

# 宽带多模干涉型光耦合器的设计

张效衡 周林杰 李新碗 陈建平

(上海交通大学“区域光纤通信网与新型光通信系统”国家重点实验室)

**摘要:** 文章通过分析制约多模干涉型耦合器带宽的因素, 提出三种可提高MMI带宽的设计方法。仿真结果表明, 三种方法均可以不同程度地提高MMI的工作波长范围, 对比于常规MMI耦合器的60nm工作波长范围, 采用优化设计方法可将其带宽提高到140nm至210nm。当同时采用三种设计方法后, 带宽可以达到300nm, 是原结构带宽的5倍。

**关键词:** 多模干涉型器件; 硅基光子集成; 光无源器件

## Design of Broadband Multimode Interference (MMI) Based Couplers

Zhang Xiaoheng Zhou Linjie Li Xinwan Chen Jianping

(State Key Lab of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University)

**Abstract:** On the basis of analyzing the factors that limit the bandwidth of multimode interference couplers, three methods are proposed to improve the bandwidth of MMI. Simulations are performed to study the device characteristics. It shows that the revised structures have an improved bandwidth in the range of 140nm to 210nm in comparison with 60nm of a regular structure. The combination of the three methods results in an even higher bandwidth of 300nm, which is five times larger than that of the original one.

**Key words:** multimode interference device; silicon photonics integration; optical passive device

### 0 引言

近年来, 随着电信网络的发展, 网络的灵活性以及重构性对于光子集成回路(PIC)提出了更高的要求。同时, 目前应用广泛的波分复用系统也要求信号的耦合器件以及分路器件拥有比较大的光学带宽。考虑到芯片加工成本, 设计的器件单元需要有更小的尺寸和更易于大规模集成的特性。对于上述的需求, 有一类光学器件单元可以满足, 它就是多模干涉型光耦合器(MMI)。

MMI器件由于其出色的光学性能、简单的制造工艺以及紧凑的器件结构, 引起了人们的关注。对其研究的内容十分广泛, 既包含对于MMI本身结构的设计, 例如: 基本的 $N \times M$ 耦合器<sup>[1, 2]</sup>、3dB耦合器<sup>[3, 4]</sup>以及应用广泛的 $1 \times N$ 光功率分配器<sup>[5-7]</sup>, 也包含对于MMI相关应用的研究, 例如: 应用MMI结构设计的马赫-曾德尔调制器、光开关、半导体环形激光器等。MMI的广泛应用同样对MMI器件提出了更高的技术要求, 而近年来的研究多是针对实现MMI的低损耗及紧凑结构的设计, 对于MMI带宽的研究则止步于附加损耗1dB对应的100nm光学带宽。显然,

这样的光学带宽无法满足所有的系统需求, 限制了MMI的广泛应用。

本文从分析MMI的基本工作原理出发, 分析制约MMI带宽的因素, 通过合理的设计及优化以达到提高MMI器件带宽的目标。

### 1 宽带MMI结构设计

#### 1.1 MMI带宽的制约因素分析

MMI的工作原理是基于多模干涉的自映像效应<sup>[8]</sup>, 即输入的光场会在多模的区域中激励起一系列的模式, 并在传播方向上的特定位置处形成输入的像点。其数学表达式为:

$$\psi(x, L) = \sum_{\nu} c_{\nu} \varphi_{\nu}(x) \exp[i \cdot \Delta \beta_{\nu} \cdot L] \quad (1)$$

上式表示在传播方向上(如图1所示 $z$ 轴方向)距离为 $L$ 处的光场, 是由多模区域中激励的传输模式(模式的阶数为 $\nu$ )叠加形成的。其中,  $\varphi_{\nu}(x)$ 表示在多模区域中每一个模式的模场形式,  $c_{\nu}$ 表示每一个模式的激励系数, 在MMI结构确定的情况下, 模式与模式的激励系数为固定值。 $\Delta \beta_{\nu} = \beta_0 - \beta_{\nu}$ 表示每个模式的在 $z$ 轴方向上的传播常数与基模的传播常数

之差， $L$ 表示在 $z$ 方向的传播距离。因此，由式(1)可知，在传播方向上任意位置处的光场形式将主要由两方面因素决定：其一为成像位置在传播方向上的距离 $L$ ，其二为模式的传播常数差 $\Delta\beta_v$ 。

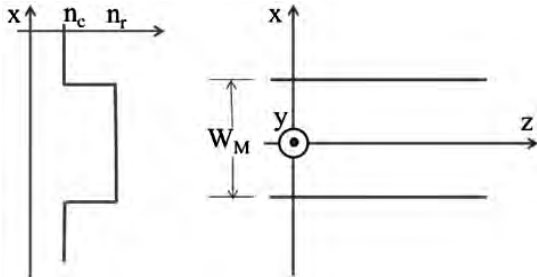


图1 波导结构与折射率分布图

MMI耦合器的长度 $L$ 取值为固定值，正比于基模与一阶模的拍长 $L_\pi$ 。 $L_\pi$ 的数学表达式为：

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} = \frac{4n_r W_{e0}^2}{3\lambda} \quad (2)$$

从式(2)式可知， $L_\pi$ 的取值是与波长相关的，换句话说，当工作波长发生变化时，MMI的成像位置将发生变化。因此对于同一个MMI结构来说，对于不同的工作波长，其固定的输出位置不可能同时保证成像的质量。这就是制约MMI带宽的第一个因素：即由于 $L_\pi$ 是随波长发生变化的，导致成像位置随波长的变化而改变。

对于传输常数差 $\Delta\beta_v$ ，如式(1)所描述的，其取值大小影响着成像位置的相位关系。 $\Delta\beta_v$ 的数学表达式为：

$$\Delta\beta_v = \beta_0 - \beta_v = \frac{v(v+2)\pi}{3L_\pi} \quad (3)$$

由式(3)式的关系可以得到近似的 $\Delta\beta_v$ ，即其计算过程是存在误差的，由于误差的分析过程比较复杂，这里给出最终包含全部影响因素的相位误差 $\Delta\phi_v$ 数学表达式为<sup>[9]</sup>：

$$\Delta\phi_v = \frac{\lambda_0^2 (v+1)^4 \pi}{2Nn_r^2 W_{e0}^2} \left[ \frac{1}{8} - \frac{\lambda_0 n_r^2}{6\pi W_{e0} (n_r^2 - n_c^2)^{3/2}} \right] \quad (4)$$

由式(4)可知，相位的误差与模式的阶数是相关的。当模式的阶数很低时，误差将可以忽略，但是当MMI需要有出色的性能以及带宽时，其误差对MMI结构带来一些设计上存在的误差损耗。这就是制约MMI带宽的第二个因素：即由于MMI结构中传输常数差 $\Delta\beta_v$ 的计算过程存在近似，导致MMI结构设计方面将会带来一定的误差和损耗。

## 1.2 提高MMI带宽的方式

由上述的分析可知，提高MMI的带宽主要分两类方式：其一为减小MMI结构对于不同波长的敏感程度，即在波长变化的情况下，成像的位置变化量减小；其二为减小 $\Delta\beta_v$ 的误差量，使MMI结构可以在更广泛的波长范围内满足高质量成像的关系。下面我们将分别介绍三种提高MMI带宽的设计方式。

(1) 降低多模区域的宽度。降低多模区域的宽度可以有效地降低MMI结构对于波长的敏感程度，以及MMI结构中的传输常数误差。由式(2)可知，当多模区域的宽度降低将会导致 $L_\pi$ 的降低，进而使得当波长发生变化的情况下，最佳成像位置的变化量下降，即在不同波长时，相同的结构也可以近似满足成像的需要。同时，多模区域的宽度降低可以使多模区域中激励的模式数目下降，进而使传输常数差 $\Delta\beta_v$ 的计算误差减少，使MMI的带宽提高。

(2) 提高多模区域接入波导宽度。图2(a)所示为接入多模区域波导采用梯形过渡区域的结构示意图，采用这样的结构会使多模区域激励的模式数降低，从而减小传输相位误差。同时，采用这样的结构也可以使输出端的耦合区域变大，从而保证了在一定范围内成像位置都可以很高效地从多模区域末端输出，很好地弥补了在设计当中存在的误差，提高了MMI结构的性能。

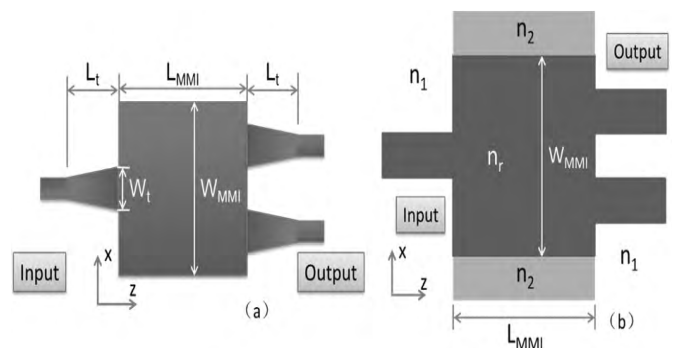


图2 (a) 提高接入波导宽度MMI结构 (b) 浅刻蚀工艺MMI结构

(3) 多模区域采用浅刻蚀的工艺。图2(b)所示为在多模区域采用浅刻蚀工艺加工得到的MMI结构示意图。由式(4)对传播相位误差的分析可知，当多模区域的芯/包折射率差减小的情况下，相位误差量会减小。而在MMI器件的材料固定的情况下，我们可以通过减小刻蚀的深度使多模区域两侧的平板层等效折射率提高，从而降低与多模干涉区有效

折射率的差值，这样可减小相位的误差量从而提高MMI的成像质量。

### 2 宽带MMI结构的仿真实证

本节将采用光束传播法(BPM)对上述三种提高MMI带宽的改进结构进行仿真实证。传输波导的芯层厚度为 $H=220\text{nm}$ ，刻蚀后的剩余硅平板层厚度为 $h=60\text{nm}$ ，单模波导的宽度为 $W=500\text{nm}$ 。芯层的折射率为 $n_{\text{Si}}=3.477$ ，包层二氧化硅的折射率为 $n_{\text{SiO}_2}=1.444$ 。

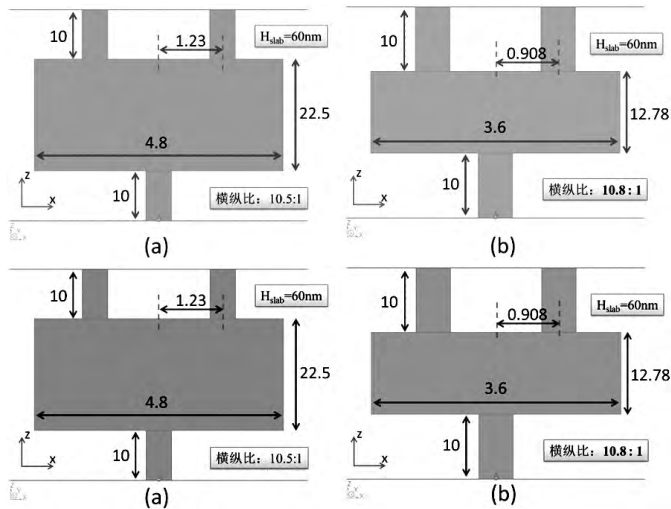


图3(a)初始MMI结构及参数(b)减小多模区域宽度的MMI结构

(c)增加接入波导宽度的MMI结构(d)采用浅刻蚀工艺的MMI结构

图3所示为常规MMI结构以及采用三种方法改进后的MMI结构示意图(图中所标尺寸单位为 $\mu\text{m}$ )。其中(b)所示为减少多模区域宽度的MMI结构，它将MMI的宽度由 $4.8\mu\text{m}$ 降低为 $3.6\mu\text{m}$ ；(c)为增加接入波导宽度的MMI结构，它将接入波导的宽度由普通的单模波导宽度 $500\text{nm}$ 提高为 $1.1\mu\text{m}$ ；(d)为采用浅刻蚀工艺的MMI优化结构，它采用了浅刻蚀的工艺使硅平板层厚度由 $60\text{nm}$ 提高为 $150\text{nm}$ 。

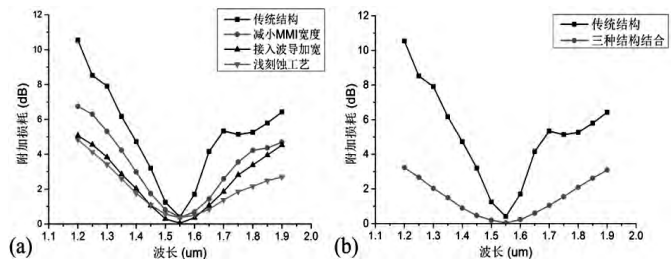


图4(a)三种MMI结构与传统结构对比(b)三种结构同时应用与传统结构对比

图4所示为仿真的几种MMI结构的附加损耗对比图。图4(a)对比了不同MMI结构在工作波长范围

为 $1200\sim 1900\text{nm}$ 时的附加损耗情况。如图所示，采用三种提高MMI带宽的结构之后，带宽比常规MMI结构有了很大的提高，而且在中心波长( $1550\text{nm}$ )的附加损耗也有所下降。具体来说，常规结构的 $1\text{dB}$ 附加损耗带宽约为 $60\text{nm}$ ，而改进型MMI结构的 $1\text{dB}$ 带宽提高到了 $140\sim 210\text{nm}$ ，其对于MMI带宽的提高幅度非常明显。不仅如此，当结合应用这三种提高MMI带宽的结构之后，MMI的带宽可以进一步提高，如图4(b)所示。MMI的 $1\text{dB}$ 带宽提高到了 $300\text{nm}$ ，并且中心波长的附加损耗仅为 $0.036\text{dB}$ 。

### 3 总结

本文通过分析MMI的工作原理，得到制约MMI带宽的两个主要因素，并基于这两个因素提出了三种提高MMI带宽的结构设计方法。仿真结果表明采用这三种改进结构后，MMI工作波长范围能从 $60\text{nm}$ 提高到 $140\text{nm}$ 至 $210\text{nm}$ ；当同时采用这三种结构后可进一步将MMI带宽提高到 $300\text{nm}$ ，而中心波长的附加损耗仅为 $0.036\text{dB}$ 。

### 参考文献:

- [1] Besse P A, Gini E, Bachmann M, et al. New  $2\times 2$  and  $1\times 3$  multimode interference couplers with free selection of power splitting ratios[J]. Lightwave Technology, Journal of, 1996, 14(10): 2286-2293.
- [2] Levy D S, Scarmozzino R, Osgood Jr R M. Length reduction of tapered  $N\times N$  MMI devices[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 1998, 10(6): 830-832.
- [3] Themistos C, Rahman B M. Design issues of a multimode interference-based 3-dB splitter[J]. Applied Optics, 2002, 41(33): 7037-7044.
- [4] May-Arrijoja D A, LiKamWa P, Torres-Cisneros M, et al. Tunable 3-dB multimode interference coupler[C]. Organic Materials and Devices for Displays and Energy Conversion. Optical Society of America, 2007.
- [5] Ferreras A, Rodriguez F, Gbmez-Salas E, et al. Design and fabrication of a InPhGaAsP Multimode Power Splitter[C]// Proceedings IPRC'93, 1993: 151-154.
- [6] Rasmussen T, Rasmussen J K, Povlsen J H. Design

(下接50页)

口类似。其他的硬件如定时器、计数器、A/D转换的使用都与A口类似，使用时都要对相关端口初始化，然后赋值进行操作，可以给同学们讲解一个实例，然后讲解一下各个硬件模块的原理，编程及使用部分学生可以通过自学掌握。到此学生已经进入了入门状态，对单片机的学习更有兴趣，很想一试身手。

## 2 凌阳单片机的使用效果

使用了凌阳单片机，采用了以上教学方法，在应用时尽量减少理论内容的讲解，既要领进门，又让学生有自己自由发挥的空间。学生可以一边编程练习，一边在试验箱上观察实验结果，加深印象。学生普遍反应，原来单片机是这么回事，并不是传说中的那么难。学生入门快，学习兴趣也很高。

2007年山东省机器人大赛，工程训练中心指导的23个学生全部为二年级学生，没有单片机的知识，没有学习过汇编语言，而且大赛准备时间有限。在准备过程中我们用了4个课时的时间集中讲授凌阳单片机的基础知识，入门之后同学们三人一组，利用试验箱边自学边实验，老师帮助学生解答一些疑难问题。在大约一周时间内掌握了自己的方案中可能用到的硬件设备的变成使用方法。从第二周开始制定方案，硬件部分。第三周进入调试过程。得益于选用了合适的单片机，并找到了合适的教学方法，在这次大赛中，中心指导的这7组使用凌阳单片机的队伍全部获奖。

由于不同型号的单片机在使用方法上具有相似性，在学习了凌阳单片机之后，对学习其他单片机如MCS-51也有很大的帮助。

### 参考文献:

- [1] 凌阳单片机[EB/OL].<http://www.unsp.com.cn>  
[2] 罗亚非, 等. 凌阳16位单片机应用基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2003,12.

### 作者简介:

丁 航, 济南大学工程训练中心 (250022)  
电话: 13589124031  
电子信箱: cherry\_dh@163.com

(上接70页)

- and performance evaluation of 1-by-64 multimode interference power splitter for optical communications[J].Lightwave Technology,Journal of, 1995,13(10): 2069-2074.
- [7] Kim J H, Dudley B W, Moyer P J. Experimental demonstration of replicated multimode interferometer power splitter in Zr-doped sol-gel[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006,24(1): 612-616.
- [8] Soldano L B, Pennings E C M. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications[J]. Lightwave Technology, Journal of, 1995,13(4): 615-627.
- [9] Huang J Z, Scarmozzino R, Osgood Jr R M. A new design approach to large input/output number multimode interference couplers and its application to low-crosstalk WDM routers[J].Photonics Technology Letters, IEEE, 1998,10(9): 1292-1294.

### 作者简介:

张效衡, 1988年出生, 上海交通大学硕士研究生, 主要研究方向为硅基光子集成器件的设计  
电子信箱: zhangxiaoheng@sjtu.edu.cn  
电话: 15821807205  
联系地址: 上海市东川路800号上海交通大学电信群楼5号楼218室 (200240)

### 基金项目:

国家973项目Program(ID2011CB301700)  
国家自然科学基金项目(61007039, 61001074)

