文章编号：0258-7025(2002)Supplement-0361-03

楔形平面阵列波导光栅作波分复用优化设计的仿真分析*

丁么明 鲁德祖

(孝感学院物理系，湖北 孝感 432100)

提要 从波导信号幅射特性出发讨论了楔形平面波导的设计问题，对于在光通信中作波分复用渐变波导光栅，设计一最佳阵列波导，并对最佳条件、结构参数、传输效率进行了仿真计算。理论分析与仿真结果一致。

关键词 平面阵列波导，波分复用，最佳设计，仿真

中图分类号 TN929 **文献标识码** A

Simulation Analysis of Optimum Design of a Planar Array of Tapered Waveguides in Wavelength Multiplexer

DING Yao-ming LU De-zu

(*Department of Physics*, *Xiaogan University*, *Xiaogan* 432100)

Abstract Based on signal radiation characteristic, the problem of designing a planar array is discussed. An array of tapered waveguides is used by optical communicated in wavelength multiplexer. A design procedure for optimizing the array is described. Optimum conditions, structure parameter and transmission efficiency are calculated by simulation. Theoretical analysis is concided with the simulation result.

Key words planar array waveguides, wavelength multiplex, optimum design, simulation

阵列波导光栅(AWG)作波分复用是一种极具潜力的新型器件。我们采用一优化楔形平面波导[1]，考虑信号在波导中的辐射特性，通过数值计算，讨论平面楔形 AWG 波导结构参数的理论计算问题，得到最佳条件、结构参数和传输效率，并进行仿真计算。

1 楔形波导优化设计

图 1 所示是二元平面阵列楔形波导结构图，波导间距 $a \gg \lambda/2$(λ 为光谱波长)。考虑长度为 L 的维面波导阵列，注意到阵列的有效区仅在图 1 的小扇形内(Brillouin 内)，即 $|\theta| < r_c$。在该扇形区，在 θ_m 方向传输效率 $\eta(\theta_m)$，用 η_c 表示 $\eta(\theta)$ 的最大值。最优化阵列效率用 ε 表示为[2]

$$\varepsilon = \eta_c^2 \sin\gamma_c / \sin\gamma \tag{1}$$

对于给定 $\eta(\theta)$ 的阵列，η_c 是 γ_c 的函数，因此存在使 ε 最大的 γ_c 的最佳选择。

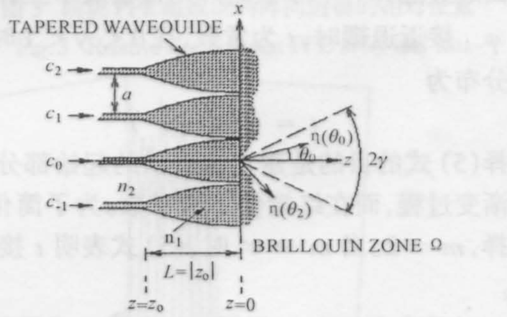

图 1 平面阵列波导楔形结构图

Fig. 1 Structure of planar array of tapered waveguides

探讨锥面阵列波导的最优化实际上转变为给定长度 L，求解 ε_m 的最大值，或给出 ε_m 找出 L 的最小值，也可以探讨在给定区间 γ_c 求出 η_c。

在 $z = |z_0|$ 时，波导渐变函数 $V(z)$ 是连续的。由此损耗率 $\tau = 1 - \eta$ 近似由下式确定

* 湖北省教育厅重点科研项目(2001A27008)资助课题。

$$\tau = \int t\exp(-\mathrm{j}\nu \mathrm{d}\nu) \tag{2}$$

式中 $t\mathrm{d}\nu$ 是一微分耦合系数，ν 是相位。为了使 τ 最小，积分区间为整个渐变区域。在渐变区域终端，两模远离同相，选择 $V(z)$，使 $t = 0$，且随 z 增加而增加。这里选定

$$V(z) = 2\pi Bp/(1 - p^2)^{1/2} \tag{3}$$

式中 B 是常数。在渐变的起始部分给 $V(z)$ 赋有限值，其波导渐变特性不会有太大的影响。(2) 式、(3) 式表明，在渐变终端 $z = 0$, $V(z) = 0$，由此限定了渐变始端和终端值。

对位置坐标 y 归一化，即 $y = z/z_0 = -z/L$，这里 $-L < z < 0, 0 < y < 1$，m 阶模 $y = 0$ 的终端幅值为 $\tau = \int \exp(-\mathrm{j}\nu)\mathrm{d}t$，$\nu$、$T$ 分别为模的相位和传输系数（m 阶模 $y = 1$ 反射用 ν'、T 表述，这里 R 为反射系数）。

利用文献[3] 讨论的结论

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}y} = \frac{1}{2(1+\mu^2)}\frac{\mathrm{d}\mu}{\mathrm{d}y} \tag{4}$$

令 $\nu = \omega(0)\int(1+\mu^2)^{1/2}\mathrm{d}y$,

其中

$$\omega(0) = \frac{2\pi\delta\sigma L}{a\beta_0},\quad \delta\sigma a = \pi - \sigma a,\quad \mu = \frac{V}{2\pi\delta\sigma a}$$

结合(4)式，有

$$t = \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}\nu} = \frac{1}{W}\frac{1}{2(1+\mu^2)^{3/2}},$$

其中 $W = \dfrac{L}{a}\dfrac{2\pi\delta\sigma a}{\beta_0 a}\dfrac{1}{\mathrm{d}V/\mathrm{d}y}$

下面通过选择 $V(z)$ 改进阵列传输效率。当衍射 φ_0 和 φ_{-1} 接近退耦时，t 为常数，在 $0 < y < 1$ 时选择 t 的分布为

$$t = C(1 - y^m) \tag{5}$$

选择(5) 式的目的是建立在锥状的起始部分形成 t 的渐变过程，而在终端使 t 为常数。为了简化，这里选择，$m = 2$。当 $m \to \infty$ 时，(5) 式表明 t 接近常数 C。

对于确定 $V(z)$，根据(4) 式、(5) 式得到：

$$2\omega(0)t\mathrm{d}y = \mathrm{d}\mu/(1+\mu^2)^{3/2}$$

左边的积分结果用 $p(y)$ 代替[4]，解出 μ 为

$$\mu = p(y)/[1 - p^2(y)]^{1/2}$$

其中 $p(y) = 2C\omega(0)\left[y - \dfrac{y^{m+1}}{m+1}\right]$ (6)

由于输入波导退耦合，(6) 式中 C 的选择必须满足 $z \to z_0$ 时 $V(z) \to \infty$，这实际上要求 $p(1) = 1$，因此 $m = 2$ 时

$$p(y) = \frac{3}{2}\left(y - \frac{y^3}{3}\right) \tag{7}$$

(7) 式为楔形平面波导渐变参数。结合(3) 式得到图 2 所示。图 2 表明，$V(z)$ 的变化是非线性的。

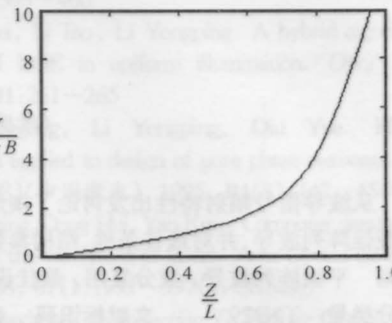

图 2 最佳阵列 $V(z)$变化曲线

Fig.2 Transition curve $V(z)$ for an optimized array

上面讨论 $V(z)$ 是连续的，若考虑到 $z = z_0$ 处有奇点出现。归一化坐标 y 表示为

$$y = (1 - y_0)z/z_0 + y_0 \tag{8}$$

这种变化对应区间为 $y_0 < y < 1$，因此在变换末端产生一个非零值 $p(y_0)$。这种产生，在 $z = 0$ 时 $V(z)$ 是不连续的。依(4) 式

$$\tau = \frac{\mu}{\sqrt{2}\left(1 + \mu^2 + \sqrt{1+\mu^2}\right)^{1/2}} + \int \exp(-\mathrm{j}\nu)\mathrm{d}T \tag{9}$$

其效率为 $\eta \approx 1/(1 + |\tau|^2)$ (10)

2 仿真优化选择

利用(9)式和(10)式，对于任意 $\eta(\theta)$ 的 ε_m 值可近似为[5]：

$$\varepsilon_m = L/(a^2\beta_0) \approx L/(ka^2)$$

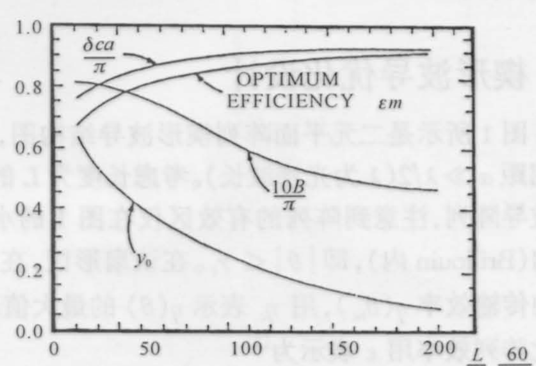

图 3 最佳设计参数 L/a 与传输效率

Fig.3 Optimum design parameters and optimum performance

这里 η 最佳值由 ϵ_m 最大值确定。图 3 给出其关系曲线，图中标明最佳参数和最佳效率 ϵ_m。图 3 表明，$L/(a^2\beta_0) > 150$ 时，y_0 值很小，此时非连续的 $V(z)$ 值也很小，对 ϵ_m 没有太大的影响。

3 结论

以一柱状波导为例，计算有关最佳参数。考虑一连续柱状阵列波导的折射率为 $n_2(z)$。如前所述，阵列波导的效率由 $(ka)^2$ 的傅里叶系数第一项决定

即 $V \approx 2n\Delta nk_0^2a^2\sin(l\pi/a)/\pi$

这里 $\Delta n = n_1 - n_2$，$n = (n_1 + n_2)/2$

l 为低折射率的柱状带宽。选择 $a = 2l$，$\beta_0 a = 60$，V 的初始值为 $V(z_0) = 60$，以保证波导在 $z \approx z_0$ 处忽略模间耦合。在波导始端波逊数 $\Psi(x,z)$ 由 $z = z_0$ 的基模决定，若初始值确定，$\Psi(x,z)$ 通过波方程的积分得到。其结果为 $L/a = 150/\beta_0 a$，如图 4 所示。在输入端，波导间的耦合很小，因此 $\Psi(x,z)$ 被约束在本波导内。但到了锥状终端，耦合较大，其部分能量传输到相邻波导，形成串音[6]。选取 $L/a = 30\beta_0, 50\beta_0, 150\beta_0$，对应的效率由(10)式计算出分别为 0.69、0.78、0.90。因此，它说明理论推导结果：ϵ_m 主要由锥状波导终端模相互作用引起是正确的。

通过以上讨论，我们认为，通过对阵列面 $V(z)$ 的恰当设计，使布里渊区的中心区域 Ω 辐射能量最大，并且得到阵列长度的一个最小面。为楔形阵列波导在光通信选频、耦合、开关等方面应用作了些有益的理论探讨。

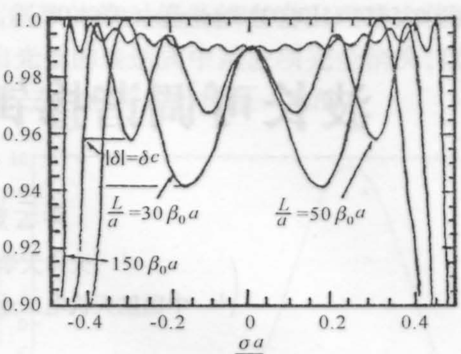

图 4 z 为特定值时 $|\Psi(x,z)|^2$ 与 x 关系曲线

Fig. 4 $|\Psi(x,z)|^2$ vs x for $z = 0.58Z_0$ and $z = 0$

参考文献

1 丁么明，张国平. 楔形平面 AWG 优化设计的数值计算. 半导体光电，2001，6(5):323～326

2 C. Dragone Optimum design of a planar array of tapered waveguides. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, 7(11):2081～2093

3 C. Dragone. Efficiency of a periodic array with nearly ideal element pattern. *IEEE Photon Technol. Lett.*, 1989, **1**(3):238～249

4 C. Dragone, C. H. Henry, I. P. Kaminow *et al.*. Efficient multichannel integrated optics star coupler on silicon. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1989, **1**(3):241～243

5 M. K. Smit. New focusing and dispersive planar component based on an optical phased array. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(7):385～386

6 H. Takahashi, S. Suzuki, K. Kato *et al.*. Arrayed-waveguide grating for wavelength division multi/demultiplexer with nanometer vesolution. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(2):87～88