

第六讲 物理与光纤通信*

戴峰[†] 杨伯君

(北京邮电大学理学院 北京 100876)

摘要 文章通过回顾光纤通信发展的历史,分析光纤通信研究的现状,展望光纤通信发展的未来,阐述了光纤通信发展与物理学发展的密切关系,显示出物理学作为自然科学基础,它在光纤通信技术发展中起核心作用。

关键词 光纤通信,历史,现状,未来,物理学

Physics and fiber communications

DAI Feng[†] YANG Bo-Jun

(School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract The evolution of fiber communications, its current status, and future are reviewed. Every step of its development has been based on the development of physics. It is shown that physics plays a crucial role in fiber communications, as in all aspects of the natural sciences.

Key words fiber communications, history, current status, future, physics

光纤通信以其传输容量大、频带宽、损耗低、抗电磁干扰能力强、保密性好等特点,已成为通信网的主要传输方式。回顾光纤通信发展的历史,分析光纤通信研究的现状,展望光纤通信发展未来,都会看到光纤通信发展与物理学是密切相关的,而物理学作为自然科学的基础,它在光纤通信的发展过程中起着核心作用。本文将从光纤通信系统的组成出发,并结合光纤通信的历史、现状和未来,论述光纤通信发展与物理学的密切联系。

1 光纤通信发展的历史

光纤通信是以光波作为载频,以光导纤维(简称光纤)为传输媒质的通信方式。光纤通信系统由光发送机、光纤光缆与光接收机等基本单元以及一些互联与光信号处理部件(如光纤连接器、隔离器、调制器、滤波器、光开关、路由器、中继器及分插复用器等)组成。系统示意图如图1所示,其中光源、光纤和光放大器是光纤通信系统中最基本的元件。

第一条商用光纤通信系统建立于1978年。光纤通信的出现一方面是由于市场的需要,由于电视、电话数据传输量的增加,特别是计算机的发展,传统的以无线与有线方式传输信息的带宽已经不能满足日益增长的实际需要,此时发展光纤通信这种新的大容量高速率的通信方式是必然的;另一方面是近代物理发展提供了进行光纤通信的可能。光纤通信必须要有易于调制的相干光源和低损耗的信息传输媒质——光纤。在各种激光器中,固体激光器和气体激光器由于体积大调制困难而很难在光纤通信中应用;在光纤通信中实际应用的是半导体激光器,而半导体物理的发展在半导体激光器的研制和发展中起到了很重要的作用。导体激光器的发展与近代物理的发展也有着密切的联系。其结构如图2所示,这种激光器具有体积小、与光纤耦合效率高、发射波长处于光纤的低损耗区、可以直接进行调制及可靠性高

* 国家自然科学基金(60378011, 60377026)资助项目

2004-07-28 收到初稿, 2005-03-14 修回

[†] 通讯联系人, Email: bigdf@163.com

结构,它的研制离不开原子物理的发展。

光纤通信通过 30 年的发展,已有四代光纤通信系统由实验研究进入实用。目前商用光纤通信系统的码速率最大已达到 $160 \times 10\text{Gbit/s} = 1.6\text{Tbit/s}$, 无中继传输距离达到 4300km。而实验室水平的最大码速率已经达到 $10.92\text{Tbit/s} (273 \times 40\text{Gbit/s})^{[6]}$ 。

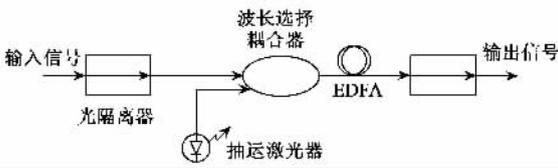


图5 EDFA结构示意图

回顾光纤通信发展的历史,不难看出它与近代物理发展的关系是非常密切的。如果没有激光物理、固体物理与半导体物理的发展,就绝不会有今天的光纤通信。光纤通信发展与人们对物质结构深层次的认识密切相关,物理学在光纤通信的发展中起到了核心的作用。

2 光纤通信研究现状

21 世纪伊始,似乎光纤通信产业遇到一定的挫折。一些小型公司倒闭,大公司裁员,40Gbit/s 以上的系统的开发突然停止,光通信行业产值有所下降,这是由于光纤通信研发的速度已超越了市场的需求。但信息传输量的增加并没有减速,而且以每年 50% 的速度在增加,各种远程教育、电子商务、电子图书馆、电子医疗、电视会议等高速信息浏览业务和大容量信息存储业务均在迅速发展,这将必然会带来光纤通信的进一步发展,这些都说明光通信行业的不景气将只是一个暂时的现象。浏览国际光纤通信学术会议(OFC 2004),不难看出,不管是光纤通信器件还是光纤传输系统,或是光通信网络技术都在进一步发展。

高速宽带的波分复用(WDM)系统仍然是光纤

通信传输系统研究的重点。为此,各种光纤通信器件也都在不停地发展。波分复用(WDM)是在一根光纤中同时传输多波长光信号的技术,它将光纤的低损耗窗口中可用的光谱频带划分为若干个子带,其中某个波长信号经过强度调制后在相应中心波长的子带内传输。基本的点到点的 WDM 系统如图 6 所示,在发送端对每一个波长的信号都使用独立的调制光源,然后用复用器将各个光束复合到一串密集波长信号谱内,并把信号耦合进一根光纤。在接收端使用解复用器将各波长的光信号分离,然后送入检测信道,最后通过光电变换等一系列处理将信号还原。

在光源方面,WDM 系统需要多波长的激光器。其中高功率飞秒(fs)量级宽带光源的研究值得关注,因为它可以在 100—200nm 的带宽内产生间隔为 1nm 左右的多波长的光源,如果结合适当的滤波器,可以得到 WDM 需要的一系列光源。

在光信号传输系统中,光纤损耗的存在要求光信号必须被放大。目前,掺铒光纤放大器在光网络中被广泛使用。其工作在波长 $1.55\mu\text{m}$ 附近,平坦放大带宽在 1545—1560nm 之间,这对于 WDM 系统来说显得比较窄。而最早在光孤子传输系统中使用受激 Raman 放大器受到密切的关注^[7,8]。由于它直接利用光纤中受激 Raman 散射,而不需要另外接掺铒光纤,只要有合适的抽运源,它就可以在波长为 1250—1650nm 之间对信号进行放大。这个特点使它很适合在 WDM 系统中进行光信号放大。

光纤参量放大器近年来也受到了人们的关注。它利用光纤中的非线性效应对光脉冲进行放大,并且在放大过程中放大与相位有关,因此也称为相位敏感放大器^[9]。这种放大器通过相位调制,可以做到零噪声放大^[10]。在它的研究中,寻找大非线性的光纤是这种放大器走向实用的关键。总之,不管是 Raman 放大器还是参量放大器,其发展除研究合适的抽运源外都有赖于我们对光纤非线性性质的深入研究。

在光纤通信传输系统中,各种新材料新器件也很值得关注。例如光子晶体的应用,利用它做补偿器和光分插复用器都有很好的应用前景。

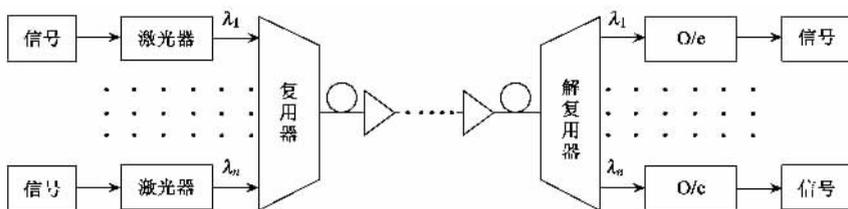


图6 简单 WDM 通信系统示意图

虽然上述器件的制造是多个科学领域的共同的结晶,但的物理学尤其是光学和固体物理学的发展在其中起的作用是不可小视的。

3 光纤通信发展的未来

为满足人类日益增长的信息交换的需要,人们一直在追求更大容量、更高速和更安全的通信方式,本文在这里将介绍光纤通信发展的一个新方向——量子通信。

目前的量子通信系统研究主要利用量子远程传态,量子远程传态就是通过量子信道发送和提取量子信息,其基本思想是将某个物体的信息分成经典信息和量子信息两部分,经典信息是发送者对原物进行某种测量而获得的,量子信息是发送者在测量中未提取的其余信息。接收者在获得这两种信息后就可以制造出原物的复制品。在传送过程中,原物并没有传给接收者,传送的只是原物的量子态,接收只是将别的物质单元的量子态变得与原物相同。在这个方案中,纠缠态的非定域性起至关重要的作用。实现量子通信的核心问题是制造量子纠缠态,并利用纠缠态在通信者之间传输。量子通信系统的基本部件包括量子态发生器、量子通道和量子测量装置。其原理如图7所示。处于 $|\phi\rangle_1$ 粒子1在 Alice 处,制备 EPR 粒子对(2,3),粒子2在 Alice 处,粒子3在 Bob 处。实现量子远程传态就是在 Alice 处粒子1本身不传送的情况下将其量子态传递给 Bob 处的粒子3,结果使3处于 $|\phi\rangle_3$ 态。对粒子对(1,2)进行 Bell 基的联合测量,导致粒子2和3关联性坍塌到一定的量子态。Alice 将 Bell 基的联合测量结果通过经典信号传递给 Bob, Bob 通过一定的么正变换将粒子3制备到粒子1的复制态 $|\phi\rangle_3$,这样便完成了通信过程。

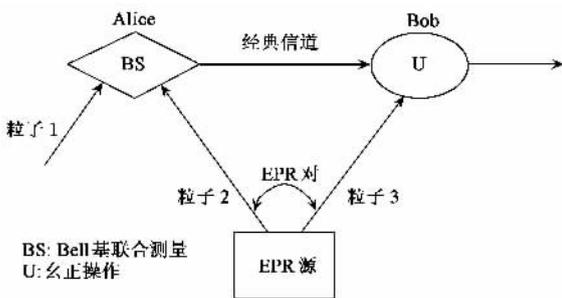


图7 量子远程传态原理

目前进行量子通信的方案中,纠缠态产生的理论和试验研究大都集中在单光子和单原子的有限维系统中,然而在量子通信中可利用无限维系统的连

续变化数纠缠态^[11]。近期人们提出利用孤子压缩态产生的纠缠态进行远程传态就属于连续变数的一种形式。这个方案不但便于和现有的通信系统集成,而且由于光纤中光孤子是超短光脉冲,强度大,可以利用量子相干仪得到高的可观测度。在经典通信中,孤子是光纤中一种稳定的传输模式,孤子与外界耦合作用小,具有很强的抗退相干的能力。因此利用孤子脉冲纠缠态可以在已有的光纤网中进行量子光纤通信。由于孤子可以放大,利用相位敏感放大器有可能对孤子压缩态进行放大,利用孤子压缩态可以进行远距离量子通信。

对孤子还可以利用偏振化处理,即利用两个孤子偏振压缩纠缠态进行量子通信^[12],它有可能集中前面两方法的优势而避免两方法的劣势。这方面另一个优点是可以将光量子态转变为原子量子态,有利于量子信息的传输与存储,以形成量子光纤通信系统。从理论分析这是可能的,但要在实验上完成还有很长的路要走。

量子光纤通信正以其独特的优势展现在人们面前。量子密码、量子远程传态和量子密集编码都显示出量子通信独特能力^[13]。量子通信单元为量子比特,理论指出, n 个量子比特传输的信息量可达到经典信息量的 2^n 倍,这显示出量子光纤通信一旦实现,带来的信息容量的增加是惊人的。量子态的不可克隆性和量子纠缠态的纠缠性使得任何的窃密行为都会马上被发现,它有可能提供绝对保密通信。量子通信的基础是量子力学的非定域性,因此量子通信的试验也是对量子力学基本原理的检验和应用。

量子通信的研究需要比常规通信研究更深的物理根底,目前在量子通信领域中进行研究的人员大多数是物理工作者,这说明量子通信的发展需要更深的物理基础。量子光纤通信研究目前正从理论研究逐步走向实验研究,并向实用化迈进。

总之,光纤通信和物理学之间的联系非常密切,光纤通信技术发展依赖于物理学发展,而光纤通信技术(特别是量子通信)的发展反过来也促进物理学某些领域的发展。只有具备较强的物理基础才有可能在光纤通信的研究中发挥出更大的创造性。

参 考 文 献

- [1] Kapron E P, Keck D B, Maurer R D. Appl. Phys. Lett., 1970, 17 : 423
- [2] Miya T, Terunma Y, Hosaka T, Miyashita T. Electron. Lett., 1979, 15 : 106
- [4] Desurvire E. Erbium - Doped Fiber Amplifiers. New York : Wiley, 1994

[5] Becket P C , Olsson N A , Simpson J R. Erbium - Doped Fiber Amplifiers : Fundamentals and Technology. San Diego : Academic Press , CA , 1999

[6] Fukuchi K *et al.* Anaheim : OFC 2001 , 2001 , paper PD 24

[7] Mamyshev P V , Chernikov S V. Opt. Lett. , 1990 , 15 : 1076

[8] Chernikov S V , Mamyshev P V. J. Opt. Soc. Am. , 1991 , B 8 : 1633

[9] Imajuku W Takada A. Electron. Lett. , 1997 , 33 : 2155

[10] Yuen H P. Opt. Lett. , 1992 , 17 : 73

[11] Bowen W P , Treps N , Schrabel R *et al.* J. Opt. B. Quantum Semiclass. , 2003 , 5 : s467

[12] Korolkova N , Lenchs Gerd , London R *et al.* Phy. Rev. , 2002 , A 65 : 52306

[13] Schumacher B. Phy. Rev. , 1995 , A 51 : 2738

封面说明

密度起伏、结构缺陷等空间不均匀性能导致介质中光的弹性散射. 弹性散射也会发生在非线性晶体中, 它作为信号光参与光参量过程, 并且在相位匹配的条件下有效地转换成新的频率, 强度也获得增强. 最近我们在 $\chi^{(2)}$ 非线性光子晶体中发现的锥形二次谐波就与这一过程有关. 实验采用的是一块“晶格参数”约为 $9\mu\text{m}$ 的六角极化的 $\chi^{(2)}$ 钽酸锂光子晶体, 当基波光沿着六角结构的对称方向传播时, 出射的锥形二次谐波投影在接收屏上呈现出轴对称或者镜像对称两种衍射光环. 随着基波频率的变化, 环的半径和颜色会发生相应的改变. 封面图展示了样品的显微结构和不同颜色的衍射环. 该结果从不同角度引起了人们的兴趣, 人们期待着能从光子晶体中发现更多有趣的物理效应. 详细的介绍请参阅 Phys. Rev. Lett. , 2004 , 93 : 133904.

(南京大学固体微结构国家重点实验室 徐平 季帅华 祝世宁)

· 书评和书讯 ·

科学出版社物理类新书推荐

书 名	作(译)者	定价	出版日期	发行号
相互作用的规范理论	戴元本	估计 ¥65.00	2005 年 6 月	0 - 2148
计算物理学	马文淦	¥37.00	2005 年 5 月	0 - 2147
计算电磁学要论	盛新庆	¥32.00	2005 年 3 月	0 - 1900
窄禁带半导体物理学	褚君浩	¥120.00	2005 年 5 月	0 - 2093
计算声学——声场的方程和波	李太宝	¥38.00	2005 年 1 月	0 - 2016
半导体量子器件物理	傅英 陆卫	¥50.00	2005 年 1 月	0 - 2004
磁层粒子动力学	徐荣兰	¥35.00	2005 年 1 月	0 - 1961
现代声学理论基础	马大猷	¥48.00	2005 年 1 月	0 - 1830
物理学家用微分几何(第二版)	侯伯元 侯伯宇	¥98.00	2005 年 3 月	0 - 1976
数学物理方程及其近似方法	程建春	¥58.00	2005 年 2 月	0 - 1952
随机振动的虚拟激励法	林家浩 张亚辉	¥45.00	2004 年 9 月	0 - 1889
准晶物理学	王仁卉	¥45.00	2004 年 8 月	0 - 1802
非平衡凝固新型金属材料	陈光 傅恒志	¥42.00	2004 年 8 月	0 - 2027
金属陶瓷薄膜及其在光电子技术中的应用	孙大明 孙兆奇	¥56.00	2004 年 7 月	0 - 1942
岩石力学	谢和平 陈忠辉	¥54.00	2004 年 5 月	0 - 1944
软 X 射线与极紫外辐射的原理和应用	张 杰	¥59.00	2003 年 9 月	0 - 1682
现代压电学(上中下)	张福学	¥99.00	2003 年 5 月	
拉曼布里渊散射——原理及应用	程光煦	¥48.00	2003 年 5 月	0 - 1301
应用力学对偶体系	钟万勰	¥42.00	2003 年 3 月	0 - 1542
广义相对论和引力场理论	胡 宁	¥15.00	2003 年 3 月	0 - 1157
激光的衍射及热作用计算	李俊昌	¥34.00	2003 年 3 月	0 - 1553
粉末衍射法测定晶体结构	梁敬魁	¥68.00	2003 年 4 月	0 - 1697

欢迎各界人士邮购科学出版社各类图书. 如果您有出版意向, 请和我们联系. 凡购书者均免邮费, 请按以下方式和我们联系:
 电 话 : 010 - 64017957 64033515 电子邮件 : mlhukai@ yahoo. com. cn 或 dpyan@ cspg. net
 通讯地址 : 北京东黄城根北街 16 号 科学出版社 邮政编码 : 100717 联系人 : 胡凯 鄢德平
 欢迎访问科学出版社网址 <http://www.sciencep.com>