

- 63(1989),1950.
- [4] K. M. Leung and Y. F. Liu, *Phys. Rev. Lett.*, **65** (1990),2645.
- [5] Z. Zhang and S. Satpathy, *Phys. Rev. Lett.*, **65** (1990),2650.
- [6] K. M. Ho, *Phys. Rev. Lett.*, **65**(1990),3152.
- [7] E. Jablonovitch and J. J. Gemitter, *Phys. Rev. Lett.*, **67**(1991),2295.
- [8] P. W. Anderson, *Phys. Rev.*, **109**(1958),1492.
- [9] Shanjin He and J. D. Maynard, *Phys. Rev. Lett.*, **57** (1986),3171.
- [10] Hao Wang, *Sci. Amer.*, No.11(1965),110.
- [11] M. Gardiner, *Sci. Amer.*, No.1(1977),110.
- [12] R. Penrose, *Bull. Inst. Math. Appl.*, **10**(1974), 110.
- [13] N. G. de Bruijn, *Ned. Akad. Wet. Proc. A*, **43** (1981),53.
- [14] A. Mackay, *Physica*, **A144**(1982),609.
- [15] D. Shechtman et al., *Phys. Rev. Lett.*, **53**(1984), 1951.
- [16] D. Levine and P. J. Steinhardt, *Phys. Rev. Lett.*, **53** (1984),2477.
- [17] J. M. Hammersley, in *Percolation Structures and Processes* (eds. G. Deutcher, R. Zallen and J. Adler) Adam Hilger, (1983),47.
- [18] B. J. Last and D. J. Thouless, *Phys. Rev. Lett.*, **27** (1971),1719.
- [19] B. P. Watson and P. L. Leath, *Phys. Rev. B*, **9** (1974),4893.
- [20] P. G. de Gennes, *Recherche*, **7**(1976),919.
- [21] P. G. de Gennes, *世界科学*, No.12(1979),30.
- [22] P. Bak, C. Tang and K. Wiesenfeld, *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987),381; *Phys. Rev. A*, **38**(1988),364.
- [23] G. A. Held et al., *Phys. Rev. Lett.*, **65**(1990), 1120.
- [24] S. R. Nagel, *Rev. Mod. Phys.*, **64**(1992),321.

光 子 学

于荣金

(中国科学院长春物理研究所, 长春 130021)

光子学(photonics)是一门与电子学(electronics)平行的科学. 简述电子学和光子学的诞生和发展, 重点介绍光纤通信、光纤、光计算、光盘和集成光路的状况、作用和发展前景, 强调了光子学的战略地位.

Abstract

Photonics is a science parallel to electronics. In this paper, the birth and progress of photonics and electronics are reviewed briefly. Especially, the status, significance and prospects of optical fiber communication, optical fibers, optical computing, optical disks and integrated optical circuits are introduced, with the emphasis on the strategic position of photonics.

一、电子学

电子学是研究并应用电子运动的, 包括其产生的方法, 支配着它的规律以及为实际应用而控制它的方法^[1]. 电子学诞生于 1883 年, Thomas Edison 发现在加热的灯丝和冷的金属电极之间的真空中有一股弱电流流过; 其后 John Ambrose Fleming 发明了把交流变为直

流的真空二极管整流器; 1906 年, Lee DeForest 发明了真空三极管, 构成了第一个电子放大器. 从本世纪 20 年代开始, 随着广播事业的发展, 形成了电子工业. 真空电子管器件曾经是这个工业的心脏, 并推动了无线电、雷达、电视、电信、电子控制设备、电子信息处理等迅速发展. 1948 年, 贝尔电话实验室的 William Shockley, Walter H. Brattain 和 John Bardeen 发明晶体管, 使以晶体管为基础的固体电子学得到大发

展. 1958—1959年,发明了半导体集成电路,它可将大量的二极管、晶体管、电阻、电容和电路互连元件集成在一块半导体单晶片上. 集成电路不仅使高速电子计算机得以实现,并且使电子工业和近代信息处理发生一次革命. 近30年来,半导体工业呈指数式上升,现在全世界年收入为300亿美元. 而电信、信息处理设备和航空航天控制系统的硬件市场,以及信息存储市场,全世界每年的销售额都达1000亿美元或1000亿美元以上,其中大部分是电子设备和电子技术.

二、光子学

光子学是随着1960年红宝石激光器的问世而诞生的. 光子学的定义有多种提法,我认为钱学森教授提出的“光子学是研究光子的产生、运动和转化的科学”^[2]比较合适. 如果再具体一点,可以说成“光子学是研究相干光的产生、放大、传导、控制和探测,以及把这些技术应用于能量产生、通信、信息处理等的一门科学”. 在光子学诞生以后的30多年的时间里,出现了He-Ne激光器、Ar离子激光器、He-Cd激光器、CO₂激光器、N₂激光器、铜蒸气激光器、Nd³⁺玻璃激光器、Nd³⁺:YAG激光器、色心激光器、半导体激光器、染料激光器、可调谐激光器、气动激光器、化学激光器、自由电子激光器、软X射线激光器、准分子激光器、Q-开关、超短激光脉冲产生、光混频、光学参量放大器、非线性光学、纤维光学、集成光学、激光光谱学、量子光学、全息光学等一系列新的光子器件和领域. 特别是1970年Corning(康宁)公司根据1966年高锟博士提出的理论,拉制出了第一根损耗为20dB/km的石英光纤,1962年半导体激光器的发明,以及1969年集成光学和集成光路的提出,都是光子学发展史上的里程碑,为光子学的发展和應用奠定了重要基础. 光纤在光子学中的作用,相当于电子学中的同轴电缆,应用于信息的传输;半导体激光器在光子学中的地位和作用,相当于电子学中的晶体管;而集成光路在

光子学中的地位和作用,则相当于电子学中的集成电路.

一些专家预言:“光子时代已经到来”,“光子技术将引起一场超过电子技术的产业革命”,并“将给工业和社会带来比电子技术更为巨大的冲击”.

光子技术对自然科学和技术科学,已产生深刻的影响. 现在的许多实验室里,就象离不开电子设备那样,几乎离不开各种激光器的使用. 由于激光的高功率、单色性、相干性、方向性、超短光脉冲(ps—fs)等特点,使激光成为研究原子、分子微观能态结构和瞬态动力学过程的有力探针,已经可以观察到原子如何碰撞以及如何发生化学反应. 现在软X波段的激光已经获得,预计不久,就能利用相干X射线激光,进行X射线的全息实验,“看到”物质的电子结构,特别是生物化学分子的结构. 利用激光,已经实现了催化和选择光化反应;利用激光,使光谱分辨力提高一百万倍以上;利用激光,已经可以用光在一定时间内所经过的距离代替光的波长,作为空间长度的基准.

光子作为能量载体,应用于能量产生方面,已为开发新能源提供了一条可能的途径. 激光分离铀同位素已从实验室试验阶段进入工程应用阶段,预计90年代将成为正式生产设施. 惯性约束途径的激光核聚变,已预计到能形成核聚变点燃的脉冲能量阈值大约为 2×10^6 J,因此美国准备90年代建立输出能量达 1×10^7 J的核聚变装置,为下一世纪的核聚变能源作技术储备. 利用激光进行切割、焊接、打孔、微加工、热处理等激光加工,这是除了信息和通信以外,激光应用的最大市场. 1989年,全世界激光加工系统的产值已达9.8亿美元. 激光在常规武器中已获得广泛应用,并正在发展定向能激光武器. 激光在医学中的应用范围越来越广,几乎遍及各科,1984年的激光医疗设备销售额就达3.3亿美元.

光子技术最重要的应用,是把光子作为信息载体,用于信息传输(通信)、信息处理(光计算)等信息领域.

三、光纤通信和光纤

在通信领域,为了最大限度地扩展通信容量,科学家一直在追求对高频电磁波的利用.有了波长比最短的无线电波(微波)还要短四个数量级的相干光波,就可实现通信容量的巨增.因此激光出现之后,光通信立即成为一个很重要的研究目标.

光纤通信是60年代提出,70年代发展起来的一项重要技术,已使通信领域发生一次革命性变革.它有容量大、中继距离长、重量轻、体积小、线路铺设和维修的费用低、节约有色金属和能源等优点,同时它还具有保密性好、可靠性高、抗电磁干扰等特点,因此经过研究、开发、大量现场试验和并网试用,从80年代开始,光纤通信已在世界范围进入大规模应用阶段.例如,铺设了横跨大西洋、太平洋的海底光缆,建立全国性的光纤通信干线,建立“光纤化城市”,甚至将光纤引入家庭…….许多国家宣布今后新建通信干线,不再采用同轴电缆,而直接采用光缆.到1987年止,世界上已敷设的光纤总长为 453.5×10^4 km.电话从发明到应用花了60年左右时间,光纤通信从1970年研制成功第一根低损耗光纤到1976年美国亚特兰大实验系统的试用,只用了短短几年工夫.经过一、二十年的努力,其发展速度之快,应用规模之大,在技术发展史上是很少见的.值得进一步指出的是,从发展角度看,这些还只是光纤通信的前期,潜力很大,虽然已崭露头角,但还会有很大的发展.目前,光纤通信传输速率 ~ 10 Gb/s,中继距离上百公里,传输速率为1.7Gb/s的光纤通信系统已投入商业服务.人们还在继续为增加传输容量、延长中继距离而努力,其中包括发展光学时分复用和波(频)分复用、研制超长波长红外光纤、采用集成光学(或集成光电)元件、开发相干光通信系统和光纤孤子通信技术等.现在光纤通信使用的是光强度调制和直接检测,而相干光通信使用的是相位调制和光外差探测.在相干光通信中,载波光波与本地振荡光波混

物理

合产生拍频(中频),拍频后进行光的检测.拍频检测后的中频(无线电频率)便于放大、滤波和提高信噪比,从而增加传输距离,也可以使用性能比光滤波更高的电滤波器得到更多的频分复用.因而,相干光通信系统的最终开发成功,可以使一根光纤中复用的信道达上万路,中继距离可再延长几十公里至近百公里.光纤孤子通信是一种非线性通信方案.一个强的光脉冲在具有负色散的光纤中传输时,一方面,群速度色散对光脉冲产生展宽;另一方面,非线性效应(自相位调制效应)对光脉冲产生压缩.如果这两种效应达到平衡,就形成孤子传输.光纤孤子通信就是利用孤子脉冲作为信息载体,因为孤子脉冲在光纤中传输时形状保持不变,所以可提高通信容量.采用适当方式补偿孤子在光纤中传输所造成的能量损失,就可以使传输距离非常之长.1991年,在10Gb/s下,光纤孤子通信的传输距离已突破10000km.

当今社会,要求传输的信息量与日俱增.单纯话音通信的电话正进入可视电话;电视在欧洲和日本已把625线标准分别改为1250线和1125线标准的高清晰度电视(HDTV).HDTV将通过提供具有更高清晰度、大屏幕和数字立体声伴音的数字化图像而最终取代现行电视.今后,甚至需要建立国际间的宽带综合业务数字网(BISDN).而光纤通信的巨大潜力,完全可以适应这种需求,并使今后的社会生产方式和生活方式发生深刻变化.如果今后普及了有视频终端的通信设施,将减少人们的直接接触和外出公差,甚至类似于1984年在日本东京召开的由美国、英国、日本、加拿大和澳大利亚五国在本国就可参加的世界第一次国际学术电视会议——远距离彩色映像通信会议,将变成国际会议的一种普通组织形式.

世界光纤通信的需求,1980年为2.7亿美元,1987年为21亿美元,1990年增至65亿美元,2000年将超过400亿美元,成为一个大产业.

光导纤维和光导纤维技术是本世纪50年代发展起来的,其用途十分广泛,除上述主要作

为光纤通信的光缆以外,由光纤构成的各种元件,如光纤面板、微通道板、光纤传光束和传像束等已发展成熟,并成功地用于微光夜视仪、X-射线光像增强器、工业内窥镜、医用内窥镜和安全监测系统. 光纤制导已成为加强现代军事装备的关键技术之一. 各种光纤传感器不断涌现,产量每年以 40% 的年增长率增加,1992 年的产值达 8.7 亿美元. 用变折射率光纤制作的变折射率透镜,可用作微小型光学系统的成像、聚焦和耦合元件. 光纤还可与各种光源相结合,用于商业广告、铁路、公路、隧道、机场、家庭装饰等场所,使人们的生活更加丰富多彩. 各处不同材料、不同结构、不同功能的光纤〔单模光纤、多模光纤、阶跃折射率光纤、梯度折射率光纤、零色散频移光纤、色散平坦化光纤、线性(或圆、椭圆)双折射光纤、石英光纤、塑料光纤、卤化物光纤、晶体光纤、有源光纤、非线性光纤、各种特殊敏感性能光纤等〕层出不穷,其功能和应用领域不断扩大. 光纤将不仅用于光能和光信息的传输,并且可以做成各种有源器件,如光纤激光器、光纤放大器、光纤倍频器等. 掺铒光纤放大器为光纤通信系统提供了一种十分重要的器件,1990 年 1 月,日本 NTT 报道采用 25 个掺铒光纤放大器做了 2.5Gb/s、2200km 的相干传输实验. 掺铒光纤放大器在未来光纤通信系统中的应用,将引起光通信系统一次新的革命.

现在生产光缆的工厂,全世界已有二百多家,每年生产光纤数百万公里,1989 年,世界光纤市场为 5 亿美元. 因此光纤对国民经济、科学技术、国防和人类生活正产生日益重要的作用. 由于光纤的特点、应用广泛和巨大的潜力,美国国防部已把光纤技术选定为 22 项关键技术之一,仅 1990 年就投资近 2000 万美元. 在全世界,已形成一场“光纤热”.

四、光计算机和集成光路

光计算机是正在探索和发展中的一个重大技术课题. 多种光信息处理系统和光学模拟运算已经实现,并成功地获得应用. 其中,综合孔

径雷达和光学图像去模糊,是应用中最成功的两个例子. 用光学方法处理图形、抽取特征信息,准确度可能比较差,但是它具有整个图形整体处理的特点,速度极高. 光学对图形处理的这种能力,可以用来构成电子数字计算机与光学模拟计算机相结合的混合系统. 在数字化光计算机的研制方面,也取得了重要进展. 1990 年 1 月 29 日,贝尔实验室报道了世界上第一台数字光处理器,处理器由激光器、透镜和棱镜等组成. 光处理器的运算程序安排在硬件里,光处理器的核心部件是对称自电光效应器件(S-SEED),光开关的速度可达每秒 10 亿次,开关能 $\sim 1\text{pJ}$. 尽管这台数字光处理器的运算速度只有每秒 100 万次,但是不久就可能制造出每秒运算几亿次的光计算机. 因此,这台实验型数字光处理器的研制成功,是向实用化光计算机迈出的重要一步. 下一代计算机的目标之一,是研究具有识别、推理、联想等人工智能特点的计算机. 光学人工智能的研究已经起步,1982 年美国 Hopfield 提出了一种神经网络的物理模型,并在光学模拟系统中得到了实现,由此还激发人们对这种模型的继续改进和深入探索. 光子学在计算机方面肯定可以作出重要的贡献. 因为,光子和电子不同,光子属于玻色子,不带电荷,不容易发生相互作用,因此光束可以相互交叉通过而不会相互影响,具有平行处理的能力;光子在真空中的速度为光速,不受 RC 时间常数的限制. 光子的这些特点恰好为解决目前电子计算机的互连带宽、时钟歪斜和冯·诺依曼“瓶颈”等限制提供了一条可以选择的途径. 光子学可以在自己最能发挥长处以及关键的地方(互连、并行处理、逻辑运算、存储等方面),逐步取代电子元件,构成光计算机.

例如,在解决日益“泛滥”的信息存储方面,光盘以其数据存储密度高、可靠性好、误码率低、能同时存储信息的类型多、适应性好、便于计算机处理和查询、可进网实现资源共享、也可个人拥有、价格低廉、复制方便等特点,倍受人们的重视. 仅就美国来说,1990 年前,光盘的销售额就达 45 亿美元. 1989 年,5.25 英寸可擦除

光盘已在市场上大量销售,预计到1993年可普及可擦除的大容量光盘存储器,并逐步在各种信息存储器中形成优势,成为20世纪继汽车、电视和微型计算机之后的又一个重要发明。

无论是光纤通信系统、光计算机,还是其他光信息处理系统、光传感系统等,如果采用离散的大块光学元件,则光学系统在稳定性、可靠性、体积、重量、功耗、成本等方面,都不能满足实际的需求,因此光子元件必须像电子元件一样,走小型化和集成化的道路,集成光路是发展的必由之路^[2]。光纤通信从多模系统进入单模大容量系统之后,为了优化系统,从试验线路直到许多长途通信干线,都在逐步采用集成光学元件和回路(或集成光电回路),其中用得最多的就是分布反馈(DFB)半导体激光器。光集成和光电集成的器件,将在今后各种光通信系统中起重要甚至关键的作用。光计算机目前还在多途径及不断的探索之中,一旦采用的功能元件、算法、体系结构等确定之后,像电子计算机那样,必然会采用不同集成度的集成光路和集成光电回路。现在,在一个衬底上,已能集成各种不同功能的光子元件和电子元件,并且有的已达到相当高的集成度。例如,在不到 1cm^2 的GaAs衬底上,已集成了一百多万个电泵浦直立腔表面发射微型激光器,器件密度 $\sim 2 \times 10^6$ 个/ cm^2 。鉴于集成光路和集成光学的重要性,它已成为发达国家优先发展的领域,美国国防部已把集成光学技术列为22项关键技术之一,仅1990年就投资2500万美元。

世界新的技术革命,正在使一些发达国家从工业社会步入信息社会。所谓信息社会,主要是在社会生产和生活中极广泛地应用现代化通信、计算机和终端设备相结合的技术。从以上介绍的情况可以看出,过去和现在,电子学、电子

器件和设备、电子技术在信息领域占有主导地位,起了重要作用;而今后,从光纤通信、光纤、光计算机、光盘、集成光路等方面可以得知,光子学、光子器件和设备、光子技术将是推动今后信息时代发展的主要动力,它在今后的信息时代将占有越来越重要的地位。

光子学是继电子学之后正在迅速发展中的一个极其重要的前沿科学,关系到信息社会的进程,也关系到国防、科学、生产和生活的发展水平。因此,当前我国在抓电子信息技术应用的同时,要不失时机地抓住光子信息技术的发展。

现在许多高技术产品,往往都是光、机、电、算结合的产物。光子学与电子学、光子器件与电子器件、光子技术与电子技术、光子工业与电子工业之间更是存在着相互依存、相互补充、相互渗透和相互促进的关系。光电结合有着非常广阔的前景,正如王大珩教授指出的:“如果说光有 a 种特殊功能,电有 b 种特殊功能,当把光和电结合使用时,其综合功能不是 $a+b$ 种,而是 $a \times b$ 种,这就大大增加了应用途径。”^[4]

近30年来,光电子技术产业有很大发展,其发展速度相当于计算机产业初期发展的速度。1989年,全世界光电子产业规模已达450亿美元,预计1995年将达到700亿美元,2000年将进一步达到1030亿美元。光纤通信系统、光打印机、光存储系统的应用是促使光电子产业发展的三大因素。光子元件和光电子元件的集成化是光子元件和光电子元件的发展方向,它将从根本上改变电信技术、计算机、测量技术和消费类电子系统的状况。

- [1] D. G. 芬克著,陈捷译,科学技术百科全书,23卷,电子工程学,科学出版社,(1979),104.
- [2] 钱学森,激光,6-1(1979),1.
- [3] 于荣金,科学通报,19-6(1974),244.
- [4] 王大珩,激光与红外,20-3(1990),1.