

亚特兰大的世界首次光纤通信系统实验

黄尚永

(北京建筑大学理学院, 北京 102612)

摘要 亚特兰大光纤通信系统实验在世界上属于首次, 实验取得了很好的结果, 坚定了业界对于光纤通信的信心。实验系统包含光纤、激光、中继器、探测器、连接器等诸多要素, 本文对它们的发展和性能进行了论述, 对综合实验系统构成和实验结果进行了分析介绍, 对影响光纤通信发展的宏观社会因素, 以及测试实验结束后光纤通信的后续发展进行了讨论。

关键词 亚特兰大; 光纤通信; 激光; 连接器; 探测器; 中继器

THE WORLD'S FIRST FIBER-OPTIC COMMUNICATION SYSTEM EXPERIMENT IN ATLANTA

HUANG Shangyong

(School of Science, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102612)

Abstract The Atlanta fiber-optic communication system experiment was the world's first time of such experiments, it achieved excellent results, strengthened the confidence of communication industry about the future of fiber communication. The experimental system consisted of several key components such as fiber optics, lasers, repeaters, detectors, and connectors. This article analyzes their developments and performances, introduces the integrated experimental system and the results, as also discusses the macro social factors influencing the development of the whole communication industry, and its following development after the success of this experiment.

Key words Atlanta; fiber-optic communication; laser; connector; detector; repeater

光纤通信是通信科技发展历史上具有里程碑性质的突破, 由于光的频率比普通电磁波要高几个数量级, 相应地可以承载的信息容量就大很多。可以说光纤通信的实现几乎一劳永逸地解决了之前电话线路拥堵的问题, 使通过有线进行信息传输的容量达到了极致, 直到现在我们还一直在依赖着这项技术。1976年的亚特兰大光纤通信系统实验, 是全球第一个光纤通信系统测试实验, 实验的成功证实了光纤可以用于通信, 给了通信业界极大信心, 使得光纤通信得以在接下来的时间里得到进一步的迅猛发展并实现了商业化。

由于光纤通信是一项不断处于发展中的前沿技术, 相关的文章主要围绕其最新发展, 很少涉及其早期发展历史的文章, 更没有分析其得以发展的前因后果的文章。本文结合当时的技术发展和社会需求等情况, 对该系统的主要构成和测试成功前后的相关工作展开论述。

1 世界首次光纤通信系统实验

1976年进行的亚特兰大光纤通信实验, 被业界公认为是世界上第一次光纤通信系统实验。实

收稿日期: 2024-03-22

基金项目: 教育部产学合作协同育人项目(220606071072602)。

通信作者: 黄尚永, huangsy@bucea.edu.cn。

引文格式: 黄尚永. 亚特兰大的世界首次光纤通信系统实验[J]. 物理与工程, 2025, 35(3): 277-284.

Cite this article: HUANG S Y. The world's first fiber-optic communication system experiment in Atlanta[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(3): 277-284. (in Chinese)

验取得成功后,研究人员就在《贝尔实验室记录》上发表文章“光波通信通过了它的首次检验”,这里的首次,既是说实验取得成功一次通过,也有世界首次的含义^[1]。《贝尔系统技术杂志》在1978年7—8月的第57卷第6期推出专辑,对实验情况进行了综述和回顾。中国国内则最早在1979年4月由“一九三四研究所情报资料室”将该专刊的相关论文翻译成上下两册,供内部参考。1981年第一期的《光通信技术》期刊刊登了文章“FT3 贝尔系统的都市干线光波系统”,(内容标注译自1980年的“Six European Conference on Optical Communication”),提到“贝尔系统的第一个光波系统已研制好,并且很快就可以普遍地向诸经营电话公司供货”^[2]。贝尔实验室研究专家阎康年先生的两本关于贝尔实验室的著作,都介绍了这次实验的一些情况,提到其无差错传输距离达到10.9km,并都强调“这是世界上第一次光通信实验,实验的成功宣告了光通信时代的到来,预示着微电子技术时代向光子时代转变的序幕正式拉开”^[3,4]。《电信科学》2016年一篇纪念光纤通信发明50周年的专题文章中也指出,贝尔实验室在1976年于亚特兰大开通“世界第一条光纤通信实验回路”,中继距离10km,速率45Mb/s^[5]。中国通信学会主编的《中国通信学科史》也在书后附表“国际有线及光通信技术发展大事记”中,列入1976年的一件大事是“美国西屋电信公司在亚特兰大成功地进行了世界上第一个44.736Mb/s传输110km的光纤通信系统的理论试验,使光纤通信向实用化迈进进一步”^[6](原书中110km有误,应为10km)。作者也注意到有文献资料提到1975年伦敦的一个警察局曾采用光纤来修复遭雷击的计算机系统实现了小范围通信,规模和影响都很小,不影响亚特兰大的世界首次光纤通信系统的历史地位^[7,8]。

2 亚特兰大光纤通信系统实验的概况和结果

2.1 贝尔系统的简要情况

贝尔是电话的发明者,他在发明电话后成立了公司,后来发展成美国电报电话公司(American Telephone and Telegraph, AT&T),这是贝尔系统的母公司。西方电气公司(Western Electric Company,即前文提到的西屋电信公司,也音译作

韦斯顿电气公司)是贝尔系统的制造和供货分支,并由AT&T全部控股。西方电气公司的主要功能是依据统一的设计和质量标准来制造大量的器材和设备,如电缆电线等,供应贝尔系统。贝尔电话实验室则从1925年正式成立,主要从事基础研究工作,一半由AT&T控股,一半由西方电气公司控股。贝尔实验室在AT&T和西方电气公司资助下,以非营利机构的形式运行。AT&T主要资助基础理论的研究和开发,西方电气主要资助对器材和设备的研发。因此亚特兰大光纤通信系统的研发和设计主要由贝尔实验室完成,制造和施工主要由西方电气公司实施^[9]。

2.2 光纤通信得以发展的社会背景

20世纪六七十年代,光通信得以起步和发展。当时的世界,“二战”已经过去20年左右,世界经济早已得到恢复和发展,商业发达,货物和资讯的流通需求大增。在致力于加速及加强全球訊息的传输前线上,电讯是最重要的桥头堡,普通长途电话已经不能满足人们日常通信的需求。光纤通信的先驱高锟回忆起1970年他在香港讲学期间亲身体会到的长途通信之不便:在圣诞节之类的家庭团聚节日里,家人们分散在世界各地,都会通过电话彼此问好。这段时间电话会很集中,人们一般需要先打电话预约通话时间,通话只能限制在3分钟,收费也很昂贵,打到海外的电话一般还需要通过接线生,通话的隐私没有保障,因此人们对于提高通信时长和通话质量有着强烈需求。而“二战”后社会财富的日渐积累,可以资助更加先进的科技研究。当时的美国和苏联还基于冷战争相进行军备和高科技竞赛,半导体、电脑等技术日趋进步,先进技术不断得到普及。贝尔实验室在20世纪60年代成功发射了卫星,可以通过卫星实现通信,不过也在安全和费用方面存在很多问题,虽然技术上获得了成功,但美国政府当局并不支持卫星通信商业化。20世纪60年代初期激光的发明由于在军事上能够应用而得到较大发展,激光的发展使得人们进一步看到了光通信的前景^[10]。

2.3 亚特兰大光纤通信系统

亚特兰大光纤通信系统实验的目的是,在类似的环境下对光波传输技术进行鉴定,将光纤光缆和连接器、光源和探测器,以及系统其他电子设备等方面的探索性研究结合起来,以观察其综合效果,解决一个完全系统联合测试中出现的接口问

题,为贝尔系统光波通信技术进行可行性验证^[11]。

实验场地位于亚特兰大的西方电气公司和贝尔实验室的联合研究室,这里有研究室建成时就安装好的管道,管道一端在贝尔实验室底层房间,经过 150m 到达一个人孔(Manhole,在地下通信线路中,可供人下去检修的稍大空间),之后再延伸 140m 到达另一个人孔。一根 648m 长,含有 144 根光纤的光缆通过地下管道和人孔形成回路,其两端都在同一个房间,并分别连接到一短截光缆上,短截光缆的另一端呈扇形分散开,连接到 12×12 阵列的每根单条光纤上,这个连接器阵列称为光纤配线架(PDF),可以方便地使用单根光纤。光纤跳线带单个光纤连接器,用于光纤之间的互相连接,以及光纤同连接器的连接^[12]。

总的数字传输系统主要包括三个分系统:光缆,配线系统,终端电子设备。其中光纤由预制件拉制而成,再集成到光缆中。配线系统的关键元件包括用在配线架和光中继器上的插座式单光纤连接器。终端电子设备则包括光探测器,激光发射机,以及带有发射机和接收机的中继器等。主要实验结果参数有:传输速率 44.7Mb/s(可容纳 672 路语音通道);光缆由 12×12 带状排列的 144 根梯度折射率光纤构成,平均损耗是 6.0dB/km(波长是 0.82μm),发射机的平均功率 -3dBm(0.5mW),接收灵敏度 -54dBm(4nW),中继距离的计算值是 7km,实际最大达到 10.9km。实验原来的目标是在光缆的 144 根光纤中至少得到 100 根平均损耗低于 8dB/km 的理想光纤,实际获得 138 根平均损耗为 6dB/km 的较好光纤。通过正交耦合测量技术来测量串音,发现光纤之间串音很小,即使有些许串音,对系统性能影响也可以忽略不计。光纤色散的影响也很小,线路中抖动的积累也在终端电路的控制能力之内^[12,13]。

亚特兰大光纤系统实验是在对系统性能具有高度期望的情况下开始的,实验结果使得研究人员坚定了信心,就是系统和设备的设计能满足贝尔系统传输的需要,光纤应用于通信技术是可行的。

3 光纤通信系统的主要要素

亚特兰大光纤通信系统实验是一次集中的系统测试,这距离 1966 年高锟首次提出可以应用光

纤进行通信已经过去了 10 年,距离 1960 年的激光首次发明已经过去了 16 年。实际上,贝尔系统一直是致力于实现光通信的。早在贝尔系统的创始者贝尔在刚发明电话后不久,也成功进行过光电话的实验,他已经意识到用光传输信息的巨大潜力^[14]。

只不过由于缺少理想的光源和传输介质,光通信一直没有进展。激光发明后,贝尔实验室的研究人员也率先投入到激光应用于通信的研究,尝试过自由空间的激光通信,地下管道中的棱镜组,空气棱镜等多种方式,也取得了较低的损耗,但是由于实验装置复杂,造价昂贵,不具有实用性,也逐渐被弃用^[15,16]。1970 年前后,贝尔实验室逐渐转向光纤通信,由于其规模庞大,资金充足,很快在光纤通信的各个方面取得诸多进展,并于 1974 年开始,着手进行亚特兰大光纤通信系统的测试。

3.1 激光

激光的发展可以分为三个阶段:第一阶段是激光技术的出现,以 1960 年梅曼宣布世界上第一台红宝石激光器的发明为标志,第一台激光器出现后,科学家们开始进行包括各种固体、气体、液体、半导体等不同类型激光器的研制工作。第二阶段是半导体激光器问世,最早报道半导体激光器研制成功的四篇论文,集中出现在 1962 年 9—10 月,它们都采用同质结半导体材料,利用两个抛光的平行端面作为谐振腔。同质结半导体激光器由于阈值电流密度太高,只能在液氮环境下以脉冲形式工作,无法满足光纤通信光源所要求的稳定性和长寿命等要求,所以也还不具有使用价值,但其基本理论为半导体激光器的发展奠定了坚实的基础;第三阶段是异质结半导体的引入和应用。异质结采用不同的半导体材料,可以有效地降低光波和载流子,降低阈值电流,提高工作效率,以实现半导体激光器在室温下连续工作的目标。1967 年,贝尔实验室的潘尼施(M. B. Panish)和哈亚希(I. Hayashi)采用液相外延的方法制成了单异质结激光器,在 1970 年进一步研制出双异质结激光器,能在室温下连续工作,长寿命激光器的研制成功,为光纤通信的实用化奠定了基础。半导体激光器的发展,遵循了从同质结,到单异质结,再到双异质结的发展过程,最终得以成功运用于光纤通信领域^[17,18]。

亚特兰大光纤通信实验采用 GaAlAs 注入式激光器,通过激光器偏置反馈控制电路解决了输出功率的调整问题,使得激光器可在系统中作为稳定光源。系统的终端发射机和干线中继器需要将信号转换成 0.5MW 的平均功率进入光源, GaAlAs 注入式激光器光源很好地适应这个要求,它能够进行高速(上升时间小于 1ns)通断调制,驱动功率也很低。激光能有效耦合到低数值孔径的光纤中,激光器波长、线宽都在低损耗光纤中达到最佳性能。激光器在实际应用中也需要克服一些缺点,其中温度敏感性显得特别突出。激光发射机设计了两个封装的激光光源分系统,一个是以 825nm 波长工作的 GaAlAs 双异质结注入式激光器和驱动调试电路,包括激光器和光纤的接口;一个是提供激光器输出功率闭环反馈控制的电路,以使得当环境温度变化和激光器老化引起激光器参数变化时,激光的峰值脉冲输出能够维持稳定。除此之外,驱动电路还要求消光比(光脉冲通断时间的比例)大于 10,以避免接收机中灵敏度的过多损失。外加电流脉冲和激光器的发射光脉冲之间延迟时间之比要短于比特间隔,以使光脉冲准确再现输入信号,外加快速电流脉冲所激励的光输出脉冲弛豫震荡也要减弱,因为震荡会使得系统性能降低。

亚特兰大光纤通信实验总共制造了 62 台激光发射机,它们在不同温度的平均功率输出,幅度变化,传输延迟,消光比,工作温度范围,所需功率等主要性能指标均符合要求。温度从 25℃ 升高到 50℃ 时,功率减小小于 1%^[19]。

3.2 光纤

1966 年高锟在英国的标准电话与电报公司期间,通过实验发表论文首次提出可以通过光纤来实现通信,信息在光纤中的损耗并不是光纤本身带来的,而是其中的杂质造成的,只要去除这些杂质,制造出足够纯净的光纤,把损耗降低到 20dB/km 以下,是可以实现通信传输的^[20]。这篇论文后来被认为是光纤通信的开山之作,1966 年被认为是光纤通信元年,高锟本人则被尊称为“光纤通信之父”。高锟不仅在理论上提出了低损耗的光纤可用于光纤通信,也致力于把低损耗的光纤和光纤通信变为现实,在对光纤通信的长期研究过程中咬定青山不放松,体现了百折不挠、精益求精的科学家精神,无愧“光纤通信之父”和诺贝

尔物理学奖获得者的荣誉。高锟的自传 *Time and Tide*,恰当地反映了他当时勇立潮头、引领时代的高瞻远瞩的眼光,和坚持信念,锲而不舍的身体力行的作风。中译名《潮平岸阔》,则又体现出了当光纤通信得以应用后,他闲庭信步,“轻舟已过万重山”的感慨^[10]。

但是当时这种低损耗光纤还并不存在,光纤损耗普遍多达上千 dB/km,只能传递很短距离的信号,在医学的内窥镜上有普遍应用。大部分人对低损耗光纤持怀疑和观望态度,包括贝尔实验室的研究人员。玻璃材料的制造并不是通信公司的强项。第一条符合要求的低损耗光纤是在专业的玻璃制造公司,美国康宁公司做出来的,1970 年康宁公司的研究人员在经过长期对材料组分和纤维设计工艺的研究后,做出的纤维损耗为 16dB/km,实现并超越了高锟提出的通信应用的阈值^[21]。贝尔实验室的材料研发团队很快和康宁公司签订了技术许可的协议,根据协议条款,康宁公司的技术进步不能威胁到美国电话电报公司。康宁公司和贝尔实验室负责光纤通信项目的人员建立的良好工作关系,使得康宁公司的人员也能够接触和了解光纤通信系统的其他部分,比如光源和探测器等,这样就显著加快了光纤通信项目的进展^[22]。

1974 年,位于亚特兰大的西方电气产品工程控制中心,在积累了一些制造低损耗纤维领域中相关制造方法和机械设备的经验后,开始着手生产光纤的实验。1975 年 4 月第一台预制件制造设备及配套的管道净化设备开始投入工作,并在 9 月份将生产的光纤提交给贝尔实验室。所有的光纤都由贝尔实验室在亚特兰大进行表征,然后制成纤维带和光缆。1975 年 11 月全部提交用于亚特兰大光纤系统实验。

光纤的制造工艺相当复杂。首先需要制造光纤预制件,刚开始要进行所用管子的清洗,管子直径为 14mm,在硝酸、氢氟酸和去离子水中组成的 50% 浓度的溶液中进行腐蚀,再用去离子水清洗干净,用氮气吹干,然后覆盖上保持管子内部干净。用于预制件制造的设备共有相同的两台,其中一台备用,它们和位于新泽西州的莫瑞山贝尔实验室本部使用的设备是一样的,使用化学气相沉积法(MCVD)经过复杂的工序制造出预制件。最后将预制件拉制成纤维。纤维拉制机也和贝尔

实验室本部使用的设备一样,顶部为送料机构,利用一个转动机构将预制件送入拉丝炉,拉丝炉是一个石墨电阻炉,在进出口装有节气阀,可以在2000℃的高温时严格控制所需惰性气体的气流。炉子出口处装有电子测微器来监控通过光纤的直径。西方电气公司在八个星期的时间内拉制成功大部分光纤纤维。这些光纤的材料是掺锗硼酸硅,多模,梯度折射率,提交给贝尔实验室进行质量测试^[23]。

单根的光纤比较纤细和脆弱,从光学和机械的角度考虑,都需要制造出小型、牢固、大容量的光缆,以保护和集中使用光纤,这种想法在1970年已经被提出,“由嵌入一个薄的、柔韧的支撑介质中的光纤直线状阵列构成的纤维带作为应用于光纤传输系统部件的使用”^[24]。光缆制造出来经过检验后,就可以直接安装在地下管道中。光纤制成直线状结构的方法有很多,他们采用制带机在两层的聚酯材料衬底的黏胶合之间加入12根光纤纤维,称为胶合夹层带(ASR),最终用于亚特兰大光纤系统测试。贝尔实验室共制造了16条ASR,长度约为1050m,其中4条由于多条光纤断裂而被抛弃,剩下的12条ASR中也有累计17条的光纤破裂。在以后的时间里,更好的光纤卷绕技术和改进的制带机设计使光纤断裂数量大大减少。12条ASR叠成矩形阵列,外边再加以数层的绝缘保护和机械保护套层,内套层为光纤提供了移动的空间,可以减缓制造和安装过程中发生的应力,以防光纤断裂或弯曲,外套层则含有细丝聚丙烯线和螺旋多股绳,起到热和机械方面的绝缘与保护作用^[25]。

3.3 其他主要器件

实验所用的光缆包含144根光纤,这要求在中心室内光纤互联系统对所有光纤拆卸方便,以使得任何数量的光纤与光纤之间,光纤与电子仪器之间可以方便连接,这就需要单根光纤连接器,连接器是配线系统的核心。连接器的端头可以连接两根标称外径为110μm,芯径为55μm的单根梯度折射率光纤。把光纤任意连接时,光纤的参数如直径、数值孔径以及折射率分布剖面都发生变化,所以连接会导致附加的内在损耗,这就使得连接器面临很大困难。而且系统中需要用到大量的连接器,其经济性也需要考虑。改进的插头生产方法称为精密连续自动制模方法,以插头的尖

端同心圆锥和双锥形插座的表面形成连接器准线,模制插头有用于附加外部元件的细槽,用来提供一种轴向力把连接器固定。模型的关键部分是一种没有接缝线的圆柱形对称的精密硬模,它的中心导孔标称直径是115μm,同心度高于几分之一微米,可以构成制模插头的对准面。锥形作为对准面有多个好处,插入容易,磨损小,重复性好,也适应不同直径光纤的连接,而且由于制模材料的收缩是各相同性的,收缩率的变化能使锥形和制模材料相适应。制模材料是一种高密度掺硅环氧树脂,用它来制造机械性能极其坚韧的,包括极好的抗磨优质表面的插头。把模制插头安装在弹性夹具中来实现在发射器和接收器插件背板后的快速连接。在亚特兰大实验刚开始时,这种单根光纤连接器还处于最初的发展状态,后面又得到了较大改进,包括模制双锥形套管和光纤端制备的重大改进^[26]。

光探测器采用平面外延硅雪崩光电二极管(APD),在800~850nm的范围内性能最佳,量子效率超过90%,探测器小巧快速,灵敏度高且相对便宜。器件通过离子注入和扩散在基片上生长外延硅支撑。其特性指标包括量子效率,电流增益-电压特性,动态范围,增益-电压特性对温度和波长的依赖关系,增益的均匀性,过量噪声对波长和标称增益的函数,响应速度,电容值,暗电流和温度的关系,在380V工作时的可靠性等。为这次系统实验研制的APD代表了当时较高的技术水平,量子效率高,响应时间短,过量噪声及暗电流低,提高了接收机的灵敏度^[27]。

一个雪崩光电二极管和一个双列直插型转移阻抗放大器共同组成探测器系统,为了实现光的对接,放大器组件中一般还带有一段连接光纤用的光纤软线,一端对着APD,另一端连着一个连接器。共制造了53个这样的完整组件,对它们的性能进行测试,得到的平均光灵敏度是-54.1dBm,标准偏差0.28dB,转移阻抗13.7KΩ,动态范围76dB,有效量子效率69%。对32个单元进行初步的寿命试验发现,其中10个在60℃下工作,超过 7×10^5 等效器件小时没有发现损坏,这意味着器件的可靠性达到系统要求^[28]。

光中继器本质上是一个输入和输出端具有光电转换器的数字中继器,这里所谓的转换器包括了前面提到的雪崩光电二极管APD和GaAlAs

注入式激光器。中继器包括放大,滤波,自动增益控制,再定时和再生的一般功能,为光波传输系统设计的中继器具有的特殊功能还包括很高的增益和较宽的动态范围,转换器特性需用反馈加以稳定。光中继器在电路上可以分为3个独立的部分,接收机、判决电路和发射机插件,它们对体积和隔离的要求并不高。接收机插件可接收低至-55dB的信号,产生峰峰值为1V的电压输出信号,判决电路插件提出定时和产生信号,发射机插件把再生的电信号转换成规定的光信号,把最小为-3dB的平均功率耦合到光连接器中去。接收机和发射机上都要设置光连接器,以便进行对接。中继器的电源为5.0V和-5.2V,典型功耗为3.1W,供电电压可在 $\pm 5\%$ 范围内变化,不影响中继器工作^[29]。

4 实验成功后光纤通信的初步应用

在1976年5月末,贝尔实验室宣称亚特兰大实验结果好得超过预期,虽然还存在很多细节上的问题,但基本事实明显而响亮:光纤能用于通信。在这方面发起一场光纤冲金比赛绰绰有余。这项新技术对于通信行业的企业家们意味着什么,无疑就像矿工发现金子一样。贝尔实验室的先行成功也引起了其他落后者的集体叹息和相互宽慰。

贝尔实验室是通信行业的巨无霸,并不怎么关心潜在竞争者。作为电话的垄断者,贝尔系统长期以来都是自己制造设备用。贝尔系统的下一步计划是在城市地下管道中运行光纤光缆,并以实时话务量来进行测试。AT&T在芝加哥市中心的环形区域内通过连接三个建筑的地下管道,运行着1.6英里长的光纤。这是AT&T计划首先采用光纤的典型地点:位于城市中心,地下管道中塞满铜电缆。一段光缆能够承载144根光纤,四根光缆能够装进一段管道,管道是按容纳灭水龙带尺寸大小的铜质电缆设计制造的。然而每根光缆容量比笨重的铜缆要大很多倍。把老式铜质电缆替换为新型光缆注定会成倍提高管道容量,不需要再开挖一条城市街道^[7]。

1976年冬,亚特兰大的大部分实验设备被拆装运送到了芝加哥,AT&T改善了其亚特兰大系统的硬件,使用更加纯净的光纤,性能更优的激光

器,连接器性能也相应提高。工程师们在两端设置测试设备,在技术员把细细的光缆塞进迂回曲折的地下管道后,仔细测量了24根光纤。没有一根折断。1977年4月1日,第一次在新的系统上传送商业信息,5月11日,芝加哥光波通信系统全部建成。电视编码器和其他终端设备也都可以附加到系统中,可向顾客开通电话和数据业务,电视电话会议业务,以及正规的通信干线业务^[30]。

贝尔系统运行着超过7千万线路英里的数字传输,大部分是建于1962年的T1系统,它工作于1.544Mb/s,由两根铜线提供24个数字话路。在亚特兰大和芝加哥光通信系统基础上,贝尔实验室研制成功的数字光波通信系统FT3,每秒可传输44.7Mb的信息,相当于容纳672个数字话路,它在1979年起逐渐在美国的多个地方得到了运用,包括1980年年初应用于纽约普拉西德湖冬奥会的4km的光通信系统,6月应用于加州萨克拉门托的4.4km的光缆,以及10月在旧金山安装的6.1km的光通信线路^[2,3]。

5 结语

亚特兰大光纤通信系统实验是一次承前启后的阶段性,综合性实验,它是对十几年来(1960—1976年前后)激光、光纤和其他各种器件的一次集中检阅,联合调试,取得了很好的结果,坚定了业界发展光纤通信的信心,为光纤通信系统的完全商业化奠定了基础。

半个世纪以来世界风云变幻,虽然后来贝尔系统经历了拆分风光不再,但对关键技术的表彰终于来了:2000年的诺贝尔物理学奖,表彰了室温下连续工作异质结半导体的研制工作^[31];而2009年的诺贝尔物理学奖则授予了高锟,表彰他在光纤通信领域的开创性工作^[32]。光纤通信技术前进的步伐从未停歇,这方面不断取得的技术进步成就了我们今天的信息化社会。接下来,光纤通信技术将朝着超大容量、智能化、集成化的方向不断演进,未来可以期望实现智能化网络参数监测和超长距离、超大容量信息传输,并且随着集成技术和光通信器件的不断进步,必将推动整个光纤通信行业的高性能、低成本发展^[33]。

光纤通信系统复杂,器件众多,也能够从侧面反映一个国家在这方面的综合实力,本文所讨论

的亚特兰大通信系统实验和早期应用发生在美国,体现了当时美国在这方面的领先优势,同时欧洲国家、日本等也紧跟而上,高琨在他的传记里多次提到他在欧洲、美国、日本等地参加会议和技术交流。当时的中国与西方交流还较少,不过也关注着这方面的进展,并独立发展了自己的光纤通信系统。后来被称为“中国光纤通信之父”的赵梓森当时具有超前的眼光和迎难而上的奋斗精神,在基础条件相对落后的情况下,进行光纤和通信系统的研究。1976年武汉邮电科学研究院首次研制成功中国的通信光纤,并进行了环武汉院的通话实验;1981年,中国第一条实用化的光纤通信线路也是在武汉开通,效果良好^[34]。经过多年的发展,中国的光纤通信设备和系统,不仅能满足国内网络建设的需要,而且大量服务国际通信网络,成为和国际应用水平差距最小的高科技领域之一,发展势头良好,将为我国从通信大国发展为通信强国做出更大贡献^[35]。

参 考 文 献

- [1] JACOBS I. Lightwave communications passes its first test [J]. Bell Laboratories Record, 1976, (54): 291-297.
- [2] 杨昭宝,林金昌,译校. FT3 贝尔系统的都市干线光波系统 [J]. 光通信技术, 1981(1): 37-40.
YANG Z B, LIN J C. The urban main line optical wave system of Bell system [J]. Optical Telecommunication Technology, 1981(1): 37-40. (in Chinese)
- [3] 阎康年. 贝尔实验室: 现代高科技的摇篮 [M]. 保定: 河北大学出版社, 1999: 368.
YAN K N. Bell Labs: The cradle of modern high science and technology [M]. Baoding: Hebei University Publishing House, 1999: 368. (in Chinese)
- [4] 阎康年. 美国贝尔实验室成功之道 [M]. 广州: 广东教育出版社, 2004: 188.
YAN K N. How Bell Labs succeeded [M]. Guangzhou: Guangdong Education Publishing House, 2004: 188. (in Chinese)
- [5] 郑小平, 华楠. 光网络 30 年: 回顾与展望 [J]. 电信科学, 2016, 32(5): 24-32.
ZHENG X P, HUA N. Review and outlook of 30 years of optical network development [J]. Telecommunications Science, 2016, 32(5): 24-32. (in Chinese)
- [6] 中国通信学会编著. 中国通信学科史 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010: 303.
China Institute of Communications. The history of communications science in China [M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2010: 303. (in Chinese)
- [7] Jeff Hecht. City of light-the story of fiber optics [M]. Oxford University Press, 1999: 177.
- [8] Optical fiber link for police computer [J]. Electronics Weekly Sept. 24, 1975: 3.
- [9] MILLMAN S, Editor. A history of engineering and science in the Bell system, Communication sciences (1925—1980) [M]. USA: AT&T Bell Laboratories, 1984: 4.
- [10] 高锟著, 许迪锵, 译. 潮平岸阔 [M]. 成都: 四川文艺出版社, 2009: 91.
KAO K C, XU D K. Time and tide [M]. Chengdu: Sichuan Literature and Art Publishing House, 2009: 91. (in Chinese)
- [11] Ira Jacobs. Atlanta fiber system experiment: Overview [J]. B. S. T. J. 1978, 57(6): 1717-1721. (注: B. S. T. J, 即贝尔系统技术期刊 Bell System Technology Journal, 下同)
- [12] KERDOCK R S, WOLAVER D H. Results of the Atlanta experiment [J]. B. S. T. J. 1978, 57(6): 1857-1879.
- [13] BUCKLER M J, MILLER C M. Optical crosstalk evaluation for two end to end lightguide system installations [J]. B. S. T. J. 1978, 57(6): 1759-1769.
- [14] 陈智浩. 现代光通信史上的里程碑: 光电话的发明 [J]. 光通信技术, 1993, 17(5): 288-289.
CHEN Z H. A milestone in the history of optical communications: The invention of photograph [J]. Optical Communication Technology, 1993, 17(5): 288-289. (in Chinese)
- [15] DELANGE O E. Losses suffered by coherent light redirected and refocused many times in an enclosed medium [J]. B. S. T. J. 1965, 44(2): 283-302.
- [16] GLOGE D. Experiments with an underground lens waveguide [J]. B. S. T. J. 1967, 46(4): 721-735.
- [17] 康静. 中国半导体激光器的早期发展 (1963—1980) [D]. 北京: 首都师范大学, 2013.
KANG J. The development of semiconductor lasers in China from 1963 to 1980 [D]. Beijing: Capital Normal University, 2013. (in Chinese)
- [18] PANISH M B, HAYASHI I, SUMSKI S. A technique for the preparation of low-threshold-room-temperature GaAs laser diode structure [J]. IEEE Journal of quantum electronics, 1969, 5(1): 210.
- [19] SHUMATE P W, JR., CHEN F S, DORMAN P W. GaAlAs laser transmitter for light wave transmission systems [J]. B. S. T. J. 1978, 57(6): 1823-1836.
- [20] KAO K C, HOCKHAM G A. Dielectric-fiber surface waveguides for optical frequencies [J]. Pro. IEEE. 1966(133): 1151-1158.
- [21] KAPRON F P, KECK D B, MAURER R D. Radiation losses in glass optical waveguided [J]. Applied Physics Letters, 1970(17): 423-425.
- [22] Margaret B. W. Graham, Alec T. Shuldiner 著. 康宁公司

- 和创新的技能——一个企业的世代创新史[M]. 施尔畏, 编译. 北京: 科学出版社, 2014: 469.
(original language) Margaret B. W. Graham, Alec T. Shuldiner. Corning and the craft of innovation[M]. New York: Oxford University Press, 2001.
- [23] MYERS D L, PARTUS F P. Preform Fabrication and fiber drawing by Western Electric product engineering control center[J]. B. S. T. J. 1978, 57(6): 1735-1744.
- [24] STANDLEY R D. Fiber ribbon optical transmission lines[J]. B. S. T. J. 1974, 53(6): 1183-1185.
- [25] BUCKLER M J, SANTANA M R, SAUNDERS M J. Lightguide cable manufacture and performance[J]. B. S. T. J. 1978, 57(6): 1745-1757.
- [26] RUNGE P K, CHENG S S. Demountable single-fiber optic connectors and their measurement on location[J]. B. S. T. J. 1978, 57(6): 1771-1790.
- [27] MELCHIOR H, HARTMAN A R, SCHINKE D P. Planar epitaxial silicon avalanche photodiode[J]. B. S. T. J. 1978, 57(6): 1791-1808.
- [28] SMITH R G, BRACHETT C A, REINBOLD H W. Optical detector package[J]. B. S. T. J. 1978, 57(6): 809-1822.
- [29] MSIONE T L, SELL D D, WOLAVER D H. Practical 45-Mb/s regenerator for lightwave transmission[J]. B. S. T. J. 1978, 57(6): 1837-1856.
- [30] SHWARTZ M I, REENSTRA W A, MULLINS J H, et al. The Chicago lightwave communication project[J]. B. S. T. J. 1978, 57(6): 1881-1888.
- [31] 宋菲君, 张莉. 激光 50 华诞[J]. 物理, 2010, 399(7): 445-461.
- SONG F J, ZHANG L. The 50th anniversary of the birth of the laser[J]. Physics, 2010, 399(7): 445-361. (in Chinese)
- [32] 杨建邺. 光纤之父—高锟[J]. 自然杂志, 2012, 34(6): 364-370.
- YANG J Y. Charles Kuen Kao—Father of fiber optics[J]. Chinese Journal of Nature, 2012, 34(6): 354-370. (in Chinese)
- [33] 谈仲伟, 吕超. 光纤通信技术发展现状与展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 100-107.
- TAN Z W, LV C. Optical fiber communication technology: Present status and prospect[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 100-107. (in Chinese)
- [34] 赵梓森. 中国光纤通信发展的回顾[J]. 电信科学, 2016, 32(5): 5-9.
- ZHAO Z S. Review of the development of China's optical fiber communication[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(5): 5-9. (in Chinese)
- [35] 毛谦. 我国光纤通信技术发展的现状和前景[J]. 电信科学, 2006, 8: 1-4.
- MAO Q. Development situation and trend of optical fiber communication technologies in China[J]. Telecommunications Science, 2006(8): 1-4. (in Chinese)