

光波导开关的最新进展*

王小龙[†] 余金中

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 随着光纤通信技术的不断发展,作为光分插复用(OADM)和光交叉互联(OXC)核心器件的光开关作用日益突出.文章从开关单元结构、材料及调制机理三个角度对波导开关进行了划分,阐述了波导开关的基本原理以及当前的研究进展,对面临的一些技术挑战进行了分析,并提出了自己的观点.

关键词 光开关,热光效应,电光效应,SOI,多模干涉器

THE LATEST PROGRESS OF OPTICAL WAVEGUIDE SWITCH

WANG Xiao-Long[†] YU Jin-Zhong

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract With the development of opticalfiber communications, the function of optical switches is becoming increasingly prominent since they serve as kernel devices for optical add-drop multiplexing(OADM)and optical cross connecting(OXC). This article classifies optical waveguide switches from three different angles: unit structure, material and modulating mechanism. We also discuss the basic principles and latest developments of waveguide switches, and analyze the technological challenges with comments from our point of view.

Key words optical switch, thermo-optic effect, electro-optic effect, silicon-on-insulator, multimode interference

1 引言

目前大容量、长距离的通信网络都是以光纤为基础的.光纤通信技术在经历了从单波长的光时分复用(OTDM)向多波长的点对点密集波分复用(DWDM)转变之后,下一步的发展方向是自由波长的全光网(AON),其特征是光分插复用(OADM)和光交叉互联(OXC)模块的广泛应用.图1和图2分别是OADM和OXC模块原理图,光开关起着上下路信号和不同光路间交叉互联的作用.可见光开关是OADM和OXC的核心器件,研制高性能、低成本的光开关和光开关阵列对于光纤通信技术的发展具有重大意义.

目前光开关种类繁多,在技术上甚至处于无序竞争状态,但是微机械(MEMS)开关和波导开关前景光明,技术相对成熟.MEMS由于得到Nortel和Lucent的支持,发展迅猛,已经实现了64×64的开关阵列,在开关损耗、串扰、消光比等性能上优势明显,但是它的开关速度只有毫秒量级,不适合高速切换的要求,MEMS的机械转动装置也存在着磨损和可靠性的问题.波导开关恰恰能弥补这些不足.经过科研人员近年来的努力,波导开关在综合性能上取得了飞速进展,并且开始步入商品化阶段.

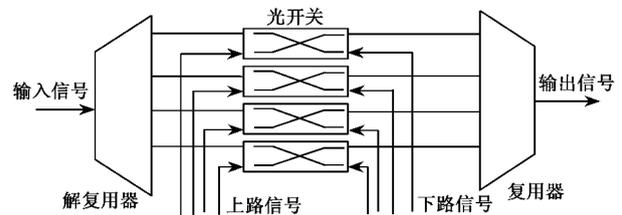


图1 OADM 模块

波导开关利用导波光学原理,使信号光在介质

* 国家自然科学基金(批准号:69896260,69990540)、国家科技部“九七三”(批准号:G20000366)资助项目

2002-04-04 收到初稿 2002-05-23 修回

† 通讯联系人. E-mail: wangxl@red.semi.ac.cn

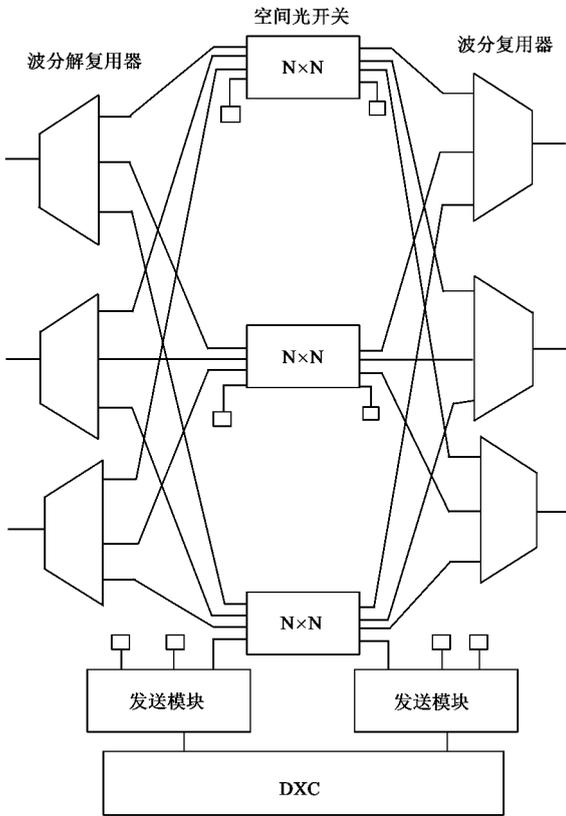


图2 OXC 模块

光路中进行传输,同时通过热效应或者电效应来改变介质折射率,达到光路通断或者改变光传播方向的目的.波导开关随着光波导和光集成技术的进步衍生出不同的类型,按照光开关结构单元、光开关采用的材料及光的调制机理三个不同的角度可以对光开关进行划分,由此也可以看出波导开关的发展历程.

2 不同结构单元的光开关

2.1 Mach - Zehnder 结构的光开关

Mach - Zehnder(简写 MZ)是一种广泛应用的开关结构,MZ 开关由两个 3dB 耦合器和两个相移臂组成,如图 3 所示.一个分束器将输入光分成 I_1 和 I_2 ,经过两相移臂后由耦合器合并输出.改变一个波导臂的折射率,使其光程发生变化,产生相移 $\Delta\Phi$,就可以获得调制输出光.如果两束光相位相同,就会干涉相长,相当于开关处于开态,如果两束光相位相反,就会干涉相消,相当于开关处于关态.具体表示为

$$\text{输出光强 } I_{\text{out}} = \frac{I_1 + I_2}{2} + \sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\Phi),$$

$$\text{最大调制深度 } \eta_{\text{max}} = \frac{(I_{\text{out}})_{\text{max}}}{(I_{\text{out}})_{\text{min}}} = \left(\frac{\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2}}{\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2}} \right)^2.$$

从上式可以看出,只有当 $I_1 = I_2$ 时,才能达到最大消光比.光开关的输出特性受到 3dB 耦合器的影响,Y 分支的输出越均衡,消光比就越大,实际器件可以到 20dB.

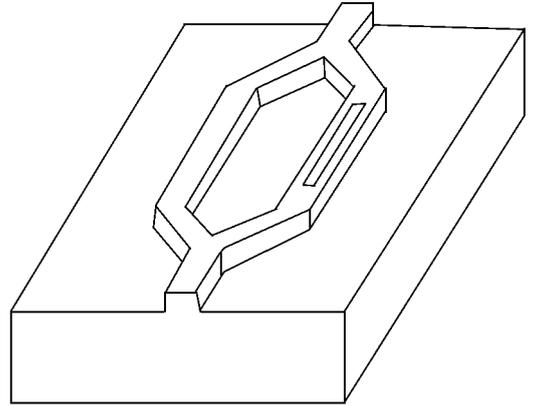


图3 MZ 结构原理图

1999 年,日本 NTT 的 Takashi Goh 等人^[1]采用双 MZ 结构,在这种新型结构中,闭合态时泄露光将被第二个 MZ 阻止,获得了高达 60dB 的消光比.

2.2 多模干涉型光开关

与传统的 MZ 耦合器、分束器相比,多模干涉 (multi-mode interference, MMI) 耦合器结构紧凑,制作容差大,更容易实现大规模集成,而且具有带宽宽、偏振敏感度低的特点,适合于 DWDM 系统.多模干涉耦合器是利用光的自映像原理:在多模波导中,沿着波的传播方向,在周期性的间隔处出现输入场的一个或多个复制的映像.图 4 是模拟的二维 MMI 光场分布图.

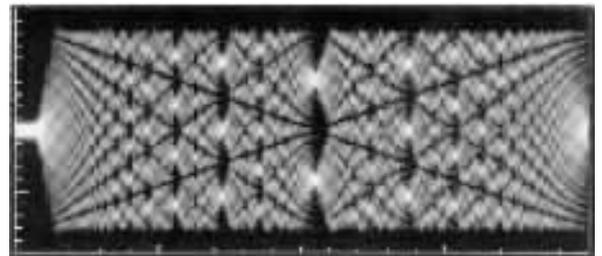


图4 二维 MMI 光场分布图

利用自映像原理可以制成光耦合器、分束器等.基于 MMI 结构的 2×2 热光开关原理图如 5 所示:入射光 P_0 经过 MMI 分束器后均分为强度相等、相位相同的两束光,分别耦合进两个相移臂,经过相移

臂调制后产生相位差,再由 MMI 耦合器合束后,从 P1 或者 P2 端口输出.对于热光开关,只要控制一个相移臂的加热温度,就可以选择光的输出端口.

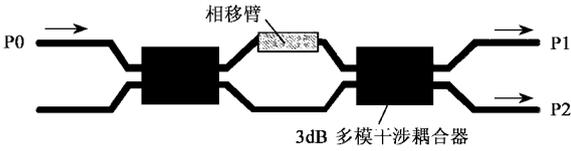


图5 2×2MMI 热光开关原理图

由于多模波导的有效宽度对特征长度成平方关系,减小多模波导宽度可以使 MMI 结构更紧凑.在实际制作器件时,采用锥形渐变结构可以进一步缩短 MMI 的长度. Fischer 等^[2]制作的 2×2SOI MMI 热光开关,在脊形波导外侧刻出 SiO₂ 绝热槽可以降低开关功耗至 85mW,整个器件插入损耗达到 2.4dB.

2.3 数字光开关

以上建立在 MZ、MMI 基础上的开关,最大的缺点是对偏振敏感,而且要求开关有较高的尺寸精度.数字光开关可以弥补上述缺点,由于它是利用模式重组来实现开关动作,即通过折射率定则控制光的走向,不仅对偏振和波长不敏感,对制作容差的要求也不苛刻,这些优点促成了数字光开关的开发.数字光开关有 Y 分支型、X 分支型以及多分支型. Y 分支数字光开关^[3]是在 20 世纪 80 年代提出的,示意图如图 6.在不加热的情况下,端口 1 与输入波导的耦合比端口 2 强的多,光场从端口 1 输出,开关处于开状态.当薄膜加热器对端口 1 加热时,该分支折射率变大,端口 2 的模折射率与输入波导更加匹配,光场从端口 2 输出,开关处于关状态.数字光开关性能稳定,只要加热到一定温度,就能保持开或者关的状态. Y 分支数字光开关和 X 交叉全内反射式光开关分支角很小,器件的尺寸比较大.

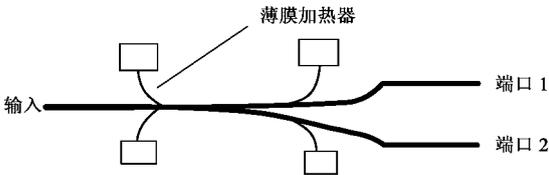


图6 Y分支数字光开关

3 不同材料的光开关

3.1 LiNbO₃ 和 InP 光开关

LiNbO₃ 具有大的电光系数,是最早应用的一种光电子材料,也被光开关所采用. LiNbO₃ 电光开关速度在纳米量级,损耗低,缺点是对偏振很敏感、工作电压高,而且无法与硅基微电子回路集成,所以这种开关已经逐渐退出竞争舞台.以 InP 为代表的化合物半导体开关响应速度快、功耗小,可以与微电子集成.

瑞士 Krahenbuhl 等制作了 4×4 InP-InGaAsP 光开关^[4],由 4 个 2×2 多模干涉型(MMI)光开关组成,具有如下 3 个特点:

- (1)采用电场调制方式,开关速度可以达到 200ps;
- (2)相移臂与 InP 的(100)解理面成 34°角,消除泡克尔斯(Pockels)效应和 F-K 效应的偏振敏感性,最后器件的偏振敏感度控制在 ±0.5dB;
- (3)相移臂采用水平和垂直两个方向的逐渐变细结构,增加电场强度,使开关偏压降到 4.5V.

这种器件价格高昂,工艺复杂(水平和垂直两个方向的渐变结构国内还无法实现),不适合大规模工业生产.

3.2 SOI 光开关

硅材料是微电子工业的基础,但是用来制作光电子器件和进行光电混合集成并不是一个好的选择. SOI(silicon on insulator)的出现改变了这种状况,SOI 光波导技术也将 SOI 推向了光开关的领域.与传统的材料不同,SOI 导波层的硅和包层的 SiO₂ 折射率分别为 3.45 和 1.46,差别非常大,由它们组成的波导对光的限制很强,所以 SOI 结构中波导包层可以很薄(只要大于 0.2μm),从而与 IC 工艺兼容.目前长途骨干网都是单模光纤,所以要求光开关的输入输出波导也必须是单模的.按照传统的平面波导结构,要想在 SOI 中实现单模波导,导波层的硅厚度小于 0.3μm,这使得它与直径 8μm 的单模光纤耦合效率低下,也与集成电路工艺不完全兼容(集成电路有源层厚度一般为 10μm).为了解决这个问题, Soref 和 Petermann^[5]在 1991 年提出如图 7 所示的脊形波导结构, n₁ n₂ n₃ 分别是波导芯层、衬底和覆盖层折射率,当脊宽 w、内脊高 H 和外脊高 h 满足一定的比例时,就可以保证大尺寸情况下波导只承载单模.脊形波导对光场的侧向限制是由开放的脊形区域完成的,当光场在脊形区域传播时,高阶模通过开放边泄露到下面的平板区域中,只剩下基模在波导中传播,从而实现单模.这种侧向限制比较弱,波导尺寸可以达到几个微米,与单模光纤相匹配.

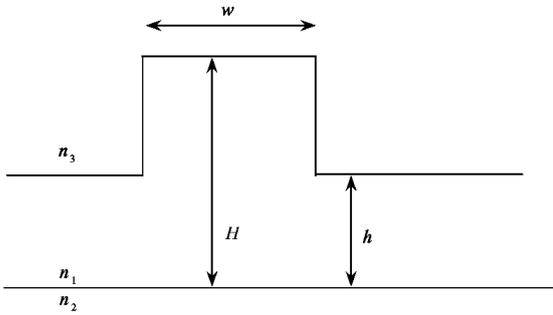


图7 脊形波导截面示意图

SOI 光开关的损耗问题一直比较严重, 尽管对于 1.3—1.5 μm 的红外光(也正是光通信波段)硅的吸收系数已经降到了 0.1dB/cm, 由于其他因素的影响, 实际在制作开关器件的时候损耗要远远超过理想数值, 主要表现在:

(1) 单模光纤与脊形波导耦合时大概只有 80% 的能量作为基模继续传播, 其余能量作为辐射模从衬底泄露掉;

(2) SOI 的硅导波层不是纯净硅, 掺杂和缺陷都会增加体散射损耗, 特别是对于隔离氧离子注入 (SIMOX) SOI 更是如此, 采用缺陷较少的背面键合 (BE) SOI 效果较好;

(3) 硅层的界面粗糙度引起的界面散射是主要的损耗原因, 湿法刻蚀的界面平整度要好于干法刻蚀, 散射损耗相应比较低, 但是湿法刻蚀的波导只能是梯形的, 垂直性很好的脊形波导只能用干法刻蚀。

3.3 SiO₂ 光开关

在硅材料体系中, SiO₂ 是一种低损耗的导波介质, 也被用于光开关上。SiO₂ 没有电光效应, 只能用于热光开关。和阵列波导光栅 (AWG) 一样, SiO₂ 开关面临的主要问题是材料的生长厚度。国内电子十三所^[6]用 FHD 生长后退火致密化, 得到了 20 μm 的 SiO₂ 膜。SiO₂ 波导与光纤芯层折射率是一致的, 耦合时候没有反射损耗。NTT 的 Takashi Goh^[7] 等用双 MZI 结构组成 16 \times 16 的热光开关阵列, 总插入损耗为 6.6dB, 充分发挥了 SiO₂ 低损耗的优势。

3.4 聚合物光开关

近年来聚合物光波导及器件也引起了人们的兴趣。聚合物可以在任何材料的衬底上大面积旋涂成型, 不需要高温处理, 聚合物的热光系数和电光系数都比较大, 可以制备热光开关和电光开关。但是聚合物损耗大, 而且随温度升高变得不稳定, 器件退化严重。

4 不同调制方式的光开关

光开关的调制就是通过改变介质的折射率来改变光场相位(干涉式)或者改变光场分布(非干涉式)。波导开关分为热光开关、电光开关和声光开关。这里主要讨论前两种。

4.1 热光开关

热光效应是指光介质的光学性质(如折射率)随着温度的改变而发生变化的物理效应。热光系数定义为对某个特定波长的光, 折射率对温度的偏导数 $\partial n / \partial T$ 。我们认为表 1 中的几种材料在 1.3—1.5 μm 波段, 热光系数与波长无关, 而且在温度变化范围不大的时候, 近似认为热光系数是常数。

表 1

材料	热光系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$
硅	2×10^{-4}
SiO ₂	1.1×10^{-5}
玻璃	$< 10^{-5}$
LiNbO ₃	4×10^{-5}
聚合物 PMMA	-1.2×10^{-4}
聚合物 PUR	-3.3×10^{-4}

从表 1 可以看出, 硅和聚合物的热光系数比其他材料高一个数量级, 实现 π 相位调制所需的温度变化比较小, 相应的开关速度就快。例如魏红振^[8]制作的 Y 分支调制器实现 π 相移所需的温度变化仅为 1.34 $^{\circ}\text{C}$, 上升时间 10 μs , 下降时间 20 μs 。SOI 材料作为热光开关还有一个优势, 掩埋层的 SiO₂ 热导只有 Si 的 1/100, 只要掩埋层足够厚 (BESOI 的 SiO₂ 层厚可以到 1 μm , 有足够的绝热效果), 热量就很少通过掩埋层散失到硅衬底中, 可以减少开关功耗。

相对 SOI SiO₂ 热光开关插入损耗低, SiO₂ 导热能力差, 热量不容易散发, 器件功耗低。为了减少开关动作中大量通过硅衬底泄露的热量, 1998 年, Lai 等人^[9]通过在波导侧面刻出深绝热槽的方法使开关功耗降到了 110mW。加上绝热结构后, 开关的功耗降低, 但是开关时间却有所增加, 因为绝热结构可以使热量流失减少, 同时使得开关在下降沿时热量的扩散受到阻碍, 开关时间加长。Lai 的开关上升时间 150 μs , 下降时间 180 μs 。

热光开关是目前惟一已经商品化的开关, 工艺相对成熟, 成本较低, 现在面临的主要问题是开关提

速. 经过对热光开关模型的研究, 笔者认为可以采用下述几种途径:

首先, 无论是干涉型开关还是改变光场分布型开关都是要改变介质折射率, 选用热光系数大的材料可以缩短开关相应时间, 比如 SOI 和聚合物的热光开关速度可以到几十微秒甚至几个微秒.

其次, 干涉型开关实现 π 相移所需的温度变化是 $\Delta T = \left(\frac{dn}{dT}\right)^{-1} \frac{\lambda}{2L}$, 延长调制区长度 L , 可以使温度变化范围变小, 明显提高开关速度.

再次, 适当减小导波层的厚度, 可以使被加热区的热容减小, 提高器件的温度响应速度.

4.2 电光开关

电光效应可以定义为当电场施加在光正在传输的介质时, 引起的折射率变化、吸收率(电吸收)变化和散射变化. 电场引起的折射率变化通常可以分为两类: 一类是电场直接引起介质光学折射率的变化, 称为直接电光效应, 包括泡克尔斯效应和克尔(Kerr)效应; 另一类是电场间接引起的折射率变化, 包括 Franz-Keldysh 效应(简称 F-K 效应)和等离子色散效应(plasma dispersion effect).

采用直接调制方式的电光开关具有很突出的性能, 表现在:

(1) 电场是以光速传播的, 而电场变化的速度仅仅取决于电极结电容和接触电阻等电路参数, 因而开关速度可以非常快, 文献[5]的 InP 电光开关速度达到了 200ps.

(2) 没有体电流注入, 因而器件功耗小, 发热量也很小, 可以避免大规模集成时器件温度升高而导致的热光效应.

(3) 电场调制一般使导波层的折射率升高, 大的折射率差会增加对光场的限制作用, 减少辐射模损耗.

但是它也存在着一些问题, 主要有:

(1) 对 TE 模和 TM 模电光效应的差别会导致偏振敏感性;

(2) 尽管 LiNbO_3 已经具有很大的电光系数, 但是它的半波电压还是很高. 像 InP 等电光系数稍小的材料只能通过减小电极间隔、延长调制区长度的方法来实现相位调制, 这样做的结果是导致器件工艺复杂、尺寸加大.

(3) 具有直接电光效应的材料多是一些非对称性化合物, 价格昂贵、性能不稳定, 而且不能与硅基微电子工艺兼容.

在间接电光效应中, 等离子色散效应有突出的应用, 最主要的原因是硅有很明显的等离子色散效应. 半导体中自由载流子浓度的改变一般有两种方法: 一种是掺杂, 另一种是通过外加电场形成注入电流. 无论何种方式改变了自由载流子浓度, 自由载流子等离子体通过吸收系数 $\Delta\alpha(\omega, \Delta N)$ 对介电常数(折射率)的负作用, 都降低了介质折射率. 但是只要用等离子色散效应改变介质折射率, 就必然带来吸收的增加, 这样经过调制区的光强就会比非调制区的弱, 对于干涉型器件, 直接的后果就是消光比变差和串扰增加. 以 2×2 的 MMI 开关为例, 经过粗略的计算, 当注入空穴和电子浓度都是 10^{18}cm^{-3} , 实现 π 相移需要的调制区长度为 $307 \mu\text{m}$, 引入的附加损耗为 0.37dB, 器件串扰不会好于 -18dB.

从电学特性上说, 电光开关调制区等效于一个台面型的 PIN 二极管, 它的开关时间是由载流子寿命决定的, 一般是几十纳秒到几纳秒. 所以, 减小载流子寿命可以提高电光开关的速度, 通过向硅中掺金的方法可以降低载流子寿命, 但是这样会对半导体工艺产生不好的影响.

载流子注入型开关另一个需要克服的难题是大电流注入时产生热效应的问题, 由于注入载流子使介质折射率变小, 而热光效应使折射率变大, 所以我们必须抑制热光效应, 方法包括:

(1) 增大调制区长度, 降低载流子注入密度, 可以使器件的发热减少, 但是这样会增加结电容;

(2) 提高载流子时间利用率. 因为影响折射率变化的是本征区载流子分布的浓度, 不是注入速度, 只要充分延长载流子在本征区存在的时间, 就可以降低电流密度, 减少发热. 方法是延长载流子寿命, 减小载流子复合, 但是这与开关时间相矛盾.

(3) 增加器件散热, 尽量保持器件温度恒定. 1987 年, Soref 等^[10]制作了 2×2 硅基电光开关, 器件采用 X 结数字型结构, 也称全内反射开关(TIR), 通过 $600 \text{A}/\text{cm}^2$ 的高注入电流密度改变交叉区折射率, 使光发生全反射改变方向, 在两个出口间切换. 但是当时由于工艺水平限制, 在开关处于关态时仍然有 50% 的光出射, 所以这种开关基本没有什么实用价值. 1997 年, 赵策洲^[11]报道了 SOI 材料的非对称 TIR 电光开关, 消光比 -18.1dB, 插入损耗 6.3dB, 注入电流 60mA, 响应时间 110ns, 性能接近了实用标准. 这种开关在大规模开关矩阵中可以得到应用.

由于消光比很难提高, 采用 MZ 或者 MMI 结构

