

全光信息网络中的某些关键 半导体光电子器件

黄德修

(华中理工大学光电子工程系 武汉 430074)

摘要 随着 IP 信息业务的指数增长,包括以密集波分复用(DWDM)为基础的光传输、光交换甚至包括光接入的所谓全光网(AON)将是未来信息网络的核心和发展的必然趋势。高性能的光电子器件和它们的集成化是发展 AON 的基础。在诸多的光电子器件中,论文仅对 AON 中某些关键的半导体光电子器件的重要性和发展趋势予以评论。

关键词: 光电子器件, 半导体, 全光信息网络

EEACC: 7240, 7220

文章编号: 0253-4177(2000)03-0209-06

Some of Key Semiconductor Optoelectronic Devices Used on All-Optical Network

HUANG De-xiu

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Received 18 May 1999, revised manuscript received 22 September 1999

Abstract The information capacity is exponentially growing due to the rapid development of IP (Internet Protocol) traffic. It is the indispensable trend to develop the All-Optical network (AON) in which a lot of optoelectronic devices and their integration are required with the excellent performance. Some of key semiconductor optoelectronic devices in AON and their developing trend is discussed.

Key Words: Optoelectronic Devices, Semiconductor, All-Optical Network

EEACC: 7240, 7220

Article ID: 0253-4177(2000)03-0209-06

黄德修 1937 年出生, 现为华中理工大学信息科学与工程学院副院长, 光电子系主任、教授, 博士生导师, 长期从事半导体光电子学和光纤通信方面的研究。

1999-05-18 收到, 1999-09-22 定稿

1 信息爆炸的时代

人类已进入信息爆炸的年代。这一爆炸的“导火索”来自指数增长的 Internet 业务，网络服务的提供者正在按 50%~300% 的年增长率规划，随着 Internet Protocol (IP) 的出现与其它协议(如 ATM, STM, DWDM 等)的兼容，其服务范围已从初期单纯的 E-mail 发展成商务和多媒体服务。IP 在信息网络中的核心地位正在形成，现在全世界上因特网的主机已达 2000 多万台，上网人数过亿，预计 1999 年因特用户数将达 2 亿。Internet 业务的特点之一是用户占信息带宽的时间长(数十分钟到 1 小时以上)，如采用现有的网络结构，必然会造成业务拥挤，带宽“枯竭”。

一些新的业务，诸如远程教育、远程医疗、家庭购物、家庭办公等正在蓬勃发展，一些与人们直觉有关的图象信息，诸如会议电视、可视电话、DVD、HDTV 等宽带业务市场正在迅速扩大，以提高工作效率和人们的生活质量。

围绕对占整个信息投资规模和占市场约 70% 的接入网的研究也正在紧锣密鼓地进行。由于宽带业务正涌入千家万户。预计到 2010 年，许多家庭所占带宽将达 10~100Mb/s。为了突破快速增长的业务而在信息网络上所出现的瓶颈，一些新的接入技术不断推出，如非对称数字用户线(ADSL)、高速数字用户线(HDSL)、光纤同轴混合(HFC)等。考虑到下世纪家庭将占用大的信息带宽，是将 FTTH 一步到位还是分步实施是一个重要的发展战略问题，其中制约因素是光电子器件的性能和价格。灵活、机动的移动通信业务以每 9 个月翻一翻的速度向前发展。无线接入融入光纤通信(radio on fiber)无疑能提高其使用效率，但也给光纤通信网络带宽带来新的压力。面对上述业务对信息带宽的需求，迫使人们振臂高呼“Capacity! Capacity! Capacity!”。尽管信息技术的战略家们或专业性的市场评估机构惊叹对如此迅速发展的信息市场总是估计不足，但对扩大信息网络容量的战略发展方向是明确的，即在开拓带宽资源的同时，发展信息压缩技术(如压缩数字图象的 MPEG-2 等)，提高带宽利用率。

光纤被认为有“取之不尽”的带宽开发潜力。随着信息技术的发展，先后开发出中心波长为 850、1310 和 1550nm 三个窗口。近年来，美国 Lucent 又在开发中心波长为 1625nm 的第四个窗口。同时他们正在通过超纯光纤生产工艺，削去中心波长为 1400nm 的 OH⁻吸收带，并使之成为第五个窗口，制成将第二和第三个窗口连成一片，带宽为 1280~1650nm 的全波(All Wave)光纤，形成一条超宽的信息高速公路。

光纤传输容量以每 12 个月翻一翻的速度在增长，目前美国 Lucent 能提供的实用化系统已能达到 2.5Gb/s × 128，日本 NTT 在实验室已进行了 300Tb/s(160Gb/s × 19)的试验。下世纪的头十年内 Tb/s 量级的干线传输系统将进入实际应用。例如，日本计划在 2010 年在干线上传输速率达 5Tb/s。对通信事业正蓬勃发展的中国也不例外。很显然，承担信息交换的网络节点，如采用现在的电子交换无疑将成为整个信息网络的瓶颈。突破这一瓶颈的根本途径是依靠光子学。普遍认为，20 世纪是电子学时代，21 世纪将是光子学时代或光子学与电子学并行发展的年代。

2 全光网——信息网络的核心

未来信息网络技术的发展必然是以全光网络为核心，融合包括有线、无线等多种媒体和不同业务规模的多种信息网格。通过 IP、STM、ATM、DWDM 等多种协议，使整个网络成为一个灵活的整体。由于光纤有巨大的带宽和待开发的潜力，因此很自然就确定了全光网在整个信息网的核心地位，如图 1 所示^[1]。所谓全光网，是指从源节点到目的节点均在光域内。从网络运行的经济性、灵活性、可靠性等诸多因素出发，全光网的网络结构和运行协议有多种选择。例如，在核心传输层上由在 ATM 基础上的 IP 支撑或 IP 直接进入核心传输层等。全光网的演变和构成如图 2 所示。点到点单信道光纤传输(含光放大器)是较早和最基本的传输系统(图 2(a))。由于光放大器对波长和调制格式的透明性，在此基础上演变成能传输多信道(波长)

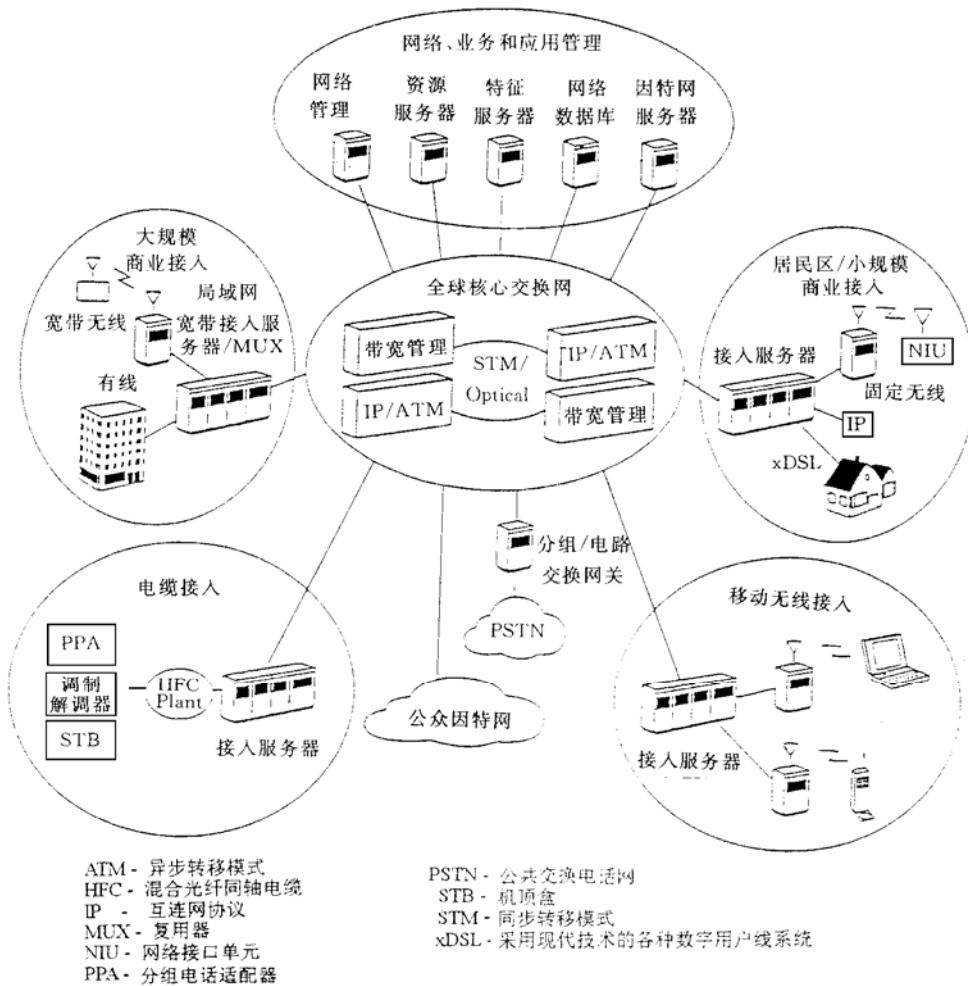


图 1 以全光网为核心的信息网络

FIG. 1 Information Network Used All-Optical Network as Nucleus

的 WDM 或 DWDM 的光纤传输系统(图 2(b)). 为克服目前网络节点处通信容量的瓶颈, 下一步将演变成含有光上/下复接(OADM)和光交叉连接(ODXC), 并含有诸如波长路由、波长转换等功能的 DWDM 全光网, 它也构成整个信息网的核心传输层.

3 全光网中的某些关键半导体光电子器件

如前所述, All Wave 光纤开辟了在很宽波长范围内 DWDM 的可能性, 以便获得大的通信容量. 全光网的发展又需要一些新的光电子器件来支持. 器件是系统和网络的基础, 显然, 要在此如此宽的波长范围内构成以 DWDM 为基础的全光网络, 对光电子器件性能将提出更为苛刻的要求, 其中, 波长可选择/可调谐的有源和无源器件、单片或混合集成化模块是至关重要的. 限于篇幅, 以下只讨论极为有限的重要半导体光电子器件.

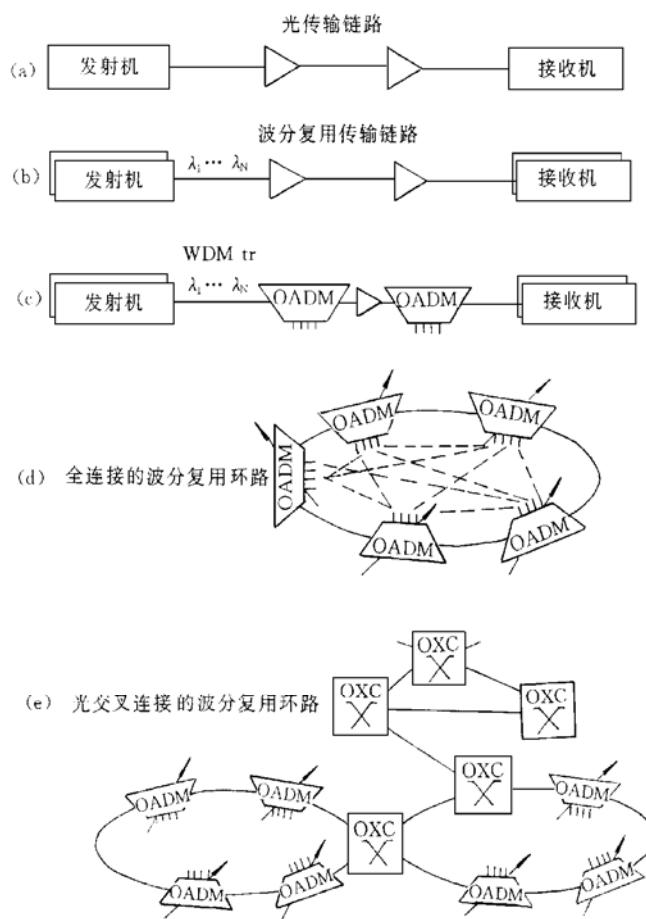


图 2 全光网络的演变

FIG. 2 Evolution of All-Optical Network

3.1 用于泵浦的半导体激光器

随着低损耗传输光纤带宽的拓宽和对 EDFA 增益谱平坦化的处理,将在它的 C 带和 L 带内进行数十个 DWDM 信道的放大。为保证每个信道所放大的信号有足够的输出功率($\sim 10\text{dBm}$),则要求泵浦用半导体激光器的出纤功率在 200mW 以上,经过 980nm 、 1480nm 几级泵浦(如用 980nm 泵浦放大已衰耗的信号,再用 980nm 泵浦以补偿为均衡放大器增益所产生的损耗,用 1480nm 泵浦进行功率放大),最后产生总输出为 30dBm 以上的功率。目前, 980nm 激光器的出纤功率能达 200mW ,进一步提高输出功率需用无铝材料以提高腔面破坏(COD)阈值; 1480nm 半导体激光器的输出功率已达 180mW ,进一步提高输出仍需解决载流子漏泄和热效应问题以提高饱和输出功率。

近年来用光纤喇曼放大器(FRA)与 EDFA 相结合能得到 80nm 以上的平坦增益谱。它是利用 FRA 与 EDFA 有互补的增益谱特性。而 FRA 的增益谱取决于泵浦波长和泵浦功率,以产生所要求的非线性和频移。

另一方面,只要合理选择泵浦波长,理论上可直接用 FRA 对位于光纤的各透明窗口的光信号进行放大。而且,用多个不同波长的激光源对 FRA 泵浦,还可得到 100nm 左右的平坦增益谱。例如用 $1420\text{~}1490\text{nm}$ 范围内适当间隔的 $3\text{~}4$ 个波长对 FRA 泵浦,可在 1550nm 波段得到 $80\text{~}100\text{nm}$ 的平坦增益谱。

为得到所需增益,这种泵浦激光器的出纤功率需 2W 左右。目前均是采用光纤激光器。从长远考虑,这些泵浦源应该使用半导体激光器,以充分发挥半导体激光器的优越性。但要在长波长波段实现功率达瓦级的半导体激光器,由于严重的载流子俄歇复合和漏泄效应,远非容易之事。

3.2 DFB 激光器与电吸收(EA)调制器的单片集成

量子阱材料所制成的 DFB 激光器具有好的动态单纵模特性。而 EA 调制器与铌酸锂调制器相比,驱动电压低($\sim 2V$),不需保偏光纤,EA 与 DFB-LD 单片集成可得到低成本、结构紧凑的一体化器件,将在 10Gb/s 速率和中距离(200~400km)的传输系统中得到应用。然而,与常用的 M-Z 调制器相比,它的工作条件苛刻(如偏置电压、器件的温度,与之相集成的激光器的工作电流等),并要求激光器激射波长与 EA 调制器的激子吸收峰波长的差值恒定。为进一步增加传输距离,需对 EA 输出面进行超低剩余反射率增透,以减少啁啾,并对半导体激光器有源区和 EA 调制器吸收区量子阱参数分别优化。

3.3 半导体激光放大器(SLA)

自 90 年代以来,由于以应变量子阱为代表的能带工程的运用,SLA 的性能得到了全面和大幅度的提高,特别是增益的偏振灵敏度、噪声指数已明显降低,已达到和 EDFA 相比拟的水平,饱和输出功率、小信号增益有显著提高。它的一些独特优点,如结构紧凑、便于与其它半导体光电子器件集成、直接电驱动产生信息增益和适合于大量生产因而价格便宜等,一直是驱使它不断发展的动力。有理由相信,它在光子学领域,特别是在全光网络中将发挥巨大作用。

(1) 由于可通过改变 InGaAsP 材料的组分而能在 1300~1600nm 的一个特宽的波长范围内获得信号增益,从而可能串联数个不同增益谱中心波长的 SLA,获得宽且平坦的增益谱。这是 DWDM 传输系统所需的,如图 3 所示。价廉的 SLA 将会在用户网中得到广泛应用。

(2) 利用 SLA 的交叉增益调制(XGM)、交叉相位调制(XPM)和四波混频(FWM)效应可实现波长转换,而波长转换器在全光网络中是一种非常关键的器件,用它可以实现波长动态路由。如欧洲正在进行的“Switchless”全光网中计划用 16 万个这种波长转换器;用波长转换器可以构成 OXC,还可以用它作波长开关来重构网络,增强全光网的灵活性和生存能力;用波长转换器可以实现波长再利用,从而在网络的不同节点上使用同一波长,以减少参与复用的波长数量,等等。

(3) 利用半导体光放大器可能产生的非线性效应,又可在全光网中开辟一个新的天地。例如,利用四波混频效应所产生的共轭波可实现中点谱反转,即光信号在 SLA 前所经历光纤正色散造成脉冲展宽,在光信号 SLA 内转移至它的共轭波上,在此后下一半光纤线路的传输中信号受到压缩。利用这种色散补偿,英国 BT 已实现 40Gbit/s、180.6km 的现场传输试验。也可在无线接入经外调制进入光纤的系统中,利用同样的相位共轭原理,克服双边带信号在含有色散的光纤系统传输中所产生的周期性衰落。

(4) 利用在 SLA 中的非线性效应,可以用来实现光纤传输系统中的 2R (Reamplification and Reshaping) 和 3R (Reamplification、Reshaping and Retiming) 再生。还可用来代替长约 1km 的普通单模光纤所产生的非线性,做成结构紧凑的非线性环行镜(NLOM),而 NLOM 在光脉冲整形、光开关、光时钟提取、解复用器等方面都能得到应用。

(5) 利用 SLA 可构成大容量的光开关阵列。而这种光子集成的开关阵列具有内部增益,可补偿开关损耗,在全光网中有重要应用价值。

还有 SLA 的其他一些应用实例,不一一列举,Phillips 甚至还用 SLA 进行了光纤传输系统中的线路放大、前置放大、功率放大试验。然而,可以作一个保守的设想,在未来的 3~5 年内,SLA 将会首先在波长转

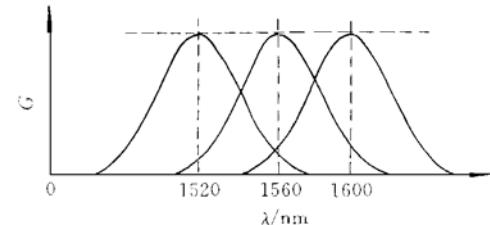


图 3 多个 SLA 串联实现宽且平坦的增益

FIG. 3 Wide and Flat Gain Completed by

Cascade of SLAs

换、光开关等方面得到很大的应用;利用它在一定条件下的非线性特性对传输光脉冲整形、色散补偿等将会有大的突破。至于在光纤传输中像光纤放大器那样得到应用,还有待于它的饱和输出功率、信号增益的进一步提高。可以预言,SOA 在光子学中的地位将能类比晶体管在电子学或微电子学中地位。

3.4 Si 衬底上的光子集成

光子集成(PIC)和光电子集成(OEIC)技术与相应的器件,是全光网发展的必然趋势。全光网必然是各种信息业务、信息技术、多种光电子器件的高度集成。

Si 在微电子学中还将继续发挥巨大作用,在芯片单位面积上能集成的晶体管数量现在仍以每 18 个月翻一翻的速度增长。微电子学仍是光子学、光子系统与网络得以发展的基石。

在光子学中,Si 作为光纤的基质,已为信息社会作出了极为重要的贡献。在光子学器件中,Si 同样有重要的和广泛的应用前景,将为信息时代建立起新的丰碑而出现“Si 基化光学”(Siliconization of Optics)的局面。以下略举数例:

(1) 微电子机械系统(MEMS)

它是利用现有微电子学中所常用的外延、光刻、腐蚀等成熟生产工艺,在 Si 衬底上形成某些机械零部件(包括运动件,如电机、弹簧、开关等)和光学零件(如面镜),所形成的 MEMS 能完成光调制、光开关、波长可选择的衰减器、OADM、波长路由等许多功能。由于它适合于大量生产、价格便宜,将会获得大量应用(特别是在用户网中)。目前 Bell Labs 已研究和开发出数十种 MEMS,其大小仅为 mm 量级。

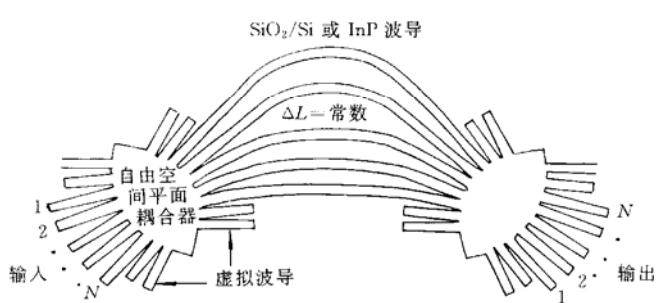


图 4 列阵波导光栅

FIG. 4 Arrayed Waveguide Grating

(2) Si 光学平台(SiOB)

将微小的 Si 芯片作成光学“平台”,在其上可形成连接光学元件的光波导,连接电子学元件的电路和供焊接的金属头,在其上混合或单片集成 LD、探测器、分路器,光学滤波器、WDM 器件等,而成为“system on chip”的形式之一。

列阵波导光栅(AWG)是将含自由光谱区的星形耦合器、列阵波导光栅集成在半导体衬底(Si 或 InP)上的一个例子,如图 4 所示。AWG 可

用作大容量波分复用器、波长路由器和 OADM 等。Bell Labs 所开发的“Dragon”形 AWG 已用于路由器,路由的波长已从 16 波发展至 72 波。同时还在 SiOB 上形成 16 个波长的 OADM。

4 结语

由于因特业务的迅速发展,下世纪在信息传输、交换和存储的容量都将达到 Tb/s 量级,而信息网络必然是以全光网为核心,融合其他媒体网络的网络整体。全光网络需要大量波长可调谐、可选择的有源、无源器件。PIC 和 OEIC 是适应网络技术发展的必然趋势。本文仅讨论了全光网中极为有限的关键半导体光电子器件。

参 考 文 献

- [1] D. C. Dewden, R. D. Gitlin and R. L. Martin, Bell Lab. Tech. J., 1998, 3(4): 3~ 14.