

第五代光纤通讯

E. Desurvire

(美国电话电报公司贝尔实验室)

以铒金属处理过的光纤结合微小的激光晶片,已在光纤网路通讯及资料传递上,造成了革命性的突破。

光纤发明至今已有20年历史了。经过不断改良及研究,科学家发现,若以红外线二极管(diode)激光照射,含铒元素(erbium, Er)的光纤可将光信号放大。若将这类的光纤放大器组合成通讯系统,讯息传递量将增加100倍。换句话说,若光纤的长度为地球圆周的四分之一(约1万公里),数千兆比特的讯息可在不到1秒的时间内全部传递完毕!美国和日本的电话公司计划装设此种缆线横跨太平洋。每一条缆线将可同时传送50万路电话。其传递量将是目前所使用越洋系统的12倍。

使用铒光纤时,不需要使用传统的中继放大器(repeater)。光纤本身的信号放大率及传送速度要比中继器快上好几倍。铒光纤放大器在长途通讯及局部区域网路都很重要。借助高清晰度电视(HDTV)及电视会议(video teleconferencing),光纤网路可将数以万计的讯息传递至各个家庭及公司企业。

第一代到第五代光纤通讯

自从1975年第一代的光纤通讯问世以来,光纤的讯息传递量早已远超过一般所使用的铜线电缆(图1)。第一代及随后的光纤通讯系统通常包括:译码解码器(encoding/decoding device)、发射器、普通的氧化硅光纤、中继器及接收器。译码器首先将讯息转换成电子讯号;发射器接着将电子讯号转换成光讯。早期的发射器是一个发光二极管,其发光范围是在红外线区域,波长为0.87微米(μm);同时它的发光强度随着电子讯号的大小而改变。

一般氧化硅光纤可分为两个部分:核心及保护层(cladding)。光波经由前者通过;后者则引导光波的

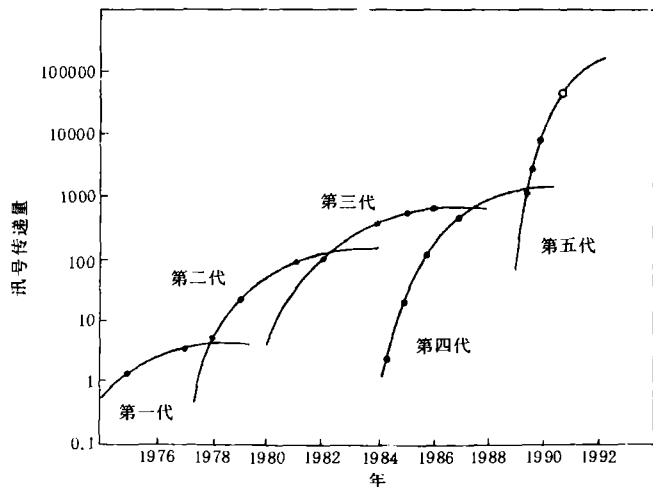


图1 光纤通讯技术经过五代的演变。自1975年以来,光纤讯号传递量大约每年增加10倍。空心点代表实验室结果。

传递。光信号沿着氧化硅光纤核心传递时,其信号宽度变宽且强度减弱。这是因为不同频率的光在核心内传递的速度不一样。光纤内的一些缺陷及杂质也会吸收或散射光信号强度。中继器是用来维持缆线间信号传递的强度。当信号强度减弱时,中继器将信号放大并重新发射。当信号到达接收器时,光信号转换回电子讯号,然后解码器再将电子讯号转换成电话或电脑讯息。

每一代的光纤通讯总是朝着两个方向发展:增加讯息的传递量及传递距离。1978年之前,一条10公里长的光纤,最高传递量为每秒1千兆比特。三年之后,第二代光纤的最高传递量增加了将近10倍。传递量增加的原因有下列两点:第一,使用核心半径较小的单模(single-mode)光纤。光信号可在光纤内以较均匀的速度传递,信号宽度比较一致;第二,新的发射器及接收器所使用的波长为1.3微米,在氧化硅光纤内,1.3微米的光比0.87微米的有较高的穿透率,于是信号衰减的程度降低许多。

第三代光纤于1982年问世。由于新发展的技术可制造更高纯度氧化硅光纤,因此1.2—1.6微米光的穿透率大为提高(最高穿透率位于1.55微米)。再配合上以1.55微米二极管激光为发射光源,光纤的传递量又比第二代多了好几倍。

到了1984年,光纤通讯的发展似乎已到了一个极限。于是一群科学家寻求不同的研究途径及利用最新的仪器,终于突破现有困境,发展出第四代及第五代光纤通讯。

相干系统与直接检测系统

第四代光纤通讯摒弃了已往所使用的调制(modulate)强度,而改用调制频率或相位的方式来传递讯号。在这革新的通讯系统里,光波的频率和相位维持一定,这称为“相干”(coherent)。传统的调制强度方式是将光信号强度直接转换成电流,这称为“直接检测”。实验室测试结果显示,相干系统检测微弱信号的极限和准确性,远超过直接检测系统。因此若采用相干通讯系统,信号将可传递得更远。

于1987年,相干通讯系统的传递量可说和直接检测系统旗鼓相当。虽说相干通讯系统具有相当的发展潜力,但仍有一些有待克服的技术问题。其中之一是,所使用光源的频率和相位必须非常稳定;其次,调制及检测光波频率和相位的仪器,操作上没有传统的调制强度方式来得方便且价格昂贵。

另一方面,科学家也不断想尽办法改良现有的直接检测系统,主要的目标是发展更强而有力的放大器。有了此种放大器,微弱的信号便可传递到遥远的距离。于是有人发展出光学放大器晶片,虽然实验室测试结果成功,但困难重重。因此将这些放大器晶片应用在大规模通讯上,还有一段遥远的距离。

80年代末期,光学放大器的发展有了突破。新的光学放大器主要部分是二极管激光器和铟光纤。二极管激光器可提供放大器1.48微米或0.98微米的红外光源。激光可将光纤内的铟原子激到较高的能阶。当外界的微弱信号进入光纤时,处于激发态的铟原子可借着激发发射(stimulated emission)的过程,将能量传递给信号,所以铟光纤可将信号再生及放大(图2)。

这样一来,铟光纤不就是等于中继器吗?答案是否定的。虽然铟光纤像中继器一样,可再生讯号,但中继器的功能是将光信号转换成电流,放大电流,然后再转换回光信号。铟光纤则没有这种中途转换的必要,光信号可直接从发射器传到接收器。

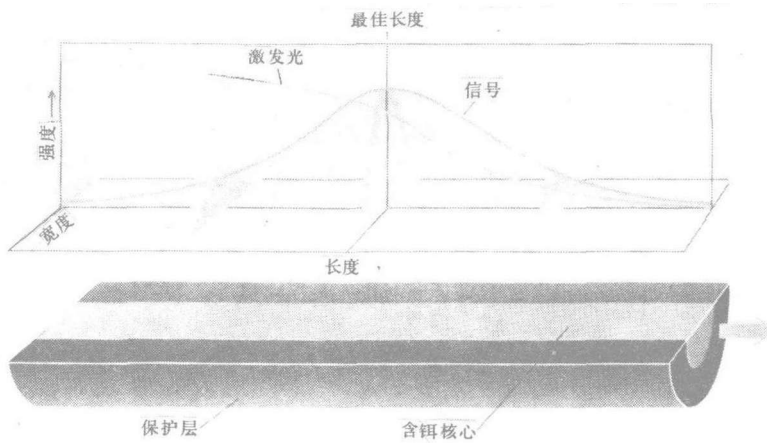


图2 光纤放大器需要激发光源及单模铒光纤。光纤放大信号的原理是借铒原子吸收激发光后将能量传递给信号。所以通过光纤时,激发光的强度逐渐降低,而信号强度逐渐增加,直到激发光的强度降至某个程度。

从钕光纤到铒光纤

铒光纤的问世使得光纤通讯迈向第五代。信号传递量又比第四代高出100倍。铒光纤及其他稀土元素光纤的构想源自于60年代早期。当时,美国光学公司的克斯特(C. J. Koester)和史尼泽(E. Snitzer),在研究含钕(Nd)元素的光纤时发现,钕光纤可作为激光光源藉以放大信号。他们将1公尺长的光纤缠绕在闪光灯上,从光纤所发出的1.06微米红外光强度放大了5万倍!这相当于47分贝。十年后,美国电话电报公司贝尔实验室的史东(J. Stone)和布鲁士(C. A. Burrus, Jr.),将激发光源从闪光灯或水冷式激光器改成二极管激光器。

随后,70年代,钕光纤的研究逐渐被人们遗弃,因不合时代所需。光纤放大器的研究方向逐渐由1.06微米光区,转向适用于氧化硅光纤的1.3或1.55微米光区。

直到1985—1986年间,英国南安普顿大学的裴恩(D. Payne)等人,才对稀土族元素光纤重新探讨一番。他们发现铒光纤可作为1.55微米光区的光学放大器。一年之后,他们以60毫瓦(mW)的红光(波长0.65微米)激发铒光纤,信号放大率达到25分贝。

当时,大部分的科学家均认为:南安普顿大学的研究成果不具实用价值。主要原因是要产生高强度的0.65微米红光不容易,需要大且笨重的激光器。其时大家都忽略了一点,铒光纤不一定非得用红光不可,也可用红外线激发,而最佳的红外线来源便是二极管激光器。

1986年,贝尔实验室的一群科学家也用氩离子激光器(绿光,0.51微米)来激发铒光纤。一年多之后,100毫瓦的绿光可产生22分贝的放大倍率,但这和南安普顿大学的研究一样,也不符合实际需要。

贝尔实验室的盖尔思(R. Giles)和狄苏华(E. Desurvire, 本文作者)并未放弃研究,他们测量信号传递时所产生的误码率。经过数小时的测试,在传递量为每秒2千兆比特下,误码率为十亿分之一。这简直可以说是“零误码”。

另外一项重要结论是,放大倍率和信号的偏极方向无关。半导体放大器的放大效率常受信号偏极方向影响。这是一个令人振奋的结果。于是盖尔思和狄苏华又尝试了一个实验,让铒光纤同时产生数组不同信号。结果非常良好,信号彼此之间不会互相干扰。

虽然不同波长的光可以用来激发铒光纤,但只有少数几个区域具有真正的放大效率。例如,以0.67微米或0.80微米的光照射时,铒原子吸收一个光子,跃迁到一定的能阶之后,有可能再吸收两个光子,再往更高的能阶迁移。就光纤放大器而言,若有一部分的铒原子被激发到更高的能阶,光信号就无法顺利传递,因此放大效率降低。

幸亏老天爷帮忙,刚好0.98微米和1.48微米的光有很高的放大效率。这些区域的光正好可由铟(In)、镓(Ga)、砷(As)和磷(P)所制成的半导体二极管激光器产生(图3)。

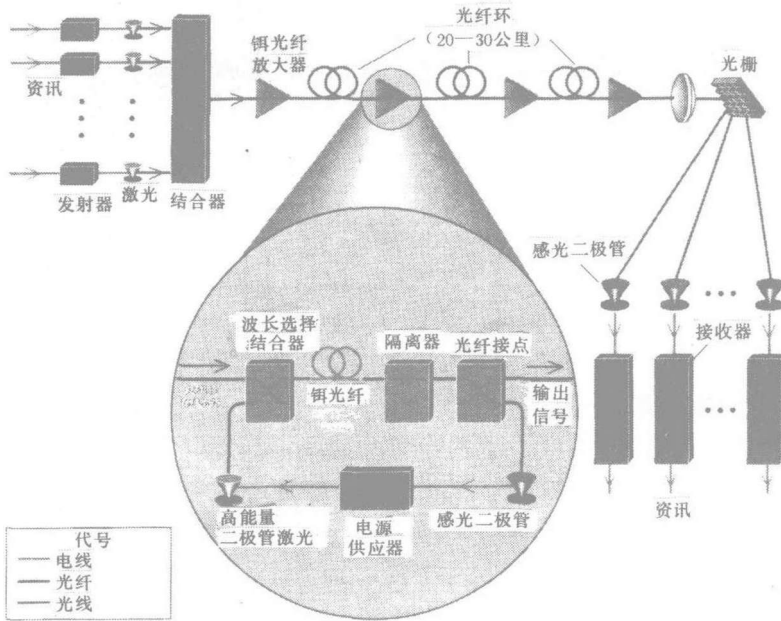


图3 在以铒光纤放大器组成的长途通讯系统中,整个发射器产生光信号送入光纤内。在每一束光纤之间,光纤放大器将信号放大。光信号由光纤出来后,光栅将光分为数道送入接收器内。图中放大部分是光纤放大器的详细构造。感光二极管测量输出信号的强度,然后反馈控制激发光源,使放大率保持一定。

迈入传达1000公里的纪元

再接下来是寻求适当的二极管激光器。虽然南安普顿大学的研究证实了0.98微米为激发铒光纤最有效的光区,但因迁就于二极管激光器技术问题,有一部分的科学家仍专注在1.48微米区域。

1989年,日本电话电报公司(NTT)首次成功将二极管激光器运用在铒光纤放大器上。该系统可一次以每秒2千兆比特的传递量传达212公里之远。随后,全世界的科学家纷纷投入竞争行列,想在传递量方面再创新纪录。不久,美国和日本同时宣称:在150公里的光纤传递量可达每秒10千兆比特。也有人将12条光纤串联在一起,总长度为904公里,传递量也达每秒1.2千兆比特。

1989年,日本电话电报公司的科学家再创纪录。他们利用相干系统光纤放大器,以每秒2.5千兆比特的传递量传达2,223公里之远。整个光纤通讯工业进入了1000公里的纪元。

当然,美国方面也紧追不舍。贝尔实验室的柏加诺(N. S. Bergano)在他的模拟通讯实验里又创下了惊人的纪录,以每秒2.4千兆比特的传递量传达21,000公里之远。另一次实验也于9000公里的距离,传递量达每秒5千兆比特(图4)。这相当于目前所使用的越洋系统传递量的10倍。上述的研究成果证明了光纤放大器在通讯上具有雄厚无比的潜力。

可无限传递的孤立子

为了描述光波在光纤内如何传递,我们在此引进“孤立子”(soliton)的概念。在一条理想的光纤内,孤立子可无限远地传递。孤立子的波长就像一般的脉冲光波一样,有一个微小的分布。孤立子的强度也和其长宽高有关。在光纤里,不同波长的光以不同的速度传递,这叫做“色散现象”(dispersion)。当光强度超过某一程度时,相同波长但不同强度的光也会以不同的速度传递,这现象叫做“克尔效应”(Kerr effect)。对孤立子而言,其克尔效应刚好可和色散现象抵消。若每一个微小的波长分量具有不同的强度,则所有的光有可能均以相同的速度传递。因此,在理想的光纤内传递时,孤立子的分布不会变宽或变窄。

当然,所有信号通过光纤时,强度或多或少都会降低。孤立子的强度也会渐渐衰减,但其脉冲波形仍不变,直到强度降低至某一程度。

1988年,光纤孤立子理论先驱莫任那尔(L. F. Mollenauer)于贝尔实验室证明了光纤放大器可抵消信号的强度衰减。因此,孤立子可在光纤里传递很远的距离。他们发现,经过1万公里的传递之后,孤立子只变宽了些许。最近他们证明了,在“零误码”的情况下,孤立子可以每秒2.5千兆比特的速率传递14,000公里之远。这一切均说明了孤立子可用于长途通讯。

孤立子就好比光脉冲一样,彼此之间不互相重叠,因为其脉冲宽度很窄,大约在千分之一(10^{-11})秒左右。孤立子系统即以本身存在或不存在的方式,来传递每一比特的讯息。因此,孤立子可以每秒5千兆比特速度传达1万公里之远。

若把孤立子系统与其他技术结合在一起,则传递量将更为庞大。讯息以孤立子传送时,不同波长的孤立子可由不同的频道同时输出。这种传送方式称为“波分复用”(wavelength-division multiplexing)。这并不适用于传统非孤立子讯号的传递,因为当距离遥远时,讯号会色散且彼此混合。孤立子系统所能使用的频道数目有限,因为光纤放大器对于不同波长的放大程度不同。一个理想的孤立子系统应可至少承担5个频道,因此传递量可达每秒25千兆比特。

莫任那尔他们也针对孤立子系统的“极化多工发讯”(polarization multiplexing)作一番探讨。在该系统当中,通讯频道数目增加一倍。因为讯号的波长相同,但可有两个不同的极化方

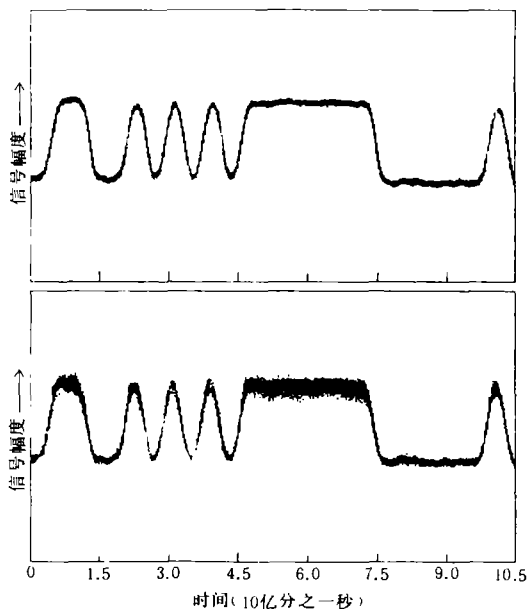


图4 上图是通过光纤之前的信号,下图是通过9000公里长的光纤及铒光纤放大器之后的信号。信号的形状及强度未因噪音的介入而改变。

向。此套系统尚未问世,仍在发展阶段当中。

将来通讯系统的另外一个可能发展方向是相干系统。由于相干技术可应用于1.2—1.6微米区域,将有很多光频道可以使用。为了达到这个目标,必须仰赖高灵敏度的频率稳定器。所以未来的发展方向是什么,现在还很难预料。

21世纪是光波通讯的世纪

铒光纤放大器的确给长途通讯带来很大的震撼。在未来10年内,光纤放大器将在光波通讯网路方面扮演很重要的角色。未来通讯网路所面临的挑战是,如何以最短的时间、最少的误码,将更多的资讯传给更多的使用者。在长途通讯上,光纤线路要比微波线路来得准确及快速。

最简单的光纤网路系统为广播网路(broadcast network)。资讯可由中央发射台传给广大范围的接收户(图c5)。英国通讯公司最近发展出一套播放系统,具有384个影像频道,可在50公里之内将讯息传给4000万个接收户。播放范围可以借助增加光纤放大器数目及光纤长度而扩张。使用者数目仍然有个上限,因为随着放大器数目增加,噪音也逐渐增加,系统会不稳定。

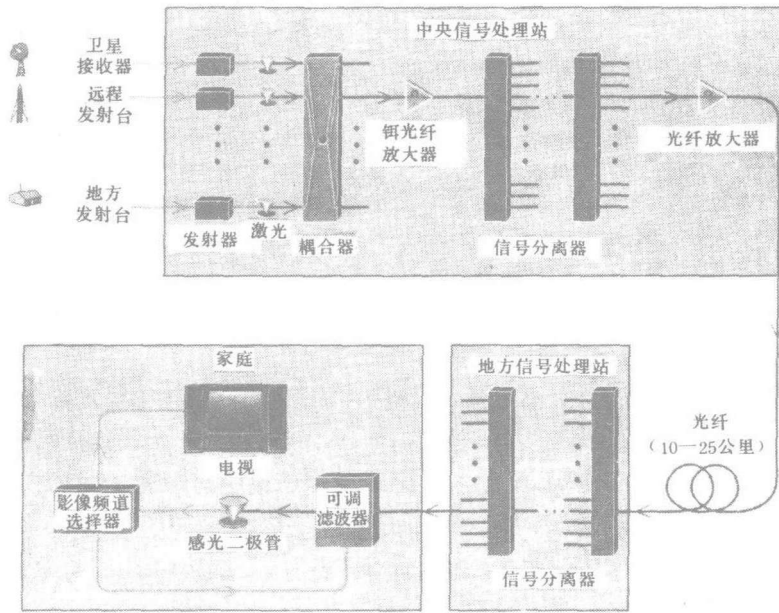


图5 铒光纤播放网路系统。信号传递和放大过程与图3类似。信号经由分离器分离后,强度可由放大器再放大

光纤网路之所以具有很高的讯息传递量,是因为同时可使用很多个频道。频道通常受限于四个因素:第一,若所有信号(来自不同频道)的总强度超过某一程度,铒光纤无法放大信号;第二,光纤放大器传递讯息的波长范围有限(从1.53—1.55微米);第三,任何两个光频道的波长不能太接近,以免信号互相干扰及混合;第四,放大器的放大程度依波长而定。其他限制因素还有仪器辨别不同频道的能力等等。

虽然有种种限制,光纤放大器的讯息传递量仍遥遥领先现有的其他各种通讯技术。据估计,未来光纤放大器的讯息传递量将可达到每秒20—30千兆比特。

未来10年内,长途通讯系统及区域性网路将逐渐采用铒光纤放大器及其他光波通讯技术。届时,与光波通讯技术结合,电话、传真机、电脑和电视等系统的功能将更为加强。公司企业将从大型资料库取得所要的讯息,或是利用影像会议交换意见。科学家也可在数千公里外的地方使用超级电脑。一般家庭也可由电视资料库选择自己所喜爱的节目。光波通讯势必对整个21世纪的生活方式和社会结构有着深远的影响。

(本文节译自 E. Desurvire, "Lightwave communications: the fifth generation", Scientific American, January, 1992, 原载台湾《科学月刊》1992年第6期)

(李世琛 译)

本刊荣获全国优秀科技期刊二等奖

在国家科委、中宣部、新闻出版署联合举办的首次“全国优秀科技期刊评比”活动中,我委创办仅6年的委刊——《中国科学基金》荣获二等奖。1992年12月26日在北京举行了隆重的颁奖仪式。这一荣誉不仅是对委刊几年来工作的肯定和赞誉,也进一步扩大了我委的影响,为国家自然科学基金委员会在科技出版界树立了良好的形象。

目前全国有科技期刊近4000种。这次共有30个省、市、自治区和46个部委、国务院直属单位以及中国科学院、中国科协等部门均推荐期刊参加了总评。从参加总评的606种期刊中共评出获奖期刊351种。其中一等奖50种、二等奖100种、三等奖201种。评奖工作从1992年4月份开始,也采用了专家择优的评审方式。这次获奖的刊物中有的已有70多年历史,《中国科学基金》在获奖期刊中是刊龄最年轻的期刊之一。

我委委刊——《中国科学基金》于1987年创刊,已出版了6卷24期。刊登了较高水平的学科发展、工作研究、基金管理、优秀成果介绍等方面的文章500余篇,受到科学家们的欢迎和好评。委刊现有国内外订户上千家,中国科学院508位学部委员也是委刊的读者。

《中国科学基金》已和日本、德国、英国、匈牙利、台湾、香港、澳门等9个国家和地区的自然科学基金组织、科研管理机构建有刊物交换关系,在国内与30多个有影响的科技刊物建立了交换关系。

委刊在首次全国优秀科技期刊评比中获奖,荣誉来之不易,今后我们要进一步提高刊物质量,积极努力工作,为广大科学家和科学基金管理干部创造更多的发表高质量论文的机会。为完善和发展科学基金制,促进我国基础性研究的发展,作出新贡献。

我们也衷心希望今后能得到广大科技工作者更多的帮助和支持。

《中国科学基金》编辑部