

MMI 阵列波导光栅复用/解复用器的研制*

马慧莲¹ 江晓清¹ 杨建义¹ 王明华¹ 余金中²

(1 浙江大学信电系光电子研究所, 杭州 310027)

(2 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 详细分析了基于自镜像效应的 MMI DMUX 器件的基本工作原理, 在此基础上, 在 SOI 材料上完成了对 8 信道 MMI DMUX 的具体设计. 该器件的输入、输出单模波导采用 Soref 的大截面脊形光波导理论进行优化设计, 最后获得了当输入、输出单模波导宽度为 $5\mu\text{m}$, SIE 多模波导宽度和长度分别为 $72\mu\text{m}$ 和 $6313.4\mu\text{m}$ 时, 该器件对 8 信道波长的隔离度均在 35dB 以上, 且理论传输损耗 $< 0.18\text{dB}$.

关键词: 阵列波导光栅; 复用/解复用器; 多模干涉; 有限差分光束传输法

EEACC: 4130; 4140; 2520

中图分类号: TN814^{*}.6

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)07-0919-05

1 引言

为满足蓬勃发展的容量数据传输的要求, 到目前为止, 最有效的方法之一是采用波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 传输系统. 而在 WDM 系统中, 波长复用器 (Multiplexer, MUX) 和解复用器 (Demultiplexer, DMUX) 是关键器件, 其性能的优劣对光复用系统的传输质量有决定性的影响. 在集成光学中, 人们已发展了许多不同的结构与形态^[1-2].

本文详细分析了一种基于自镜像原理的多模干涉 (Multimode Interference, MMI) 型阵列波导光栅复用/解复用器. 由于 MMI 型器件具有结构紧凑、低的插入损耗、较大制作容差等优点^[3], 因此 MMI 结构是构成多种光器件的非常重要的组成部分. SOI (Silicon-on-insulator) 是微电子中的一种重要的材料, 同时它也是硅基集成光电子的一种重要材料. 本文利用 Soref 的大截面脊形光波导理论^[4]对器件材料和结构进行优化设计, 在 SOI 材料上设计了一种具有较高波长隔离度、低传输损耗的 MMI

波导阵列光栅复用/解复用器.

2 原理

图 1 是一个 N 信道的 MMI MUX/DMUX 的结构示意图. 它由两个 $N \times N$ MMI 耦合器用一个 N 阵列波导臂连接起来. 其中, 两个 $N \times N$ MMI 耦合器是作为 N 个信道的分束器/合束器, N 个阵列臂是 MUX/DMUX 的色散元件. 对应于不同的光传播方向, 该器件具有波分复用/解复用功能. 为简洁起见, 本文只分析该器件用于 DMUX 时的情形.

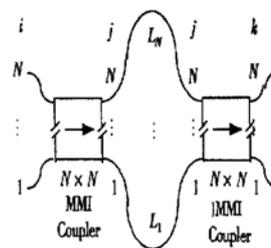


图 1 N 信道 MMI MUX/DMUX 结构示意图
FIG. 1 Schematic Diagram of N -Channel MMI MUX/DMUX

* 国家自然科学基金 (69677012), 国家重点基础研究发展规划 (G1999033104) 和集成光电子学国家重点联合实验室资助项目.

马慧莲 女, 1975 年出生, 博士生, 从事半导体光电子器件及其 CAD 研究.

王明华 男, 1941 年出生, 教授, 从事半导体集成光学和光电子器件的研究和制作.

2000-07-31 收到, 2000-12-07 定稿

当考虑作为 MUX 使用时, 只需将 DMUX 的输入、输出波导分别作为 MUX 的输出、输入波导即可。

2.1 MMI 耦合器的工作原理

波导模式间的相长性干涉所导致的自镜像效应 SIE(Self-Imaging Effect) 是 MMI 器件最基本的工作原理. MMI 耦合器的关键结构是一个能传输多个模式(一般大于 3 个)的多模波导, 本文称这个多模波导为 SIE 多模波导. 由一个 SIE 多模波导和两组分别用于输入、输出的单模波导便构成了 MMI 耦合器。

由一般干涉原理可知^[5], N 重像的位置:

$$L_{\text{MMI}} = \frac{3L_{\pi}}{N} \quad (1)$$

其中 L_{π} 为零次模和一次模传播常数差倒数的 π 倍, 即两个最低次模的拍长(Beat Length)

$$L_{\pi} = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} = \frac{1}{2} \times \frac{\lambda}{n_0 - n_1} \quad (2)$$

其中 β_0 和 β_1 分别是 SIE 多模波导区(宽度为 W) 零次模和一次模的传播常数; n_0 和 n_1 是相应的有效折射率; λ 是工作波长。

图 2 给出了本文使用的 $N \times N$ MMI 耦合器的结构示意图. 其输入、输出波导横向截面位置满足:

$$x_i = (2i - 1)(W_c/2N) \quad (3)$$

$$x_j = (2j - 1)(W_c/2N) \quad (4)$$

其中 W_c 是 SIE 多模波导区的有效宽度, $i, j = 1, 2, \dots, N$ 分别是输入、输出波导(从下至上命名), 则 N 重像的相对相位关系:

$$\begin{aligned} \phi_j = & -\frac{\pi}{2}(-1)^{i+j+N} + \frac{\pi}{4N} \left[i + j - i^2 - j^2 + \right. \\ & \left. (-1)^{i+j+N} \left[2ij - i - j + \frac{1}{2} \right] \right] \end{aligned} \quad (5)$$

由(5)式不难得到下面两个对称关系式

$$\phi_j = \phi_i \quad (6)$$

$$\phi_j = \phi_{N+1-i, N+1-j} + m \times 2\pi (m \text{ 是整数}) \quad (7)$$

2.2 $N \times N$ MMI DMUX 的工作原理

DMUX 的工作原理可简述如下: 从光纤进入的多波长复合光进入 MMI 分束器的其中一个输入波导, 经 MMI 分束器后, 各波以一定的相位差耦合到 N 阵列波导臂, N 阵列波导彼此分开, 光在各个波导中独立传播, 经过 N 阵列波导臂后, 光进入 MMI 合束器. 由于 N 个阵列波导存在长度差, 故在 MMI 合束器波导入口获得了相位差, 因为相移大小和波

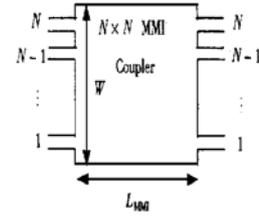


图 2 $N \times N$ MMI 耦合器的结构示意图

FIG. 2 Schematic Diagram of $N \times N$ MMI Coupler

长有关, 故 MMI 合束器的合束位置依赖于输入光波长, 从而输入 DMUX 的光被分解到相应输出波导. 由多模干涉原理可知^[3,5], 当 N 阵列臂长度 L_j 满足下关系式时:

$$\begin{aligned} (L_j - L_m) \beta(\lambda_{i,k}) + (\phi_{mk} + \phi_m - \phi_k - \phi_j) \\ = A_{ijk} \times 2\pi \end{aligned} \quad (8)$$

从 i 端口输入的复合光中, 波长为 $\lambda_{i,k}$ 的光将从端口 k 输出. 其中, L_m 是 N 阵列波导中最短的阵列臂, ϕ 数值可由(5)式求得, A_{ijk} 是一个待定的整数. 下面将详细给出 A_{ijk} 的确定过程。

设 N 信道波长间隔为 $\Delta\lambda$, 则等间隔的 N 信道波长 λ_s 可定义如下:

$$\lambda_{s+1} = \lambda_s + \Delta\lambda \quad (9)$$

为后面分析简洁起见, 记 N 信道中心波长为 λ_0

$$\lambda_0 = \lambda_{\text{round}(N/2)} \quad (10)$$

其中 $\text{round}(x)$ 为不小于 x 的整数. 由 DMUX 的工作原理可知, 当 N 信道的复合光进入 DMUX 的输入端口 i 时, 在 DMUX 的某一输出端口 k , 有且只有波长为 $\lambda_{i,k}$ 的光输出. 利用 DMUX 器件结构的对称性, 可以得到如下关系式:

$$\lambda_{i,k} = \lambda_{k,i} \quad (11)$$

(11) 式意味着从 i 端口输入、 k 端口输出的光与 k 端口输入、 i 端口输出的光有相同的光谱特性, 即对应着同一个波长, 它的重要性在于 DMUX 结构的具体设计与输入波导的定位是没有关系的, 从而大大简化设计过程. 故在后面的分析中, 将仅限于 DMUX 工作于输入端口 $i = m$ 的情形。

显然, 对于单一工作波长 λ , 由(8)式非常容易设计出满足其相位匹配条件的 N 阵列臂(取 A_{ijk} 为任一整数). 因此, 在具体设计之前, 可以假设 DMUX 的 N 阵列臂相对于中心波长 λ_0 来说, 是满足相位匹配条件的, 且从 m 输入端口输入时, 将从 m 输出端口输出. 然而, 对于 $k \neq m$ 的输出端口, 存在一相位失配, 可表示如下:

$$\Delta\phi_k = (\phi_k - \phi_{mk}) - (\phi_m - \phi_{mm}) \quad (12)$$

其中 ϕ 数值可由(5)式求得. 则当波长为 $\lambda \neq \lambda_0$ 的光在第 j 个阵列波导和第 m 个阵列波导间产生的相位差满足(12)式时, 在 DMUX 的输出端口 k 将得到波长 λ 的光. 将 ϕ_k 数值代入(12)式并整理得:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_k = & \frac{2\pi}{N} \times \frac{(-1)^N}{4} \left[\left[(-1)^{j+m} \left[j - \frac{1}{2} \right] - \right. \right. \\ & \left. \left. \left[m - \frac{1}{2} \right] \right] \times \left[(-1)^{k+m} \left[k - \frac{1}{2} \right] - \left[m - \frac{1}{2} \right] \right] \right] \\ & - \frac{\pi(-1)^n}{2} \{ [1 - (-1)^{j+k}] \\ & - (-1)^{k+m} + (-1)^{j+k} \} \quad (13) \end{aligned}$$

不难验证, (13)式两个大括号内部分都是 4 的倍数, 因此, $\Delta\phi_k$ 将始终是 $2\pi/N$ 的整数倍. 定义 ΔL 为在相邻信道波长上产生相位差为 $2\pi/N$ 时的阵列臂长度差, 则它可由下式近似计算:

$$\Delta L \approx \frac{\lambda_0(\lambda_0 + \Delta\lambda)}{N\Delta\lambda[n_0 - \lambda_0(dn/d\lambda)]} \quad (14)$$

其中 n 和 n_0 分别是工作波长为 λ 和 λ_0 时阵列臂的有效折射率. 因此, 阵列臂长度 L_j 须满足以下关系:

$$L_j - L_m \cong d_j \Delta L, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

其中 d_j 为阵列臂因子, 其最小值 $d_m = 0$, 为防止 N 阵列臂相互交叉, 其最大值 $d_j^{\max} \geq N - 1$. 从器件结构紧凑性出发, 显然 d_j^{\max} 越小越好. 由(13)~(15)式得

$$d_j = \psi_j + A_j N, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (16)$$

其中 A_j 是保证 N 阵列臂不相互交叉的最小整数, 即 N 阵列臂间必须满足以下关系式:

$$L_{j_2} > L_{j_1}, \text{ 当 } j_2 > j_1 \geq m \text{ 或 } j_2 \leq j_1 \leq m \text{ 时} \quad (17)$$

ψ_j 由下式给出:

$$\psi_j = (- (N/2\pi) \Delta\phi_k) \bmod N \quad (18)$$

由(13)~(18)式就可以计算 N 信道波长 DMUX 的最佳(有最小 d_j^{\max} 时)阵列臂因子 d_j 的数值. 表 1 给出了 $N = 3-8$ 时的情形. (8)式令 $i = k = m$, 则 $\lambda_{ik} = 0$, 并利用 $\phi_{ij} = \phi_m$ 整理得:

$$L_j - L_m = \left[A_{mjm} + \frac{\phi_{mj} - \phi_{mm}}{\pi} \right] \frac{\lambda_0}{n_0} \quad (19)$$

结合(15)(19)式得

$$A_{mjm} = \text{round} \left[d_j \Delta L \frac{n_0}{\lambda_0} + \frac{\phi_{mj} - \phi_{mm}}{\pi} \right] \quad (20)$$

表 1 $N = 3-8$ 时阵列波导臂因子各相应最佳数值

Table 1 Optimum Set of Values of Array Arm Factor d_j for N -Channel Demultiplexer

N	Array Guide Number(j)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
3	0	1	2					
4	1	0	2	3				
5	3	0	1	2	4			
6	5	4	0	3	7	8		
7	4	0	1	3	5	6	9	
8	6	3	1	0	4	5	7	10

3 设计举例($N = 8$)

按 ITU-T. 692 标准, 8 信道所用中心波长为 1555.75nm, 波长间隔为 ~ 1.6 nm. 本文所设计的 8 信道 MMI DMUX 的单模输入、输出脊形波导的截面图如图 3 所示. 用 Soref 的大截面脊形光波导理论^[4]对这种脊形光波导进行优化设计, 以获得低传输损耗和较大截面的单模工作状态. 最后, 我们获得的单模波导宽度 $a = 5\mu\text{m}$. 利用(1)~(20), 最后可得如表 2 所示的一些设计参数值.

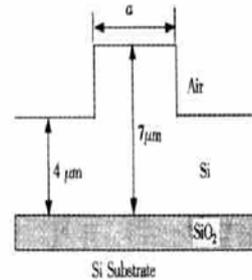


图 3 SOI 单模脊形光波导截面示意图

FIG. 3 Cross-Section of SOI Single-Mode Rib Waveguide

从表 2 不难发现, 该器件对 TE 和 TM 模存在一定的偏振依赖性, 为减小器件的偏振依赖性, 器件最后所选参数为两者的平均值.

表 2 8 信道 DMUX 的设计参数值

Table 2 Values Used for the 8-Channel DMUX

Parameter and Symbol	Value
Maximum Number of Channel, N	8
Channel Spacing, $\Delta\lambda$	~ 1.6 nm
Center Wavelength, λ_0	1555.75nm
Width of Single-Mode Guide, a	$5\mu\text{m}$
Width of SIE Multimode Guide, W	$72\mu\text{m}$
Length of SIE Multimode Guide, L_{TE}	$6323.5\mu\text{m}$
Length of SIE Multimode Guide, L_{TM}	$6303.3\mu\text{m}$

续表

Parameter and Symbol	Value
Effective Index of Array Arm Guide n_{OTE}	3.4743223822
Effective Index of Array Arm Guide n_{OTM}	3.4742157081
ΔL_{TE}	52.053 μm
ΔL_{TM}	52.047 μm
$(L_1 - L_4)_{TE}$	312.778 μm
$(L_1 - L_4)_{TM}$	312.788 μm
$(L_2 - L_4)_{TE}$	156.221 μm
$(L_2 - L_4)_{TM}$	156.226 μm
$(L_3 - L_4)_{TE}$	51.887 μm
$(L_3 - L_4)_{TM}$	51.889 μm
$(L_5 - L_4)_{TE}$	207.324 μm
$(L_5 - L_4)_{TM}$	207.331 μm
$(L_6 - L_4)_{TE}$	260.107 μm
$(L_6 - L_4)_{TM}$	260.115 μm
$(L_7 - L_4)_{TE}$	362.650 μm
$(L_7 - L_4)_{TM}$	362.213 μm
$(L_8 - L_4)_{TE}$	520.102 μm
$(L_8 - L_4)_{TM}$	520.118 μm

4 特性分析

在 DMUX 中, 插入损耗(Insertion Loss, IL) 和 波长隔离度(Wavelength Isolation, ISO) 是两个极为重要的质量指标. 设 P_s 和 P_c 分别是第 s 信道波长的输出光功率和其他所有信道对第 s 信道的串扰, P_{in} 为 s 信道波长输入光的功率. 则 DMUX 的插入损耗和波长隔离度可定义如下:

$$IL = 10\log(P_s/P_{in}) \quad (\text{dB}) \quad (21)$$

$$ISO = 10\log(P_s/P_c) \quad (\text{dB}) \quad (22)$$

然而, 由于器件的插入损耗非常复杂, 包括理论传输损耗、材料本身的传输损耗及芯片与光纤的耦合损耗等. 本文只限于分析器件理论传输损耗. 根据表 2 所设计的参数, 采用有限差分光束传输法(Finite Difference Beam Propagation Method, FDBPM)^[6] 对该器件进行模拟分析. 图 4 和图 5 分

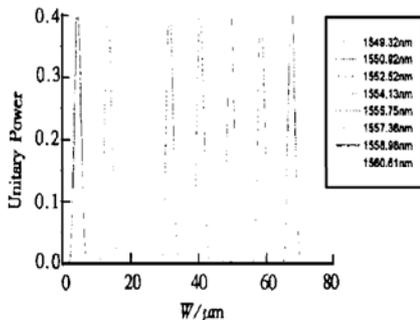


图 4 归一化输出光功率分布示意图

FIG. 4 Schematic Diagram of Unitary Output Power

别反映了当 8 个波长的光同时从波导 4 端口输入时, 在 DMUX 输出端得到的归一化输出光功率和相对光强分布情况. 将图 4 得到的 DMUX 终端场分布和输出波导中单模场分布积分, 可以得到每个输出波导即每个信道波长的输出光功率, 再利用(21)式, 就可以得到该器件对 8 个信道波长的理论传输损耗(如表 3 所示).

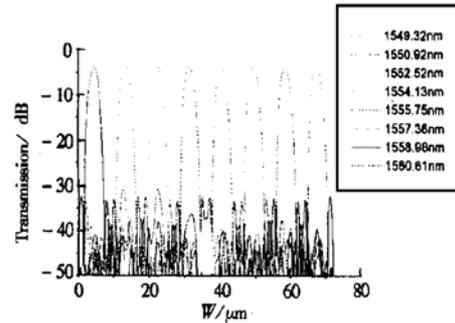


图 5 相对输出光功率大小分布示意图

FIG. 5 Schematic Diagram of Relative Output Power

表 3 所有信道波长的理论传输损耗

Table 3 Theoretical Propagation Loss for All Channel Wavelength

Channel Wavelength	Propagation Loss
λ_s/nm	/dB
1560.61	0.1481
1558.98	0.1788
1557.36	0.1136
1555.75	0.0726
1554.13	0.0647
1552.52	0.0559
1550.92	0.0734
1549.32	0.1349

从表 3 和图 5 可知, 该器件对 8 个信道波长有较小的理论传输损耗(均小于 0.18dB) 和较高的波长隔离度(大于 35dB). 同时, 从图 4 和表 3 我们不难发现, 该器件对 8 个信道波长的功率离散度小于 0.12dB.

5 总结

本文首先详细分析了 MMI DMUX 器件的工作原理, 而后利用 Soref 的大截面脊形光波导理论对器件材料和结构进行优化设计, 在 SOI 材料上设计了一种低理论传输损耗和较高波长隔离度的 8 信道 DMUX. 该器件对 8 个信道波长有较小的理论传输

损耗(均小于 0.18dB) 和较高的波长隔离度(大于 35dB).

参考文献

- [1] A. R. Vellekoop and M. K. Smit, Four-Channel Integrated-Optic Wavelength Demultiplexer with Weak Polarization Dependence, *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(3): 310—314.
- [2] P. C. Clemens, G. Heise, R. Marz *et al.*, 8-Channel Optical Demultiplexer Realized as SiO₂ Flat-Field Spectrograph, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(9): 1109—1111.
- [3] L. B. Soldano, F. B. Veerman, M. K. Smit *et al.*, Planar Monomode Optical Couplers Based on Multimode Interference Effects, *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(112): 1843—1850.
- [4] R. A. Soref, J. Schmidtchen and K. Petermann, Large Single-Mode Rib Waveguides in GeSi/Si and Si-on-SiO₂, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(8): 1971—1974.
- [5] M. Bachmann, P. A. Besse and H. Melchior, General Self-Imaging Properties in $N \times N$ Multimode Interference Couplers Including Phase Relations, *Appl. Opt.*, 1994, **33**(18): 3905—3911.
- [6] T. Rasmussen, T. H. Povlsen and A. Bjarklev, Accurate Finite Difference Beam Propagation Method for Complex Integrated Optical Structures, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(3): 339—342.

Study on MMI Arrayed-Waveguide Grating MUX/DMUX*

MA Hui-lian¹, JIANG Xiao-qing¹, YANG Jian-yi¹, WANG Ming-hua¹ and YU Jin-zhong²

(1 Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2 State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Beijing 100083, China)

Abstract: MMI MUX/DMUX is theoretically analyzed based on the self-imaging effect (SIE) in the multimode waveguide. An 8-channel wavelength DMUX on SOI Structure is designed. The input and output single-mode waveguides are optimized according to the theory of large single-mode rib waveguides by R. A. Soref. When the width of the single-mode rib waveguide is 5 μ m and the optimum width and length of the SIE waveguide are 72 μ m and 6313.4 μ m respectively for 8-channel wavelength devices, the wavelength isolation is 35dB, theoretical propagation loss is less than 0.18dB.

Key words: arrayed-waveguide grating (AWG); MUX/DMUX; multimode interference (MMI); finite difference beam propagation method (FDBPM)

EEACC: 4130; 4140; 2520

Article ID: 0253-4177(2001)07-0919-05

* Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69677012, Major State Basic Research Development Program of China Under Grant No. G1999033104 and Foundation of Integrated Optoelectronics Key Laboratory.

MA Hui-lian was born in 1975. She is working for her PhD degree and her research interest is the integrated optics and related CAD.

WANG Ming-hua professor, was born in 1941. His current research interests are in the semiconductor optoelectronics, especially in GaAs/GaAlAs optoelectronics.

Received 31 July 2000, revised manuscript received 7 December 2000

©2001 The Chinese Institute of Electronics