

文章编号: 1001-3806(2003)04-0288-05

基于半导体光放大器的可扩展型光开关矩阵*

缪庆元¹ 胡振华^{1,2} 王 涛¹ 黄德修¹ 刘德明¹

(¹华中科技大学光电子工程系激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074) (²武汉理工大学物理学系, 武汉, 430063)

摘要: 未来的高速和高度灵活的光分组交换网络要求开关速度达到纳秒量级且集成度高的大规模空间光开关矩阵。在分析了基于半导体光放大器的常用结构形式的光开关矩阵存在规模局限性的基础上, 综述了新型的可实现大规模集成的基于半导体光放大器的光开关矩阵的基本原理和研究现状。

关键词: 大规模光开关矩阵; 半导体光放大器; 插入损耗; 串扰; 载流子注入; 折射率变化

中图分类号: TN365 **文献标识码:** A

Scalable optical switch array based on semiconductor optical amplifier

Miao Qingyuan¹, Hu Zhenhua^{1,2}, Wang Tao¹, Huang Dexiu¹, Liu Deming¹

(¹ National Laboratory of Laser Technology, Department of Optoelectronic Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

(² Department of Physical, Wuhan University of Technology, Wuhan, 430063)

Abstract: Optical space switch arrays that can offer nanoseconds switch time as the devices are integrated to larger and larger arrays will meet the demand of high speed and agile routing of packets in future optical packet switching networks. Under the analysis of scalable limitations toward ordinary optical space switch matrix based on semiconductor optical amplifier, basic principles of novel arrays which can be easily scaled to significantly larger sizes are presented, as well as their progress.

Key words: large scale optical switch array; semiconductor optical amplifier; insertion loss; crosstalk; carrier injection; refractive index change

引 言

随着密集波分复用系统的成熟及大量被投入使用, 高速大容量光传输得以实现, 从而强烈地推动着光交换向前发展。光开关是未来全光通信网络中实现光交叉连接、光分插复用、网络监控以及自愈保护等功能的核心器件, 是影响光网络性能的主要因素之一。在所有类型的光交换系统中, 空间光开关矩阵是必不可少的基本光器件。它可以直接构成空分光交换单元, 也可以与其它功能开关一起构成时分光交换单元和波分光交换单元。

现时非常流行的微光电机系统(MOEMS)光开关具有插入损耗小、串扰小、工作稳定可靠等优点, 能实现一定规模的集成而构成空间光开关矩阵。然而, MOEMS 依赖微镜面的转动来改变输入光的

传播方向, 其开关速度受到机械运动的限制, 开关交换时间为毫秒量级。随着国际互联网(INTERNET)的发展, 数据业务渐渐超过电话业务, 目前占主导地位的电路交换方式要过渡到光分组交换方式, 而光分组交换网络要求开关速度达到纳秒量级且便于集成的大规模空间光开关矩阵。

在集成大规模的光开关矩阵时, 波导所固有的插入损耗的积累及波导间信号的相互串扰的积累是限制开关矩阵规模的主要因素。大规模的交换系统要求光开关必须具有低损耗和低串扰特性。半导体光放大器(SOA)同时具有高开关速度(纳秒量级)、低插入损耗、低串扰的优点, 而且还具有宽的增益带宽、低偏振相关以及体积小、便于扩展、可集成性等特性。因此, 和 SOA 集成在一起所构成的高速大规模光开关矩阵特别适合于未来光分组交换的需要。而且, 它是迄今为止在开关规模可扩展的情况下唯一可以具有净增益(其它类型光开关皆有插入损耗)的高速光开关矩阵。

* 国家九七三项目资助课题。

作者简介: 缪庆元, 男, 1968 年 1 月出生。博士研究生, 高级工程师。现从事光交叉连接关键集成器件的研究工作。

收稿日期: 2002-11-18; 收到修改稿日期: 2002-12-16

1 电控 SOA 光开关的基本原理及其常用结构形式的性能局限性

SOA 光开关有电控制和光控制两种。电控 SOA 光开关是实现大规模矩阵结构时易于采用的方式。它通过改变偏置电压来实现开关功能。当 SOA 被加上偏置电压时, SOA 被注入电流, 若输入信号光频率在有源区材料的增益带宽范围内, 有源区产生受激辐射对输入的光信号放大后输出, 对应开关导通; 当 SOA 无偏置电压时, SOA 中主要是受激吸收, 信号光经过 SOA 时被吸收, 输出光信号近似为 0, 对应开关关闭(阻塞态)。

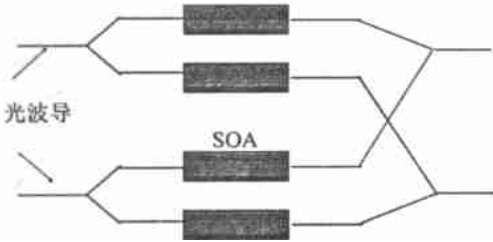


图 1 基于 SOA 的树状分支结构空间光开关矩阵

图 1 是在“九五”期间研制的基于 SOA 的空间光开关矩阵^[1,2]的结构示意图。它采用树状分支结构, 是一种分路阻塞重组型基于 SOA 的光开关矩阵。它就是目前大多数基于 SOA 的光开关矩阵采用的结构形式。在输入端, 输入光信号通过 Y 型分路器分为多个分支, 在各支路上通过 SOA 的阻塞和导通放大功能实现信号的选择, 在输出端再通过 Y 型合路器重组合并。通过对各个 SOA 的控制, 开关矩阵具有直通、交叉和广播发送功能。其广播发送功能在提供点到多点和广播业务时是非常有用的。但树状分支结构形式有如下不可克服的缺点:

(1) 因为每一个 Y 型耦合器将一半的光能浪费掉, 所以, 这种结构有正比于端口数目的大的插入损耗。交换的路数越多, 损耗越大。

(2) 此种结构的 SOA 光开关矩阵的输入信号动态范围将随着开关级数的增大与信号调制速率的增大而减小。这种性能退化有两方面的原因。其一是 SOA 中放大的自发辐射(ASE) 噪声由于级联而放大, 积累的 ASE 噪声在输入信号光较小时, 会淹没信号光, 从而限制光信号输入的最小功率。积累的 ASE 噪声随开关矩阵中 SOA 级数成正比增长。其二是大信号输入情况下, 与线路码型相关的非线性增益饱和和失真会引起信号消光比退化。开关矩阵规模越大, 增益饱和和效应也越强。因此, 增大光开关矩阵的动态范围需要减小 SOA 噪声指数、提高 SOA

的饱和输出功率, 但这种改善是很有限的。

(3) 在集成开关矩阵的制作工艺中, 数量众多、互相交叉的波导之间的串扰会大量积累。

(4) 在建立一条信号路径时, 需要几个 SOA 同时加电, 功耗大。同时, 它在集成时占用较大的衬底面积。

由于开关矩阵受到如上所述插入损耗、通带变窄、串扰及功耗等的共同作用^[3~5], 实现 8×8 的规模就接近了理论的极限值。因此, 它存在着难以克服的规模局限性, 其应用受到了很大的限制。为了在保持 SOA 光开关所具有的性能优点的同时能继续扩大光开关矩阵的规模, 必须采用新机理和新结构。基于 SOA 巧妙地构建光开关基本单元被证明是一个很有效的方法, 它能够在保持低损耗和低串扰的情况下继续扩展光开关矩阵的规模。基于这样的思想, 出现了以下几种很有特色的基于 SOA 的光开关矩阵。

2 较早报道的基于 SOA 的空间光开关矩阵的改进型结构

较早报道的基于 SOA 的单片集成空间光开关矩阵改进型结构^[6]如图 2a 所示。16 个带有 SOA 的光开关基本单元一体化集成在 InP 基片上, 构成了一个 4×4 的交叉结构的光开关矩阵。

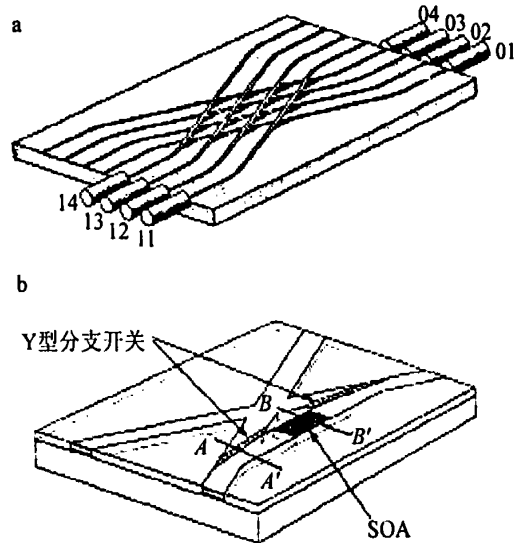


图 2 a—基于 SOA 的空间光开关矩阵的一种改进型结构
b—光开关基本单元

如图 2b 所示, 每个单元包括一个 X 型交叉波导, 两个 Y 型分支开关和一个 SOA。集成的 SOA 的长度为 $700\mu\text{m}$, X 型交叉角为 10° , Y 型分支角为 5° 。图 2b 中 A-A' 和 B-B' 处的剖面示于图 3 中。两个 Y 型分支开关和一个 SOA 同时加电时, Y 型分

支开关中发生载流子注入引起的折射率变化,从而通过全反射改变光的传播路径。当交换单元处于“开”态时,SOA的增益补偿了整个器件的损耗;当它为“关”态时,SOA吸收来自Y型分支开关的串扰。这样,每个单元同时具有无损耗交换和降低串扰的功能。同时,由于任何交换路径只经过1级SOA,从而避免了ASE噪声的积累。其纤纤增益为5dB,开/关比为54dB。由于性能的改善,使其具有较好的可扩展性。其缺点是“开”态时所需注入的电流较大(250~450)mA,波导的传输损耗较大。

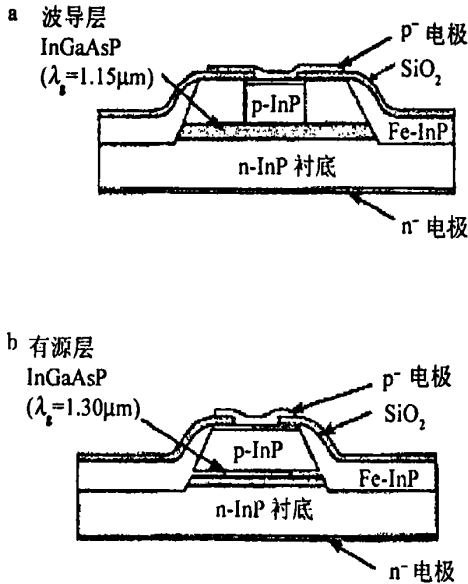


图3 a—图2b中A-A'处剖面图 b—图2b中B-B'处剖面图

3 以抑制性模式干涉开关为光交换基本单元的空间光开关矩阵

图4a中所示为另一种InP-InGaAsP材料的4×4规模的基于SOA的空间光开关矩阵^[7]。如图4b所示,两个抑制性模式干涉(SMI)开关和1个小半径(250μm)的弧形SOA组成1个具有光放大功能的抑制性模式干涉开关(OASIS)-光开关基本单元。抑制性模式干涉(SMI)开关的原理是:它通过电流的注入得到不同的输出路径。从3μm宽的脊波导输入的单模光信号从右边耦合到SMI开关的6μm宽的双模干涉区域。当无电流注入时,双模干涉区域中同时存在双模,由于双模干涉区域的长度恰好设计为1个拍长,在双模干涉区域的终点,信号被转换到双模干涉区域的左边,耦合到3μm宽的输出脊波导,笔直向前传送(bar状态);当在双模干涉区域的一半宽度注入电流时,由于载流子的注入引起了注入区折射率的变化,折射率的变化改变了双模干涉区域的折射率横向分布,双模干涉区域的宽

度被有效地减小,使其成为单模波导,其中只有单模,而无高阶模存在,模式干涉受到抑制。这时,在双模干涉区域的终点光信号被引导到其右边,进入弧形SOA输出波导中(放大的交叉连接cross状态)。16个OASIS单元组成一个矩形的4×4空间光开关矩阵。

SMI开关在bar状态,只有非常小的插入损耗(0.5dB),从而避免了使用3dB分路器所带来的大的插入损耗。在cross状态,由于SOA的放大作用,使得插入损耗为0,可以得到无损的交换。如图4a所示,输入和输出波导垂直相交,这种设计不仅可节约衬底面积,更为重要的是它可降低相互交叉的波导间的串扰。这种4×4的交叉连接开关矩阵只占用了2mm×2mm的衬底面积。在芯片的输入、输出处还分别使用了1个SOA作为输入输出放大器,以克服输入和输出处的光纤耦合损耗,增加开关矩阵总的增益。

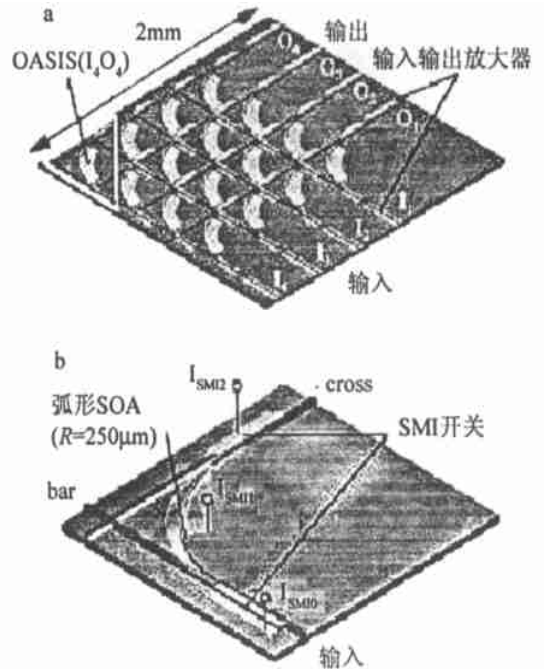


图4 a—16个OASIS单元组成1个4×4空间光开关矩阵 b—1个弧形SOA和2个SMI开关组成1个OASIS

SMI开关在bar和cross状态能够分别提供16dB和22dB的消光比,整个开关矩阵的开/关比为(33±4)dB,串扰为-38dB。开关矩阵的工作带宽为45nm。纤纤插入损耗为3dB。开关矩阵的弧形SOA波导的制作难度大,若其弧形SOA波导粗糙,其芯片的总损耗可能达到(10~15)dB。通过改进制作工艺,将能获得0dB的插入损耗。该开关矩阵具有插入损耗小、低串扰和高消光比的特点。性能的提高和尺寸的减小使其具有较好的可扩展性。

4 应用有源垂直耦合器的交叉点结构的空 间光开关矩阵

应用有源垂直耦合器的交叉点结构的 4×4 空间光开关矩阵^[8,9] 如图 5 所示。其尺寸仅为约 1.5mm^2 ($250\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$ /开关)。它应用光在两层波导间垂直方向上的耦合可将任何输入信号垂直地转入任何输出端。

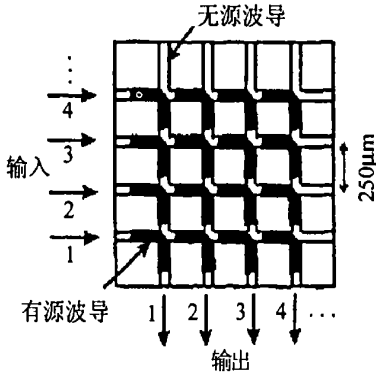


图 5 应用有源垂直耦合器的交叉点结构的空空间光开关矩阵

其光开关单元如图 6 所示,它采用了独特的正交立体分层结构。开关处的晶片分层剖面如图 7 所示。在 InP 衬底(100)面上通过 MOCVD 生长得到

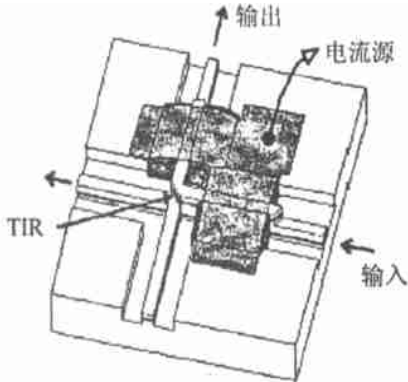


图 6 光开关基本单元

InGaAsP/InP 晶片。它有两层波导层,上层波导芯是 1550nm 波长的有源层(即 SOA),它包括 5 个未掺杂 6.5nm InGaAs 量子阱和 Q1.26(4 元化合物,波长 $1.26\mu\text{m}$)势垒层。下层波导芯亦采用多量子阱结构。通过减小单个阱层的厚度(3.7nm),构造适当数目的量子阱数,使得下层无源波导的有效折射率低于上层有源波导。且无源波导对于 1500nm 及以上波长的光吸收很小。两种波导芯层均为 $0.3\mu\text{m}$ 厚,中间隔着 $1.2\mu\text{m}$ 厚的 InP 间隔层。间隔层、无源波导层芯以及 InP 覆盖层都是 n 型掺杂,且掺杂浓度为 $3 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 。这种设计非常有效,它使得光交换在有源层的整个 50nm 增益带宽内都可实现。

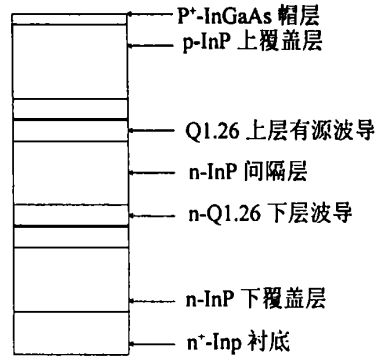


图 7 晶片分层剖面

晶片上形成的两组垂直相交的脊波导分别作为输入和输出波导。波导的宽度为 $3\mu\text{m}$,波导之间的间隔为 $250\mu\text{m}$ 。上部的有源层从交叉点处开始向着输入和输出端口有 $200\mu\text{m}$ 的扩展。耦合器有源层的波导以布儒斯特角刻蚀面终结,以减小背向反射。垂直方向的光定向耦合器在上部的有源波导层和下部的无源波导层之间形成。有源层内有一个完全的内部反射镜(TIR),它垂直地穿过波导的交叉点。当向有源层中注入载流子时,耦合器中上部有源波导的折射率发生了改变,从而改变了垂直耦合器的耦合程度,这就是它的交换机制。在“开”态,由于载流子的注入,使得上部有源波导的有效折射率降低到和下部无源波导一致。这样,输入光信号的大部分将从无源波导耦合进上层的有源波导,接着被 TIR 反射,然后从上层波导耦合到输出波导。注入的载流子亦对信号提供增益,这样极有利于得到高的消光比。在“关”态(无载流子的注入)时,只有特别弱的光信号耦合进有源波导,且上层有源波导对残留的耦合过来的信号有很强的吸收特性,从而使得串扰特别的小。在“关”态,输入的光信号通过下层无源波导笔直地传播到下一个单元。如果几个开关同时工作于“部分”的加电状态,这时的输入信号同时被几个输出端口分享,则开关矩阵就具有广播发送功能。这种开关矩阵还可用于波长转换。

由于在“开”状态下,输入信号可以获得增益;在“关”状态下,通过波导间弱的耦合和 SOA 中不加电时强的吸收的同时作用,寄生的信号被有效地衰减,达到超低的串扰(小于 -50dB)。这时,基本无信号从输出端口输出,因而可以获得很高的开/关比(大于 50dB)。另外,由于采用两层波导结构,无论多大规模的光开关矩阵,从输入通道到输出通道都只需经过一次有源波导(即 SOA),因而不会造成 ASE 噪声的积累,开关矩阵很容易扩展到任意的输入输出端口数。其开关速度小于 1.5ns 。

5 结 论

新型结构的基于 SOA 的光开关矩阵通过巧妙的设计解决了常用结构类型中存在的规模局限性问题。它们克服了树状分支结构中存在的放大的自发辐射(ASE)噪声的积累等缺点,表现出 SOA 光开关在高开关速度和净增益等方面的优势。特别是最新出现的应用有源垂直耦合器的交叉点结构的空分光开关矩阵,它采用了独特的正交立体分层结构,吸取了 MOEMS 光开关矩阵在矩阵结构(正交矩阵结构)上的优点。同时,在交叉点处采用新机理(有源垂直耦合器)作为交换机构,使得开关速度达到纳秒量级,且集成度最为致密。它还可用于波长转换,使其功能从空分光交换扩展到波分光交换。在未来的高速和高度灵活的全光包交换网络中将有着巨大的应用潜力。它具有其它机制的光开关矩阵不可比拟的优越性,表现出诱人的应用前景。

目前,在制作大规模的基于 SOA 的光开关矩阵中存在工艺稳定性、开关单元性能一致性和可靠性等问题。这是因为大规模的光开关矩阵对工艺过程要求极高。基于 SOA 的光开关矩阵在制造中要用

到金属有机化学气相沉积(MOCVD)生长技术、精确的光刻和等离子刻蚀等技术。各研究生产机构正加速努力,使它们满足实用化要求。随着基于 SOA 的光开关矩阵的理论和设计水平的不断提高和工艺过程的不断完善,基于 SOA 的光开关矩阵将成为未来全光通信中的关键器件之一,在将来的高速光网络中将扮演重要的角色。

参 考 文 献

- [1] Liu D M, Hu X J, Huang D X. Proc SPIE, 1999, 3899: 159~ 165.
- [2] 刘德明, 胡晓君, 黄德修 *et al.* 华中理工大学学报, 1999, 27(10): 4~ 6.
- [3] 张新亮, 任雪斌, 黄德修 *et al.* 半导体技术, 1997(6): 17~ 19.
- [4] Kato T, Sasaki J, Shimoda T *et al.* IEICE Trans on Electronics, 1999, E82C(2): 305~ 312.
- [5] Fan R S, Hooker R B. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(4): 546~ 554.
- [6] Kirihara T, Ogawa M, Inoue H *et al.* IEEE Photon Technol Lett, 1994, 6(2): 218~ 221.
- [7] Fish G A, Coldren L A, DenBaars S P. IEEE Photon Technol Lett, 1998, 10(2): 230~ 232.
- [8] Yu S Y, Owen M, Varrazza R *et al.* Proceedings of APCC/OECC' 99, 1999(2): 1623~ 1626.
- [9] Yu S Y, Owen M, Varrazza R *et al.* Conference on Lasers and Electr Optics, 2000: 256~ 257.

(上接第 281 页)

各向异性,产生了双折射现象,同时,因存在着热梯度,也产生了热应力,使晶体的折射率发生变化,总的来说,晶体在热效应的作用下,随着温度的升高,焦距由远及近地变化,使谐振腔逐步从稳定腔向非稳腔过渡,激光器的输出功率增长逐渐趋缓。由于仅仅处于实验阶段,制冷装置只是简单地置于晶体下方,再通过风扇吹散热片进行散热,晶体的散热情况并不是很好,还有耦合泵浦光的两个凸透镜参数没有经过精确计算和调整,镜片上也没有镀膜,耦合效率很低,若对晶体的散热方式和泵浦耦合方式进行改进,得到的输出功率、效率都会有大幅度提高。

3 结 论

利用半导体激光器端面泵浦 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ 晶

体,通过对晶体端面 and 输出镜的镀膜,抑制了增益更强的 1064nm 谱线的起振,产生了 1342nm 激光,最大输出功率达到 296mW,最大斜率效率 21.2%。

参 考 文 献

- [1] 王长青, 沈德元, 卢建仁 *et al.* 光学学报, 1997, 17(9): 1176~ 1179.
- [2] 张恒利, 杨乾锁, 竺乃宜 *et al.* 量子电子学报, 2000, 17(5): 400~ 404.
- [3] 周炳琨, 高以智, 陈侗嵘 *et al.* 激光原理. 4 版, 北京: 国防工业出版社, 2000: 275~ 276.
- [4] 张恒利, 何京良, 侯 玮 *et al.* 中国激光, 1999, 26(6): 481~ 484.
- [5] 张恒利, 竺乃宜, 杨乾锁 *et al.* 光子学报, 2000, 29(5): 470~ 473.