

电子技术向光子技术的进化

THE EVOLUTION FROM ELECTRONICS TO PHOTONICS

张 煦

1、引 言

在当今新技术革命的浪潮中,人们普遍感觉到信息时代的来临,政治、经济、文化、生活大量需要高度便利的通信。人们盼望信息服务多样化(语音、数据、图象),不受地理限制(市内、长途、国际),还要求小(设备轻小)、快(传递迅速)、省(资费低廉)。不仅要求人与人的相互通信,还要求人与计算机,以及无人干预的计算机与计算机间的相互通信;不仅要求点与点之间通信,还要求点与多点之间的通信(网、会议、广播)。信息容量不断加大,运行速率不断加快,现代通信技术的顺利发展,得力于电子技术的进步。尤其是近一二十年来,电子技术飞跃猛进,对通信和信息的传输、交换和处理都有巨大贡献,并且仍在继续发挥作用。然而,在小、快、省三项要求上,电子技术也有它不可超越的理论限度,不能期望它永无止境地飞跃。与此相应,光子技术及时出现了。光纤通信之所以成为新技术革命主要支柱之一,原因就在于光子技术的优越性。光纤通信的成功,标志着光子技术发展的开端,也代表电子技术向光子技术的进化。可以有把握地说,如继续探索研究光子技术,它必然有广阔的发展前景。

2、电子技术的飞跃和限度

1906年,真空管的发明,标志着电子技术的创始,后来人们称它为电子管。确实,从二三十年代起,电子管在通信中曾发挥过了不起的作用。然

而,到1947年,半导体三极管的发明才真正揭开电子技术的奥秘,后来称为晶体管。从60年代起,晶体管被广泛应用于模拟多路载波通信,后来制成同轴电缆10 800路宽带系统,这是模拟有线通信的最好成绩。更重要的是,晶体管促进了数字有线通信的开创。这时,数字电子学兴起,逻辑门电路的应用得到推广。后来的发展表明,数字通信有较大的优越性,甚至有替代模拟通信的趋势。晶体管的成功,不仅促使通信技术的改观,并且扩大了其应用范围,特别是导致了电子计算机的问世。而且,由于材料、工艺、设计的不断改进,从分立的晶体管器件进一步实现了集成电路。

利用半导体硅由晶体管制成集成电路(IC),是电子技术一个有深远影响的重大跃进,人们称之为微电子技术。最初的集成电路,在60年代属于小规模集成(SSI),每片仅能集成10个晶体管等元器件,线条宽度约10微米;70年代属于中规模集成(MSI),每片集成1 000个晶体管等元器件,线宽5微米;80年代达到大规模集成(LSI)和超大规模集成(VLSI),集成度增至10 000个和更多个晶体管等元器件,线宽减至3~1微米或更细。集成电路的集成度以成倍的速度迅速增长,而成本又成倍地降低。这样的跃进速度,大大促进了数字通信的飞速发展,也大大促进了计算机和数字信号处理的飞速发展。虽然下一步还会出现更大的进展,例如超高速大规模集成(UHSI),甚至进入分子电子学领域,还可能从单晶半导体硅转至III-V化合半导体砷化钾,以获取更快的运行速率,但现阶段,大家公认微电子技术VLSI是当今新技

术革命最基本的重要支柱,它是电子技术进展中引人注目的高峰。有了它,才能建成更好的电子计算机、信号处理和通信交换系统,才能迎接信息

时代的来临。

硅集成片虽已达到VLSI阶段,但仍在继续改进工艺和增加电路复杂性,以期达到性能更好、耗电更少、成品率更高等效果。在这时,必然面对一些带根本性的问题。每块硅片的集成度和运行速率有没有限度呢?这些限度也就是电子技术的限度,很重要,必须作出合理的解答。讲到集成度,应该一方面考虑每一芯片上的晶体管元器件数,另一方面考虑每一芯片上连接元器件的导线数。根据对实际晶体管的最小可能尺寸和实际集成片的最大容许尺寸的测算,每一集成片最多可容纳1亿个晶体管元器件,这就是硅芯片集成度的限度。按照目前的进展速度,估计最多10年时间就可达到这限度。

集成片的运行速率也是很重要的问题。大家都知道,硅不是运行速率最快的材料。III-V化合半导体,例如GaAs的电子运动速率比硅快,理论估测也许快2~5倍。所以,目前已有倾向采用GaAs替代硅来实现更快速率的集成片。采用GaAs,还可能形成三维结构,电路元器件排列在叠积的几层,不象硅那样只用一个表面。但是,现阶段还有待于研究改进工艺。还有,在集成电路中,电子信号通过导线从一个元器件传输至另一元器件,其传输速率受到导线电阻电容乘积的限制。导线缩短后仍有限制。在高频率又受到电感的限制。总之,集成电路,特别是其中的导线,对电子运动速率有一定的限度。

近来超导体的研究进展很快,一旦在室温下的超导材料能够真正实现,并能制成薄膜,在集成芯片上应用,那就有可能克服现时导线带宽限制的缺点,使芯片的运行速率显著加快。可以预见,这样就会扩展电子技术的应用历程和范围,对VLSI、通信、计算机和信息处理都将有很大影响。届时,导线限制速率的缺点就不再存在了。

3、光子技术的开端和趋向

电子与光子有一定的相似性,两者都能把信息从一地传送至另一地,而且有些器件能把电子的能量转换至光子或相反。然而,光子与电子有重要的区别。电子是有电荷的粒子,通过它们的电荷和磁场,很容易发生交互作用。导线中电子流动多,两根邻近导线传送电流,将产生不良电磁串扰。导线有电阻、电容、甚至电感,它们不可避免地要限制传输带宽。光子没有电荷,不容易发

生交互作用。在高纯玻璃纤维中,光波传播就是光子传播,光纤作为光波导(相当于光导线),光子载荷信息从一点传播至另一点,损耗很小,色散也小。另外,在集成芯片上,光子可以沿波导传播。光在两根靠近的玻璃纤维或集成波导中各自传输,不会产生电磁串扰。光通过纤维或波导传输,不象电导线那样由电阻、电容或电感限制带宽。

由于光在电磁谱中所占频率(例如100太赫)比无线电通信频率(例如10吉赫)高得多(10 000倍),光子通信的潜在传输带宽或载荷信息容量比电子通信要大得多。更突出的是:光子不一定要有了纤维或波导才能从一点传播至另一点,它也能在空间自由行进。一个光束可以穿越另一光束,不致发生显著影响,或者没有影响。光子不仅能把信息从一点传播至另一点,也可能从一点传播至许多点或者从许多点聚焦至一点。这样,一列激光管发出的光可以传给一列检测管接收,在二维平面上并行传输。但是,正由于光子间没有交互作用,不容易导致光束发生开关作用,目前还未能制成光的三极晶体管,这是令人遗憾之处,但不少研究工作者近年来正在努力想办法,估计在不久的将来会有所突破。

从大约20年前至今,最主要的光子材料可以分为三类:其一是超纯玻璃制成的光纤,用作光子的传播媒质;其二是III-V半导体制成的激光管和检测管,用于电子至光子或相反的转换;其三是非线性光子材料,制成控制器件,用作光子逻辑开关。显然,前两种材料使光纤通信的传输系统得以成功地实现,如后一种非线性材料研制成功,将不仅应用于通信,还打开了光计算机、光子交换和光信号处理等新技术领域的大门,有广阔发展前途。

(1)光纤材料得力于石英玻璃的提纯,克服玻璃对光的吸收。据说,从最早使用玻璃至本世纪中叶约4 500年期间,玻璃吸收所引起的光损耗降低了1万倍,使制成的透镜具有较好的透明度。在过去20年中,玻璃达到了真正的超纯,使光损耗又降低1万倍,以致16公里厚的这种超纯玻璃比2.5厘米厚的普通玻璃窗透明度还要好。

现在常用光纤的内部纤芯直径约7微米,外加包层直径125微米。它们本来都是二氧化硅(SiO_2),俗称石英,但纤芯掺锗,包层掺氟,使纤芯的折射率稍高于包层的折射率,约为0.005,以致光只能在纤芯中传播。其传播机理一般用射线或模式理论来说明。对于纤芯直径7微米的光纤,入射光只有一个路程或一条射线在纤芯内传播,这就称为单模光纤。如纤芯直径为50微米,入射光就可能有許多条射线同时在纤芯中传播,称为多

模光纤。多模光纤纤芯径向折射率分布为抛物线渐变式,故射线近于正弦波自聚焦的形状。

这种以石英为基的光纤,最适宜于在波长0.8至1.6微米范围内工作,对其中两个波段光纤损耗特低,即短波长0.85微米损耗为2.7分贝/公里,长波长1.3微米为0.36分贝/公里,1.55微米为0.20分贝/公里。在对最低损耗波长1.55微米,光纤如经过进一步提炼,可能将本征损耗减至0.1分贝/公里。同时,常规单模光纤在1.3微米的色散近于零。如采取特殊的折射率分布设计,零色散波长可移至1.55微米附近。图1示石英单模光纤在长波长的损耗一波谱和色散一波谱特性,这表明,单模光纤的潜在容量极大。目前已证实,传输1~2吉位/秒数字信号可远达200公里,不需中继机;而同轴电缆只能传输400兆位/秒,每隔1.6公里就须设置中继机。两者比较,光纤传输距离比同轴电缆长两个数量级。这意味着,未来信息时代的通信网,长波长单模光纤肯定要淘汰同轴电缆,成为最理想的信号传输媒质。这也是电子技术向光子技术进化的重要第一步。

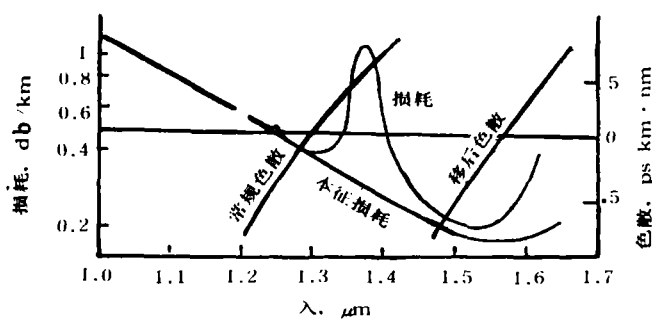


图1

人们还在继续发掘光纤材料,例如非石英的、利用氟化物制成的中红外光纤,在波长2~5微米工作,理论上损耗可能小至0.001分贝/公里。一旦这种超低损耗的光纤研制成功,它们不仅可用于长途海底通信,还可能有效地应用在其他许多领域,例如传感器、医疗都有广阔的应用前途。

(2) 现时的光纤通信系统是光子与电子联合运用的系统,发送端需有将电子转换为光子的光源器件;接收端需有将光子转回为电子的光检测器件。这两种器件都属于光子器件的范畴,实际通信中采用半导体,特别是III-V半导体材料。对于短波长0.85微米,光源用GaAlAs,光检测用Si;对长波长1.3~1.55微米,光源和光检测都用InGaAsP,少数光检测用Ge。

在二元III-V化合的半导体,GaAs或InP,复合产生的能量相当于光子能量。带隙宽度决定光的波长,这就有可能制成发光管LED和激光管

LD两种光源器件。

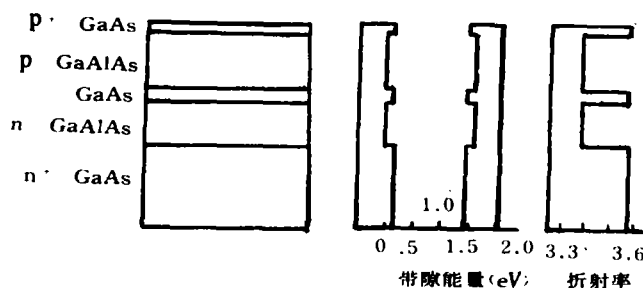


图2

图2示激光管的结构设计,它利用液相外延法生长几层不同成分和不同掺杂的半导体,发出光的是活动层GaAs,靠紧它的上下两层分别是p型和n型掺杂的GaAlAs,故称双异质结,其目的是局部带电的载流子和发出的光。由图的右部可见,两层GaAlAs具有较大的带隙能量,使进入活动层的电子和空穴不再离去。活动层GaAs的折射率比邻近两层GaAlAs的高,使发出的光被包围在活动层内,这好象光纤传播的光被包围在纤芯中一样。

光纤通信所用长波长激光管现时仍为研究改进的目标,特别集中于1.55微米波长使用的单频激光管。然而,为了适合相干光纤通信的要求,特别对移相键控(PSK)的相干通信,单频激光管的发射谱线宽度必须显著地缩窄,还要克服相位噪声和频率抖动(Chirp)等问题。显然,具备这样完善性能的单频激光管,需要高超的光子技术才能制成。

与上述光源器件情况相反,当光子入射半导体时,如它的能量大于带隙能量,就产生电子和空穴,它们在外加电压影响下,将向相反方向移动,形成电流,这就是半导体光检测器件实现光子转换为电子的作用。

为了实现设备小型化,改善性能和提高可靠性,上述光源器件LD或LED和它们的驱动电路,光检测器件PIN或APD和预放大器FET及主放大器电路,希望能够各制成集成片。由于这是光子器件与电子器件集成在同一芯片上,故称光电子集成(OEIC)。这当然比微电子的IC又进了一步,衬底可能仍是Si,但更可能是III-V半导体GaAs或InP,加工工艺也将复杂得多。事实上,OEIC正是当前光纤通信研究工作者努力攻关和亟待解决的主要项目之一。可以认为,微电子技术正在向光电子技术(opto-electronics)进化。

(3) 上面讲的光纤和光源、光检测器件组成新的光通信系统。但光子器件应该不仅限于传播光

和产生光的器件,还要有能起调制或开关作用,象电子三极晶体管那样的光子晶体管。只有这样,才能装配成全光子整机和系统,进入光子技术时代。

实验研究表明,有些III-V半导体多量子井MQW结构对光信号呈现非线性响应。这是极其重要的、带有突破性的现象。对于这种材料,输入光强较小时,输出光强保持很小,但当输入光强增加到一定的门限值时,输出光强几乎突然增加至饱和值。由此可见,输入的光有保持光和开关光。保持光的功率调整到稍低于门限值,过了这门限值,输出光就很快上升。如将小量的开关光加入保持光,就把输入光功率推至稍大于门限值,使开关光得到有效的放大作用。到了某一值,输出光功率达到饱和状态。这表明,输出从原来的“0”态过渡至“1”态。

4、光子数字计算机的发展前景

光子技术与计算机有四个层次的关系。最高层次是若干部计算机之间的相互通信,为了实现高码速的数据传输和延长传输距离,利用光纤作为传输线路。近几年来,光纤局部地区网(LAN)特别受到重视,正在蓬勃发展。

第二层次是在一部计算机的内部,采用电子逻辑元器件,但用光进行连接,即电子与光子混合运用。例如从处理器至存储器,从处理器至处理器等等,可能利用光通信,但不一定用光纤,而是由光通过自由空间传输。第五代计算机的内部有可能采用光的数据总线,也可能利用 32×32 纵横光开关,横的一行有32个激光管(LD),垂直的一列有32个雪崩管(APD),构成二维阵列。当一个组件发出信息时,LD发出的光通过凸镜射向所有的APD,使所有的处理器与存储器并行地立刻同时收到。就是说,每一LD发出的光射向阵列中32个开关的整个一列的APD,而每一APD收到整个一行LD发出的光。

第三层次是一块板与另一块板之间,或同一板上的一块集成芯片与另一块集成芯片之间的连接。现在长途通信程控交换的计算机中,已有应用光纤光缆连接各电子电路板的。光纤使信号从一个VLSI芯片通往另一VLSI芯片,既可以是在一块印制电路板的面上沿水平方向连通,又可以从上一块板至下一块板沿垂直方向连通。用了光连接,可以充分发挥快速电子逻辑的潜在能力。也可考虑利用全息光元件使两块芯片之间连通,这是光信号在自由空间传输,信号带宽可以很大。最常用的全息是利用两条相干激光束射向照

相膜片而不用透镜。

最小规模的层次是在一块集成芯片上,用光子来使电子运动定时。大多数集成电路是同步的,利用时钟发出的电子脉冲作为芯片上全部元器件的定时参数。芯片上用金属导线连接各元器件,由于导线长短不同,时钟脉冲到达逻辑门的时间不同。这样参差不齐的输入可能发生错误输出。为了克服这种缺点,一般是限制导线长度,例如限于15厘米,并对短线加进时延。然而这将削弱发挥快速电子逻辑的优点。较好的办法是使用LD产生光的钟信号,射往集成片上适当位置的若干个APD,它们产生的光电流分送至附近的电子元器件,这就缩短了定时电子脉冲的传输距离。

有人设想超大型数字计算机采用全光式,无需连续将能量和信息从电子转换至光子和从光子转换至电子。电子与光子的转换过程,不免要散发热量,降低效率和提高成本。如果自始至终保持光子能量的运用,可以获得最高效率和最快速度。而且,光可以并行传输,这样连接较易,带宽较大,优于电子并联计算机。光子晶体管和光子逻辑门所需的开关能量并不大于由晶体管构成的电子逻辑门。

有一种全光数字计算机,利用量子井包络状态过渡(QWEST)制成光逻辑门代替电子逻辑门,又利用集成光路工艺制成平面波导,代替电子集成片上的导线,这就使光子数字计算机与电子数字计算机具有相同结构。但是,集成片上电子导线可以直角转弯,而波长0.8微米的光波导必须圆滑转角,以免光泄漏损失。为此,有人设想激光器改用CO₂式,波长10微米,再采用高折射率Ge的棱镜,就可能制成直角转弯。但在波长10微米的情况下,GaAs中波长约为3微米,光波导的宽度必须小于 $2 \sim 2.5$ 微米。进一步设想是采用二维阵列开关,使光并行传送,更好地发挥光子的长处。

5、结 语

人们正面临信息时代的到来,数字通信的信息容量急剧上升,数字计算机的运行速率需要不断加快。电子技术的VLSI确实发挥了巨大作用,但超纯玻璃和III-V半导体两种光子材料的脱颖而出和迅速发展,使光纤通信成功地代替了传统的电缆导线,打开了新兴光子技术的大门。人们不仅集中力量于光电子集成(OEIC)的研制,还致力于分子束外延(MBE)制造多量子井(MQW),以及非线性光子材料,期望光子晶体管、光计算机、光子交换和光信号处理的研究工作取得突破性进展,直至成为现实。

目前看来,技术发展的进程是:(下转第67页)

风暴预测仪”，可提前15小时预报风暴的强度和击来的方向。来预防灾害。由于每秒振动次数不到20次的“次声”频率很低，波长很长，传播过程中不易被大气吸收，能量衰减很少，所以能传播很远。

核试验时所产生的次声波可绕地球5圈多。次声在空气中以每小时200多公里的速度前进，而风暴移动的速度才每小时不到100公里，所以水母能在风暴到来之前10多个小时就离开海岸，潜游海底避难去了。

直到1942年人们才发现，蝙蝠能在黑夜中飞行并非靠它的“夜明眼”，原来在喉内能产生每秒20 000次以上的超声波，通过口或鼻发射出去，根据回声可判定目标的距离与方位。人们利用这个原理已制成为盲人探路的“声纳眼镜”。

人能分辨出200多种气味，一公斤水中，只要溶有0.0000001毫克的紫罗兰酮便可引起嗅觉。对于 4×10^{-9} 毫克/升浓度的乙硫醇也能辨别。但狗的嗅觉要远比人灵敏100万倍，能感觉200万种不同浓度的物质。根据狗鼻机理制成的“电子犬”在化工厂能测定浓度达到千万分之一的过氧乙烯毒气。瑞典的地质学家用“探矿犬”找到了埋在地下一米多深的黄铁矿、毒砂等单独矿段。利用汞蒸气能吸收波长为2 537 Å的紫外线共振谱线的原理制成的“测汞电子犬”，可以准确地测出每立方米空气中含量为10纳克以下的汞蒸气。一种灵敏度比狗鼻还要高1 000倍的“电子警犬”已经问世，已工作在侦缉战线上。

自然界中，除了蝙蝠以外，海豹、海狮、鲸鱼、燕子、夜蛾等都有声波定位与通讯的本领。海豹耳的结构就给声纳的设计带来了启示。最初的水听器只能在舰艇停航时才能收听到潜艇噪音的信号，因为舰艇航行时的水动力噪声太大，往往淹没了潜艇信号。可是海豹却不怕干扰，它能在高速游泳中清晰地辨别远处的声音，人们就仿照海豹耳设计出声纳的导流罩，改善了声纳的滤波效果。

人造声纳的体积很大，最大的声纳高达十几米，重150吨，而蝙蝠的听觉器官才几分之一克，夜

蛾的大脑才两个听觉细胞。如果以一个分辨力为1厘米，重量为12克，最大输出功率为0.1毫瓦，探测距离为2米的设备作为基准的回声定位仪，则蝙蝠声纳的效率竟高达 2×10^8 (20亿)倍，而一部重12吨、目标直径为5米、探测距离为150公里、最大输出功率为75千瓦的雷达，其效率才 6×10^{-5} (十万分之六)，声纳的效率约 2×10^{-3} (千分之二)，真是令人堂目结舌。

今天，虽然根据光电、光导、热电效应已制成光传感器；根据压电、霍尔、约瑟夫逊效应制成了压力传感器和磁传感器；根据吸收效应造出了气体传感器和温度传感器；利用应变电阻、热电阻效应制成了压力传感器和温度传感器。这些传感器分别反映人的视觉、听觉、嗅觉与触觉，可是味觉——反映人舌头功能的传感器尚有待于仿生学的发展与新材料的发现。

我们已经利用塞贝克效应的电阻温度计或热电偶来检测温度。利用化学的或物理的吸收效应制成了陶瓷湿度传感器来测量湿度。利用霍尔效应作成的高斯表可量测磁通，由于约瑟夫逊效应的发现，甚至可以测出 10^{-7} 特的磁通量密度。今天，人们不仅能测得0.000001K的低温和热核等离子体几千万度的高温；而且利用SQUID超导量子干涉仪可测出千亿分之一地磁场的强度。利用激光光谱仪可测出低于0.01ppm的含量。人们不仅探测到200亿光年的宏观宇宙，而且细察到原子的显微尺度。人们不仅创造出物理传感器、化学传感器而且生物化学传感器——酶传感器、微生物传感器和免疫传感器等等都已降生人间。看来，人已有很大的“本领”，但是，更大的潜力蕴藏在仿生的机理之中。厚度仅1~4毫米，具有120亿个神经细胞的人脑机理，光合作用的机理，蝙蝠能在比自己发声大2 000多倍的噪声中检测出反射回声的机理，正等待着我们去探索，去利用。动物完善的传感器据说是经过了 10^{11} 次的试行中才形成的，而人造的工程传感器的历史才百年有余。所以，仿生与传感，前途无量！

(上接第65页) 电子学进化至微电子学，又进化至光电子学，最后进化至光子学。虽迄今尚无把握说何日才能实现光子的C-C(通信和计算机)，然而不容置疑地说，这是当代科学工作者向往的研究方向。可以乐观地相信，在未来的年代里，光电

子学和光子学(或数字光学)定会不断地取得辉煌的成果，为信息时代的来临增添光彩。

本文承孟晤英老教授审阅和指教，敬致以衷心感谢。