

第一讲 光电子器件在光纤通信中的应用*

黄 翊 东[†]

(清华大学电子工程系 北京 100084)

摘 要 光纤通信技术发展的阶段性飞跃总是伴随新型光电材料和功能器件的突破. 文章介绍了光纤通信系统中应用到的各种光电子器件, 从光纤通信的 3 个环节: 光发送、光接受、光放大为出发点, 着重阐述了半导体激光器、光调制器、光检测器、光放大器等关键器件的基本原理、工作特性以及发展现状和趋势, 并在回顾传统集成光电子器件发展的同时, 展望了以新一代微纳结构光电子器件为基础的光子集成技术的发展趋势.

关键词 光纤通信, 光电子器件, 半导体, 有源器件

Optoelectronic devices in optical fiber communications

HUANG Yi-Dong[†]

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Optoelectronic devices used in optical fiber communications are reviewed. The basic concepts, performance, and research progress of various key devices used in optical transponders, detectors and repeaters, such as laser diodes, optical modulators, photodiodes, and optical amplifiers, are described. An introduction to conventional integrated devices, as well as the new generation integrated technology based on nano-structure optoelectronics, is also given.

Keywords optical fiber communications, optoelectronic devices, semiconductor, active devices

1 引言

用光来传递信息是一种古老的通信方式, 中国古代烽火台的狼烟就是代表性的一例. 现代的光通信是在光的传媒——光导纤维——出现之后发展起来的, 并且在过去的 20 年中以惊人的速度发展, 使得当今所有的通信技术领域都受到了它的冲击. 在信息量爆炸性增长的今天, 光纤通信无可争议地成为信息传递的主力. 以光纤通信为代表的传输网构架了现代通信最重要的基础网络, 成为近年来通信界发展最快、技术最为成熟和完善的亮点.

最早的商用光纤系统于 1977 年开通在美国芝加哥和 Santa Monica 之间. 我国自 20 世纪 90 年代

中叶开始引入光纤通信的产品以来, 10 年间已建成近 230 万公里的光缆传输网, 其中长途光缆线路近 50 万公里. 光纤通信除了中继距离长、抗电磁干扰、保密性好、成本低等优点外, 它在通信容量上的巨大潜力是任何一种以往的通信手段所不能比拟的. 我们知道, 人们一直是通过提高载频来扩大通信容量的, 光频要比无线通信使用的频率高得多, 所以通信容量也相应地大得多. 近年来的两大技术进步——波分复用^[1] (wavelength - division multiplexing, WDM) 和掺铒光纤放大器^[2] (erbium - doped optical - fiber amplifier, EDFA) ——使现有的光纤通信系统的传输能力得到巨大提高. 目前每对光纤可传送

* 2004 - 11 - 04 收到初稿, 2005 - 04 - 05 修回

[†] 通讯联系人, Email: yidonghuang@tsinghua.edu.cn

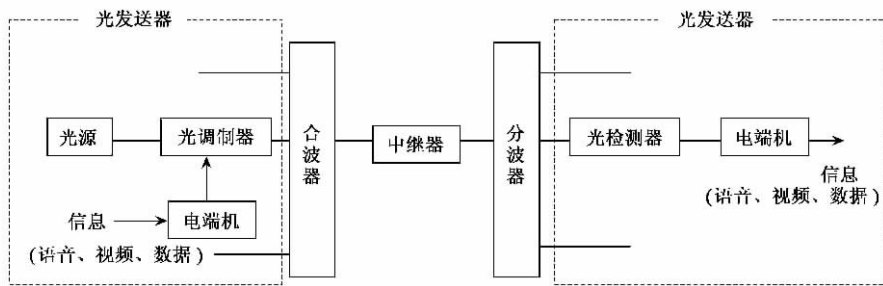


图1 光纤通信系统示意图

几万路信号(数 Gb/s 的量级),而这还远远没有达到其传送容量的极限. 光纤通信为人类社会提供了前所未有的大容量的廉价通信平台,被称为是从电子通信到光子通信的一次飞跃.

进入 21 世纪的人类迈向信息化的时代,以海量信息的高速传输为基础的国际范围信息化是实现知识和经济全球化的必要条件,这为光纤通信的应用提供了广阔的发展空间. 同时,光纤通信技术与计算机技术的结合,使传统的以及现代的各种通信技术得以综合利用,传统的光纤通信技术正在以网络的形态登上新的历史舞台.

光纤通信系统主要是由光发送、光传输和光接收三部分组成(图 1). 光发送器中有光源、驱动器和调制器,它的功能是将要传输的语音、视频、数据等信号通过电端机加到光源(或调制器)上产生调制的光信号,并将其耦合到光纤中去;光传输部分主要由光纤(光缆)和中继器组成,在短距离通信系统中,一般不需要中继器;由光纤传送来的光波信号入射到光接收部分,那里的光检测器将光信号接收、解调成电信号,然后进行电放大处理,还原成原来的信息. 通过适当的接口设备,这样一个光传输单元可以和现有的数字或模拟通信系统、有线或无线通信系统互连.

我们看到,一个完整的光纤通信系统除了它的传输主体—光纤—之外,还必须有各种光学元件和光电子器件的支持. 正是这些功能与技术不同的元器件的研制成功使得光纤通信系统发展到了今天的形态. 光纤通信系统中的元器件大体可分为无源和有源两大类,光耦合器、光滤波器、光开关、光衰减器、光环形器和光隔离器等属于无源元器件,而光源、放大器、光检测器等属于有源器件. 有源器件的工作原理都是基于光与电的相互作用,它们是光电子器件的主体. 本文将着重介绍光纤通信系统的几种主要的光电子器件.

2 半导体激光器

发送器的核心是光源,光源的主要功能就是将一个电信号转换为光信号. 今天的光纤通信系统中选用的是微型的半导体光源—半导体激光器^[3](即激光二极管, laser diode, LD)和发光二极管(LED). 这不仅是因为它们的体积都很小(典型尺寸 250—500 μm 长、100—300 μm 宽、100 μm 高),更重要的是它们可以通过载流子注入,即注入电流来控制输出功率,从而可以直接进行强度调制,而且它们的输出波长正好与光纤的低损耗窗口一致,采用 GaAlAs 和 GaAs 材料构成异质结,发光波长为 0.85 μm ,采用 InGaAsP 和 InP 材料的异质结 LD 的发光波长为 1.3—1.55 μm ,近年来,InGaAlAs^[4]和 InGaAsN^[5]等材料也成为这一波长段的新成员.

LED 已经有 30 年以上的发展历史了. 虽然它们的输出功率远远小于 LD,但是在价格上的优势使得它们在短距离的局域网中占有一席之地. LD 是 20 世纪 70 年代发展起来的,它以其输出功率大、定向性好、光谱宽度窄以及相干性好等特点成为长距离光纤系统的最佳光源.

LD 的基本结构如图 2 所示,目前主要采用双异质结结构^[6](图 3),即有源层两侧的包层是宽带隙材料,同时又是低折射率材料,它不仅能够将注入有源区的载流子限制在一条形窄带内,有利于产生高的增益,还形成光波导,将大部分的光场限制在有源区内. 正是这种结构对载流子和光场的双重限制作用,有效地降低了激光器的阈值,使得 LD 的室温激射得以实现^[7].

LD 是靠 pn 结正向注入载流子的复合发光,但要发射激光,和其他的激光器一样还需要有合适的光学谐振腔起反馈作用. LD 的光学谐振腔通常是由 pn 结平面相垂直的自然解理面构成. 比如,有源

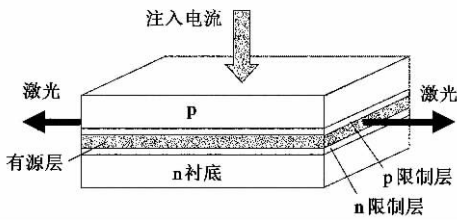


图2 半导体激光器(LD)

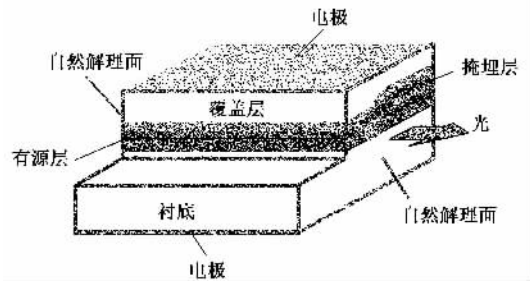


图4 掩埋条形半导体激光器剖面图

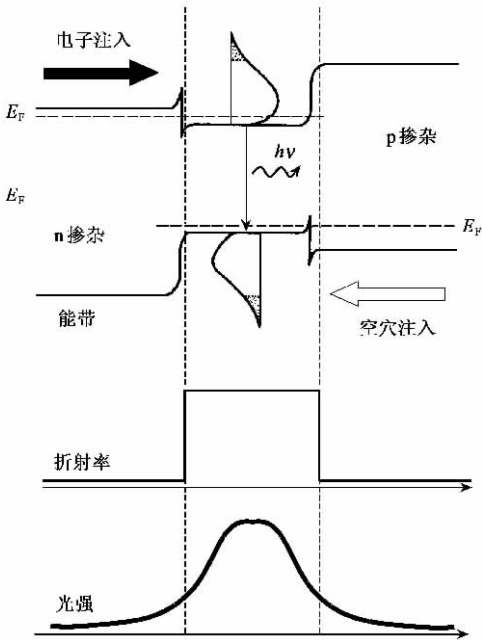


图3 双异质结结构对载流子和光场的双重限制作用

区的材料 GaAs 的折射率大约为 3.6 ,从有源区出射到空气中的光将有 30% 以上会被反射回来 ,构成一个理想的法布里 - 帕罗(Fabry - Perot ,F - P)平面腔。

为了对载流子实现侧向限制 ,目前一般多采用掩埋异质结^[8] (buried heterostructure ,BH) 。这种结构是通过刻蚀工艺将有源区刻蚀形成宽度仅为 1—2 μm 的细条 ,然后在有源区的两侧生长异质结构从而实现侧向限制(图 4) 。BH 结构 LD 具有输出功率稳定、线性好、阈值低等一系列的优点 ,在光纤通信中占有重要的地位。

为了满足不断发展的光纤通信系统的需求 ,LD 的特性也在逐步提高。下面介绍它几个重要的发展阶段。

2.1 量子阱半导体激光器

量子阱结构 LD^[9] 的有源区是由厚度为几个纳米的窄带隙材料(势阱区)和宽带隙材料(势垒区)

交替构成(图 5) 20 世纪 80 年代发展起来的分子束外延(MBE)、金属有机化学气相沉积(MOCVD) 等新型晶体外延生长新工艺能够精确控制晶体生长厚度达到原子层的精度^[10,11]。势阱中的电子和空穴沿垂直阱壁方向的运动呈现量子化,电子的状态密度也变为类阶梯状。这时只需要很小的注入电流就可以达到粒子数反转。在此基础上发展起来的应变量子阱结构是通过在势阱和势垒的材料生长中引入微量的晶格失配量而产生的应力,进一步改善了量子阱中的电子状态密度。今天,量子阱结构,特别是应变量子阱结构,已被广泛应用于各种有源半导体器件中。这种人为改变电子的运动状态(即能带结构)以获得所需器件性能的做法被称为是“能带工程”^[12]。

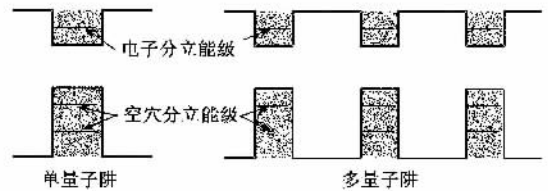


图5 量子阱能带结构

引入量子阱或应变量子阱结构有源区,可以大幅度全面提高半导体激光器的性能^[13-17],比如降低阈值电流、提高微分增益以及高速调制特性、改善器件的温度特性等,量子阱结构成为应用于长距离大容量光纤通信系统中的光源的首选有源区结构。

2.2 分布反馈式半导体激光器

随着光纤通信的发展,特别是 WDM 技术的出现,对作为光源的 LD 提出了新的挑战。WDM 技术是在一根光纤上同时传输多个波长,为了增加传输信道,各路波长之间的间隔非常小,密集 WDM 的波长间隔通常在 200GHz(1.6nm)以下。为了防止各个波长信号彼此之间的串扰,要求每个波长必须拥有

非常窄的光谱线宽. 这不仅要求光源的光谱线宽要窄, 而且, 要在 Gb/s 的调制速率下保证单模工作的稳定性, 即所谓的动态单模工作. 普通结构的 F-P 腔 LD 在电信号调制下容易光谱展宽, 变成多纵模输出, 已经不能满足 WDM 系统的要求, 分布反馈式 (distributed-feedback, DFB) LD 则应运而生^[18, 19].

DFB-LD [图 6(a)] 是由腔内沿纵向等间隔分布的布拉格光栅来实现光反馈. 当有源区注入电流辐射发光时, 光波受到有源层近旁光栅的反射, 满足布拉格反射条件的特定模式(波长)的光会受到强烈的反射, 致使这个模式的谐振腔损耗明显降低, 比其他模式更容易激射^[20]. 正是由于这种布拉格光栅的选模作用, 使可能激射的各个模式的阈值差别很大, 使得 LD 在高速调制的状态下仍能保持很好的动态单纵模特性. 在光栅的中央引入 $1/4$ 波长相移^[21]或在共振腔的轴向形成增益的周期性分布(增益耦合)^[22], 能够进一步提高 DFB-LD 的单纵模稳定性. 与 F-P 腔激光器相比, DFB-LD 波长稳定性好, 光谱线宽窄, 是波分复用光网络的最好光源.

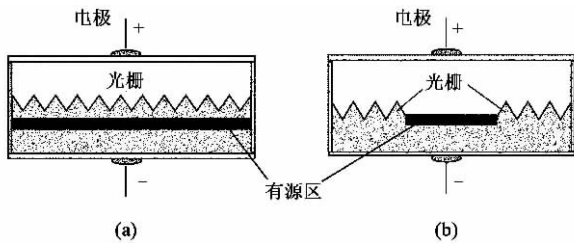


图 6 (a) 分布反馈式 (DFB) 半导体激光器; (b) 分布布拉格反射 (DBR) 半导体激光器

另一种类似结构的 LD 是布拉格分布反射式 (distributed Bragg reflector, DBR) LD, 如图 6(b) 所示, 与 DFB-LD 的不同, 它的光栅区是在有源区的两侧(或一侧). 由于这种结构的光栅和有源区是分开的, 可以减小在制作时因晶格损伤而引起的腔内损耗, 但是, 需要解决好有源区于光栅区的接续工艺. DBR-LD 的基本特性与 DFB-LD 相似, 但是, 动态单模稳定性略逊于 DFB-LD. 目前, DFB-LD 还是 WDM 光源的主流, DBR 结构则在波长可调谐半导体激光器中有应用的前景^[23].

2.3 垂直腔面发射半导体激光器

图 2、图 3 和图 6 所示的 LD 结构是用衬底晶体的解理面作为腔端面的边发射型 LD. 还有一种形式的 LD, 光是从表面发射出来的, 称为垂直腔面发射激光器^[24] (vertical cavity surface emitting laser, VC-

SEL, 图 7). 它的基本结构是由中心的有源区和上下反射器构成的. 反射器有两种, 一种是介质膜反射器, 另一种是分布布拉格反射器, 后者是通过结晶生长的方法, 在半导体表面直接生长折射率交替变化的多层电介层形成布拉格反射^[25].

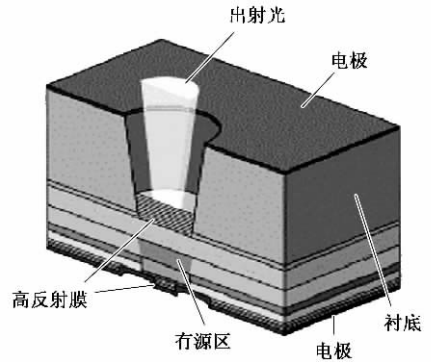


图 7 垂直腔面发射 LD (VCSEL)

VCSEL 独特的特点是光放大的长度即腔长相当短(100nm 数量级), 而一般边发射的激光器腔长为 $300\mu\text{m}$ 数量级. 谐振腔的模式间隔是和腔长成反比的, 100nm 数量级的腔长使得有源区的增益谱范围内只能有一个纵模, 最终容易形成稳定单模的振荡. 但是, 由于很短的腔长限制了可获得的增益, 必须加大上下反射器的反射率才能使其激射, 这样, 光很不容易从腔内射出. 所以, VCSEL 的输出光功率一般都很小.

VCSEL 的主要优点是制造、测试、封装简单, 因而价格低廉; 与光纤耦合既方便又高效, 由于它的输出功率和调制速率比 LED 要高, 所以, 输出波长在 780—980nm 的 VCSEL 已在高速光纤数据传送中获得了商业应用并取代了 LED. 另外, VCSEL 得天独厚的表面出射的结构特点使得它在未来采用二维阵列的平行光技术中显示了诱人的应用前景.

3 调制器

信息从电信号加载到光波上要经过调制过程. 调制的方式有两种, 一种称为直接调制, 即将调制信号直接加到 LD 的驱动电流上, 使得 LD 的输出光功率随着调制信号变化. 这种调制方式简单灵活, 器件的体积小、成本低, 是城域网和接入网光源的最佳选择^[26]. 直接调制的速率受到激光器本身响应速度的限制, 目前 LD 的调制极限是 10GHz^[27]. 另外, 由于直接调制会产生较大的波长啁啾, 所以, 不适合用在

长距离的干线网上。

另一种调制方式是间接调制,或称为外部调制。即调制电信号不作用于光源本身,另外有调制器对光源输出的光波进行调制。间接调制的方式有许多种,如电光调制,声光调制和磁光调制等,其中电光调制技术比较成熟。间接调制的优点是调制速度快,调制对光源本身的工作不产生影响,所以啁啾小。但器件较为复杂、成本高,仅在要求很高调制特性的情况下使用,例如,大容量、长距离的光纤干线系统等。下面介绍两种最常用的电光调制器。

3.1 Mach-Zehnder 外部调制器

Mach-Zehnder(M-Z)外部调制器的材料一般选用铌酸锂化合物(LiNbO_3),也有采用半导体材料的^[28]。其工作原理如图8所示。当光信号从A端输入后,由Y分歧波导一分为二,导入B段和C段。在没有外加电压时,B段和C段的入射光波的相位不发生变化,在D段叠加后还原为最初的波形。如有外加电压,铌酸锂材料的折射率在外加电压下会发生变化,调整电压使得B段和C段的光波反相,这两部分的光叠加后相互抵消。于是,通过变化外加电压控制输出端的光输出,实现光强度的调制。这种结构的调制器响应速度快,目前40Gb/s的器件已经发展到了实用化的阶段。缺点是驱动电压高(约5V)、体积大(>10cm)、插入损耗高等,另外,它难于和LD光源集成。

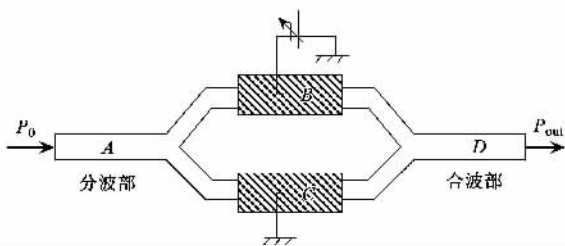


图8 Mach-Zehnder 外部调制器

3.2 电吸收外部调制器

即能保持直接调制的优点又没有啁啾的理想调制方式是将外部调制器与半导体激光器集成到一个芯片上。电吸收外部调制器^[29](electroabsorption, EA)的出现实现了这一理想的调制方式。

EA调制器的结构是以截止波长小于入射光波长的半导体材料形成的波导,它对入射光是透明的。在外加调制电压时,由于Franz-Keldysh^[30]效应,波

导材料的带隙变窄,导致截止波长红移,波导材料对入射光信号产生吸收。于是,调制电压通过控制波导的吸收特性实现了对光波强度的调制。EA调制器所需的调制电压比 LiNbO_3 的M-Z调制器要低得多,一般只要2V,它的最大优点是很容易与LD光源的半导体激光器集成^[31](图9),实际上速率2.5Gb/s的EA集成DFB光源已经有了成熟的产品,10Gb/s的产品也正在推向市场。虽然目前EA调制器达到的调制速率还不是很,但在集成能力上的优势,使它成为最有前途的调制器,在WDM系统的应用中显示了巨大的发展潜力。

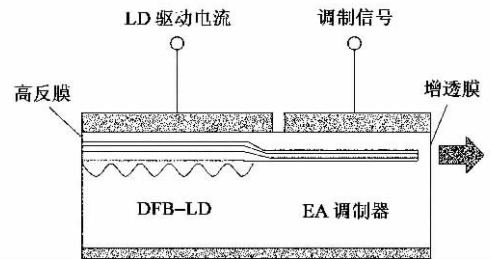


图9 EA调制器集成DFB-LD

4 光检测器

从图1中可以看到,信号是以电的形式到达和离开光纤传输系统的。传到接收端的光信号由接收器将其转换为电信号。接收器由光检测器和电子元件构成,光检测器又称为光探测器或光检波器,有不同的种类。基于PN结构的光电二极管(photodiode, PD)——因为它们体积小,而且对光纤的三个低损耗窗口有很好的响应——成为光纤通信系统中的首选。正如LD是发送器的核心部件一样,PD则是接收器的核心。

PD与LD的功能正好相反,它的主要功能就是把光信息信号转换回电信号(光电流)。PD可以看成是一种光伏型器件,能量大于某种材料禁带宽度的光子被该材料吸收后,激发产生电子-空穴,依靠内部的电场把电子-空穴对分开,获得光电流,即实现光信号向电信号的转换。

pin结构是光电二极管中最常用的结构之一^[32],它是在构成pn结的p型和n型半导体之间夹有一层有相当厚度的高电阻率的本征半导体(i层),故称作p-i-n结构。典型的结构见图10。pin结构的主要特点是它的本征层就是吸收光子的耗尽区,由于本征层设置得比较厚,大多数的入射光

子都进入该层,并产生电子-空穴对,使得量子效率得到大幅度提高. pin 具有制作简单、可靠性高、噪声低、电压低、以及带宽相对较高的特点,被广泛使用在光纤通信系统中. 提高 pin 的响应速度是目前的研究热点,有报道采用 UTC-PD^[33](uni-traveling-carrier PD)结构实现了相当于 220GHz 带宽的脉冲响应.

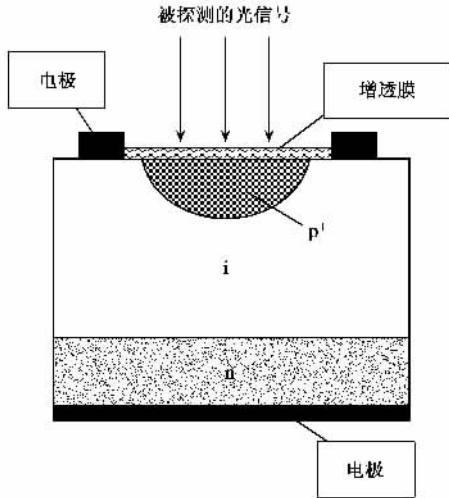


图 10 pin 光电二极管

为了提高 PD 的灵敏度,人们发明了雪崩光电二极管^[34](avalanche photodiode, APD). 如图 11 所示,APD 在 i 区和 n⁺ 区之间加了一层 p 区,在相对较高的反向电压的作用下,耗尽区的碰撞电离增强,同时在 n⁺p 结区附近形成很强的电场. 由于碰撞电离产生的电子和空穴由此获得足够的动能量再去离化其他的载流子,于是,一个光子最终产生了许多载流子,光电流就会急剧增加^[35]. 载流子的这种增加过程具有雪崩的特征,故形象地称之为雪崩光电二极管. 从 APD 的工作机理可以看出,它的量子效率是 pin 的 M 倍, M 称为倍增系数或增益系数,典型值的范围在 10 和 500 之间. 虽然 APD 的灵敏度比 pin 要高 M 倍,但是它需要相对更高的反向电压,并且雪崩倍增过程使得输出电流中的噪声加大. 可以说, APD 和 pin 各有利弊,应该根据不同光纤通信系统的具体要求,选择进行使用. 同 pin 一样,高速 APD 也是研究的热点^[36],目前已有报道研究出了 GB 积 (gain bandwidth product) 在 200GHz 以上 APD^[37].

5 光放大器

光信号在光纤中传输时是会衰减的,即使在光

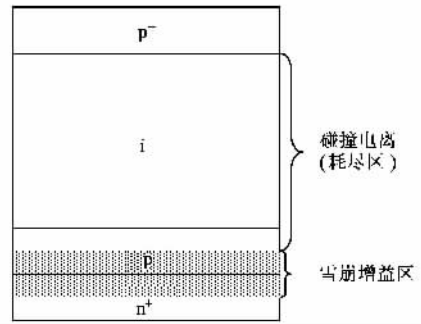


图 11 雪崩二极管的结构

纤的几个低损耗窗口,因此,长距离传输离不开光中继器. 传统的光电中继器是先将接收到的微弱光信号通过 PIN 或 APD 转换成电流信号,经过放大处理后,再驱动 LD 产生光信号,重新发送到下段光纤通信系统中去. 随着光纤通信的发展,特别是波分复用技术的出现,这种光-电-光的传统放大方式已经远远不能满足系统的要求.

补偿光纤损耗的最有效方法是用光放大器直接对光信号进行光-光放大,除去将一个光信号转换到电信号再转回光信号这一繁琐的过程. 光放大器只是简单地增强光信号,它可以在相当大的范围内对不同波长、不同调制速率和格式的光信号进行放大. 光放大器的出现对光纤通信技术的发展产生了深远的影响.

放大器按其功能分为后置放大器,在线放大器,前置放大器三种. 后置放大器也称为增强放大器,是用来放来自发送器的光信号,提高传输前光信号的功率使其传送距离加大;在线放大器是在光纤传输线路中间补偿光信号的衰减;前置放大器则在接收器前对传输后的光信号进行放大. 不同的功能对光放大器特性的要求是不同的. 后置放大器要求产生最大的输出功率,前置放大器则要求高增益、良好的灵敏度和低噪声,而在线放大器希望的是在整个 WDM 波段上的稳定性、增益特性的相似性等等. 下面介绍一下目前的两种放大器:半导体光放大器和掺铒光纤放大器.

5.1 半导体光放大器

半导体光放大器^[38]有 F-P 谐振放大器和行波放大器两种基本类型,光纤通信领域多用到的是行波放大器(traveling wave laser amplifier, TWLA). 图 2 所示的半导体激光器的两个解理面上镀上增透膜就制成了 TWLA. 由于增透膜抑制了光在端面的反

馈,即使在很大的注入电流下也不会发生激射,而增益则在未饱和的范围内随着注入电流的增加而增加.当弱的光信号输入到 TWLA 之后将被放大,放大光信号的强度随着在 TWLA 中传输的距离呈指数上升关系.由于 TWLA 对增透膜的要求很高,一般需要其反射率小于 0.1%,所以发展起了倾斜条形结构和透明窗区结构来降低端面的光反馈.

SOA 的研究虽然开展了多年,其增益可以做到 30dB,带宽 7.5GHz,而且有 1.3 和 1.55 两个窗口,但它目前仍然没有达到实用的阶段.原因是一些主要问题尚未得到解决,例如增益受偏振态的影响、增益波动与增益饱和引起的串扰、插入损耗大、噪声指数大等等.但是 SOA 具有的结构简单,可批量生产、成本低、寿命长、功耗小等优点,加之便于与其他部件一块集成,使得人们始终没有放弃对它的研究.尤其是近年来 SOA 在波长变换器中^[39]的应用,引起了广泛的重视.

5.2 掺铒光纤放大器

掺铒光纤放大器²⁾(EDFA,图12)是目前唯一已经实用于海底光缆或陆上长距离光通信系统的光放大器.它是由抽运激光、波分复用耦合器、光隔离器和掺铒光纤几部分组成.光纤放大器的工作原理也是受激辐射,是通过光能抽运获得增益.抽运光的波长为 980nm 或 1480nm,抽运功率的典型值为 10—400mW.当抽运激光耦合到掺铒光纤中,它所提供的能量将激发铒离子去较高的能级,信号光入射后则激发受激离子落回到较低能级,并同时发出与信号光同样波长的光子辐射,从而实现信号光的放大.EDFA 具有许多 SOA 所难以比拟的优良特性,例如增益与偏振方向无关、信道串扰低、带宽大、噪声低等.正因为如此,EDFA 成为光通信系统中的最佳放大器,可以说,它的应用引发了光纤通信发展史上的一场革命,使得 WDM 光纤通信系统成为现实.

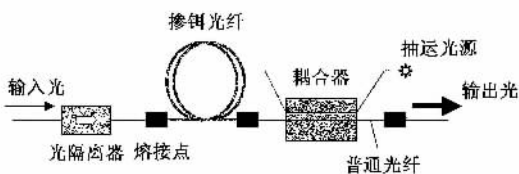


图 12 掺铒光纤放大器基本结构

除了 SOA 和 EDFA 以外,还有利用非线性效应的光放大器的研究也取得了很好得结果.其中,使用

拉曼效应和布里渊效应的两种光纤放大器^[41]已经接近实用.这种类型的放大器最大的特点是放大波长窗口灵活,不依赖于光纤的材料,同一段光纤,可以同时既做传输介质又做放大介质,这样,就有可能实现“遥泵”,即从远处的中心站馈送抽运能量并且控制放大的过程.

6 集成光电子器件

随着社会向高度信息化发展,光信息技术的大容量,超高速对光电子器件的高性能,小型化的要求越来越高.走向集成化成为光电子器件发展的必然趋势.集成光路(photonic integrated circuit, PIC)的概念最早是 1969 年由 Miller 提出的^[41],当时是在玻璃等材料的衬底上形成光波导,并集成上光调制器等器件,由于用这种材料很难实现光源及接收器等有源器件,所以,有源器件必须通过外加芯片的方式来连接.完整的 PIC 的概念是指在半导体衬底上形成半导体激光器、放大器、光调制器乃至光接收器等有源器件以及光耦合器、光隔离器、光开关,光滤波器等无源器件,并由光波导相互连接起来的具有综合功能的单芯片光电子器件.如果再把驱动调节的电路部分也集成到芯片上,就达到的光电集成的更高阶段 OEIC.集成器件可以集成多个单体器件的功能,直接具有一个模块甚至子系统的功能,它不仅具有结构紧凑、体积小、可靠性强、功耗低等优点,还有可能提供一些分立器件的组合尚未具有的新的功能.

十多年来,光电子器件的集成化始终是一个研究热点.出于光通信技术中复用技术、光互连、光交换、光神经网络及光计算发展的需要,与 LD 相关的集成技术成为光子集成中最为活跃的领域,例如,LD 与调制器的集成,波长可调谐 LD^[42](图 13),多波长 LD 的单片集成^[43](图 14),LD 与放大器的集成,以及 VCSEL 的二维阵列等,其中,LD 与调制器集成器件的研究最为成熟,已经到了实用化的阶段.图 15 为日本 NEC 公司推出的可工作在 10Gb/s 速率的 EA 集成 DFB 器件的封装模块以及 10Gb/s 速率的工作眼图.

与电子技术相比,光子集成的发展还是很缓慢的,原因是目前还缺乏像硅在电子技术中那样起决定性作用的材料和在其基础上发展起来的大规模集成技术.光子集成的发展期待材料以及工艺上的突破.近年发展起来的纳结构光电子学,在理论上揭示

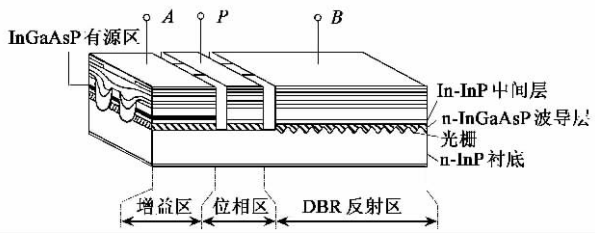


图 13 DBR 结构波长可调谐 LD

进展,展示了诱人的发展前景.

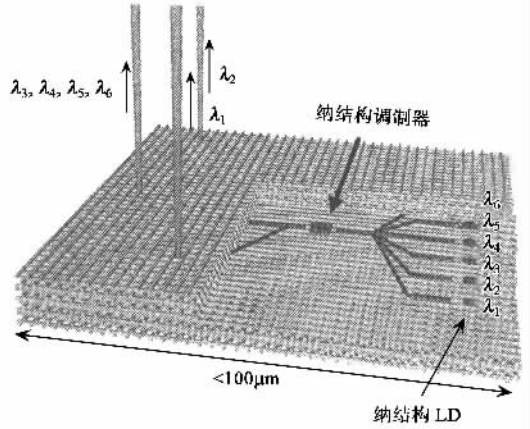


图 16 基于光子晶体的集成器件构想图

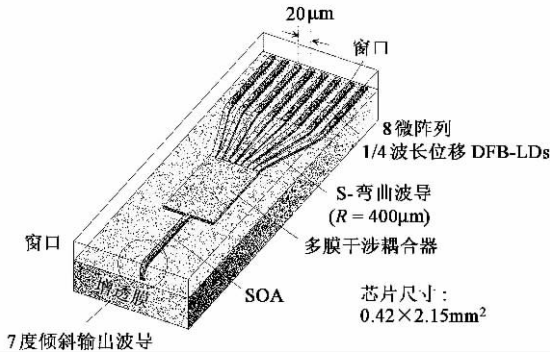


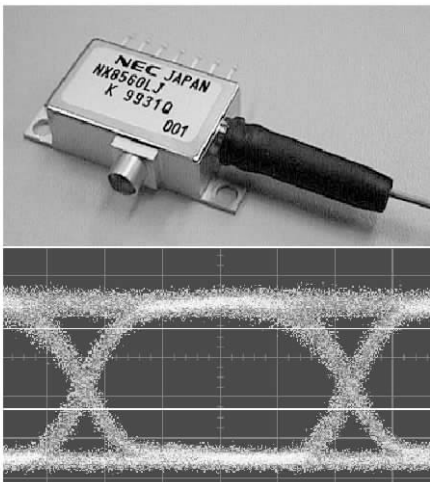
图 14 单片集成的多波长 LD

7 结束语

历史表明,光纤通信技术发展的阶段性飞跃总是伴随新型光电材料和功能器件的突破.20 世纪 60 年代激光的问世导致新交叉学科—光电子学的迅速崛起,70 年代异质结半导体激光器和光导纤维的突破为现代光通信奠定了基石,80 年代量子阱、动态单模 LD 和 90 年代 EDFA 的出现又推动 WDM 光通信技术的迅速发展.今天,对于以微纳结构为代表的新一代光电子器件的探索研究,必将推动未来光纤通信技术新的时代.

参 考 文 献

- [1] 河内正夫编. Technology of high speed optical networks. 日本电气通信协会出版社,2000 (in Japanese)
- [2] 须藤昭一编. Erbium doped fiber amplifiers. OPTRONICS 出版社,1999(in Japanese)
- [3] 江剑平编. 半导体激光器. 北京:电子工业出版社,2000 [Jiang J P ed. Semiconductor Lasers. Beijing: Publishing House of Electronics Industry 2000(in Chinese)]
- [4] Tsuchiya T *et al.* IPRM2000, 2000, 226
- [5] Kondow M *et al.* IEEE Photonic. Tech. Lett., 2000, 12: 777
- [6] Alferov Zh I *et al.* Sov. Phys. Semiconductor, 1970, (3): 1107
- [7] Panish M B *et al.* Appl. Phys. Lett., 1970, 16: 236
- [8] 伊贺健一编. 激光光学的基础. 日本欧慕出版社, 1988
- [9] Henry C H. Quantum Well Lasers. Ed. Zory P S. Zory, Jr. San Diego, Academic Press, 1993
- [10] van der Ziel J P *et al.* Appl. Phys. Lett., 1975, 26: 463
- [11] Holonyak N *et al.* IEEE J. Quantum Electron, 1980, QE - 16: 170
- [12] Adam A R *et al.* Band structure engineering in semiconductor microstructure. Plenum Publishing Co, 1989



光波形(10.66 Gb/s)

图 15 10Gb/s 速率 EA 集成 DFB-LD 的组件

了介观领域一系列新的物理现象和独特光学特性,例如光子晶体^[44, 45]的带隙限制、缺陷模式耦合、微腔效应等特性,不仅可以实现许多传统光电子器件难以实现的功能,还为未来实现微纳尺度超小型化集成,乃至 PIC(图 16)提供了可能.与此同时,随着半导体微纳结构加工工艺的发展,特别是电子束曝光及干法刻蚀技术的进步,小于 100nm 的加工操作已经可以控制^[46],这一切都为我们提供了一个崭新的创造空间,有希望引发光电子集成技术突破性的

