

* 学科发展 *

光子学的发展对当代信息技术的影响^{*}

干福熹

(上海光学精密机械研究所 上海 201800)

摘要 文章介绍了光子学在通信、存储、信息处理和计算中的应用,论述了光子学的开拓对信息技术发展的深远影响,指出了从电子信息时代、光电子信息时代向光子信息时代发展的趋势。

关键词 光子学,信息技术

早期的光学主要研究物质的宏观光学特性,如光的折射、反射、衍射、成像和照明等,较少研究其微观的物理原因。随着本世纪 60 年代初激光的出现,人们着重于研究光子与物质相互作用、光子的本质,以及光子的产生、传播、探测等微观机制。本世纪下半叶光学向光子学方向的开拓,十分类似于本世纪上半叶电学向电子学的开拓,其科学及技术意义都十分深远。

本世纪以来,信息工程依靠电子学和微电子学技术,如通信是从无线电到微波,存储是从磁芯到半导体集成,运算发展是从电子管到大规模集成电路的电子计算机等等,所以,目前谈到信息技术都称为电子信息技术。从技术特征而言,我们正处于电子信息时代,其特征为信息的载体是电子。

光子学(photonics)从最早的定义(“光子学是以光子作为信息载体的一门系统性科学”,1970 年第九届国际高速摄影会议提出)就已紧密地与信息科学技术联系在一起了。当代社会和经济发展中,信息的容量剧增,随着高容量和高速度的信息发展,电子学(electronics)和微电子学(microelectronics)显出局限性。由于光子的速度比电子速度要快得多,光的频率比无线电的频率高得多,为提高传播速度和载波密度,由电子到光子是发展的必然趋势,它会使信息技术的发展产生突破。目前,信息的探测、传输、存储、显示、运算和处理已由光子和电子共同参与来完成,所产生的光电子学(optoelectronics)技术已应用在信息领域。今后将更注意光子的作用,继光电子学后,光子学技术正在崛起。如美国把“电子和光子材料”、“微电子学和光电子学”列为国家关键技术,认为“光子学在国家安全与经济竞争方面有着深远的意义和潜力”,“通信和计算机研究与发展的未来属于光子学领域。”从电子学到光电子学和光子学是跨世纪的发展。

• 中国科学院第九次院士大会学术交流报告
收稿日期:1998 年 6 月 4 日

1 光子学器件

光子学技术主要包含光子的产生、探测、传输、控制和处理,因而必须有相应的光子学器件。与电子学器件相比,光子学器件中光子的运动不受回路分布延迟的影响(一般为 10^{-9}s),光子在固体中传输速度为 10^{12}cm/s 左右,光子学器件的时间响应和单道超大容量要比电子学器件高得多,这对信息技术发展有很大的推动作用。

高密度高相干性的激光光源始终对光信息工程起重要作用,特别是半导体激光器。人们熟知,由于有了低阈值、低功耗、长寿命及快响应的半导体激光器,使光纤通信成为现实,并以 $0.8\mu\text{m}$, $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 的激光光源形成三个光通信的窗口。由于有高功率单模半导体激光器,才使光盘存储技术实用化,并且目前高密度光存储的发展以半导体激光波长的缩短(从 $0.8\mu\text{m}$ 到 $0.65\mu\text{m}$ 和 $0.5\mu\text{m}$)为标志,形成三代光盘存储技术。多量子阱器件、高密度垂直腔面发射器、量子级联器件、微腔辐射与微腔光子动力学器件的发展,可以不断降低激光阈值,提高激光转换效率与输出功率,扩展波段,改善模式,压缩线宽,实现激光光源的阵列化和集成化。

非线性波导光学的发展,探索弱光非线性效应和材料,特别是在低维和纳米材料中的光学非线性增强,可以研制出超高速光开关、空间光调制器、集成光子回路和光学双稳态器件等,人工微结构的光子晶体可以用来控制或定域光子态,由此制成光子控制器件。

模拟微电子集成器件,把不同功能的光子器件通过内部光波导互连,制成一个光子集成芯片,包括激光器与光子接受器、放大器、调制器和光开关等。目前光子集成器件主要应用各种电光效应,也离不开电的操作,因此实用的光子集成芯片必须配之相应的电子回路和成熟的微电子技术于终端处理,即大型的光电子集成系统。

2 光通信

把光子作为信息载体,是 20 世纪中的一个划时代变化,就是用光纤通信代替电缆和微波通信,简言之,信息的传输发生了本质性变革。光纤通信产业在国际上目前已有上百亿美元的年产值。在信息高速公路浪潮的推动下,高速公用通信网和数字数据网会很快发展,巨大的信息流多达 $1\,000\text{Gb/s}$,由此对光纤通讯在速度和容量上提出了更高要求。

本世纪 70 年代初由于低损耗的熔石英光纤和长寿命的半导体激光器的研制成功,使光通信成为可能。1978 年前一条 10 公里长的光纤,最高传输率为 1Gb/s ,称为第一代光纤通信;三年以后第二代光纤通信由于应用了单模光纤和处于熔石英光纤最低色散波长($1.3\mu\text{m}$)的半导体激光器和探测器,光信号可以在光纤内以均匀速度传播,传输容量增加了近 10 倍;第三代光纤通信由于应用熔石英光纤的最低损耗波长($1.55\mu\text{m}$),配上该波长的半导体激光器,使无中继传输距离和传输容量又有好几倍的提高。

在本世纪末期由于光子学技术的发展,产生了光学放大器,特别是半导体激光器光泵的掺铒的光纤放大器(EDFA),由于光信号的直接放大,放大率达到 30dB 以上,不受信号偏振方向的影响,有很好的保真度,很快达到实用价值。另一项有重大实用价值的光纤通信的突破是波分复用技术,即同一路光纤中传输若干个不同波长的光信号。用外调制的分布反馈激光器(DFB)达到高的信号传输率,用光纤宽带耦合器将 N 种波长的激光信号耦合入一条公用传输光纤,在信号终端用光纤光栅滤光器,分离出 N 个波长的载波激光,经检波器将信息解出。这

种波分复用技术,使信息传输率增加了 N 倍。在光子集成回路再加入宽增益频带的铒光纤放大器,就可以达到高传输容量(100Gb/s)和无中继长距离($>100\text{km}$)的光纤通信系统,可称为第四代光纤通信。

从传统的以光强度调制方式和直接检测方式的非相干光光纤通信改换成以相位调制方式和差分检测方式的相干光光纤通信,可使信号传递得更远。在相干光通信中需要有频率和相位十分稳定的激光光源。成功的相干光通信可使信息传递距离迈入 1 000 公里的纪元。在一条理想的光纤内,“孤立子”(soliton)可以无限远地传播。在光纤中孤立子的形状是由克尔效应和色散效应的补偿来保持。孤立子的强度衰减用光纤放大器来补偿。用皮秒(10^{-12})激光脉冲,使孤立子彼此间不相互重叠。在“零误码”情况下,孤立子可以在光纤中传递万里之远。孤立子传输中同样可以用波分复用技术来增大传递信息的容量。相干光通信和孤立子光通信是第五代光通信,是跨入下世纪的光纤通信。

3 光存储

20 世纪末兴起的光存储,特别是光盘存储技术,将对信息的存取产生重大影响。光盘存储技术是数字化存储和取出,与计算机直接连接。与磁存储相比较,它有存储容量大、寿命长、可替换、不易损坏等优点。近年来,在几次国际大容量数据存储会议上,对光存储和磁存储做了分析对比,一致认为在今后 15 年内是光盘和磁盘兼容的时期,到下世纪光盘存储有可能成为计算机等主要的存外设备。CD(compact disk)光盘系列和正在发展的 DVD(digital versatile disk)已成为多媒体技术的主要介质,也已形成上百亿美元产业。数字光盘存储技术正向更高存储密度和更高存取速度方向发展。最近蓝光半导体激光(GaN)有新的突破,适用于光盘存储读写用激光器将很快能实用化。因此,到下世纪,比现有存储密度高 10 倍(5 英寸光盘可存储 100 亿比特)和存取速度高 10 倍(每秒 1 亿比特)的可以擦除重写的光盘将获得应用。

随着光子学技术的进展,目前的热记录方式将向光子记录方式发展。下世纪的超高密度快速存储主要向以下几个方面发展:

(1)利用近场光学扫描显微镜(NSOM)进行超高密度信息存储。利用 NSOM 实现超高密度存储的关键在于实用化的少于光衍射极限的光点的产生及探测,光学头与记录介质间少于波长间距的控制,近场区域瞬逝光与各类存储介质相互作用下的存储机理。

(2)运用角度多功、波长多功、空间多功与移动多功等的全息存储代替聚焦光速逐点存取的方法,可以作为缓冲海量信息存储,存储密度可达到 $100\text{Gb}/\text{cm}^3$ 。关键在于探索对激光有快速响应和有长存储寿命的光子存储材料。

(3)发展三维存储技术,如光子引发的电子俘获三维存储光盘和光谱烧孔存储等高密度光存储。下世纪初有可能研制出使用次数达百万次的多层电子俘获三维光盘,能高速高密度地执行读、写、擦功能,实现能在室温下烧孔存储的光谱烧孔多维存储。

4 光信息处理和计算

随着科学和工程技术的不断复杂化,对计算技术提出了更高的要求。计算机向高速和智能化发展。运算的速度要高于 10 亿次浮点以上,但信号的传输速度还只为光速的 0.5%。新一代的电子计算机也依赖于并行的系统结构和适合于并行处理的软件。光学信息处理就充分发挥

了并列处理的优点,它有高速处理信息的能力。以图像为对象的光学信息处理已进行了多年工作,目前讲的全光计算机是用光学系统完成二维或多维的数据的数字计算,尚处于探索阶段。它利用众所周知的并列处理和高速处理的特点,使光在信息处理中发挥大容量和高速的优点。研制出高效低功耗的光子器件仍然是关键所在,在并列处理中首先要有面阵列的光子集成器件。高密度垂直腔面发射激光器(VCSEL)的光子集成回路是二维光信息实时处理和图形识别的关键器件。目前研制出的高密度对称反射式自电光效应(SR-SEED)无腔面的光双稳态开关集成面阵,可在光功耗极低($<10\text{fJ}/\mu\text{m}^2$)下对光信息进行多路和二维的处理,它为光逻辑运算打下基础,有可能研制出开关时间在纳秒、每秒亿次的光学数字处理器。

电子计算机向光学计算机发展中,有可能先经过光-电混合型,如应用光互连集成回路、若干光学开关和存储器以及光电转换元件,可以解决诸如电子计算机由于电路中不可避免的电阻和电容、电信号和传递速度受到 RC 弛豫时间的限制,以及“时钟歪斜”、互连拥挤、电子信号很容易自身干扰等问题。所以目前光互连集成回路不仅为光子芯片与光学逻辑元件之间的运行连接所必需,同时也在 VLSI 中作内联结。光学互连从光电混合型向全光型方向发展,前者较易于 VLSI 中作光互连,后者用可寻址的光源阵列、光学双稳态门阵列、全息衍射光栅和检测器阵列组成,并行通道达 10^6 数量级。进一步发展光学神经网络、光计算算法和结构及高密度交叉光互连等技术,逐步发展成全光数字计算机。

光子学是近代光学的新开拓,是继电子学、光电子学之后的新兴学科。20 世纪我们主要处于电子信息时代,光电子学信息是跨世纪的,21 世纪将进入光子信息时代。它标志着将实现 Tb(10^{12} bits)容量和 Tb/s 超大信息流的传递、存储、处理和运算。光子、光电子和微电子技术的结合,将在下世纪产生更高水平的信息技术。

参考文献

- 1 张光寅. 光学向光子学的开拓及其意义. 中国科学基金, 1993, 1: 33.
- 2 干福熹. 光子信息时代即将到来. 世界科学, 1994, 9: 16.
- 3 王启明. 半导体集成光子学的研究与进展. 自然科学进展, 1997, 7: 136.
- 4 干福熹. 光子学材料及其发展. 浙江大学百年校庆两院院士科学报告会论文集, 1997: 80—88.