

光子学与电子学的比较¹⁾

于 荣 金

(中国科学院长春物理研究所激发态物理开放实验室, 长春 130021)

摘要 文章对光子学与电子学的类似性和差异性方面进行比较,目的是从中得到启示,更好地把握和推进光子学的发展.

关键词 光子学,电子学

Abstract The similarities and differences between photonics and electronics are analysed in the hope that some inspiration may be drawn to promote the further development of photonics.

Key words photonics, electronics

把光子学与电子学进行类比(或者把光子学看成是一门与电子学平行的学科),不仅从了解光子学的角度,是非常恰当的,而且从把握和推进光子学发展的角度,也是十分重要和有益的.光子学与电子学同属一个大家庭.这个家庭的组建时间,不妨可以认为是1864年.因为1864年麦克斯韦在总结前人工作的基础上,建立了关于电磁场的方程组——麦克斯韦方程组,构成了电子学和光子学的共同理论基础;麦克斯韦不仅从理论上证明了电磁波的存在,并且指出电磁波在自由空间的传播速度,以及电磁波的折射、反射等特性与光波相同,把电磁现象与光学现象联系起来,指出光也是一种电磁波,从而宣告它们都是这个家庭的成员.光子学与电子学的关系,可以比拟为兄弟关系,电子学诞生于1883年,光子学诞生于1960年,故电子学为兄,光子学为弟.本文试图就它们之间的若干类似性和差异作一比较.

1 类似性

1.1 光子学与电子学定义的类比

电子学是研究并应用电子运动规律的学科.它包括研究电子产生的方法和电子运动的规律以及实际应用中控制它的方法^[1].对光子学,我们只需改动一个字(把“电”字改成“光”

字),就可以类似地定义光子学,即“光子学是研究并应用光子运动规律的学科.它包括研究光子产生的方法和光子运动的规律以及实际应用中控制它的方法”.到目前为止,各国的科学家,尽管对光子学下过不同的定义,但就其本质和主要内容来说,与上面的定义大体是相同的.就是电子学和光子学的英文名字,也都是分别在电子(electron)和光子(photon)后面加“ics”而成的,即electronics(电子学)和photonics(光子学).

1.2 历史发展的类比:“真空电子学→固体电子学→微电子学”与“真空光子学→固体光子学→微光子学”

电子学诞生以后,首先是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.在三极管的基础上,又出现了四极管、五极管和其他的多极管.这些真空管器件是第一代电子器件,即属于真空电子学阶段.相似地,光子学诞生以后,发明了光泵浦的固体激光器和气体激光器等,这些激光器在光子学中的地位和作用,相当于电子学中的真空管器件,即属于真空光子学阶段.光子学和电子学中这一代器件的优缺点也

1) 1995年3月27日收到.

极为相似,例如有较高的输出功率,但是体积大、重量重、功耗大、寿命较短。

1948年,贝尔电话实验室的 William Shockley, Walter H. Brattain 和 John Bardeen 发明了晶体管,电子学从真空管器件的真空电子学进入晶体管为基础的固体电子学。相似地,1962年发明的半导体激光器,它在光子学中的地位和作用,类似于电子学中的晶体管。它们有极相似的特点:体积小、重量轻、功耗小、可成批生产、成本较低、可靠性较高。经过30多年的不断发展和完善,半导体激光器的上述潜在特点现在已变成现实^[2]。随着半导体激光器的发明和完善,光子学也从真空光子学进入固体光子学。

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。在不到1cm²的Si片上,可以集成上亿个晶体管,并正在向一个片子上集成10亿个晶体管的目标努力。随着集成电路的诞生,电子学也进入了微电子学时代。相似地,在光子学中,受集成电路的启发,也在进行元器件集成化的努力,必然会出现一个微光子学时代。微光子技术和元器件的集成化,可以提供尺寸小、重量轻、效率高、功能强、价格便宜、避免电磁干扰等特点的系统,使光子学发生与微电子技术和集成电路同样巨大的革命性变革。现在,已研究和演示了具有一定功能的许多集成化光子(或光电)回路,有的已投入商业应用^[2],并且半导体微腔激光器已取得重大突破,垂直腔表面发射型和圆盘状微腔激光器的尺寸只有微米甚至亚微米量级,1cm²的片子上,可以集成几百万甚至上亿个激光器,它的集成度已达到完全可以与当今超大规模集成电路相比的程度。

还有一个问题,就是在晶体管发明以后,到了50年代后期,数字、模拟、控制、音频和视频电路的仪器设备,原来采用真空管的市场基本上已被晶体管所替代。但是直到现在,大功率电子管(特别是微波功率电子管)和电子束管等仍然起着重要的作用。这个问题在光子学中也

有类似性。就是半导体激光器已占据重要地位的今天,我们也不能忽视光子学中类似电子学中某些真空管器件的作用。例如自由电子激光器,它的光谱范围宽,从远红外—可见—紫外、甚至直到 γ 射线,且具有可设计、可调谐的特点,以及高功率、高光束质量的潜力。

1.3 概念、原理、功能和技术的类比

尽管在19世纪,麦克斯韦就指出光也是一种电磁波,但是利用各种电磁振荡产生出来的无线电波,都具有较好的相干性,而一般光源发出的光是非相干的,只有到了1960年激光出现之后,这一重要差别才不再存在。从而,电子学中几乎所有的概念、原理、功能和技术的(如放大、振荡、倍频、混频、调制、解调、外差接收、滤波、编码、解码、限幅、开关、逻辑、通信、雷达、信息处理和计算机等),在光子学中都有其对应物存在,并可以实现。

例如,电子学中的调制。它是使信息载体的某些特性随信息变化,对正弦波可实现幅度、频率和相位调制。在光子学中,通过电光、声光、磁光和电吸收等效应,也可对光波进行幅度、频率和相位等调制。

又如电子学中的倍频和混频。在光子学诞生不久(1961),P. A. Franken 等人利用石英晶体将红宝石激光器发出的波长为694.3nm的激光转变成波长为347.15nm的倍频光;还利用两束以上的激光束与非线性介质相互作用,产生频率为诸光束频率之和或差的各种新光束,实现了光学混频。

电子学中的双稳态触发器,它有两个稳定的工作状态,在外加信号触发下,可从一种稳定的工作状态转换到另一种稳定的工作状态。在光子学中,同样也已研制出具有完全类似功能的光学双稳态器件。

雷达在第二次世界大战中,由于战争的需要,成了电子学中最活跃的部分之一。现代无线电和微波雷达已发展到非常完善的程度。类似地,利用高亮度、高定向性、短波长和脉冲持续时间十分短的激光,替代微波或无线电波,也可构成激光雷达,并且从原理上说,激光雷达在

测量精度、分辨能力和抗干扰性能方面,可以远远超过普通的微波雷达。

从上述概念、原理、功能和技术的类比中,我们可以从已经成熟的电子学中得到启发和借鉴,确定发展光子学的任务和目标。

1.4 “电学→电子学→电子技术→电子工业”与“光学→光子学→光子技术→光子工业”发展模式的类比

钱学森教授早在70年代就明确指出了光子学与电子学之间的这种平行性和类似性^[3]。

电子学是在电学(又称为电磁学)基础上发展起来的。早在1883年电子学诞生以前,人类对于电磁现象的研究已相当深入。一系列的定律,如库仑定律、安培定律、欧姆定律、楞次定律、法拉第电磁感应定律等已经确立。麦克斯韦又集以往电磁学研究之大成,建立了电磁学完整的理论——麦克斯韦方程组,并从理论上预言了电磁波的存在。与此同时,人们对电磁学的利用也达到了一定的水平,有线电报和有线电话已相继发明,爱迪生发明了白炽灯,所有这些,都为电子学的诞生准备了充足的条件。1883年,爱迪生在致力于延长碳丝白炽灯的寿命时,意外地发现在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。这种电流仅单向流通,若灯丝和电极之间电势极性反转(即电极为负时),就没有电流,这就是爱迪生效应,这一发现导致了后来电子管的发明,并标志电子学的诞生。

接着人们就对电子的控制和应用进行了研究,出现了电子技术;随着本世纪20年代广播事业的发展,形成了电子工业。

光子学是在光学基础上发展起来的。在1960年光子学诞生以前,光学早已是一门历史悠久的学科。在长期的发展过程中,人们对光的本性、有关光的产生、传播、接收、显示、以及光与物质相互作用等方面,已积累了比较丰富的知识,形成了几何光学、物理光学和应用光学等分支学科。1917年,爱因斯坦在总结黑体辐射规律时已预言了受激辐射现象;20年代,在实验上曾观察到了负吸收现象;二次世界大战

期间,微波雷达的重要性引起了许多从事微波振荡器和放大器工作的科学家注意。C.H. Townes就是其中的一位,他在二次世界大战期间,从事微波研究,揭示了电子微波振荡器的正反馈原理,加上他在光谱方面的训练,为1954年发明微波激射器(maser)提供了所需的技术基础;另一方面,30年代以后,在量子力学理论的基础上,对原子、分子、离子和固体的光谱和发光现象,作了大量的理论和实验工作,积累了相当丰富的资料和数据,为选择激光工作物质奠定了基础;再有,在光的电磁理论建立之后,对于多光束干涉现象已经作了大量的讨论,对Fabry-Perot干涉仪的结构和特性作了大量的理论分析和实验工作,为选用Fabry-Perot干涉仪作为激光器的谐振腔提供了依据。在这些基础上,1954年首次研制成功maser,不久,又从微波推进到光波,在1960年诞生了第一台红宝石激光器,相继又研究成功其他各种激光器。有了激光器和激光的一系列特点,以及激光对科学、技术、各个部门广泛和重要的应用,使光学进入了一个新阶段,诞生了光子学。

类似地,光子学诞生之后,世界上一大批科学家接着就对光子进行各种控制和应用的研究,出现了光子技术;随着70年代光纤通信、激光加工等技术的发展,开始形成光子工业。到2000年,光子工业预计可达1030亿美元。

1.5 光子学与电子学在应用领域方面的类比

电子学是一门以应用为主要目标的科学和技术。它的应用范围非常广泛,现在可以说,电子技术和电子设备几乎到处都在使用,从工农业生产、国防、科技,到人们的文化生活和家庭生活。电子学为几乎所有领域提供服务,但最突出的是为信息领域的各种作业提供强有力的服务。当前人类社会正进入一个新的发展阶段,它是以信息的急剧膨胀为主要特征的阶段。人们正在努力实现工厂自动化、办公室自动化和家庭自动化(即三“A”革命),电子信息技术与产业也得到了极大的发展。

光子学与电子学一样,有极其广泛而且类似的应用领域,尤其是可以为信息领域的各种

作业提供更强有力的服务^[2,4]。

2 差异性

电子与光子,它们是不同的粒子。例如,电子属于费密子,自旋为 $\frac{1}{2}\hbar$, 遵从费密-狄拉克统计;而光子属于玻色子,自旋为 $1\hbar$, 遵从玻色-爱因斯坦统计。电子有静止质量 (m_e);而光子没有静止质量。电子带有负电荷;而光子不带电荷。电子和光子在时空特性等方面也不一样。

这两种不同的粒子所表现出的性能上的差异主要是:

(1) 光波比无线电波(包括微波)有更短的波长(更高的频率),因而有更大的频带宽度和可载入信息容量。无线电波的波长大于 1m (频率小于 3×10^8 Hz),微波的波长为 1m—1mm (频率为 3×10^8 — 3×10^{11} Hz)。光波可包括红外线—可见光—紫外线,直至 X 射线和 γ 射线。红外线波长范围为 $<1\text{mm}$ — $0.7\mu\text{m}$ (频率为高于 3×10^{11} — 4.28×10^{14} Hz),可见光波长范围为 0.7 — $0.4\mu\text{m}$ (频率为 4.28×10^{14} — 7.49×10^{14} Hz),紫外线波长范围为 400 — 5nm (频率为 7.49×10^{14} — 6×10^{16} Hz)。目前,在光纤、空间、水下和大气等介质中进行的光波通信,其波段在 $10.6\mu\text{m}$ — $0.53\mu\text{m}$ 。大量使用的石英光纤通信所用的波长是 0.85 , 1.3 和 $1.55\mu\text{m}$,它的低损耗窗口 (1.26 — $1.6\mu\text{m}$) 包含的频带就有 5×10^{13} Hz。

(2) 光子器件的开关速度比电子器件快。目前,电子器件的开关速度,最快达 10^{-9} s (即 ns 量级),而光子器件的开关速度可达 10^{-12} s (即 ps 量级),甚至可达 10^{-15} s (即 fs 量级)。人们在 10 年以前,就报道过达 12fs 的超短光脉冲。

(3) 光波作为信息载体比无线电波作为信息载体的传输速度快,光波在真空中的传输速度为光速,不受 RC 时间常数的限制。

(4) 由于光子不带电荷,传输时不容易发

生相互作用,因此光束可以并行或相互交叉通过而不会相互影响,具有先天的高度平行处理能力。

(5) 光子系统具有很大的空间带宽和时间带宽的乘积。

(6) 光信息的传输比电信息传输在抗干扰性能方面要好,无电磁干扰。

(7) 存储量大,可用光盘、全息或图像方式存储数字信号。

3 从类似性和差异性得到的启示

我们在过去的文章中^[2,4],一直强调把光子学看成是一门与电子学平行的学科,它的意义在于从这种平行性或类似性出发,可由电子学的发展史、电子技术(包括概念、原理和功能)以及电子工业的巨大产业规模对社会物质和精神文明方面提供的各种条件中,吸取丰富的营养,得到启发和借鉴,更好地把握和推进光子学的发展。因为原则上,电子学和电子技术所做的一切,光子学和光子技术也都是可以做的,因此,电子学和电子技术已经有的,而光子学和光子技术现在还没有的,可以借鉴而做之。在做之前或做的过程中,或做了之后,从原理到实际,对它的相同和不同之处,优点和缺点,认真加以比较。进而在光子学和光子技术中,重点去做那些比电子学和电子技术具有明显优势(优越性)的工作;或者选择电子学和电子技术遇到困难、迫切需要革新而光子技术又有潜力的工作;以及电子学和电子技术所不能做而属于光子学和光子技术所特有的工作。决不要去做那些电子技术已经做得很好、而光子技术至多只能有类似结果和性能的工作。

例如,60 年代提出、70 年代开发、80 年代开始大规模应用的光纤通信系统,以及正在大力探索研究的光子计算机(包括已开发的光盘存储、光互连以及二维图像光信息处理等),就是基于上述类似性和差异性、特别是差异性所做的两项重要而最典型的工作。

原子、分子、离子的电子能级、振动和转动

能级大都处于可见光和红外波段,因此可以利用这个波段的光子(激光)对其进行选择激发或选择吸收,实现催化和选择光化反应,研究它们的微观能态结构,探测大气中某些分子的存在(利用选择吸收做成光学或光纤传感器)等。利用激光前所未有的 ps—fs 超短光脉冲技术对各种快速或超快速现象进行研究。

光纤传感器和集成光波导传感器,因为它们具有不受电磁干扰、灵敏度高、可以遥测和遥控等特点,因而得到迅速的发展,特别适合在某些恶劣和有电磁场干扰环境下的各种信息检测。

在雷达和测距方面,由于使用波长短、脉冲窄、功率高的激光为信号源,激光雷达测量地球一点到月球的距离以及高精度卫星激光测距仪测量 8000 多公里的人造卫星,测量精度都已提高到厘米量级。

随着科技的发展,对广泛应用于检测自动化系统、通信系统以及信号处理系统的模数(A/D)转换器或数模(D/A)转换器,在性能上提出了更高的要求,例如要求其转换速率大于 $10^9/s$,而传统的电子 A/D 转换器是难以达到的。采用集成光学 A/D 转换器,则是可以达到这种要求的途径之一,并且可以大大减少比较器的数目,使结构简单,成本下降。又例如具有实时获取雷达信号的频谱等功能的集成光学频谱分析器,它与过去相应的电子器件相比,具有频带宽、信号截获率高、能分离同时到达的信号、能实时显示、系统体积小、重量轻等优点,已在电子对抗中获得应用。

以上仅是光子学和光子技术中已经做或正在继续做的少数几个例子。当然,还有许多工作可做。这里不难看出,从事光子学和光子技术研究的人员,有必要认真了解电子学和电子技术的发展史和现状,这对选择新的或有意义的研究内容是十分有益的。

4 结束语

通过上面的类比,可以发现光子学与电子

学之间有惊人的类似性。这种类似性,在所有自然科学和技术科学的学科之间是不多见的。

同时,还可发现:光子学的产生和发展,除了社会的需求是重要推动力以外,光子、激光、光波的固有特性及其所表现出来的功能,是光子学发展的基础和内在动力。不断解决过河时桥或船的问题,也是发展光子学的关键。例如,光通信从原理上分析,人们早就知道它与无线电通信相比,在通信容量方面所具有的优势与潜力,但只有在找到了理想的传输介质(光纤)之后,才成为具备一系列优点、可以替代同轴电缆的实用化通信工程。要解决光子学在其发展过程中所面临的这一类桥或船的问题,必须加强凝聚态物理和器件物理的基础研究,以及工艺技术基础的研究,增加经费投入,以及不同专业的科学家共同努力。

随着科学技术的进步,人们将进入“信息时代”,而实现信息时代的科学基础——信息科学,起码从现在至相当长的一个历史时期来看,它是由电子学和光子学这两门学科构成的;相应地,实现信息时代的技术基础——信息技术,则是由电子技术和光子技术构成的。当今以美国为首,正在进行由信息高速公路、信息公用设施和信息用具组成的信息基础结构(information infrastructure)的建设。信息基础结构建成之日,就是人类真正进入信息社会的自由王国之时。光子技术和电子技术对这个建设有决定性的作用,例如光纤通信就是信息高速公路的主要干线。

电子技术的成熟和继续发展,光子技术与电子技术的共存和合作,优势互补,将在 21 世纪大展宏图,在信息、能源、医学、环境和材料等领域发挥重要作用,并对国防、科学、生产和生活产生巨大影响。

参 考 文 献

- [1] D. G. 芬克著,陈捷译,科学技术百科全书第 23 卷,电子工程学,科学出版社,(1979),104.
- [2] 于荣金,物理,24-1(1995),20.
- [3] 钱学森,激光,6-1(1979),1.
- [4] 于荣金,物理,22-11(1993),645.