

1×8 阵列波导光栅型波分复用/解复用器 设计的一种简单方法*

欧海燕 雷红兵 杨沁清 余金中 王启明

(中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083)

胡雄伟

(中国科学院半导体研究所国家光电子工艺中心, 北京 100083)

摘要: 用有效折射率法, 采用近轴近似和波导模场分布的高斯近似, 简化了阵列波导光栅(AWG)器件的设计过程中繁杂的计算, 且保证了器件的性能指标. 给出了设计思路, 并给出了1×8路、中心波长为1550.9nm, 波长间隔为1.6nm的AWG波分复用/解复用器的设计实例.

关键词: 阵列波导; 波分复用; 设计

EEACC: 4190; 4130; 4140

中图分类号: TN202; TN252 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2000)08-0798-05

Simple Method for Designing 1×8 Arrayed-Waveguide Grating Multi/Demultiplexers*

OU Hai-yan, LEI Hong-bing, YANG Qin-qing, YU Jin-zhong and WANG Qi-ming

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

HU Xiong-wei

(National Research Center for Optoelectronics Technology, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Received 15 June 1999, revised manuscript received 30 August 1999

Abstract: A simple design process is presented by using the effective refractive index method, paraxial ap-

* 国家自然科学基金资助项目, 课题号 69889701 和 69896260 [Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69889701 and 69896260].

OU Hai-yan(欧海燕), female, was born in 1972. Since 1997, she has been working toward Ph. D degree, and engaged in research in Silica on Silicon arrayed-waveguide grating multi-demultiplexers.

1999-06-15 收到, 1999-08-30 定稿

proximation and the Guass function approximation of the diffraction pattern from the individual waveguide. This method avoids large amount of numerical calculations. A design procedure is given, as well an AWG multiplexer designed for an example, which is of 8 channels, with a center wavelength is 1550.9nm and wavelength spacing 1.6nm.

Key words: arrayed-waveguide; wave multiplexer; design

EEACC: 4190; 4130; 4140

Article ID: 0253-4177(2000)08-0798-05

1 引言

波分复用技术(WDM)是提高光纤通信容量的一种非常有前途的技术,而波分复用/解复用器则是波分复用系统的关键器件。能实现波分复用功能的器件有很多,如体材料制作的光栅、棱镜,基于平面光波导技术(PLC)制作的衍射光栅、马赫-曾德型干涉仪等。平面光波导型的波分复用/解复用器在器件的可靠性、小型化和生产的大规模化方面比体材料的波分复用/解复用器占有优势。PLC 技术制作的衍射光栅,由平板波导组成,最小的波长分辨率为数个纳米^[1]。为提高最小波长分辨率,采用马赫-曾德型干涉仪,其最小分辨率可达 0.008nm^[2],但这种器件最多只能有两个通道,要实现多通道,需将多个马赫-曾德型干涉仪级联。级联后器件的性能将比单个器件的性能下降。为了实现高性能、多通道、高波长分辨率的波分复用/解复用器,提出了波导阵列光栅(AWG 或 PHASAR)^[3-5]。可以把它看作是衍射光栅和多路径的马赫-曾德型干涉仪的混成。它集中了两者的优点,克服了两者的不足。AWG 器件结构复杂,为了尽量将这种器件和以它为单元器件集成的各种功能器件应用于光纤通讯系统,围绕器件的纤-纤插入损耗和不均匀度、平坦带宽、偏振不敏感、温度不敏感等几大特性,提出了各种设计方案。如为减小插入损耗,波导阵列光栅的输入/输出端采用锥形波导设计^[6];为减小串扰,阵列波导数在工艺允许的条件下,数目尽可能取得较多;为使带通平坦,将输入单模波导用多模干涉耦合器^[7],或 Y 分支代替^[8],或用多模输出波导代替单模输出波导^[9],或将阵列波导设计在多个罗兰圆周上^[10];为减小偏振相关性,采取的措施有应力释放槽^[11],采用另一种双折射系数不同的补偿材料^[12],在阵列波导中央插入半波片^[13];使器件温度无关的措施有:采用与原波导材料温度特性相反的材料补偿等^[14]。由于二维波导理论和 AWG 器件结构本身的复杂性,使 AWG 的设计和优化需大量的计算机机时和人力。本文采用如下近似^[15,16]:波导的模场为高斯分布,用有效折射率法对二维波导进行计算,不考虑平板波导有效折射率的色散效应,采用近轴近似,对于输入/输出波导对应的 θ_1 和 θ_0 , $\sin\theta_1 \approx \theta_1$, $\sin\theta_0 \approx \theta_0$ 。在以上近似的基础上建立起来的设计理论,只需简单的运算便可得出设计结果。文中最后给出了通道数 $N = 8$ 、中心波长为 $1.5509\mu\text{m}$ 、波长间隔为 1.6nm 的波分复用/解复用器的设计实例。

2 理论

图 1 给出 AWG 波分复用/解复用器的结构示意图。它由输入/输出(I/O port)波导,平板波导(Slab)和阵列波导(Grating

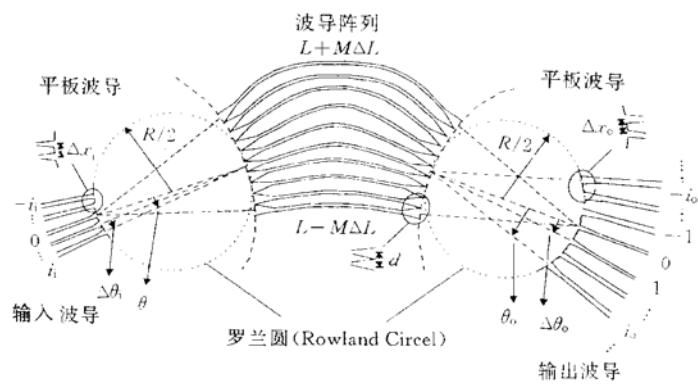


图 1 AWG 的结构示意图

FIG. 1 Schematic Illustration of AWG

Waveguide)组成。I/O 波导和阵列波导由两个平板波导相连。 Δx_i 和 Δx_o 为 I/O 波导间距; d 为阵列波导间距; R 为罗兰圆(Rowland circle)的直径,也是光栅的焦距; ΔL 为相邻阵列波导间的长度差。其工作原理为:复用光波进入某一输入波导,在平板波导内衍射,并耦合进阵列波导区。阵列波导位于以中心输入波导为圆心的圆周上。以相同相位到达波导阵列的衍射光,经长度差为 ΔL 的阵列波导后,产生了相位差(不同波长的相位差也不同),于是不同波长的光波被输出平板波导聚焦到不同的输出波导位置,完成了解复用功能。光波反向输入,则完成复用功能。从 AWG 出入的光满足光栅方程:

$$n_s d \sin \theta + n_c d \sin \theta_0 + n_c \Delta L = m \lambda \quad (1)$$

式中 n_s 和 n_c 分别为平板波导和条形波导的有效折射率; m 是衍射级数,中心波长 λ_0 定义为:

$$m \lambda_0 = n_c \Delta L \quad (2)$$

从(2)式可看出,当闪耀角为零度时,光栅仍能工作在高阶衍射。对(1)式进行微分可得到光栅的角色散:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{n_s d} \times \frac{n_g}{n_c} \quad (3)$$

n_g 为群折射率,定义为:

$$n_g = n_c - \lambda \frac{dn_c}{d\lambda} \quad (4)$$

通道间隔 $\Delta \lambda$ 可以从角色散得到:

$$\Delta \lambda = \Delta x_o \left[\frac{dx}{d\lambda} \right]^{-1} = \Delta x_o \frac{1}{R} \left[\frac{d\theta}{d\lambda} \right]^{-1} = \frac{\Delta x_o}{R} \times \frac{n_s d}{m} \left[\frac{n_g}{n_c} \right]^{-1} \quad (5)$$

有很多的 m 和 λ 的组合可以满足公式(2),自由光谱区(FSR)就是这些波长的间隔范围:

$$FSR = \frac{\lambda_0}{m} \left[\frac{n_g}{n_c} \right]^{-1} \quad (6)$$

FSR 决定了最大可得的通道数 N :

$$N \leq FSR = \frac{\lambda_0}{m \Delta \lambda} \left[\frac{n_g}{n_c} \right]^{-1} \quad (7)$$

当 $FSR = N \Delta \lambda$ 时,可实现 N 个频率的 $N \times N$ 互连。导波光的输出能量分布在很多衍射级上,对中心波长,不同衍射级数对应的角度为: $\theta = 0, \pm \frac{\lambda_0}{n_s d}, \pm \frac{2\lambda_0}{n_s d}, \dots$ $\theta = 0$ 对应的是主衍射峰,其它各角度对应的是不希望的重影,它们分走了部分光能。高斯函数型的包络线可表示为:

$$P(\theta) = \exp \left[-2 \left(\frac{\pi n_s \omega_0 \theta}{\lambda_0} \right)^2 \right] \quad (8)$$

式中 ω_0 为模场尺寸,即最大光功率 $1/e^2$ 处的半宽。于是,中心波长 λ_0 的衍射效率为:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P(0)}{P(0) + 2P \left[\frac{\lambda_0}{n_s d} \right] + 2P \left[\frac{2\lambda_0}{n_s d} \right] + \dots} \\ &= \frac{1}{1 + 2 \exp \left[-2 \left(\frac{\pi \omega_0}{d} \right)^2 \right] + 2 \exp \left[-2 \left(\frac{2\pi \omega_0}{d} \right)^2 \right] + \dots} \end{aligned} \quad (9)$$

3 设计程序及实例

3.1 设计要求

选定中心波长 λ_0 、最大通道数 N 和波长间隔 $\Delta \lambda$ 。对 1×8 路波分复用/解复用器,中心波长 $\lambda_0 = 1550.9\text{nm}$ 、 $\Delta \lambda = 1.6\text{nm}$,要求掩埋波导的模场与标准单模光纤模场匹配。中心波长和波长间隔选取时,与 ITU 规定的波长标准一致。

3.2 待设计的参数

波导的长 b 、宽 a ; 相对折射率差 Δ ; 输入波导间距 Δx_i ; 输出波导间距 Δx_o ; 阵列波导数 $2M+1$; 阵列波

导间距 d ; 阵列波导区相邻波导间距 ΔL ; 罗兰圆直径, 即焦距 R 和衍射阶数 m .

3.3 设计程序

(a) 根据设计要求, 如单模方形波导模场尺寸 a_0 的值, 确定波导的长 b 、宽 a 和折射率差 Δ . 表 1 给出了不同折射率差和宽长比情况下的单模波导尺寸. 按照波导的模场与光纤匹配的设计要求, 采用 $\Delta = 0.75\%$, $a = b = 6.10 \mu\text{m}$.

(b) 为减小相邻波导间的相互作用(串扰). $\Delta x_{i(o)}$ 和 d 取两波导解耦合时的距离. 一般的器件采用对称结构, 即 $\Delta x = \Delta x_i = \Delta x_o$. 表 2 给出了不同能量转移因子 T 对应的解耦合距离 c 和不同模场衰减因子 r 对应的包层厚度 x . 当 $T = 10^{-4}$ 时, 引入的串扰已低至 -40dB , 可以满足器件的要求, 此时对应的 Δx 和 d 的取值为 $28 \mu\text{m}$. 相应的包层厚度取为 $10 \mu\text{m}$.

(c) 已知 a 、 b 、 Δ 、中心波长 λ_0 , 用有效折射率近似法, 求出平板波导的有效折射率 n_s , 条形波导的有效折射率 n_c 和群折射率 n_g . 图 2 为有效折射率近似法得到的平板波导有效折射率 n_s 和条形波导的有效折射率 n_c . 中心波长 1550.9nm 处的对应值为: $n_s = 1.452$, $n_c = 1.450$, $n_g = 1.496$.

(d) 由公式(5)可求得 R 和 m 之积 Rm . 同时考虑通道数 N , 由公式(7)联合决定 R 和 m 的取值. 图 3 给出了光栅衍射阶数 m 、焦距 R 和最大通道数 N 三者之间的关系. 通常器件工作的衍射阶数在 30—200, 所以三角斜线区域内各点的 (R, m) 值都能满足要求. 一般 m 值小一点有利于改善器件的串扰特性, R 小一点可减小器件的尺寸, 折衷考虑 R 取为 $7048.04 \mu\text{m}$, m 取值为 78.

(e) 由式(2)得 $\Delta L = 83.43 \mu\text{m}$, 由(6)式得 FSR 为 19.27nm .

(f) 令式(8) = $1/e^2$, 得出 θ_{\max} , 即 $P(\theta_{\max}) = \frac{1}{e^2}$, 于是便得出波导阵列条数 $2M + 1$ 的最小取值. 阵列波导数 $2M + 1$ 最小值为 43, 一般在工艺允许的条件下取较大值, 本文取为 91.

从设计的参数结果可以看出, 为了保证器件的密集型波分复用的特性, 要求波导的截面尺寸精确到亚

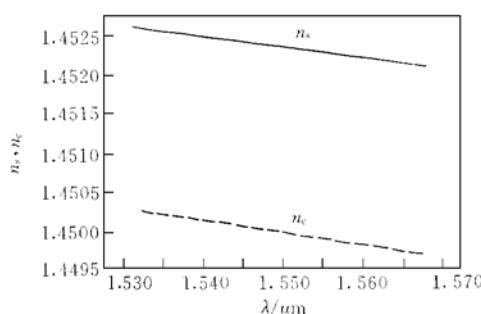


图 2 有效折射率近似法计算的 n_s 和 n_c ($a = b = 6.1 \mu\text{m}$, $\Delta = 0.75\%$)

FIG. 2 n_s and n_c Calculated by Effective Refraction Index Approximation Method

表 1 不同宽长比和折射率差的单模波导的尺寸

Table 1 Single-Mode Waveguide Size of Different Ratio of Width to Length and Index Difference

a/b	Δ	$a/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$
1	0.75%	6.10	6.10
	1%	5.25	5.25
	5%	2.28	2.28
2	0.75%	7.82	3.91
	1%	6.76	3.38
	5%	2.93	1.46
4	0.75%	10.46	2.62
	1%	9.04	2.26
	5%	3.92	0.98

表 2 $a = b = 6.10 \text{ m}$, $\Delta = 0.75\%$ 的单模波导的解耦合距离 c 和包层厚度 x , T 为能量转移因子, r 为模场的相对衰减因子

Table 2 Decouple Distance c and Cladding

Thickness x of Single Mode Waveguicle with $a = b = 10 \text{ nm}$, $\Delta = 0.95\%$

T	$c/\mu\text{m}$	r	$x/\mu\text{m}$
10^{-2}	14.40	10^{-1}	5.52
10^{-4}	21.74	10^{-2}	9.19
10^{-6}	29.07	10^{-3}	12.86
10^{-8}	36.41	10^{-4}	16.53

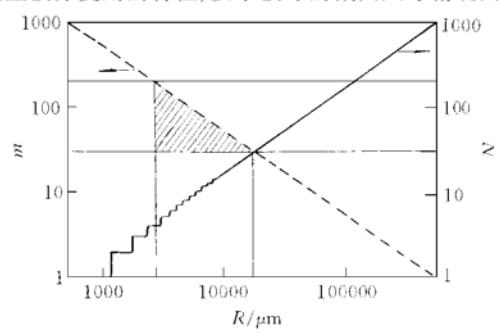


图 3 焦距 R 、衍射阶数 m 和最大通道数 N 三者之间的数值关系图

FIG. 3 Relationship Among Focal Length R , Diffraction Order m and Maximum Channel Number N

微米量级, 长度方向的精度到几十纳米量级, 这对工艺提出了非常苛刻的要求, 代价很高. Lin^[17]等提出采用非对称结构在器件设计时即考虑对工艺误差进行补偿.

4 结论

采用文中的假设, 得到器件的各种设计参数示于表 3 中. 假如对器件的某一项特性参数有特殊要求, 则应对其进行更为精确的数值计算, 另有文章将对此做详细的讨论.

表 3 设计参数表

Table 3 Parameters for Design

符号	物理意义	值	符号	物理意义	值
a	方形波导的边长	6.1 μm	n_e	条形波导有效折射率	1.450
Δ	波导芯区与包层的相对折射率差	0.75%	n_g	群折射率	1.496
N	最大通道数	8	FSR	自由光谱区	19.27nm
λ_0	中心波长	1550.9nm	m	衍射阶数	78
$\Delta\lambda$	波长间隔	1.6nm	R	焦距	8841.06mm
$\Delta x_{(o)}$	I/O 波导间隔	28μm	ΔL	相邻波导间的长度差	83.428mm
d	阵列波导间隔	28μm	$2M + 1$	阵列波导数	91
n_s	平板波导有效折射率	1.452			

参 考 文 献

- [1] C. H. Henry, R. F. Kazarinov, Y. Shani, R. C. Kistler, V. Pol and K. J. Orlowsky, *J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**: 748—755.
- [2] N. Takato, T. Kominato, A. Sugita, K. Jinguji, H. Toba and M. Kawachi, *Select. Areas. Commun.*, 1990, **8**: 1120—1127.
- [3] C. Dragone, C. A. Edwards and R. C. Kistler, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**: 896—899.
- [4] M. K. Smit, Cor Van Dam, *IEEE J. on Sel. Top. in Quantum Electron.*, 1996, **2**: 236—250.
- [5] Y. J. Chen, Y. P. Ho, Wenhua Lin, H. Li, J. Hryniecz, G. Porkolab, M. Dagenais and D. R. Stone, *SPIE Proceedings*, 1996, **2690**: 337—347.
- [6] C. Dragone, *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, **7**: 2081—2093.
- [7] J. B. D. Soole, M. R. Amersfoort, H. P. Leblanc, N. C. Andreadakis, A. Rajhel, C. Caneau, R. Bhat, M. A. Koza, C. Youtsey and I. Adesida, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**: 1340—1342.
- [8] C. Dragone, U. S. Patent, 5,467,418, 1995.
- [9] M. R. Amersfoort, C. R. De Boer, F. P. G. M. van Ham, M. K. Smit, P. Demeester, J. J. G. M. van der Tol and A. Kuntze, *Electron. Lett.*, 1994, **30**: 300—302.
- [10] Y. P. Ho, H. Li and Y. J. Chen, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**: 342—344.
- [11] M. Kawachi, *Optical Quantum Electronics*, 1990, **22**: 391—416.
- [12] K. Takahashi, Y. Hibino, Y. Ohmori and M. Kawachi, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**: 707—709.
- [13] Y. Inoue, Y. Ohmori, M. Kawachi, S. Ando, T. Sawada and H. Takahashi, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**: 626—628.
- [14] Y. Kokubun, M. Takizawa and S. Taga, *Electron. Lett.*, 1994, **30**: 1223—1224.
- [15] H. Takahashi, K. Oda, H. Toba and Y. Inoue, *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(3): 447—455.
- [16] K. S. Chiang, *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(1): 62—72.
- [17] W. H. Lin, H. F. Li, Y. J. Chen, M. Dagenais and D. Stone, *IEEE Photon. Lett.*, 1996, **8**(11): 1501—1503.