

学科发展

支撑光网络发展的 光电子器件研发现状与趋势^{*}

王启明

(半导体研究所集成光电子国家重点联合实验室 北京 100083)

摘要 从密集波分复用(DWDM)光网络的发展需求出发,评述了目前支撑光网络关键性光电子器件的发展现状,指出光器件集成芯片,光电子系统集成芯片,尤其是以 Si 为平台的系统集成芯片和规模化产品技术的研发是未来光电子的发展趋向。

关键词 光网络,光器件,光子集成,光电子集成



1 光网络发展与器件需求

光网络是未来国家信息基础设施的核心,它以最大限度服务于广大用户日益增长的信息需求为宗旨。用户对信息需求是多样化的,并随时不断变化,光网络必须能对大

容量多媒体信息传送完全兼容并充分透明。未来的光网络将是一个以数字化表征为基础的多媒体宽带综合服务网,其基本功能构架可分解为四部分,即超高速率、大容量信息比特的载入与传输;用户信息需求的上下载路与灵活的分插复用;网际间信息的快速交换与共享以及网络对传输信道的高效经济路由选择。

1.1 超高速率、大容量信息比特的载入与传送

Tb/s 级信息比特量的传送是光网络发展的起

点。目前用于单信道传输的半导体激光源(包括驱动电路的速率)信息载入的能力只达 40Gb/s。从技术难度和经济性考虑,突破 100Gb/s 的门槛已相当困难。波分复用技术是惟一可行的出路,全波窗口的实现为此奠定了基础,光时分复用也有一定的潜力,它可以缓解密集波分的压力。

高密度度、高质量的波分复用器的发展将是其关键。基于 SiO₂-Si 体系的波导光栅阵列(AWG)能够满足这一要求,是实现 DWDM 光网络 Tb/s 级传输的最佳选择。

对 DWDM 光网络中的信道间隔,ITU-T 已给出标准,至少为 100GHz(即 0.8nm 波长),随着技术的进步,还将按几何级数减小。由于 DWDM 多信道光波长如此紧邻,且解复用后,在空间分布上也非常靠近,因此,在对信道进行检测时,波长的精确对准与近邻信道串扰的抑制是需要解决的重要课题。

1.2 信息的上下载路与灵活分插复用

传送信息的多址上下载路与灵活分插复用功能是光网络有别于点对点通信的关键所在。基于

^{*} 本工作得到科技部国家重点基础研究发展规划项目:G2000036603 和国家自然科学基金委重大基金项目:69896260 的资助
收稿日期:2001 年 12 月 13 日

电子功能的上下话路分插复用(ADM)已不能满足当前的需求,必须采用高速率全光操作,因此,全光上下路分插复用(OADM)已提上日程。波导光栅阵列(AWG)依然是实现分插复用的基础,而光开关阵列则最终完成用户与网络的联接。开关响应速率的快慢决定了网络与用户间运作联系的实时性需求,例如对计算机联网实时性要求很高,至少要达到纳秒(ns)响应(但目前的邮电与广播传送则不必如此苛求,如果采用传输协议,如IP协议等,则毫秒(ms)即能满足目前信息包的上下路响应时间)。高速光开关阵列的研发将是提升网络功能水平的重要标志。

1.3 网际间信息的共享与交换

未来的光网络不仅将成为国家信息基础设施的关键,也是全球信息一体化的基础。无论哪一个地区或国家的网络都将是开放式的。当然,出于信息安全的考虑,它也有严密的管理措施。网际交换是网络一体化的关键接口。它既类同于上下路,又与之有重大区别:首先,网络交换对实时性要求高。不同地区的不同网户对信息的需求千差万别,网络必需能满足最高的需求,纳秒(ns)响应的光开关为光交换(OXC)系统所必需。其次,网络交换对应着众多的用户(尽管大部分用户可以通过地区网转发),光开关矩阵的集成度远比OADM大得多,它通过众多光波导形成一个很大规模的分叉状网络,波导损耗的积累是一个有待解决的课题。

1.4 传输信息的路由选择

光网络体系必须具备快速识别网户的功能。DWDM技术的运用,能够充分复用丰富的波长资源,选用不同波长作为网户的标记而实现波长路由的方案。然而,网户并不是全天工作的,因此,网络中必将存在大量的空闲信道。从网络运行的经济性考虑,有时需要借道传送,以充分发挥网络潜力。这就要求网络体系具有波长变换的功能。因为在不同地区网中,所有的波长都已分配给自己的网户,不经波长转换,网间信息是不可能及时载入的。波长转换的带宽则要求能覆盖全波段,并有高速率响应。波长转换也将给网络系统带来复杂性,并使造价提高。因此,在局域网中也可以不必采用波长转换,但却要求网户系统具有发送不同信道波长的

可调谐功能。如何选择,需从系统的经济性考虑。

2 关键性光电子器件研发现状

光网络具有高速率、大容量、多媒体的优势,并能满足众多用户的应用需求,这种先进系统的复杂功能必须要有许多高水平的光电子器件与集成芯片来支撑。以下着重介绍其关键性光电子器件的研发现状。

2.1 高速响应、单稳频、集成化发射光源

InGaAsP/InP量子阱半导体分布反馈(DFB)激光器仍然是光网络的首选光源。尽管通过器件结构的优化设计,DFB的直接调制速率已可达10GHz,但要达到40GHz难度极大。即便达到也由于在此高速率运作下,频移啁啾效应已相当严重,因此必须采用外调制技术。利用量子阱中激子吸收的量子限制(QCSE)效应研制的电吸收(EA)调制器是首选的目标。它不仅可以达到100GHz的调制带宽,而且能与DFB激光器实现单片集成,其发射功率下落到20dB时,谱线宽度仅为THz(即0.08nm波长),能够满足光网络发展的需求。目前可载入40Gbit/s的这类DFB-EA集成光源已经研究成功,开始在实验系统中应用,但售价高达3万美元一个。即使一个40GHz的EA调制器售价也在1万美元以上。目前商用系统上普遍使用的仍然是10Gbit/s的集成光源。

2.2 波分复用与解复用器

复用器应是一种具备对称功能的器件,现已发展了多种复用器,例如,多层介质膜滤光片复用器,光纤光栅复用器等。然而,由于它们的损耗随着复用信道的增加而增大,满足不了DWDM的密集复用传输。一般只适用于32个信道以下,如在局域网或接入网中上下路分插复用使用。

SiO₂/Si系的AWG是目前用于DWDM光网络的理想选择。从技术上看,它的复用路数几乎不受限制,只要增加弯曲波导的路数(一般为信道数的10倍)即能达到。同时它的制备工艺几乎与微电子工艺完全兼容,可以大规模生产,有望降低成本。只是必须解决SiO₂厚层(如50μm厚)的无应力生长,否则将会引入偏振色散。另一个难度则是必须保证波长与信道精确对准,同时具有平坦的响应特性,必要时还应具备适当的波长可调谐功能。随着

技术的进步,这些难点将会一一突破。目前,实验室研制的 SiO_2/Si AWG 复用信道已达 $1\,000 \times 1\,000$ 水平。 60×60 复用信道的产品开始问市,但由于成品率还不够高,故价格昂贵,一个 40×40 复用信道的 AWG 售价高达 3 万美元。尽管这样,有不少光网络系统已开始使用 AWG 复用/解复用器,而在未来的 DWDM 光网中,它则是不可缺少的关键器件。目前发展的梳状分离器 (Interleaver) 能够将偶数与奇数传输模分开,它与 AWG 的结合将能减缓在高密集度 DWDM 中 AWG 承受的压力。如前所述,用于上下载路分插复用的复用/解复用器,信道数不必很大,造价降低到用户能普遍接受的水平为其关键。因此, Si 基 SOI AWG 和 Polymer/Si AWG 是目前关注的另一重要发展方向。

2.3 窄谱带响应的高速光电探测器

面对光网络中高密集度 DWDM 的低串扰解复用需求,必须在常规的光电探测器前面加上窄通带滤波器。由分立元器件的组合可以满足此要求,但体积太大,有附加损耗,造价高。再则,这些探测器在空间安置上必须非常紧凑,这就要求对众多探测器实现线列阵集成。使用分立元器件的组合无法满足上述要求。因此,共振腔增强型 (RCE) 光电探测器应运而生。它是在很薄 (几倍波长的线度) 的有源吸收层的上下面分别做上 DBR 镜,由此构成一个 F-P 谐振腔。F-P 腔具有锐选模特性,同时对未被吸收的入射光通过腔内多次往返,起到了多光程吸收增强的效果。这种器件结构与垂直腔面发射激光器一样,尤其适于大规模集成和批量生产。采用外延生长或低温键合技术,将适宜的吸收层构置在上下 DBR 间 (如多层 SiO_2/Si), 形成 F-P 腔,从而实现全波段的窄带调谐检测功能,是一个引人关注的重要发展。我们借助自己的 SOR 专利技术,以应变层 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}/\text{Si}$ MQW 材料为吸收层,已实现对 $1.3\,\mu\text{m}$ 光的窄带探测,响应谱 $\text{FWHM} < 6\text{nm}$, 外量子效率 $\eta > 4.2\%$ 。通过结构上的优化和工艺上的完善,性能还可有更大的提高。Si 基窄带检测器的实现,为全 Si 化光接收机的 SOC 集成奠定了基础。它将促进低造价规模产业的发展。

2.4 集成光开关阵列

基于电-光、磁-光、声-光、热-光等物理效应的光

开关器件已有很长的研发历史,有些分立器件已应用在光通信系统中,但集成化的问题并未解决,造价也很高,开关速度也都比较慢。未来的发展除了提高开关响应速度外,还需在造价上大幅度降低,以适应用户的经济承受度。光网络中光开关是以矩阵的形态运作的,同时光开关又必须借助电能的驱动,因此光开关矩阵的 OIEC 集成势在必行。它不仅有利于提高速度稳定性能,同时也是实现规模化生产、降低造价的必由之路。从上述的观点考虑, Si 基光开关的研发应是一个重要的方向。目前, Si 基光开关主要有两类:一类是基于微机械 (MEMS) 的光开关,它是用微机械静电马达带动微小反射镜来实现的,利用现在 Si 微电子工艺已研制出 256×256 Si 基 MEMS 光开关矩阵,但开关速度仅达若干毫秒。另有人担心如此精密的微系统中开关运作对准性的稳定度和可靠度在长时间应用中可能会受到环境和运作条件的影响。尽管如此,有些实验系统中已采用了这类光开关。

另一类则是基于热-光 (TO) 效应和电-光 (EO) 效应的 Si 基光开关。这类光开关大都做成 M-Z 干涉仪的结构。制作在 Si 基片上 SiO_2 波导 TO 型 M-Z 光开关是已经成熟的一种。 SiO_2 有比较大的热光系数,而导热系数又很小,因此开关功耗小。但导热系数小,却使开关热弛豫时间拖长,一般为 10ms 量级。目前研发的 TO 光开关矩阵已达规模化生产,并开始应用于光网络实验系统中,但造价仍较高。一个 16×16 TO 光开关矩阵,售价达 1 万—2 万美元。

采用 Si 基 SOI 基片制作的 TO 光开关,由于 Si 的热导系数比 SiO_2 大得多 (如三个量级),因此,开关的热弛豫时间可大幅度降低,但却需付出热功耗的代价。我们研制的这种开关,在 0.5W 热功耗下运作,开关时间可低至 $10\mu\text{s}$ 。

电-光型 EO 光开关,可望达到 $< \text{ns}$ 开关时间。然而由于 Si 的 Pockel 效应很弱,电光系数极小,难以满足 EO 开关的要求。利用 P-N 结正向大注入下的等离子色散效应,可以获得与 GaAs 相当的电光系数,响应时间可 $< \text{ns}$, 但电功耗太大,运用纳米技术,对 Si 基材料的电光效应实施人工改性的工作正在探索中。

2.5 宽带波长变换器

正在发展的最有前途的波长变换器,是基于半导体光放大器(SOA)运作的波长变换器。SOA的光增益随外部入射光的强度增加而变化。波长变换的功能即是利用SOA的非线性增益和均匀展宽特性。

波长变换有三类工作模式,即:交叉增益调制(XGM),交叉相位调制(XPM)和四波混频(FWM)。最有发展前途的是交叉相位调制的工作模式。将两个性能相同的半导体光放大器SOA1、SOA2通过3dB定向耦合器组成一个M-Z干涉仪,试探光 λ_s 经耦合器分束,同时入射到两臂的SOA中。尽管它们都对SOA的光增益产生了调制,但在对称运作下,二者相位差为零。因此,输出端保留 λ_s 激光输出。此刻若信号光 λ_s 向某一臂的SOA1入射,SOA1将产生附加光增益调制,等离子色散效应将使SOA1的折射率发生变化,使SOA1臂中对 λ_s 试探光的传播系数(或相位)得到调制。适宜工作条件的选择可使两臂的相位差为 π 。由于相干抵消的结果,干涉仪的输出端将没有 λ_s 激光输出。这就实现了传输信息码 $\lambda_s \rightarrow \lambda_c$ 的波长变换。XPM模式对自发辐射光有抑制作用,波长变换对比度高,尤其适宜于级连使用。

InGaAsP/InP MQW基的波长变换器已能在1.3—1.55 μm 波段下工作,响应速率高达100Gb/s,但对单个SOA波长变换器的变换带宽则受限于SOA的光增益平坦带宽。一般可连续变换谱区在40nm以内,而石英光纤的全波窗口达400nm,因此,在高密集度DWDM光网络中,必须考虑不同响应谱带的多个SOA级连使用。SOA的制作工艺要求比较苛刻,造价还很高,一般每个售价高达2万—3万美元。

光网络中信息的传送(如TV点播,电视会议等)是多点运作的。从经济上考虑,这就需要发展一种多波长变换同时发送的技术。利用SOA的宽带自发辐射谱的光增益调制可以满足这点。将SOA运作在有强自发辐射输出的状态下,无需高功率的试探光束入射于SOA。当较强信道激光 λ_s 入射于SOA中时,由于 λ_s 受到光放大,上能级粒子分

布产生变化,从而使整个谱区自发辐射光强度同时下落,于是就把 λ_s 荷载的信息拷贝在自发辐射光上。采用高精度的解复用器分解出众多的用户标识波长的光束,调制带宽可达80nm,但变换后的信道光不是激光,强度太弱。更实用化的器件还有待发展。

2.6 短程多模干涉(MMI)分束器

传统的光开关单元是由两个3dB Y型波导耦合器与M-Z开关的两臂连接组成的。实现多址传送功能,需要众多的光开关单元按树枝状网络连接组成大规模的光开关矩阵。连接光波导的累计光程很长,网络分布复杂,芯片面积很大,传输光的损耗很大,因此,需要发展一种短程多址分束器。多模干涉耦合器能够很好满足这个需求。它是由一个适宜尺寸的多模光波导,两侧连接有输入、输出用的单模光波导。由单模波导入射的信道光束进入多模波导后,通过波导侧壁的多次反射引起的干涉效应在多模波导中的不同截面形成不同级别、强度均衡的多模光斑,其传播方向、相位与入射光波一致。根据系统的需求来确定多模波导的长度,便可获得 $1 \times N$ 或 $M \times N$ 自映像多模分束器或耦合器,从而实现多址分束功能。

MMI分束器的长度一般为波长量级,在10 μm 以内。由此组成的光开关矩阵损耗可大幅度降低,芯片面积也大大缩小。MMI具有对称功能,且对波长敏感度较弱,已经有人用它作为小规模(8个信道波长)的复用/解复用器使用,在OADM系统中有重要的应用前景。

SOI Si基材料是研发MMI的理想选择。它不仅工艺成熟,材料低廉,更重要的是它能与微电子开关电路实现单片集成,从而有利于SOC芯片的规模化生产。

2.7 垂直腔面发射激光器(VCSEL)

光网络的发展既决定于社会对信息化程度的迫切需求,同时也有赖于系统造价成本的降低,以使市场的开拓与用户的经济承受能力相匹配。光电子器件造价的降低是一个重要的努力方向。VCSEL激光器体积很小($5 \times 5 \times 80 \mu\text{m}^3$),一个3英寸的衬底已经研制出256 \times 256 VCSEL,成品率很高。借助微电子工艺又能实现自动化封装,售价可望降低

到用户能接受的 10 美元以下(比现在的 DFB 激光器便宜 100 倍)。但是现在的 InGaAsP/InP 基长波长激光器由于两种材料间的折射率差很小,制备 90% 反射率的 DBR 至少要交替生长 100 对异质层,造价很高,工艺难度极大,是需要攻克的一个难关。采用低温键合技术将 AlGaAs/GaAs 或 SiO₂/Si 的 DBR 与 InGaAsP/InP MQW 芯片结合在一起,曾一度很热,但由于界面质量不够可靠,使器件的性能难以保证。采用 InGaAs/GaAs 材料系也是一个有希望的研发方向。

目前的研发热潮集中在成熟的 AlGaAs/GaAs 850nm 波长 VCSEL 的开发,有望使成本降低到每个 2—3 美元左右,尤其适于在用户终端的接入网中使用,但它需要波长变换的配合才能实现上下路的功能。最终的取舍依然由性价比决定。

此外,支撑光网络发展的光电子器件还有:光功率均衡器,可调谐滤波器,模梳状分离器以及用于泵浦掺 Er 和 Tm 光纤放大器 EDFA 和 TDFA 的量子阱 980nm 大功率激光器和泵浦光纤 Raman 放大器的 14×nm 波长系列化大功率激光器等。

3 未来发展趋势

虽然现已研发的光电子器件比较成熟并能够支撑当前光网络发展的需求,但随着信息化社会的发展,传输信息量的激增,实时性要求的提高,用户数量的扩大和对网络安全的重视,必将会使光网络的功能配置大大增强,并将不断地对光电子器件提出新的要求。因此继续研发开拓更高性能的光电子器件是一项长期的创新性任务。优化功能、降低成本、开拓市场始终是光电子器件发展的主流。

3.1 光器件集成的研发

光器件集成的研发是一个重要发展趋势,它包括有源光子器件集成,即光子集成(PIC)和无源光波回路集成(PLC)芯片的发展,其中又分为功能集成和阵列集成。实际上前面谈到几项关键性光电子器件几乎都是光子集成器件。

光波回路集成是将若干无源光波导器件制作在一个基片上,通过平面波导互连,构成一定的功能回路应用于光网络体系中。

光器件集成不仅能使器件性能,如响应速率、

耦合效率、功耗、串扰等特性得到根本性改善,同时也使功能芯片的稳定、可靠度和成品率得到大幅度提高,从而使芯片的整体造价大幅度降低。

3.2 光电子集成芯片的研发

光电子集成芯片的研发是又一个重要发展趋势。光器件的运作离不开电的驱动与控制,因此,一个完整的集成功能芯片应包含有光子器件和电子器件的兼容集成,构成一个光电子集成系统芯片。业已成熟的微电子技术首推 Si 基和 GaAs 两类, Si 基微电子无论从技术的成熟性还是规模化程度及性价比等方面,远比 GaAs 基优越,因此, Si 基 SOC 光电子集成芯片的发展,是一个梦寐以求的目标。除了有源光子器件(激光器和光放大器)外,其余的性能优异的无源光子器件几乎都可在 Si 的基片材料上得到实现, SiO₂/Si、SOI、SiGe/Si 等结构材料为 Si 基光子器件的发展提供了充裕的发展空间。能带工程和纳米技术的运用还将会打开新的局面。

由此可见,未来的光电子集成 SOC 芯片将是 Si 平台为基础的集成芯片。低温键合技术的运用对以 Si 为平台的光电子 SOC 芯片的发展将作出重要贡献。预计将会有更多从事微电子研发的工作者转移到光电子集成领域中来。

3.3 规模化产品技术的研发

规模化产品技术的研发也是未来的重要发展趋势,必须研究大幅度降低光电子器件与芯片成本的途径。

制造工艺的简约化、标准化、系列化和自动化是必由之路。满足光网络各种需求的光子器件要求结构简单,工艺兼容性高。尽量采用标准化、系列化的平面工艺技术,为产品研制过程自动化打下基础,最终实现低成本规模化产品开发的目标。

光子集成与光电子集成芯片产品化技术的实现,无疑将使光网络的发展走进千家万户,为信息化时代的来临做出历史性的巨大贡献。

主要参考文献

- 1 王启明. 光网络中关键性光子集成器件的研究与发展(上). 光纤通信, 2001, 23(3): 8-14.
- 2 王启明. 光网络中关键性光子集成器件的研究与发展

- (下). 光纤通信, 2001, 23 (4): 8- 12.
- 3 Louay Eldada. Advances in telecom and datacom optical components. Optical Engineering, 2001, 40 (7): 1 165- 1 176.
- 4 OFC Technical Digest Series, Anaheim, California, 2001.
- 5 王启明. 光网络与光子集成的发展(上). 电子产品世界, 2001, (4): 7- 11.
- 6 王启明. 光网络与光子集成的发展(下). 电子产品世界, 2001, (5): 7- 11.

State of the Art and Future Prospect in Development of Optoelectronic Devices Applied in Optical Communication Network

Wang Qiming

(State Key Joint Laboratory on Integrated Optoelectronics
Institute of Semiconductors, CAS, 100083 Beijing)

Proceed from the consideration of the demands of the DWDM optical communication network, the state of the art in development of optoelectronic devices, which applied in the system, will be presented in this paper and also pointed out the photonic and optoelectronic integrated chips, especially Si-based optoelectronic SOC chips, as well as the mass production technology are the developing trend in the future.

王启明 中国科学院院士, 半导体研究所研究员, 博士生导师。1934 年出生。1956 年毕业于复旦大学物理系。1983—1994 年先后任半导体研究所副所长、所长。曾任“863”计划信息领域专家委员会委员, 国家自然科学基金委信息科学部光学(I)学科评审组组长等职务。现任中国光学学会、中国电子学会理事、中国电子学会半导体与集成技术分会信息光电子专业委员会主任。自 70 年代以来, 一直致力于半导体光电子学领域的研究, 重要科研成果曾多次获国家和院级奖励, 并荣获 1999 年度何梁何利基金科学与技术进步奖。现正主持国家自然科学基金委重大基金项目“半导体光子集成基础研究”和国家重点基础研究规划“支撑高速率、大容量信息光网络系统的光子集成基础研究”项目课题。以第一作者发表论文近 100 篇, 与他人合著专著 4 部。