

文章编号: 0258-7025(2002)09-0801-04

阵列波导光栅复用/解复用器焦场的分析及 光栅孔径对器件串扰影响的数值分析

邱怡申^{1,2}, 李雪梅^{1,2}, 吕团孙¹, 郭福源^{1,3}

(¹ 福建师范大学物理系, 福建福州 350007; ² 福建闽江学院光电系, 福建福州 350006)
³ 浙江大学光电系, 国家光学仪器工程技术研究中心, 浙江杭州 310027)

提要 利用脉冲响应函数方法, 分析计算了阵列波导光栅(AWG)中的焦场分布, 得到信号串扰值与 AWG 孔径以及波导间距的关系。方法简便可行, 物理意义鲜明。

关键词 阵列波导, 波分复用, 焦场分布, 串扰

中图分类号 TN 25 文献标识码 A

Analysis of Focal Field and Crosstalk Simulation of Array Aperture for Array Waveguide Grating Multi/Demultiplexer

QIU Yi-shen^{1,2}, LI Xue-mei^{1,2}, LÜ Tuan-sun¹, GUO Fu-yuan^{1,3}

(¹ Department of Physics, Fujian Teachers University, Fuzhou, Fujian 350007
² Department of Opto-electronics, Fujian Minjiang Institute, Fuzhou, Fujian 350006
³ The Chinese National Engineering & Technology Research Centre for Optical Instrument, Optical Engineering Department, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027)

Abstract In this paper, the field distribution of focal plane of the phased-array waveguide grating(AWG) multi/demultiplexer is analysed by using impulse response function. The numerical solution shows that crosstalk is related to the array aperture and the waveguide width. The method is simple and feasible.

Key words array waveguide grating, wave multi/demultiplexer, field distribution of focal plane, crosstalk

1 引言

近来,阵列波导光栅(AWG)复用/解复用成为构造波分复用系统的一个热点课题^[1~4],器件从 $1 \times N$ 发展到 $N \times N$ 。AWG是一个多通道干涉仪,它的通道由等间隔的阵列波导组成,实现了高性能、多通道、高波长分辨率的波分复用技术。由于光束的传播限制在平板波导平面内,因而没有三维体形光栅所特有的弧矢方向的慧差。而对于损耗、串扰等问题提出了各种设计,如为减小损耗,波导阵列光栅的输入/输出端采用锥形波导设计^[5];为了减小串扰,尽量增大阵列波导数,或将阵列波导设计在多个罗

兰圆周上^[6]。因此,在AWG复用/解复用器的设计中,对系统中场分布的理论分析,在器件参数的设定中起着重要的作用。有关这方面的工作已在一些文献中报道^[7~9],其基本思路是计算输入场的两次夫朗和费衍射。

本文报道分析AWG系统焦场分布的一种简便方法,此方法的核心部分是把AWG视为空间不变性系统,利用标量衍射理论求AWG系统的脉冲响应的解析式,由输入波导与脉冲响应的卷积可得到焦场的分布。并通过数值计算得到串扰与数值孔径及其波导间距的关系。本文还分析了单阵列波导的衍射包络。

收稿日期 2001-07-16;收到修改稿日期 2001-09-17

作者简介 邱怡申(1954—),男,福建师范大学物理系教授,硕士,主要从事光波导与信息光学研究。E-mail: ysqiu@fjtu.

2 AWG 焦场的理论分析

2.1 阵列波导复用/解复用器基本结构

图 1 给出 AWG 波分复用/解复用器的对称结构示意图。它由输入/输出波导(in/out waveguide), 阵列波导光栅(AWG), 阵列波导数为 $2M+1$, 及连

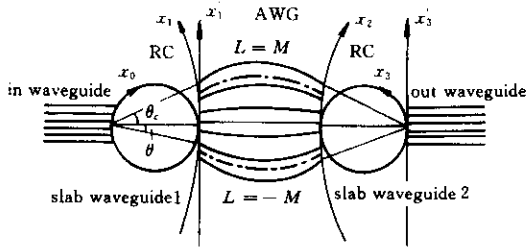


图 1 阵列波导光栅复用/解复用结构

Fig. 1 Layout of phased-array waveguide grating multi/demultiplexer

接它们的两个对称平板波导(slab waveguide)组成, 阵列波导位于以中心输入波导的中心点为圆心的圆周上。光栅的焦距就是罗兰圆(Rowland circle)的直径 R 。平板波导 2 中 θ 是衍射角, θ_c 是孔径角。当复用光波进入某一输入波导时, 光波在平板波导 1 内衍射, 并耦合进阵列波导。经阵列波导后的光波经夫琅和费衍射, 聚焦到不同的输出波导位置, 完成了解复用的功能。如果光波反向输入, 则可完成复用功能。

2.2 输入波导光场横向分布

设输入/输出波导芯区横向宽度为 a_0 , 归一化结构参数 $V = ka_0(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$, 其中 n_1 为芯区折射率, n_2 为包层折射率, k 为真空中波数。包层中横向衰减常数为 $q_x = (V^2 - k_1^2 a_0^2)/a_0$, 其中 k_1 为导波模式在芯区中的横向传播常数, 则相应的横向模场分布^[10]为

$$E_0(x_0, a_0) = \begin{cases} A \cdot \cos(k_1 \cdot x_0) & |x_0| \leq \frac{a_0}{2} \\ A \cdot \cos\left(\frac{k_1 \cdot a_0}{2}\right) \cdot e^{-q_x \left(|x_0| - \frac{a_0}{2}\right)} & |x_0| \geq \frac{a_0}{2} \end{cases} \quad (1)$$

2.3 AWG 系统的脉冲响应

AWG 系统中光的传输必须满足近轴近似, 可视为空间不变线性系统, 于是输出端的焦场分布与输入波导的光场分布^[11]的关系为

$$E_3(x_3) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x_3 - x_0) \cdot E_0(x_0) dx_0 \quad (2)$$

其中 $h(x_3, x_0)$ 是 AWG 系统的脉冲响应。我们只需确定中心输入波导的中央点的脉冲响应 $h(x_3)$, 就能根据中心输入波导的模场(1)式求出输出波导的光场分布。显然, 近轴性质保证了非中心输入波导的情形可根据平移不变性求得。因此 AWG 系统的性质

$$E_3(x_2) \propto \sum_{L=-M}^M p(x_2 - Ld) = \{p(x_2) * \sum_{L=-M}^M \delta(x_2 - Ld)\} \quad (3)$$

式中 d 为相邻波导间距, $*$ 为卷积符号, $p(x_2)$ 为阵列光波导(芯区横向宽度为 a_2 的矩形波导)的模场分布, 即 $P(x_2) = E_0(x_2, a_2) / (2M+1)$ 是阵列波导数。根据凹面光栅原理, 在焦平面 x_3' 的场分布是凹面光栅 $E(x_2)$ 的夫琅和费衍射

$$h(x_3') = \frac{e^{j \cdot k_s \cdot R} \cdot e^{j \cdot \frac{k_s}{2R} [x_3']^2}}{j \lambda R} F \cdot T \{E_3(x_2)\}_{f=x_3'/\lambda R} = \frac{e^{j \cdot k_s \cdot R} \cdot e^{j \cdot \frac{k_s}{2R} [x_3']^2}}{j \lambda R} F \cdot T \left\{ \sum_{L=-M}^M p(x_2 - Ld) \right\}_{f=x_3'/\lambda R} \quad (4)$$

式中 k_s 为自由传播区的波数, 本文中的 x_3' 与 (x_3) 相同, 将(3)代入上式, 并考虑到将坐标系变换到罗兰圆上, 须引入位相弯曲因子 $\exp(-jk_s x_3^2/R)$ (x_3) 近似为 x_3 ^[11], 脉冲响应为

$$h(x_3') \propto e^{j \cdot \frac{k_s}{2R} [x_3']^2} \cdot \frac{\sin\left[\frac{(2M+1) \cdot \pi \cdot d \cdot (x_3)}{\lambda R}\right]}{\sin\left[\frac{\pi \cdot d \cdot (x_3)}{\lambda R}\right]} \cdot e^{-j \cdot \frac{2M \cdot \pi \cdot d \cdot (x_3)}{\lambda R}} \cdot F \cdot T \{p(x_2)\}_{f=x_3'/\lambda R} \quad (5)$$

$P(x_2)$ 的傅里叶变换为^[12]

$$F.T\{P(x_2, a_2)\}_{f=x_3'/\lambda R} = F.T\{E_0(x_2, a_2)\}_{f=x_3'/\lambda R} = q_x \cdot (k_1)^2 \cdot \frac{q_x \cdot \cos\left(\frac{k_2 \cdot a_2 \cdot \theta}{2}\right) - k_s \cdot \theta \cdot \sin\left(\frac{k_s \cdot a_2 \cdot \theta}{2}\right)}{[(k_1)^2 - (k_s)^2 \cdot \theta^2] \cdot [(q_x)^2 + (k_s)^2 \cdot \theta^2]} \quad (6)$$

式中 θ 取 $\theta = 2x_3/R$ 那么 脉冲响应为

$$h(x_3) \propto e^{-j \cdot \frac{k_s}{2R} \cdot (x_3)^2} \cdot F.T\{P(x_2)\}_{f=x_3'/\lambda R} \cdot \frac{\sin\left[\frac{(2M+1) \cdot \pi \cdot d \cdot x_3}{\lambda R}\right]}{\sin\left(\frac{\pi \cdot d \cdot x_3}{\lambda R}\right)} \cdot e^{-j \cdot \frac{2M \cdot \pi \cdot d \cdot x_3}{\lambda R}} \quad (7)$$

(6) 式是芯区横向宽度为 a_2 的单阵列波导的衍射包络 其强度的半值全宽由波分复用的通道数和 $\Delta\lambda$ 决定。在输出波导尺寸范围内, 衍射包络可视为与 x_3 无关的常数, 位相弯曲因子 $\exp(-jk_s x_3^2/2R)$ 的变化不会超过几分之一弧度^[11] 其对 x_3 的依赖关系可忽略, 于是脉冲响应可简化成

$$h(x_3) \propto \frac{\sin\left[\frac{(2M+1) \cdot \pi \cdot d \cdot x_3}{\lambda R}\right]}{\sin\left(\frac{\pi \cdot d \cdot x_3}{\lambda R}\right)} \cdot e^{-j \cdot \frac{2M \cdot \pi \cdot d \cdot x_3}{\lambda R}} \quad (8)$$

(8) 式表明, 脉冲响应的基本形式是衍射光栅的多孔干涉, 衍射级次对应的宽度为 $2\lambda/(2M+1)d$ 。必须强调的是 (8) 式中的线性相位因子在所考虑的尺寸范围内是不能忽略的, 尤其是对场分布和串扰值的影响不容小视。将 (1)(8) 式代入 (2) 式就可得到焦场分布

$$E(x_3) = E_0(x_3) * h(x_3) \quad (9)$$

3 串扰的数值模拟和结果分析

取典型的设计数据 取 $a_0 = 6.1 \times 10^{-6} \text{ m}$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $n_c = 1.45013$, $n_s = 1.45213$, $d = 15 \mu\text{m}$, $R = 32 \text{ mm}$ ^[7~9] 由式 (1) 图 2 给出了输入波导横向光

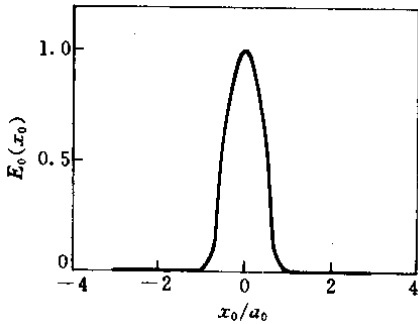


图 2 输入波导横向光场分布

Fig.2 Distribution of light field in input waveguide

场分布。在芯区, 模场为余弦分布, 在包层中, 模场呈指数衰减。(6) 式给出了衍射包络线的分布, 与角度有关, 取发散角 $\theta_c = 1/(k_s a_2)$, 则发散场随相对角

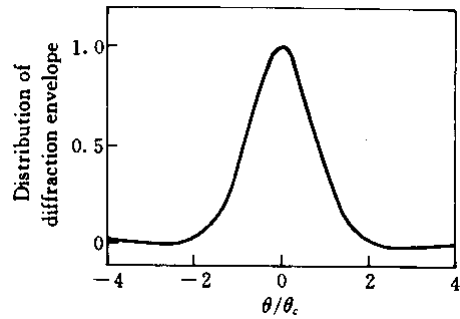


图 3 AWG 平板波导自由传播区光场分布

Fig.3 Far field distribution in free propagation region AWG

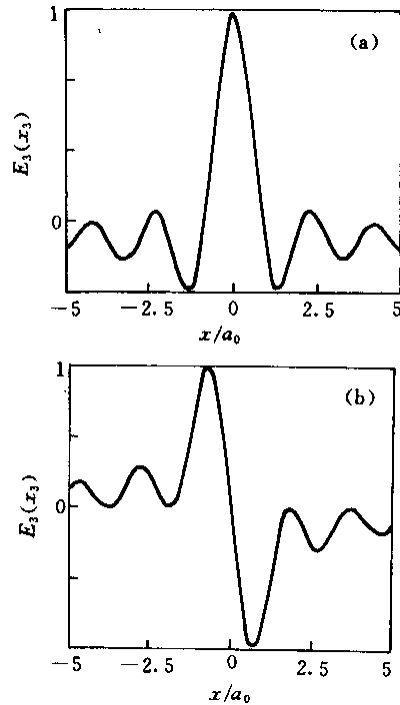


图 4 输出波导接收端光场实部分布 (a) 和虚部分布 (b)

Fig.4 Real distribution (a) and false distribution (b) of light field in output waveguide

度 (θ/θ_c) 的变化如图 3。通过公式 (1)(8)和(9)数值计算,则输出波导焦场光场实部虚部分布分别如图 4(a)(b)所示。

在 AWG 输出端,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,从而引起光信号的串扰。定义串扰为

$$CT = 10 \cdot \log \left\{ \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} E_3(x) \cdot E_0 \left(x - \frac{dr}{a} \right) dx \right]^2}{\left[\int_{-\infty}^{\infty} E_3(x) \cdot E_0(x) dx \right]^2} \right\} \quad (10)$$

其中 $E_3(x)$ 就是指输出焦场 $E(x_3)$, $E_0(x)$ 是指输入波导光场 $E(x_0)$ 。图 5 是给定阵列波导数时串扰 CT 随波导间隔 dr/a_0 的变化曲线。总体趋势表明,串扰随波导间隔的增大而减少。图 6 是在给定波导间隔 dr/a_0 时串扰随阵列波导数 $(2M + 1)$ 的变化曲线,总趋势也呈现出串扰值随阵列波导数的增大而减少。尽管如此,图 5 和图 6 中的曲线均呈现不同程度的振荡,其原因在于焦场分布 $E(x_3)$ 中的相位项有正负且呈现振荡,从而使耦合进临近波导的光场可能出现极大或极小。

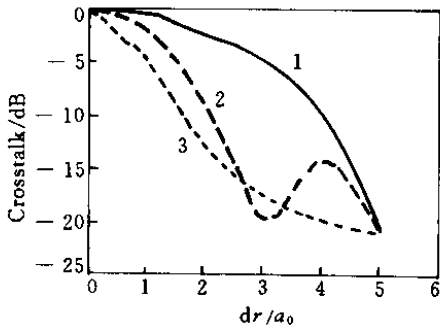


图 5 串扰随接收波导间隔 dr/a_0 的变化

Fig.5 Crosstalk resulting from two adjacent receiver waveguides
1: $2M + 1 = 100$; 2: $2M + 1 = 200$; 3: $2M + 1 = 380$

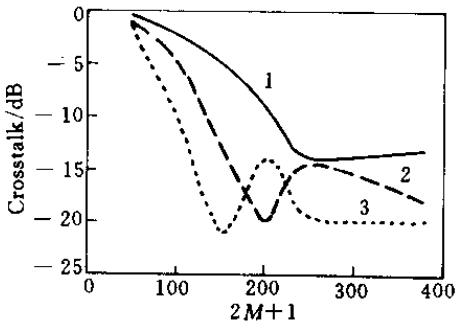


图 6 串扰随阵列波导数 $2M + 1$ 的变化

Fig.6 Crosstalk resulting from number of array
1: $dr/a_0 = 2$; 2: $dr/a_0 = 3$; 3: $dr/a_0 = 4$

4 结 论

本文利用线性系统分析方法和标量衍射理论,求得 AWG 系统的脉冲响应,脉冲响应的宽度由 AWG 的孔径决定。输出焦场的有效宽度等于输入场矩形波导的模式宽度与脉冲响应的宽度之和。这一结论对输出波导间的串扰分析有较深刻的指导意义。由于凹面光栅的聚焦特性必须满足近轴条件,所以对 AWG 系统作近轴近似是合理的前提。

参 考 文 献

- 1 J. J. He, B. Lamontagne, E. S. Koteles. Polarisation dispersion compensated AWG demultiplexer fabricated in single shallow etching step [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(9): 737 ~ 738
- 2 K. Okamoto, K. Takiguchi, Y. Ohmori. 16-channel optical add/drop multiplexer using silica-based arrayed-waveguide gratings [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(9): 723 ~ 724
- 3 Kin Seng Chiang. Effective-index method for the analysis of optical waveguide couplers and arrays: An asymptotic theory [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(1): 62 ~ 72
- 4 A. Kaneko, S. Kamei, Y. Inoue *et al.*. Athermal silica-based arrayed-waveguide grating (AWG) multi/demultiplexers with new low loss groove design [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(4): 318 ~ 319
- 5 C. Dragone. Optimum design of a planar array of tapered waveguides [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, **7**(11): 2081 ~ 2093
- 6 J. B. D. Soole, M. R. Amersfoort, H. P. LeBlanc *et al.*. Use of multimode interference couplers to broaden the passband of wavelength-dispersive integrated WDM filters [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(10): 1340 ~ 1342
- 7 Lei Hongbin, Ou Haiyang, Yang Qingqing *et al.*. Analysis and design of array aperture for phased-array waveguide grating multi/demultiplexer [J]. *Chinese J. Semiconductors* (半导体学报), 2000, **21**(4): 359 ~ 364 (in Chinese)
- 8 Hiroyuki Tsuda, Hirokazu Takenouchi, Akira Hirano *et al.*. Performance analysis of a dispersion compensator using arrayed-waveguide gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(8): 1139 ~ 1147
- 9 OU Haiyang, LEI Hongbin, Yang Qingqing *et al.*. Simple method for designing 1×8 arrayed-waveguide grating multi/demultiplexers [J]. *Chinese J. Semiconductors* (半导体学报), 2000, **21**(8): 798 ~ 802 (in Chinese)
- 10 Ming Hai, Zhang Guoping. *Optoelectronic Technology* [M]. Beijing: China Science and Technology University Publishing House, 1998. 17 ~ 47 (in Chinese)
- 11 J. W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1976. 18 ~ 110 (in Chinese)
- 12 Guo Changzhi. *Mode Theory of Semiconductor Laser* [M]. Beijing: People's posts & Telecommunication Publishing House, 1989. 87 ~ 103 (in Chinese)