

光通信中的光电子器件讲座

第一讲 光电子器件在光纤通信中的应用与发展*

余 重 秀

(北京邮电大学光通信与光电信息处理研究所 北京 100876)

摘 要 文章介绍了光纤、激光器及光放大器等光电子器件在光纤通信的产生、发展中的关键作用,分析了现代光纤通信系统中的各种有源、无源光电子器件,并论述了 21 世纪全光网发展所需的几种典型的光电子或光子器件。

关键词 光电子器件,光纤通信,全光通信网

APPLICATIONS AND DEVELOPMENT OF OPTOELECTRONIC DEVICES IN OPTICAL FIBER COMMUNICATIONS

YU Chong-Xiu

(Institute of Optical Fiber Communication & Photoelectric Signal Processing,
Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract A review is presented of some optoelectronic devices (OEDs) such as fibers, lasers, optical amplifiers and so on, which are crucial to the development of optical fiber communications. Various active and passive OEDs in modern all optical communications systems are also analyzed.

Key words optoelectronic device, optical fiber communication, all optical networks

1 光通信的产生和发展离不开光电子器件^[1,2]

我们知道,人类曾用火烟信号、信号灯、信号旗传递信息,这些通信方式不是真正的光通信,而属于目视光通信。1880年,A.G.Bell发明了“光话”,他通过大气用日光传输声音 200 m 之远,这在 19 世纪 80 年代称得上是一件了不起的事情,但由于日光的强度、可靠性及大气的损耗等问题,使这种“光话”未能得以实用。而当时的电报、电话等通信手段发展很快,到 20 世纪初期形成了全球范围的电话通信网。光通信的研究由于找不到合适的光源和传输介质曾一度处于沉寂。直到 20 世纪 60 年代,高强度、高相干性的连续波固态激光器——红宝石激光器诞生了,由此引起世界性的激光通信研究热潮。1962 年又产生了半导体激光器(laser diode, LD),它体积小、效率高、工作稳定,很适合于作为通信光源。当时的激光通信仍以大气作为传输介质,大气的散射损耗、

气候、环境严重影响了信号传输的稳定性。1966 年,华裔科学家高锟博士在他的论文中首次提出以玻璃纤维作为光传输介质,从而开辟了光通信的新纪元。针对如何提高光纤的传输性能、如何用于光纤通信,在世界范围内展开了广泛的研究。四年之后,美国 Corning 公司研制出世界上第一根低损耗的石英光纤,从而找到了适合光通信的传输介质,这在光通信发展史上是一个划时代的事件。光通信研究从此转向光纤通信研究,揭开了光纤通信发展的新篇章。

从 20 世纪 70 年代开始至今,光纤通信的研究和发展经历了 30 多年。借助光电子、微电子技术和器件的应用和发展,已经形成了 5 代光纤通信系统,其中 4 代已进入实用阶段。1970 年,发明了分布反馈布拉格(distributed feedback Bragg, DFB)激光器,它具有动态单纵模振荡、窄线宽、波长稳定性好等优点,有助于提高光信号的码速率。在第 1 代光纤通信

* 国家 863 计划(批准号:863-307-11-3)资助项目
2000-07-31 收到初稿,2000-09-30 修回

系统中,使用的光源就是在室温下连续工作的 GaAlAs 半导体激光器,并以低损耗短波长 $\lambda = 0.85\mu\text{m}$ 窗口的多模光纤作为传输介质,半导体硅材料的 PIN 光电二极管和雪崩二极管(avalanche photodiodes, APD)作为光电探测器.美国 Bell 实验室于 1976 年在亚特兰大开通了第一条 4.5 Mb/s 的光纤通信系统试验.1977 年在芝加哥进行的 44.7 Mb/s 码速率现场实验是第 1 代光纤通信的标志.之后,对光纤的进一步研究,发现了它的第 2 个、第 3 个低损耗窗口分别是波长 $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ 和 $1.5\mu\text{m}$,这样又开展了对对应波长的 InGaAsP 材料激光光源和光电探测器的研究.80 年代初,第 2 代光纤通信系统利用了 $1.3\mu\text{m}$ 的多模光纤,其传输距离和码率分别被限制在几十 km 和几十 Mb/s 的水平上.第 3 代光纤通信系统利用 $1.3\mu\text{m}$ 的单模光纤,它的损耗和色散均比多模光纤低得多,并且可调谐单纵模激光器也被研制出来,在 80 年代中期实现了长中继距离、Gb/s 码率的光纤通信.第 4 代光纤通信利用的传输介质是 $1.55\mu\text{m}$ 的单模光纤,它具有很低的损耗(0.2dB/km),但有较大的色散.相继又研制了色散位移光纤和非零色散位移光纤,1993 年又发明并开发了大有效面积光纤、true wave 光纤,这样使得强度调制/直接探测的光纤通信系统无中继距离达到几十至上百公里,光传输速率达到 40 Gb/s 的实验室研究水平.经人工改性产生了多量子阱激光器及应变量子阱激光器,它们具有更窄的线宽、更高的调制频率和更高的量子效率,是高速光纤通信中的理想光源.另外,器件技术的发展,产生了一些新型的光电子器件,它们推动了光纤通信的新技术研究.如:分路/合路器的应用产生了多路信号复用技术;光调制器、光开关进行光信号的高速调制及光交换;光时延器完成光信号的缓存或编码;光滤波器、光偏振控制开关等实现不同的处理功能,形成了空分、时分、波/频分、码分等光纤通信系统,从而进一步扩大了通信容量和传输距离.目前单路时分复用的数字速率达到了 40 Gb/s,而波分复用/密集波分复用(wavelength division multiplexing/dense wavelength division multiplexing, WDM/DWDM)的速率达到了 Tb/s 数量级.第 5 代光纤通信指超长距离、超大容量的光孤子通信.早在 1988 年人们就涉足光孤子的实验研究.最近十多年来,在孤子传输损耗及其放大、色散补偿等方面也有了长足的进展.正在研究的孤子通信+WDM 将光孤子无畸变、长距离传输及 WDM 的多路信道复用扩大通信容量这两方面的优势结合起来,使之将成为真正有竞争力的第

5 代光纤通信.

1989 年,英国南安普顿大学发明了掺铒光纤放大器(erbium-doped fiber amplifier, EDFA),这是光纤通信发展史上又一个重要的里程碑.它改变了以往光纤通信系统的光-电-光中继方式,而是直接放大光信号,实现全光中继.EDFA 的宽带宽放大特性非常适用于 WDM 系统的多通道同时光中继放大,有利于扩大系统容量.1996 年,EDFA 的使用使得第 4 代光纤通信系统取得了重要进展:单波长码率 5 Gb/s、20 个波长复用、总比特率 100 Gb/s、传输距离 9100 km 的波分复用系统的实验研究获得成功;在长距离的海缆传输系统,利用这种 EDFA 延伸了传输距离,降低了建设成本,1997 年环绕地球的 27300 km(包括横跨海底)的光纤通信网将亚洲、欧洲一些国家连接起来了;EDFA 在长距离的光孤子通信中用来补偿线路损耗,它还将在光纤到楼、光纤到路边、光纤到户(fiber to the home, FTTH)中发挥作用.因此,EDFA 推动了光纤通信的多方面发展,它引起了光纤通信革命性的变革.

以上我们回顾了光纤、激光器、EDFA 等光电子器件对光纤通信发展所产生的影响,可以说没有光纤作为实用的传输介质,就没有光通信转向光纤通信的发展阶段;没有激光器、光纤和相关的光电子器件及技术的更新换代,就没有宽带宽、大容量、长距离光纤通信系统的产生和发展;EDFA 带来了光纤通信的新面貌,解决了多通道的光中继放大,解决了光孤子的能量损耗等问题,从而支撑着更大容量、更高速率、更长距离的光纤通信.因此,光通信的产生、发展离不开光电子器件,有了光电子、微电子技术和器件的创新,才能有光纤通信的创新发展.

2 光纤通信中的光电器件

一种波分复用+WDM 数字通信系统的基本结构如图 1 所示^[1],它由光信号的发送、传输、中继、接收几部分组成,每部分又由不同的光电子或电子器件构成,它们分别完成不同的功能.其中电发射端机将话音、图像等模拟信号转换成数字信号,并进行信号取样、量化,完成脉码调制(pulse-code modulation, PCM).光发射端机包括线路编码器、光源及其调制电路和控制电路.由各发射端机发出的不同信号 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 经耦合器耦合到同一根光纤中传输.通常在光纤主干网中采用 G652 单模光纤,为解决色散补偿问题制造并应用了 G655 光纤.EDFA 光中继器

(图中仅画出一个作为代表)完成所有信号的中断、放大.耦合器将来自主干网光纤的合波信号分别送到光波分解复用器中,然后经解复用送至各光接收端机中.光接收端机由光电探测器(photo detection, PD)、前置放大器、主放大器、自动增益控制(automatic gain control, AGC)电路、均衡滤波器、时钟恢复电路、判决器、译码器等组成,并完成光电变换、放大、均衡、再生等功能.PD(PIN或APD)实现信号的光-电转换,选择不同的结构和偏置电路可形成不同的前置放大器.AGC对主放信号(或对PD的雪崩增益)进行控制,通过均衡滤波处理,使信号在判决时不出现码间干扰.判决器和时钟恢复电路共同完成信号再生.

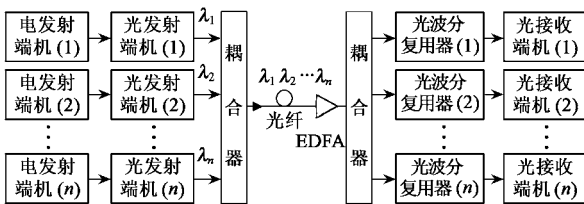


图1 波分复用+EDFA数字通信系统方框图

在这种光纤通信系统中,激光器、光放大器及光探测器属于有源器件;而耦合器、波分复用器以及未画出的光连接器、调制器、滤波器、波长转换器、隔离器、环形器、色散补偿器等属于无源器件,这两类器件是构成光纤通信系统的基础.其中无源器件涉及的技术和制造方法较多,且应用广泛,它们在光纤通信中的地位越来越重要.例如波分复用器因不同的机制和制造技术而产生了光栅型、介质膜滤波型、阵列波导光栅型等结构,不同的结构导致其性能指标(如插入损耗、隔离度等)有所差异.不断地改进、提高器件的性能指标带来了光纤通信的不断进步,需要有更加先进、新型的有源、无源光器件和光子器件来开创未来光纤通信的新局面.

3 21世纪全光通信网(AON)中的几种关键器件^[3-5]

全球电信业务量的飞速增长促使着光纤通信容量和速率大幅度提高,然而传统通信器件的“电子瓶颈”影响了通信容量和速率的提高.为解决这个问题,人们开始研究“全光网”(all optical network, AON)让信息或数据在光域中从源节点传输到目的节点,避免在所经过的各节点上进行光/电-电/光转换和处理.AON对信号的传输速率、数据格式及调制方式具有透明性,光波长层上的重构性和在网络控制、

管理上的可操作性,从而可以扩展网络结构,进一步提高传输码率等.因此,世界各发达国家在90年代中期就开展了以WDM技术为基础的AON研究,著名的有美国的MONET网、NTON网、WEST网,欧洲的OPEN网、PHOTON网、METON网,法国的Alcatel网,日本的光路网.我国的WDM光通信网研究上已取得了很大的进展,并正在积极建设中国高速信息示范网(CAINONET).因此,WDM AON将成为21世纪通信技术发展的核心.而组成AON的各种新型光电子器件、光子器件及其制造技术尚处于探索、研究、开发之中.下面,我们仅讨论直接影响AON实用化的几种关键器件.

3.1 全波(all wave)光纤^[3]

光纤是光纤通信网中不可缺少的无源器件,它的巨大带宽(25THz)引起人们的极大兴趣,已开发的3个低损耗窗口为波长 $\lambda = 0.85\mu\text{m}$, $1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$,损耗从2.5dB/km降到了0.2dB/km以下,其长波长的损耗特性优于短波长.为了大容量、长距离、高质量地传输信息,不但要求光纤低损耗,还要求它具有低色散.初期人们设计常规单模光纤的零色散位于 $1.31\mu\text{m}$,而在 $1.55\mu\text{m}$ 处有较大的色散($18-20\text{ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$).将零色散点移至 $1.54\mu\text{m}$ 处,产生了色散位移光纤(dispersion shifted fiber, DSF),其色散值在 $1.525-1.565\text{nm}$ 范围为 $-2-3\text{ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$,但是这种光纤和EDFA一起用于WDM系统时,光纤的非线性、四波混频引起信道间相互干扰.光纤色散小但不为零可以克服这个问题,这样又产生了非零色散光纤(non zero dispersion fiber, NZDF).为了适应更长距离、更大容量的WDM系统需要,研制出一种大有效面积(达 $72\mu\text{m}^2$)光纤,它可承受较大的光功率且能有效地克服非线性.但这种光纤的色散斜率较大,经进一步研究,产生了色散平坦(斜率较小)的true wave 光纤,它是目前宽带WDM系统最理想的传输介质.

为了充分利用光纤的带宽潜力,人们利用现代超纯光纤制造技术正在研究光纤低损耗的第四、第五个窗口,即 $\lambda = 1.625\mu\text{m}$ 和 $1.400\mu\text{m}$.将光纤的这几个窗口连成一片,就形成了带宽为 $1.28-1.65\text{nm}$ 的全波光纤,利用它在如此之宽的波长范围内,可获得更大的通信容量.21世纪AON更加宽阔的信息高速公路建设将大量地应用它,所以我们有必要大力开发这种全波光纤.

3.2 光放大器^[4,6]

光放大器包括半导体光放大器(semiconductor

optical amplifier, SOA)、各种掺杂的光纤放大器,如 EDFA、掺镨光纤放大器(praseodymium doped fiber amplifier, PDFA)、氟化物(fluoride)掺铒光纤放大器(F-EDFA)及非线性(受激拉曼和受激布里渊散射等)光纤放大器。

SOA 由于采用了应变量子阱结构,其输出功率、小信号增益、增益的偏振灵敏度、噪声指数等性能均有大幅度的提高,而且通过改变半导体材料(In-GaAsP)的组分,可以在 1300—1600nm 的一个特定波长范围内获得信号增益,这些优点使其适用于光纤接入网 FTTH 等领域中;SOA 的交叉相位调制(cross-phase modulation, XPS)和交叉增益调制(cross-gain modulation, XGM)及其四波混频(four wave mixing, FWM)可实现波长转换,它是 AON 中实现波长路由、波长开关的关键器件;SOA 的 FWM 还适用于超长距离光纤传输系统的色散补偿;利用 SOA 的非线性可实现光的再生、放大和整形,与非线性光纤环镜(nonlinear optical loop mirror, NLOM)结合还可实现光时钟提取、解复用器和光开关等功能;另外 SOA 便于与其他半导体光电子器件集成,构成大容量光器件阵列等。因此,SOA 类似于晶体管在电子系统中的地位,具有多方面、重要的作用,它必将广泛地应用于 AON 之中。

EDFA 作为光功率放大、光中继放大、光前置放大等已经在波/频分长距离光纤通信系统、高速用户网以及海底光缆中发挥着很大作用。它工作在 1550nm 窗口的增益带宽达 30—40nm,可以同时放大多个波长信号,且与信号的比特率无关。这个特性使 EDFA 成为 DWDM 系统的关键器件之一。1997 年,美国 Bell 实验室研制了超带宽 EDFA,其带宽达 84.3nm,它分别在 C 段(中心波长为 1536.6—1560.2nm 段)和 L 段(长波长为 1569.4—1601.4nm 段)容纳 60、40 路光通路,两段共 100 路,从而更大大了 DWDM 的通信容量。AON 必将大量地采用 EDFA,并要求 EDFA 进一步提高增益及平坦性,增加带宽,降低噪声指数等,这些要求正是我们今后研究和开发 EDFA 的努力方向。

另外,PDFA 工作在 1.31 μ m 波段,主要用作泵浦源;掺镨 EDFA 工作在 1550nm 波段,它可加大增益带宽、提高增益平坦度;掺铒 EDFA 工作在 792nm 波长,主要用于高功率激光泵浦源,可提供大功率输出及很好的增益平坦度;氟化物 EDFA 具有极好的增益平坦度,等等。这些光纤放大器的特性对 AON 极具吸引力,也是值得我们进一步研究和开发的。

3.3 OADM/OXC^[3,7,8]

在波分复用 AON 中,为了将若干路信息从全光网中取下或加上,研制了一种光插/分复用器(optical add/drop multiplexer, OADM),它无须进行光/电/光转换就能实现上下路信息的功能,因此它也是 AON 中的关键器件之一。现已研究的 OADM 结构有:分波器+光开关阵列+合波器,光耦合器+滤波器阵列+合波器,光开关+波导光栅路由器+光开关,以及偏振分束器+声光调谐滤波器+偏振分束器等。为完成网络中信道之间的交换与连结,还形成了另一种核心器件——交叉连结器(optical cross-connection, OXC),它是在光域中对 WDM 信号进行处理,也无须进行光/电/光转换,具有信道交换、波长转换、虚波长路由、功率均衡等功能。目前已研究的 OXC 结构有两类:一类基于空间交换(光开关矩阵+波分复用/解复用器或波长变换器,空间光开关矩阵+可调谐滤波器,分送耦合器或平行波长开关+波长变换器);另一类基于波长交换(阵列波导光栅复用器+波长变换器,可调谐滤波器+波长变换器)。

在 OADM 及 OXC 中,还包括 MZI(Mach-Zehnder 干涉)和 MMI(多介质膜干涉)分光器、光栅耦合器、光环形器等新型光器件,OADM、OXC 在很大程度上依赖于新型光器件的成功研究和开发。衡量 OADM 的主要参数有插入损耗、隔离度、上/下路时延,它的良好性能及上/下路的灵活性使其在 AON 中将有着更大的应用范围。而 OXC 的主要性能包括节点容量、阻塞性、链路模块性、波长模块性、广播发送能力等方面,它可实现网络的动态重构、自愈恢复及扩展、升级,有利于 AON 的业务量升级、高度灵活性和生存性。所以我们需要花大力气发展 OADM 和 OXC。

3.4 OEIC/PIC^[4,8]

光电子集成电路(optoelectronic integrated circuit, OEIC)是利用光电子、微电子技术将光电子和电子元件单片集成在同一衬底上的集成回路,光子回路(photronics integrated circuit, PIC)是利用量子阱技术开发的光子集成回路。它们具有体积小、功率小、信息容量大、速度快、可靠性高等优点,而且不像分立元件那样还需要焊接、引线、对准、组装等复杂的过程,所以它们一直是光纤通信领域中的研究热点。已经研制了长、短波长的 OEIC 光收/发机和 PIC 发射机。目前 OEIC 发射机的速率达到 10Gb/s,接收机的响应速率达到 40Gb/s,它们的宽带达到 30—40GHz。21 世纪,AON 通信将得到超高速、宽带宽、超大容量

的发展,必然要求 OEIC/PIC 更加高速、多功能和高集成化。今后的 OEIC 发射机不但包括激光光源及其驱动电路,还要有集成光调制器、光波分/复用器等。具有低阈值和量子增益结构的 DFB、DBR 激光器及量子阱 LD 是光发射机的理想光源,低电流的垂直腔面发射激光器(vertical cavity surface emitting laser, VCSFL)可提供超高速、大增益、高量子效率,并具有低互阻、高跨导和低噪声的异质结双极型晶体管(hetero bipolar transistor, HBT)和高电子迁移率晶体管(high electronic move transistor, HEMT)替代目前的各种场效应管(field effect transistor, FET),将使 OEIC 光发射的性能得到极大提高。OEIC 接收机同样地从集成光电探测器和晶体管放大器电路扩展到集成光波导、光开关、光分路/合路器、耦合器等。金属-半导体-金属光电探测器(metal-semiconductor-metal-photo-detection, MSM-PD)具有超高速、高响应度、低暗电流、易于与光纤或波导对准耦合等特点,它用于 OEIC 接收机可进一步提高性能。OEIC 及 PIC 的性能在很大程度上取决于所用的材料及制作工艺技术。GaAs、InP 及 Si 材料具有很好的光电特性,利用 III-V 族材料、硅材料和先进的晶体生长技术,亚微米级微加工技术将制作出集多种功能于一

身的、性能优异的 OEIC 和 PIC,它们将对 AON 的应用和发展产生深远的影响。

参 考 文 献

- [1] 顾晓仪,李国瑞.光纤通信系统.北京:人民邮电出版社,1999.11[Gu W Y, Li G R. Optical Communication System. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 1999.11(in Chinese)]
- [2] 原荣.光纤通信网络.北京:电子工业出版社,1999.2[Yuan R. Fiber Communication Network. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1999.2(in Chinese)]
- [3] 张煦.光通信技术,1999,23(4):233[Zhang X. Optical Communication Technology, 1999, 23(4):233(in Chinese)]
- [4] 韦乐平.光通信研究,2000,99(3):1[Wei L P. Study on Optical Communications, 2000, 99(3):1(in Chinese)]
- [5] 何力.光电子简报,2000,79:4[He L. Photoelectron Briefing, 2000, 79(4):4(in Chinese)]
- [6] 李永武.现代有线传输,2000,3:20[Li Y W. Modern Wired Transmission, 2000, 3:20(in Chinese)]
- [7] 林学煌等.光无源器件.北京:人民邮电出版社,1998.1[Lin X H et al. Optical Passive Devices. People's Posts and Telecommunications Publishing House, 1998.1(in Chinese)]
- [8] 何兴仁.光电子简报,1999,76:16[He X R. Photoelectron Briefing, 1999, 76:16(in Chinese)]

(上接第 500 页)

步辐射光亮度大于 10^{19} 光子/s,同时采用荧光探测器,已能够探测表面 0.1 个分子单层和百万分之几浓度样品的 XAFS 谱并给出高信噪比的 XAFS 信号^[5,6]。在快速采集数据方面,Gauthier 等人在 ESRF 的 ID26 光束线上的 XAFS 站实现微秒(甚至纳秒)量级采集一个 XAFS 谱^[7]。在微区探测方面,Scholl 等在 ALS 的 PEEEM2 首次观察到规整排布的反铁磁 LaFeO₃ 薄膜中磁性微区结构(微区尺寸 < 50 nm)^[8]。

目前,美国、日本、法国和德国仍然占据国际 XAFS 领域的主导地位,他们分别拥有高储存环能量和高亮度的第三代同步辐射加速器 Advanced Photon Source、Spring-8 和 Europe Synchrotron Radiation Facility。我们国家也很重视同步辐射技术的应用和发展,从 80 年代中期开始投入许多的经费建设北京和合肥两个同步辐射装置,90 年代 XAFS 实验站建成投入使用。为满足国内用户对高质量光源的需要,在上海将建设第三代同步辐射装置,让我国的 XAFS 领域的研究水平早日跟上国际步伐,在 XAFS 领域的国际舞台上占有一席之地,仍需要国家投入更大的

经费支持并让更多的国内专家投入到 XAFS 研究领域之中。

参 考 文 献

- [1] Proceeding Abstracts of the 11th International Conference on X-ray Absorption Fine Structure. Aiko, Japan, July, 2000
- [2] Hasnain S S, Helliwell J R, Kamitsubo H eds. Journal of Synchrotron Radiation. 1999, 6:121
- [3] Goulon J, Goulorr Ginet C, Brookes N B eds. J. de Physique IV. 1997, 7: colloque C2
- [4] Rehr J J, Albers R C. Rev. Mod. Phys., 2000, 72(3):621
- [5] Oyanagi H, Ishii M, Lee C et al. J. Synchrotron Rad., 1999, 6(1):155
- [6] Wei S Q, Oyanagi H, Sakamoto K et al. Phys. Rev. B, 2000, 62(3):1883; J. Appl. Phys., 1997, 82(10):4810
- [7] Gauthier C, Sole V A, Signorato R et al. J. Synchrotron Rad., 1999, 6(1):164
- [8] Scholl A, Stöhr J, Lüning J et al. Science, 2000, 287(11):1014 (中国科学技术大学同步辐射实验室 韦世强 王晓光 李忠瑞 徐法强; 河海大学数理系 殷士龙; 中国科学院高能物理研究所 吴自玉)