

阵列波导光栅复用/解复用器光栅孔径 对器件性能影响的数值分析^{*}

雷红兵 欧海燕 杨沁清 胡雄伟 余金中 王启明

(中国科学院半导体研究所集成光电子国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 阵列波导光栅复用/解复用器中波导光栅孔径是器件重要的结构参数。波导光栅孔径数值有限, 部分光场将因未被耦合进而损失掉。同时引起输出波导接收端焦场变形, 增加了器件串扰。本文详细分析和计算了由于波导光栅孔径有限引起的光场损耗和信号串扰, 选择适当孔径参数可使其引入的信号损耗和串扰降到足够低, 以优化设计器件。

关键词: 阵列波导光栅; 光波导; 复用/解复用器; 串扰

EEACC: 4130; 4140

中图分类号: TN814.6 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2000)04-0359-06

Analysis and Design of Array Aperture for Phased-Array Waveguide Grating Multi/Demultiplexer^{*}

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

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

Received 6 April 1999, revised manuscript received 3 June 1999

Abstract: Array aperture is an important design parameter of the phased-array waveguide grating multi/demultiplexer. The truncation of the field due to the finite width of the array aperture, causes power to be lost at the input aperture and the sidelobe level of the focal field will increase at the output aperture, which becomes a source of crosstalk. The array aperture angle should be chosen properly so that the corresponding crosstalk and power loss are sufficiently low.

Key words: array waveguide grating; optical waveguide; mux/demux; crosstalk

EEACC: 4130; 4140

* 国家自然科学重大基金资助项目(No. 69896260)和重点基金资助项目(No. 69889701)[Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69896260 and 69889701].

雷红兵 男, 1970 年出生, 博士后, 从事硅基光电子材料与器件、光波导器件研究。

王启明 男, 1934 年出生, 中国科学院院士, 从事光电子材料与器件研究。

1999-04-06 收到, 1999-06-03 定稿

Article ID: 0253-4177(2000)04-0359-06

1 前言

在过去的十年中,光通讯网络的容量快速增长。波分复用技术是提高光通讯容量的有效途径^[1,2]。现在单根光纤中传输的波长通道已达到八个。不久,将会超过三十个波长,甚至达到五十个波长的复用。这就要求光通讯波分复用系统中的关键器件——复用/解复用器应用特殊的阵列波导光栅技术^[3-6]。

在阵列波导光栅复用/解复用器中,波导光栅的孔径大小是器件设计的重要参数^[7-10]。由于阵列孔径数值有限,这就使得部分光场在接收孔径处损失掉。耦合进入波导光栅的光场在输出波导的接收端形成焦场,相应的焦场宽度变宽,且使主峰的两端的次级干涉峰变强。这样耦合进入邻近输出波导的信号增强,降低了器件的串扰性能。

本文定量分析了由于阵列波导光栅孔径有限引入的光场能量损耗和信号串扰,选择适当的孔径参数,可使光信号损耗和串扰达到足够低的水平,以优化器件的结构参数设计。

2 阵列波导光栅复用/解复用器基本结构

阵列波导光栅(AWG)复用/解复用器基本结构由输入/输出波导、阵列波导光栅及连接它们的平板波导(slab waveguide)组成,如图1所示。

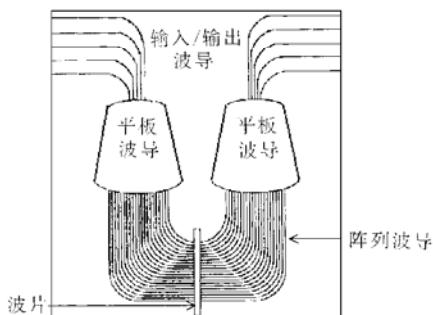


图1 $N \times N$ 阵列波导光栅复用/
解复用器结构简图

FIG. 1 Layout of $N \times N$ Phased-Array
Waveguide Grating Multi-/Demultiplexer.

一束光通过输入波导,进入平板波导中的自由传播区。在输入波导中,光波受到横向限制,而进入自由传播区后,光束在横向发散,不再受到限制。在阵列波导光栅的接收端,发散光波与阵列波导耦合,而进入波导阵列。光波通过阵列波导后到达输出端,选择阵列波导的长度,使邻近波导的光程差增量等于中心波长的整数倍。经过阵列波导其相位因子相同(或相差 2π 的整数倍),AWG 输入端的光场完全被复现在输出端,相应地,输入端接收的发散光从输出孔径输出后变成会聚光。其幅值和位相分布与在输入端相同,再经过自由传播区后,在输出波导接收端聚焦成像。

偏离中心波长的光束在经过 AWG 输出孔径后,发生倾斜,相应的焦点在象平面上也发生移动。把输出波导的接收端放在像平面适当位置,就可得到不同波长通道的空间间隔。在阵列波导光栅对称中心位置置入四分之一波片,使偏振在中点反转,从而使 AWG 保持偏振不敏感特性。

3 理论推导

3.1 输入/输出波导基模光场横向分布

连接输入/输出波导和阵列波导的平板波导结构如图2所示。输入/输出波导芯区横向宽度为 w ,归一化结构参数 $V = kw(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$,其中 n_1 为芯区折射率, n_2 为包层折射率, k 为真空中光传播常数。采用 Marcatili 的近似模型,基模导波的本征方程为:

$$k_x w = 2 \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{\sqrt{V^2 - k_x^2 w^2}}{k_x w \eta_{21}} \right] \quad (1)$$

$$\eta_{21} = \begin{cases} 1 & E_{11}^v \\ n_1^2/n_2^2 & E_{11}^s \\ q_s w & V^2 - k_s^2 w^2 \end{cases}$$

其中 k_s 为导波模式在芯区中的横向传播常数; q_s 为包层中横向衰减常数. 相应的横向模场分布为:

$$E^{in}(x) = \begin{cases} A_s \cos(k_s x) & |x| \leq \frac{w}{2} \\ A_s \cos\left(k_s \frac{w}{2}\right) \exp\left(-q_s \left(|x| - \frac{w}{2}\right)\right) & |x| \geq \frac{w}{2} \end{cases} \quad (2)$$

3.2 平板波导中自由传播区发散光场分布

输入波导与自由传播区存在一个界面, 由于输入波导宽度 w 与 λ 同数量级, 在这个出射界面上不可能发生平面波特有的光折射. 波导内的导波模式在端面出射后将转换成满足二维空间波动方程的连续模式. 在 $r \gg \lambda, d$ 时, 采用远场近似, 在自由传播区光束发散, 其分布为^[11]:

$$E^{slab}(\theta) \propto \cos(\theta) \int_{-\infty}^{\infty} E^{in}(x) \exp(ik_s x \sin(\theta)) dx \quad (3)$$

对于基模, $I(0)$ 为峰值, 取它为参考值. 设 k_s 为自由传播区传播常数, 则自由传播区发散光相对光强分布可写成:

$$\begin{aligned} \frac{I(\theta)}{I(0)} &= \frac{\cos^2(\theta) \left| \int_{-\infty}^{\infty} E^{in}(x) \exp(ik_s x \sin(\theta)) dx \right|^2}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} E^{in}(x) \exp(ik_s x \sin(\theta)) dx \right|^2} \\ &= \cos^2(\theta) \left[\frac{q_s \cos\left(\frac{k_s w}{2} \sin(\theta)\right) - k_s \sin(\theta) \sin\left(\frac{k_s w}{2} \sin(\theta)\right)}{(k_s^2 - k_s^2 \sin^2(\theta))(q_s^2 + k_s^2 \sin^2(\theta))} \right]^2 \end{aligned}$$

通常波导芯区横向宽度约为 $5\mu m$, 波长约为 $1.5\mu m$, 则光强主要分布在 θ 较小区域, $\theta \ll \pi/2$, 取近似 $\cos(\theta) = 1, \sin(\theta) = \theta$, 则发散场为:

$$E^{slab}(\theta) = (q_s k_s^2) \frac{q_s \cos\left(\frac{k_s w \theta}{2}\right) - k_s \theta \sin\left(\frac{k_s w \theta}{2}\right)}{\left[k_s^2 - k_s^2 \theta^2\right] \left[q_s^2 + k_s^2 \theta^2\right]} \quad (4)$$

3.3 输出波导接收端焦场分布

在自由传播区, 发散光到达阵列波导输入端, 被阵列波导收集后, 传输到另一端输出, 引入的相位因子为 $\exp(i k_s \Delta L)$, 其中 ΔL 为邻近阵列波导长度增量. ΔL 为中央波长的整数倍, 其相位因子为 1, 这样阵列波导输入端的光场的幅值和相位在输出端完全复现.

从阵列波导输出的光场在自由传播区形成会聚光, 并在输出波导的接收端聚焦. 而经过阵列波导光栅中角度为 θ 波导的光场到达输出波导接收端 x 处, 引入的相位因子为

$$A(x) = \exp(i R_a \theta k_s \sin(x/R_a)).$$

通常 $x/R_a \ll 1$, 则 $\sin(x/R_a) \approx x/R_a$, 上式为:

$$A(x) = \exp(i \theta k_s x)$$

设引入的强度因子为 $B(x/R_a)$. 则经过整个阵列波导光栅在输出波导接收端光场分布为:

$$E_{\theta_a}^{out}(x) = \int_{\theta_a}^{\theta_a} E^{slab}(\theta) B(x/R_a) \exp(i \theta k_s x) d\theta$$

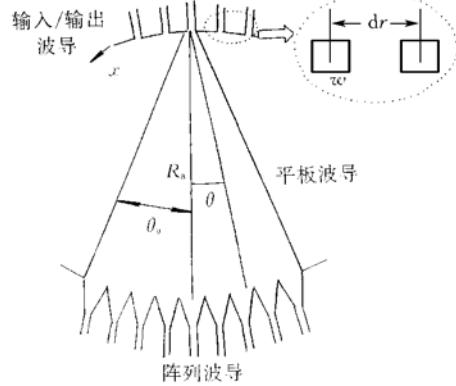


图 2 AWG 复用/解复用器平板波导结构图

FIG. 2 Geometry of Slab Waveguide in AWG Multi-/Demultiplexer.

$$= B(x/R_a) \int_{-\theta_a}^{\theta_a} E^{\text{slab}}(\theta) \exp(i\theta k_s x) d\theta \quad (5)$$

其中阵列波导光栅接收/输出孔径半角为 $\theta_a (\pi/2 \geq \theta_a \geq 0)$.

4 数值模拟与结果分析

解方程(1)并把结果代入(2)式,就可得到输入/输出波导内基模的模场分布.在芯区,模场为余弦分布,在包层中,模场呈指数衰减.模场分布与 V 参数有关, V 值越大,光场分布越集中在芯区.基模两种偏振的横向光场分布随横向折射率差不同而变化,在横向折射率差较小时($n_1/n_2 - 1 \ll 1\%$),两种偏振基本简并,图 3 给出了基模 E_{b0} 偏振的横向光场分布 $E^{\text{in}}(x/w)$ 随 V 参数的变化.

输入波导中基模导波经过端面后进入自由传播区,呈发散分布与角度 θ 有关.式(4)给出了发散场的分布.取 $\theta_c = 1/(k_s w)$,发散场随相对角度(θ/θ_c)的变化 $E^{\text{slab}}(\theta/\theta_c)$ 分布如图 4 所示.它是由图 3 中场分布 $E^{\text{in}}(x/w)$ 变换而来.输入波导中光场越集中,自由传播区中光场越发散.即自由传播区中光场的发散程度随输入波导 V 参数变化, V 值越大,自由传播区光场越发散.

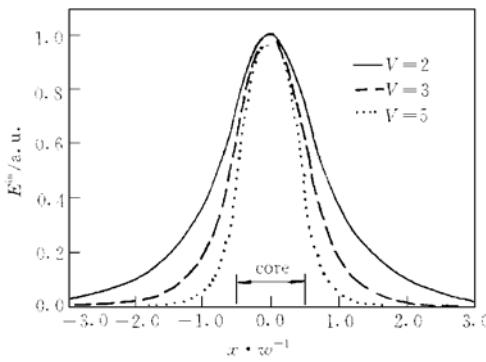


图 3 输入/输出波导基模 E_{b0} 偏振横向光场分布($V = 2, 3, 5$)

FIG. 3 Lateral Field Distribution of Based Mode (E_{b0} polarization) in Input/Output Waveguide ($V = 2, 3, 5$)

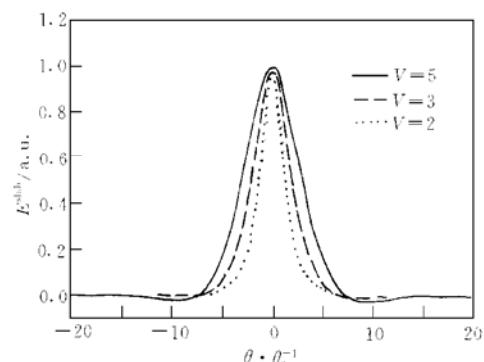


图 4 AWG 复用/解复用器平板波导自由传播区光场分布
 $\theta_c = 1/(k_s w)$

FIG. 4 Far Field Distribution in Free Propagation Region in AWG Multi-/Demultiplexer

自由传播区发散光场被阵列波导光栅耦合,同时由于阵列波导光栅输入孔径 θ_a 有限,角度大于 θ_a 的部分光场将损失掉,这就导致传输光强(TP)的损耗.根据光路可逆性,在阵列波导输入孔径和输出孔径同时存在损耗.定义传输光强:

$$TP = 20 \log \frac{\int_{-\theta_a}^{\theta_a} \left[E^{\text{slab}} \left(\frac{\theta}{\theta_c} \right) \right]^2 d\theta}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left[E^{\text{slab}} \left(\frac{\theta}{\theta_c} \right) \right]^2 d\theta} \quad (6)$$

图 5 给出了传输光强随阵列波导光栅相对孔径 θ_a/θ_c 的变化.随着相对孔径增加,阵列波导光栅收集的光越多,即传输光功率就越大. V 值越大,自由传播区光场越发散,那么相同传输光强下,所需要的接收孔径就越大.

在阵列波导输出端,输出光强实际上是一种单波导的衍射和多波导的干涉效应.当输入/输出孔径足够大时,在输出波导接收端的焦场就是输入波导光场分布的复现.当阵列波导的孔径逐渐变小时,焦场的

中央条纹变宽，同时在主条纹的两侧，出现次级干涉峰。当阵列波导孔径足够时，光干涉效应消失，相应的焦场主峰变得更宽。图 6 是根据式(5)计算出来的焦场分布随波导阵列光栅相对孔径 θ_a/θ_c 的变化。 E^{in} 为输入波导光场分布，在相对孔径 θ_a/θ_c 足够大时，它与焦场分布相同。

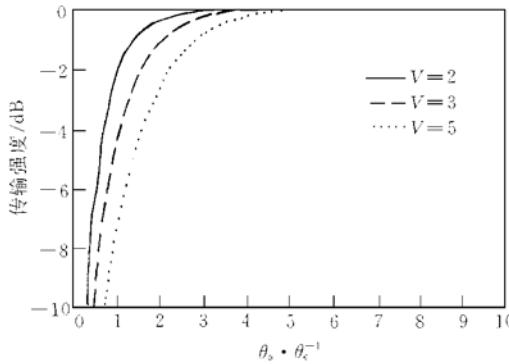


图 5 传输能量(dB)随波导光栅阵列
相对孔径 θ_a/θ_c 的变化
 $\theta_c = 1/(k_s w)$

FIG. 5 Dependence of Transmitted Power
on Relative Aperture of Array

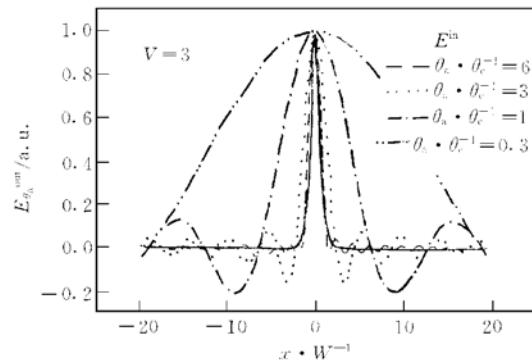


图 6 输出波导接收端光场分布
($\theta_c = 1/(k_s w)$)

FIG. 6 Distribution of Optical Field at
Receiver Side of Output Waveguide

从图 6 可看出由于阵列波导输入/输出孔径限制，使得输出波导接收端焦场主峰变宽，且在两边出现次级峰增强。在大部分焦场耦合进对应输出波导的同时，部分光场耦合进邻近波导，从而引入光信号的串扰。假设输入、输出波导结构相同，其基模光场横向分布同为 $E^{\text{in}}(x/w)$ 。设输出波导横向相对间隔为 dr/w ，则邻近波导基模光场的横向分布为 $E^{\text{in}}(x/w - dr/w)$ 。定义串扰：

$$\text{CT} = 10 \log \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} E_{\theta_a}^{\text{out}}(x/w) E^{\text{in}}(x/w - dr/w) dx \right|^2}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} E_{\theta_a}^{\text{out}}(x/w) E^{\text{in}}(x/w) dx \right|^2} \quad (7)$$

图 7 为串扰 CT 随阵列波导光栅不同相对孔径值的变化，在总体趋势上，相对孔径增大，串扰降低。而图中串扰极小值的存在，是由于焦场 $E_{\theta_a}^{\text{out}}(x/w)$ 分布中次级峰极值有正有负，从而使耦合进邻近波导的光场可能出现在极小。随着相对孔径的进一步增加，串扰值趋于稳定，为一常数。

从图 5 可看出焦场分布在阵列波导光栅孔径达到一定值后，其变化已不大，接近于输入波导光场分布，这可解析图 7 中串扰值在大孔径时趋于常数。这种大孔径时趋于常数的串扰值与理想阵列波导光栅对应条件(V 参数，输出波导横向相对间隔 dr/w)下的串扰值相同^[8]，说明两种物理过程的结果是一致的。

不同 V 参数下，串扰随阵列波导光栅相对孔径的变化相似。而相同 V 参数，不同输出波导横向相对间隔值时，串扰的变化除去其在大相对孔径时趋于常数值

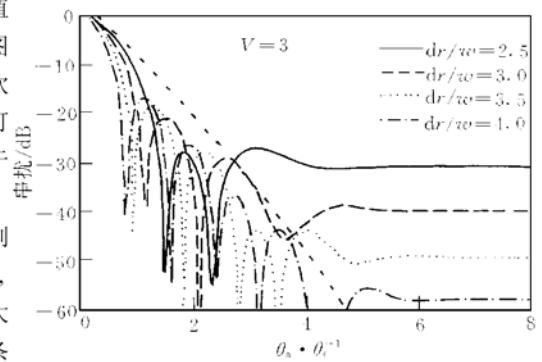


图 7 串扰随波导光栅阵列
相对孔径 θ_a/θ_c 的变化

FIG. 7 Crosstalk Versus the Relative Array
Aperture θ_a/θ_c

部分外, 随相对孔径的增加而减小的趋势是相似的. 图中给出的虚线即为它们的包络线, 表示了波导阵列光栅引入的串扰最大值.

5 阵列波导光栅孔径的选取

在器件设计中, 我们往往先确定其串扰等性能指标, 然后根据性能指标来设计器件的结构. 在实际的 AWG 波分复用/解复用器件的设计中, 器件的串扰性能往往受到材料性能及工艺条件的限制^[12], 对于 InP 基的解复用器, 典型的串扰值为- 25dB 数量级, 而对氧化硅基器件串扰值约低于- 30dB. 因此, 按目前的工艺条件, 制备出- 30dB 到- 35dB 串扰指标的器件也是不容易的. 在设计器件结构时追求更低的串扰指标没有太大的实用价值. 通常选用串扰设计指标为- 40dB, 然后据此确定 dr/w 参数.

串扰值随波导光栅孔径的变化曲线受波导结构参数 V 的影响较小, 采用图 7 中包络曲线当作串扰值最大的情况. 在阵列波导相对孔径半角 $\theta_a/\theta_c = 4$ 时, 其引起的串扰已低于- 40dB, 同时根据图 5, 在此相对孔径下, 引入的传输信号损耗远低于 1dB, 完全可以满足器件的性能要求.

6 结论

本文从矩形波导的模式理论出发, 采用 Marcatili 近似分析矩形波导模场分布, 以此为基础分析阵列波导光栅复用/解复用器中光场从输入波导到平板波导自由传播区, 经过阵列波导光栅后聚焦在输出波导接收端的变化. 模拟计算表明: 由于阵列波导光栅输入/输出孔径有限引起部分光强的损失, 且增加了器件不同信道的串扰. 随着波导光栅孔径的增加, 所引入的器件损耗和串扰值降低. 在阵列波导相对孔径 θ_a/θ_c 等于 4 时, 引入的相对串扰低于- 40dB, 引入的信号损耗低于 1dB, 可以满足器件性能的需要.

参 考 文 献

- [1] R. Adar, C. H. Henry, C. Dragone *et al.*, J. Lightwave Technol. 1993, **11**: 212—219.
- [2] C. A. Brackett, A. S. Acampora, J. Sweitzer *et al.*, J. Lightwave Technol., 1993, **11**: 736—753.
- [3] M. K. Smit, Electron. Lett., 1988, **24**(7): 385—386.
- [4] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, J. Lightwave Technol., 1995, **13**: 615—627.
- [5] C. Dragone, IEEE Photon. Technol. Lett., 1991, **3**: 812—815.
- [6] C. Dragone, C. A. Edwards and R. C. Kistler, IEEE Photon. Technol. Lett., 1991, **3**: 896—899.
- [7] Louis S. Lome, Proc. of SPIE, San Jose, 1996, **2690**: 338—347.
- [8] Meint K. Smit, Cor van Dam, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, 1996, **2**(2): 236—250.
- [9] OU Haiyan, LEI Hongbing, YANG Qingqing, WANG Qiming and HU Xiongwei, Chinese Journal of Semiconductors, 2000, **21**(1): 12(in English) [欧海燕, 雷红兵, 杨沁清, 王启明, 胡雄伟, 半导体学报, 2000, **21**(1): 12].
- [10] OU Haiyang, LEI Hongbing, YANG Qiqing, WANG Qiming and Hu Xiongwei, Chinese Journal of Semiconductors, 2000, **21**(2): 115 (in English) [欧海燕, 雷红兵, 杨沁清, 王启明, 胡雄伟, 半导体学报, 2000, **21**(2): 115].
- [11] 郭长志, 半导体激光模式理论, 北京: 人民邮电出版社, 1989[GUO Zhangzhi, Laser Mode Theory for Semiconductors, Peoples Post and Telecommunication Press, Beijing 1989].
- [12] Wenhua Lin, Haifeng Li, Y. J. Chen, IEEE Photonics Technology Letters, 1996, **8**(11): 1501~ 1503.