n_f^2-n_s^2}$$

【归一化渗透深度】

$$n^2(x)\approx n_s^2+(n_f^2-n_s^2)f\left(\frac{x}{d}\right)$$

渐变折射率分布：

$$n(x)=n_s+\Delta nf(\frac{x}{d})$$

$$\Delta n\ll n_s,0<f(\frac{x}{d})<1$$

$$n_f=n_s+\Delta n$$

d表示扩散或渗透深度

导波模式色散方程：$2V_d\int_0^{\xi_t}\sqrt{f(\xi)-b}d\xi=\left(2m+\frac{3}{2}\right)\pi$ $\quad[\xi\equiv\frac{x}{d},\xi_t\equiv\frac{x_t}{d}]$

光线近似方法

导波模式的色散方程： $2V_d\int_0^{\xi_t}\sqrt{f(\xi)-b}\,d\xi=\left(2m+\frac{3}{2}\right)\pi$

$\xi\equiv\frac{x}{d},\xi_t\equiv\frac{x_t}{d}$

截止条件(高斯分布)： $b\approx 0,\ f(\xi)=e^{-\xi^2}$

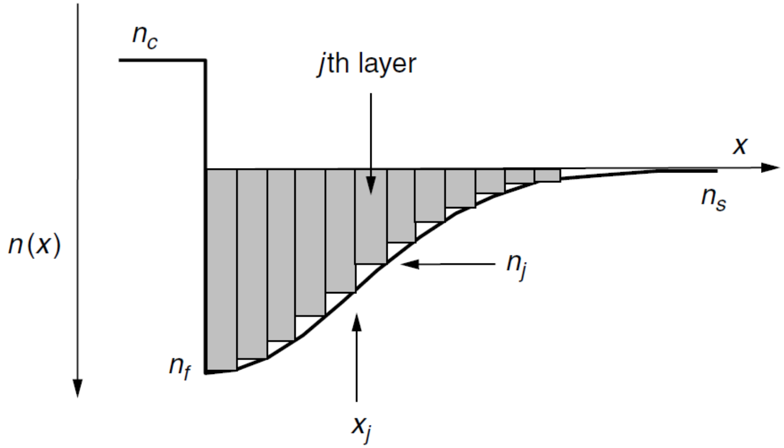
$x_t\to\infty,\int_0^{\infty}\sqrt{e^{-\xi^2}}\,d\xi=\sqrt{\frac{\pi}{2}}$

$$\left.\begin{array}{l}\\\\\end{array}\right\} V_{dm}=\sqrt{2\pi}(m+\frac{3}{4})$$

优点: 对于光滑折射率分布有效，易于求解

不足: 不能提供模式场分布

多层近似方法



多层近似分析渐变折射率平板波导示意图

折射率分布：

$$n(x) = n_s + \Delta n \exp\left[-\left(\frac{x}{d}\right)^2\right]$$

$$n_s = 2.2030[LiNbO_3], \Delta n = 0.0395, d = 2\mu m$$

$$n_f = n_s + \Delta n = 2.2425$$

$$n_c = 1$$

$$\lambda_0 = 0.633\mu m$$

基本思想：基于非对称性阶跃平板波导所得到的解，将非均匀芯区的阶跃折射率分离成有限数量的常数折射率.

实施

1. 将渐变区分成p个薄层，整个波导为$p+1$层，每一层有常数折射率$n_j(j=0,1,\ldots\ldots,p)$，其中$n_0=n_c, n_p=n_s$.总共有$p$个边界.

多层近似方法

2. 每一层均匀层中波方程：$\dfrac{d^2E_y(x)}{dx^2}+[k_0^2n^2-\beta^2]E_y(x)=0$

通解（在第j层，j=0,1,……p）：$E_j(x)=A_j\exp\left[i\gamma_j(x-x_j)\right]+B_j\exp\left[-i\gamma_j(x-x_j)\right]$

$$\gamma_j=\sqrt{k_0^2n_j^2-\beta^2},\qquad N=\beta/k_0$$

$N<n_j$,正弦解;　$N>n_j$,指数解

边界条件：
$$\begin{cases} E_j=E_{j+1} & x=x_j \quad (j=1,2...,p) \\ \dfrac{dE_j}{dx}=\dfrac{dE_{j+1}}{dx} & x=x_j \quad (j=1,2...,p) \end{cases}$$

代入边界条件之后得到方程（组）：$F(A_0,A_1,......A_p,B_0,B_1,......B_p,N,\lambda_0)=0$

导波模式：A_0=1, B_0=0.

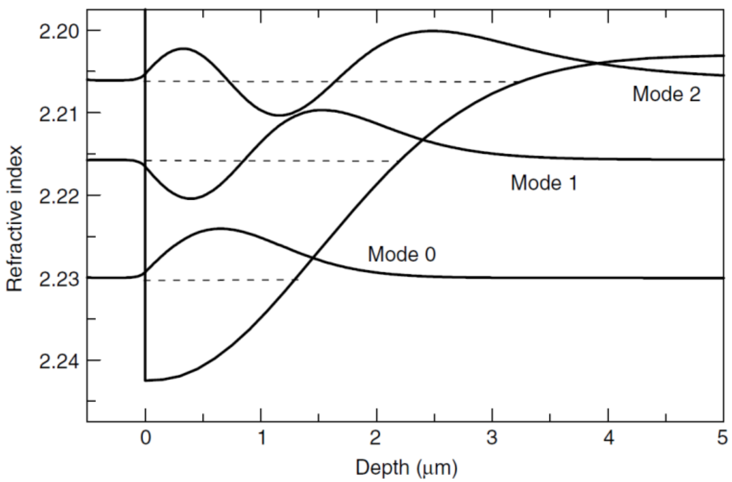
3. 寻找导波模式传输常数β【有效折射率$N=\beta/k_0$】，使得系数A_p=0，即通过迭代，对函数F进行优化.

$$F(A_0=1,A_1,......A_p,B_0=0,B_1,......B_p,N_s<N<N_f,\lambda_0)=0$$

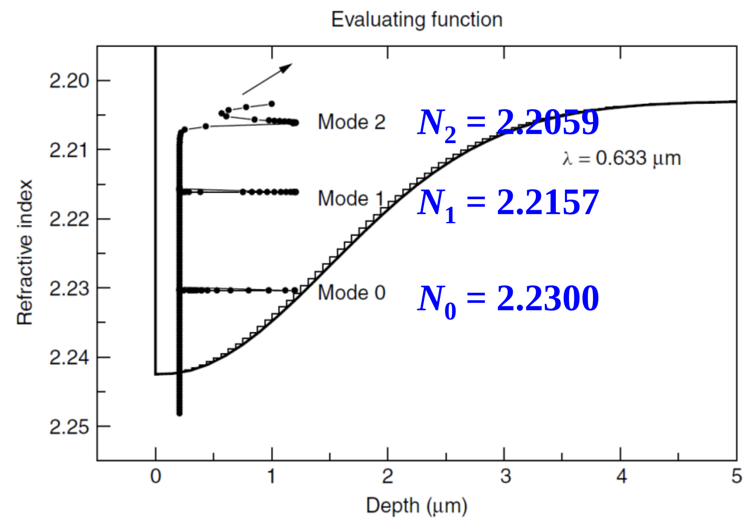
多层近似方法

使用估值函数 $\dfrac{1}{(1+r^2)}$ 【其中$r\equiv\dfrac{|A_p|^2}{|A_0|^2}$】，决定最小$A_p$的位置

A_p最小值对应于估值函数的最大值1，即导波模式的有效折射率N



利用多层近似方法计算TE导波模式的电场分布



利用多层近似方法计算渐变折射率波导中导波模式的N

优点：适用于任何折射率分布；可以计算出场分布；

缺点：使用迭代的方法来计算模式的传输常数

思考题

1. 如何理解课本P_{123}，公式（4-30）以及公式（4-31）？