

新型二元纯位相型波分复用器*

吴小萍

(清华大学电子系 北京 100084)

范朝阳

(浙江大学物理系 杭州 310027)

周文

(浙江大学信息与电子工程学系)

提要 应用杨-顾算法,只用两块纯位相片 H_1 和 H_2 来代替透镜、光栅等分立元件,提出一种新型纯位相型波分复用器件。 H_1 位相片的作用是使输出面 H_2 上强度分布达到设定所要求的那样,8个高斯子波按不同波长依次排列分布在不同位置,相互之间串话尽可能最小; H_2 位相片的作用是对输出平面上强度满足要求的出射光进行相位调整,使其最好地耦合到各接收通道,单纯由纯位相调制的方法,来实现解复用器件分光、聚焦等综合功能。

关键词 杨-顾算法,波分复用,解复用器

1 引言

目前,光纤通信发展很快,光纤已成为信息流通的主干线。为了充分利用光纤的宽频带资源,发展了各种复用技术,如FDM,TDM和WDM等。其中波分复用(WDM)技术^[1,2]是克服电子瓶颈的有效途径,它使用灵活,不必改动现有的光缆设备,只要在线路中添加波分复用器和相应的终端设备就可实现扩容,在未来的城域网(MAN)、局域网(LAN)和综合业务数据网(ISDN)中都有极广泛的应用前景。

在波分复用光通信技术迅速发展的同时,被誉为90年代光学技术的二元光学^[3,4]也在逐渐兴起并在国内外学术界掀起研究热潮。二元光学元件采用衍射原理,把入射光波加以组合,在元件的另一侧形成完整可灵活控制的新波,设计灵活,因其独特的优点在许多领域都有广泛的运用。本文就二元光学在波分复用器件的应用方面作一些研究,提出一种新型纯位相型WDM器件,用纯位相调制的方式实现WDM器件的分光、聚焦等综合功能,简化了WDM器件的结构,使集成式WDM器件的制作成为可能。它较之采用凹面光栅分光聚焦的单片集成式WDM器件,省去了输入、输出波导,不存在波导与光纤的耦合问题,使用起来更方便,直接插在输入光纤和输出光纤之间即可。

2 基本原理

杨-顾算法是80年代初由中国科学院物理所杨国桢、顾本源为解决相位恢复问题提出来

* 浙江省自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1996—10—09; 收到修改稿日期: 1996—12—25

的^[5~9]。原来是用在由实际测得的 H_1, H_2 平面的强度分布来推算 H_1 平面, H_2 平面实际具有的相位分布, 而现在, 设定 H_1, H_2 应该具有的强度分布, 来设计 H_1 位相片上应该具有的位相分布。

以下是利用杨-顾算法进行设计的基本思想。

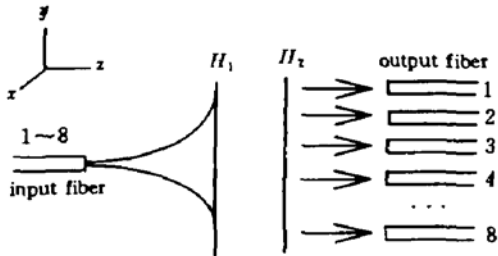


图 1 纯位相型波分复用器件的模型

Fig. 1 Model for phase-only WDM device

图 1 所示是纯位相型波分复用器件的基本模型, H_1 表示输入平面, H_2 表示输出平面, H_1 位相片的作用是使输出面 H_2 上强度分布达到要求, 8 个高斯子波按不同波长依次排列分布在不同位置, 串话尽可能最小; H_2 位相片的作用是对输出平面上强度满足要求的出射光进行相位调整, 使之最好地耦合到各接收通道。设计中使混合在一起的 8 路光经过第一个位相片后有相同的相位, 然后由于波长不同在传播到第二个位相片的过程中沿不同的偏转角度进行从而相互间分离开来。这个经过第一个位相片后共同的初相位应该是使 8 路光均发生同方向的偏转, 对于不同的波长, 偏转角度有所差别, 从而达到波长分离。

对于给定波长 λ_a , a 表示 1~8 之间的任何一个波长, 输入平面上的波函数为

$$U_{1a} = U_1(x_1, \lambda_a) = \rho_1(x_1, \lambda_a) \exp[j\phi_1(x_1, \lambda_a)] \tag{1}$$

而输出平面上的波函数是

$$U_{2a} = U_2(x_2, \lambda_a) = \rho_2(x_2, \lambda_a) \exp[j\phi_2(x_2, \lambda_a)] \tag{2}$$

两者由光学变换函数 G 联系, $U_2 = GU_1$ 。输入面取样点的数目为 N_1 , 输出面取样点的数目为 N_2 , 于是 $U_1(x_1, \lambda_a)$ 和 $U_2(x_2, \lambda_a)$ 可分别表示为 N_1 和 N_2 维矢量, 而 G 是一个 $N_1 \times N_2$ 矩阵。

采用叠加积分衍射分析, 根据菲涅耳衍射定律, 输出面上任一像点 I 处的复振幅为输入面各积分块强度贡献的矢量和, 即

$$U(I) = \frac{1}{j\lambda} \iint A_0 \exp(jP) \frac{\exp(jk\tau)}{r} \frac{1 + \cos(\hat{n}, r)}{2} ds \tag{3}$$

其中, 输入面上任一点 B 点的光场振幅为 A_0 , 相位为 P , \hat{n} 为输入面外法线的单位矢量, r 是 I 点到 B 点的矢径。

设 xy 两个方向变换函数相同, 对一个方向 x , 变换函数 G 表示为

$$G_0(i, j, u) = \left(\frac{1 + \cos\theta}{j2\lambda r} \right)^{1/2} \exp(jk\tau) \tag{4}$$

其中, θ 表示 \hat{n} 与 r 的夹角。

定义用“逼近”距离 D 这一物理量来描述 GU_1 逼近 U_2 的程度

$$D^2 = \sum_a \| U_{2a} - G(\lambda_a)U_1(\lambda_a) \|^2 \tag{5}$$

作变分运算, 求泛函关于变量 ϕ_1, ϕ_2 的极小值, 使

$$\delta_{\phi_1} D^2 = 0 \tag{6a}$$

$$\delta_{\phi_2} D^2 = 0 \tag{6b}$$

其中, ϕ_1, ϕ_2 是 H_1, H_2 位相片上的位相分布。得

$$\phi_{1k} = \arg \left[\sum_{j,a} G_{j,k,a}^* \rho_{2ja} \exp(j\phi_{2ja}) - \sum_{j=k} A_{k,j}(\lambda_a, \lambda_a) \rho_{1j}(\lambda_a) \exp(j\phi_{1j}) \rho_{1k}(\lambda_a) \right]$$

$$\phi_{2xy} = \arg\left[\sum_j G_{k,j} \rho_{1,j}(\lambda_j) \exp(j\phi_{1,j})\right] \quad (7)$$

其中, $A(\lambda_x, \lambda_y) = G^+(\lambda_y)G(\lambda_x)$, “+”表示取厄密共轭运算, $k = 1, 2, 3, \dots, N_1$ 。

对(7)式进行反复的迭代运算,就可求得 H_1, H_2 应该具有的相位分布。

首先在二维坐标系 (y, z) 中,得到 H_1 在 y 方向的相位分布;然后在二维坐标系 (x, z) 中,得到 H_1 在 x 方向的相位分布。由于高斯光束 x, y 两个方向可以分离变量,所以在三维 (x, y, z) 情况下, H_1 位相片的位相取值 = H_1 在 x 方向的位相分布 + H_1 在 y 方向位相分布。

对于 H_2 位相片,把 H_2 位相片分成 8 段,每一段分别按波长进行位相补偿。在这段位置其它通道串过来的光本来就极小,又不进行位相补偿,这样就可最大限度地减少串话。

要使入射光场与单模光纤最佳耦合,必须在振幅与相位两个方面都匹配。若接收光纤采用单模光纤,设其芯径为 $8 \mu\text{m}$,入射场为 E_1 ,单模基模场为 E_2 ,则入射光与接收光纤的耦合效率为

$$\eta = \frac{\left| \iint_{x,y} E_1 E_2^* dx dy \right|^2}{\iint_{x,y} |E_1|^2 dx dy \iint_{x,y} |E_2|^2 dx dy} \quad (8)$$

3 结 果

设计的 H_1, H_2 位相片所具有的位相分布如图 2(a), (b) 所示,入射光束通过 H_1 位相片的位相调制后,传输到 H_2 面上,在输出面上的强度分布如图 2(c) 所示,从图中可以看到,8 个波长的光波已发生分离,相互之间几乎没有串扰, H_1 位相片很好地实现了分光功能 输入光束在通

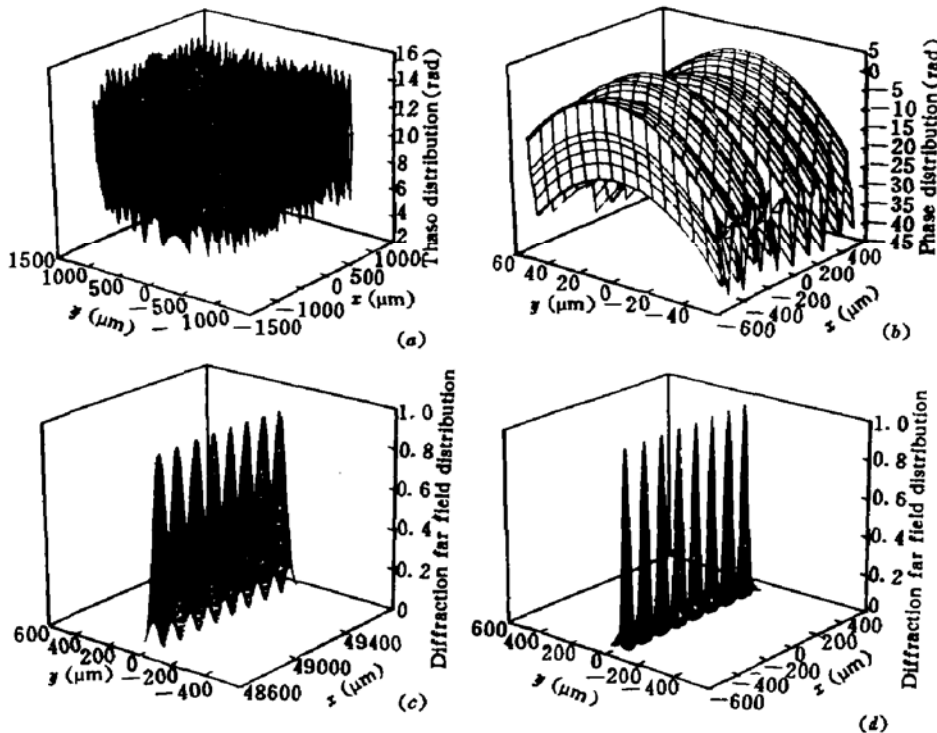


图 2 (a) H_1 位相分布; (b) H_2 位相分布; (c) H_2 处衍射远场分布; (d) 接收光纤处衍射远场分布
 Fig. 2 (a) Phase distribution of H_1 ; (b) Phase distribution of H_2 ; (c) Far-field distribution on H_2 ;
 (d) Far-field distribution on the end face of a receiving fiber

过 H_2 位相片后,再传输距离 $356.58 \mu\text{m}$,在接收光纤端面上的远场分布如图 2(d) 所示,可见 8 个通道的光强分布都转化为能与接收单模光纤的模式最佳耦合的形式,彼此之间几乎没有串话,从 H_2 到各接收光纤的光场耦合效率如表 1 所示。

表 1 各信道光从 H_2 到各接收光纤的耦合效率计算值

Table 1 The coupling power efficiency from H_2 to the receiving fiber for eight channels

channel	1	2	3	4	5	6	7	8
coupling efficiency (%)	98.98	98.97	98.96	98.96	98.98	99.00	99.03	99.07

从 H_1 到 H_2 光场的耦合效率为 82%,这可能是由于通过 H_1 位相片的色散作用,入射光在 H_2 面上其它位置有其它级次的光,这可以类比于衍射光栅的情形。

4 量化处理

为了使 H_1, H_2 位相片在工艺上易于制作,对图 2(a) 所示 H_1 位相片连续的位相取值进行 8 阶量化处理,量化后的相位分布在 I, II, III, IV 象限的情形如图 3(a) ~ (d) 所示,量化后 H_2 位相片的相位分布如图 4 所示。通过工艺上多次套刻的方法在器件片基表面上制作出相应厚度的台阶,当入射光通过台阶时,在不同的位置引入不同的光程差,由此来实现二元纯位相元件的相位调制功能。有

$$\phi_{\text{量化}} = 2\pi \frac{(n-1)\delta_{\text{阶}}}{\lambda} \quad (9)$$

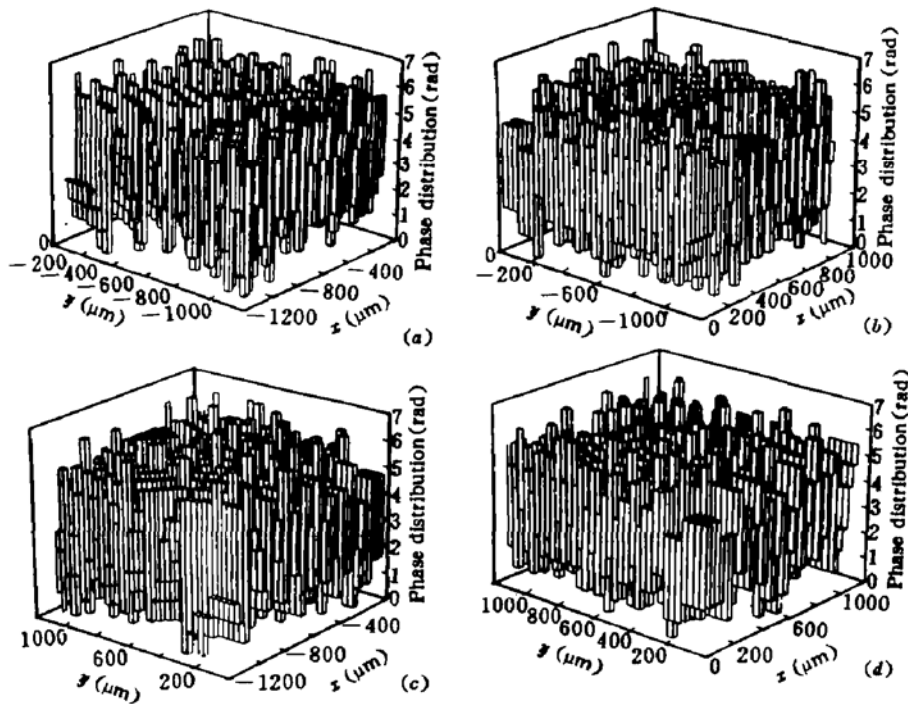


图 3 H_1 量化后相位分布 ($N=8$), (a) ~ (d) 代表四个象限的情况

Fig. 3 Phase distribution for an 8-level relief structure of H_1

其中, n 为材料的折射率, $\phi_{\text{量化}}$ 为二元纯位相元件量化后的相位值, $\delta_{\text{厚}}$ 为片基表面台阶的相应厚度。这样, 就可以从设计得到的量化后位相随位置的分布曲线换算得到二元纯位相元件在不同位置的台阶高度, 也就确定了此元件的实际工艺制作尺寸, 可照此制作二元纯位相元件。

H_1, H_2 位相片量化处理后, 输入光在通过 H_1 位相片后在 H_2 输出面上的衍射远场如图 5(a) 所示, 在空间传输一段距离后, 在接收光纤端面的衍射远场如图 5(b) 所示, 可见, 通过量化处理后, 各个波长的输入光束仍能被 H_1 位相片分光、聚焦, 然后通过 H_2 位相片的位相调整, 最佳地匹配耦合到各接收光纤, 各个波长之间几乎无串扰, 经过量化处理后, 从 H_2 到各接收光纤的光场耦合效率如表 2 所示。

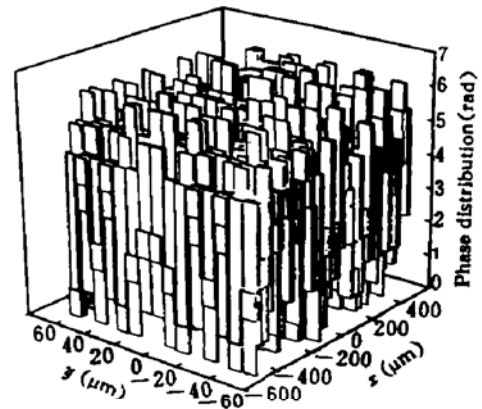


图 4 H_2 量化后位相分布 ($N = 8$)
Fig. 4 Phase distribution for an 8-level relief structure of H_2

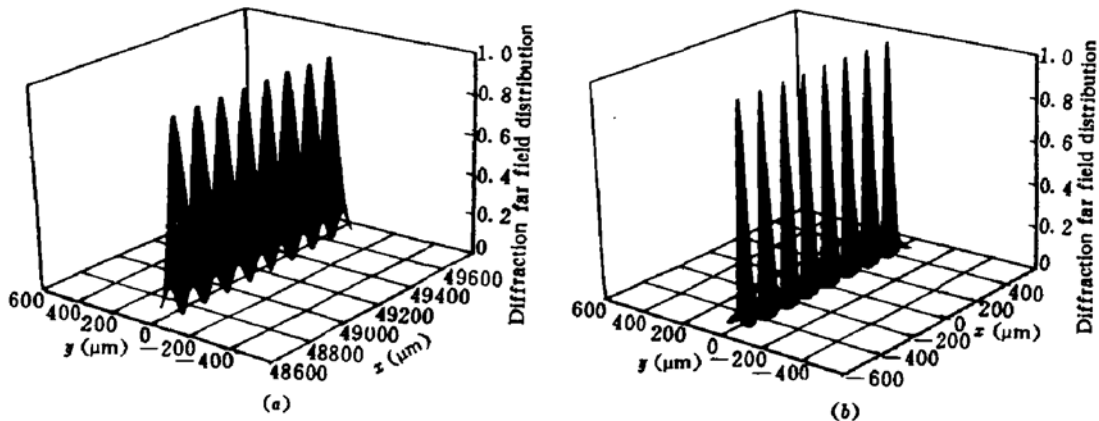


图 5 (a) H_1, H_2 8 阶量化后, H_2 处衍射远场; (b) H_1, H_2 8 阶量化后, 接收光纤处衍射远场

Fig. 5 (a) Far-field distribution on H_2 for the 8-level relief structure of H_1 and H_2 ;

(b) Far-field distribution on the end face of the receiving fiber for the 8-level relief structure of H_1, H_2

表 2 量化处理后, 各信道光从 H_2 到各接收光纤的耦合效率

Table 2 The coupling power efficiency from H_2 to the receiving fiber for eight channels for 8-level relief structure

channel	1	2	3	4	5	6	7	8
coupling efficiency (%)	98.93	98.91	98.88	98.86	98.84	98.81	98.79	98.75

5 讨论

由于考虑到输入面存在截断误差 0.2 dB; 同理, 输出面也存在截断误差 0.2 dB。从 H_1 到 H_2 的能量损耗为 0.89 dB。考虑菲涅耳反射损耗, 在每一个反射面理想情况下为 4%, 相当于 0.17 dB, 有 H_1, H_2 及光纤端面共三个反射面。与光纤的耦合损耗约为 0.05 dB。所以, 所设计的纯位相型 WDM 器件插入损耗总计约为 1.85 dB。

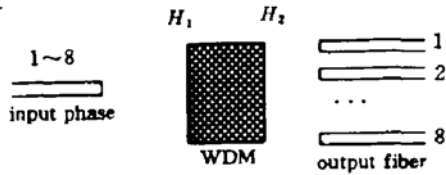


图 6 实际使用中的纯位相型集成式波分复用器件

Fig. 6 Phase-only integrate WDM device in actual use

在实际使用中, H_1, H_2 位相片可以刻在光学玻璃的两端面, 如图 6 所示, 这样, 这种纯位相型波分复用器就可以做成集成式, 其体积为 $5.7 \times 3.4 \times 0.5 \text{ cm}^3$, 它左端离输入光纤 6.449 mm , 右端离输出光纤 $356.6 \mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- 1 Gerhard Winzer. Wavelength multiplexing components—a review of single-mode devices and their application. *IEEE J. Lightwave Tech.*, 1984, LT-2(4): 369~378
- 2 J. P. Laude. Wavelength division multiplexers; review of some devices proposed recently. *EFOC/LAN 85*: 51~58
- 3 夏向亮, 杨国光. 二元微透镜的位相平衡设计及叠加积分衍射分析. *光学学报*, 1994, 14(3): 296~302
- 4 D. W. Rick, S. M. Botelet. Aberration reduction using binary optics. *Proc. SPIE*, 1990, 1211: 79~83
- 5 Yang Guozhen, Wang Li, Dong Bizhen. On the amplitude-phase retrieval problem in an optical system involved non-unitary transformation. *Optik*, 1987, 75(2): 68~74
- 6 Guozhen Yang, Benyuan Gu, Xin Tan. Iterative optimization approach for the design of diffractive phase elements simultaneously implementing several optical functions. *J. Opt. Soc. Am.*, 1994, 11(5): 1632~1640
- 7 杨国桢, 顾本源. 光学系统中振幅和相位的恢复问题. *物理学报*, 1981, 30(3): 410~413
- 8 杨国桢, 顾本源, 董碧珍. 衍射光学元件的设计方法. *光子学报*, 1994, 23(z2): 6~12
- 9 汪力, 董碧珍, 杨国桢. 非幺正变换系统中的二维相位恢复问题. *物理学报* 1989, 38(11): 989, 1809

New Type Phase-only Wavelength Division Multiplexer

Wu Xiaoping

(*Electronics Department, Tsinghua University, Beijing 100084*)

Fan Chaoyang

(*Physics Department, Zhejiang University, Hangzhou 310027*)

Zhou Wen

(*Department of Information and Electronics, Zhejiang University, Hangzhou 310027*)

Abstract Using Y-G algorithm, substituting the discrete components such as gratings, and lenses by two binary phase-only elements H_1 and H_2 , the new type phase-only wavelength division multiplexer (WDM) is designed. The phase modulation of H_1 makes the intensity distribution on the output plane H_2 satisfied to the design such that eight Gaussian beams are arrayed according to their wavelengths and their crosstalk is little. H_2 transforms the wavefront of the output laser beam to couple well to each receiving channel. By only phase modulation, the demultiplexer, focusing etc. of the WDM are realized.

Key words Y-G algorithm, WDM, demultiplexer