

从电子学到光子学

张鹏翔

以物理学为代表的自然科学的蓬勃发展为人类带来了数不尽的新鲜概念，什么地球绕着太阳转，什么世界上的东西都是由一百零几种元素组成的，什么相对论，测不准，什么绝缘体、半导体，什么黑洞、夸克……。同时，更重要的是它推动了工业的发展，掀起了一场又一场的产业革命：蒸汽机、电气化、原子能、计算机……。这些革命不仅减轻了人们的繁重体力劳动，给人们带来无限的精神和物质享受，而且实际上是在改变着社会、改变着人类生活。不难发现：近二十年来人们的物质生活、思维观念都发生了天翻地覆的变化。我们见到的是电灯、电话、电车、电视，实际上现代科技提供给我们的是人们体能和智能的巨大扩展：凭着电车、飞机我们走得更快了，凭着电视、望远镜我们看得更远了，凭着电话、收音机我们听得更多了。我们真正成了千里眼、顺风耳，这不仅武侠小说中的英雄豪杰们做不到，连封神演义中的各路神仙也难以比拟了。这当中最重要的也许是我们智能的扩展了：借助计算机我们运算的速度大大加快了，原来用人算要

几年、几十年的问题计算机几秒之内就完成了；“记忆”下来的东西越来越多了，听说一整座图书馆存贮的东西已经能存入几张光盘了。古人云：“知己知彼、百战不殆。”“凡是三思而后行。”这说明做成一件事，不只靠体能，主要是智能，主要是获取信息、分析信息、做出决断、取得成功。长期以来这是最难、最费时间、最复杂的事。现代的通讯技术、计算机则开始替人们完成这种复杂、高级的事情了。而这则是前几次产业革命所不具有的特色，或者说是以电子技术为代表的产业革命的一大特色。现在人人都知道电子学和电子工业为人类社会的发展做出了最新、最重要的推动，那么，再往后可能会是什么呢？光子学和光子工业吗？

一、电子学和电子工业的回顾

1864年 Maxwell 发表了他的电磁运动方程论文，这一在当时是纯理论性的研究，没有引起人们的任何重视。十二年后贝尔（Bell）发明了电话，但这时还

不知道电子是什么。人们认为电子学是从爱迪生 1883 年的发现开始的。那时他用碳丝灯泡做实验，发现用正电极板靠近被加热的碳丝时，“电”会跑到真空中来“流动”。现在我们都知道了，这是电子在正电吸引下，离开发热的碳丝在真空中的运动。这实际上是人类第一次控制了电子的运动。可惜他的发现在以后的二十多年中没有引起人们的重视。1904年 Fleuving 制成了真空二极管，1906年 Lee de Forest 制成真空三极管，形成了真正的“电子”放大器，这才拉开了电子学迅速发展的序幕。随着人们对电子认识的加深，1912年 Edwin Aribstrong 展示了第一个电子学振荡器，它能产生相干电磁辐射。这样，通过控制电子运动而形成的产生、放大、传播、接收电信号的系统初步齐备了，而应用上则早有电话、电报在等待了。于是一种新的工业——“电子工业”便起步了尽管当时人们还看不起它。在这几十年内，真空管是无与伦比的英雄，所有的重要电子学仪器都少不了它。人们研究出了无线电收音机，号称千里眼的雷达发明了，更加神奇的电视机问世了。与此同时，一大批电子学自动控制系统、通讯系统、信息处理系统发展起来了，在工业、科技、军事、商业各方面获得广泛应用，也反过来为电子工业发展提供了资金和其他基础条件。

顺便应当指出，1930年以前是没有电子学“Electronics”这个名词的。1930年出版了一本颇具商业性的杂志，第一次采用“Electronics”这个词，是由英文“电子”一词加上后缀 *ic(s)* 形成的。它是指一种与控制电荷在真空、物质中运动有关的物理概念、工艺、技术、元器件的科学。后来逐渐为人们所接受。

1948年电子学有了一次新的飞跃，那是贝尔实验室的 W. Shockley, W.H. Brattain 和 J. Barden 发明了半导体三极管。不同于真空三极管，这次控制电荷运动是在固体中实现的。起初半导体三极管受到传统真空三极管工业界的抵抗和挑战。人们怀疑其性能、怀疑其商业价值。然而几年后，固体三极管，由于小尺寸、高效率、低工作电压，适于大规模生产、低的单元成本等优点，便很快将真空管器件挤到了狭窄有限的应用方面上去了。此后，动脑筋的人又开始想入非非，他们力图在一块硅片上做上许多的三极管、二极管、电阻、电容、形成一个完整的动能系统，于是便出现了集成电路和大规模直到现在的超大规模集成电路。随之而来的便是现代计算机的革命，信息处理技术的革命。从微处理器到油珍计算机，从个人机到工作站，发展之迅速、变化之快捷，真正到了日新月异的地步。谁曾设想过在家庭里可以摆一台 IBM 的 PC 机？谁曾想过可以直拨越洋电视电话？

如果认为 1883 年爱迪生的实验是电子学的开始，1906 年的真空三极管是电子工业的起步，那么人类花了约一百年发展了电子学、电子工业。目前它仍以强

大的势头继续地发展着。以下几个数字或许是值得思考的：1970年在美国用1000美元可买400桶汽油，也可以买到40kb的半导体随机存储器（RAM），到了1985年同样的1000美元虽然只能买到30桶汽油，但存储器却可买到25Mb，15年中油贵了，而半导体元件记忆量却上升了100多倍。这也许在提示着历史的发展：人们将更多地使用“知识”，而不是更多的“物质”。过去30年中半导体工业几乎以指数公式迅速增长。目前全世界的利润收入达30亿美元。过去20年中每年生产的三极管数字都以200%的速度增长。工业界目前每年为地球上的每个人生产着25万个三极管。目前在美国一块有百万只三极管的集成电路销售价格和早年一只三极管的价格一样。电子学的发展并未结束，发展还在继续。也带来的一项成果便是光子学和光子工业。

二、光子学和光子工业

和电子学比较，人们对光子学的认识和应用就不那么一帆风顺了。在人类亿万年的进化中，人获取信息最多的就是通过眼睛一光。人身上没有直接的电的测量、感觉元件。遗憾的是后来，人们对电的认识反而比对光更早更深了一步。

在Maxwell方程发表25年前，1839年A. Becquerel就发现了一个光电元件：在电解液的电极上照射光时会有电压出现。但是人们不理解这个现象，直到66年后爱因斯坦才给出合理的解释。虽然不理解，聪明的贝尔却基于这个现象于1880年做成了“光(电)话”。1916年爱因斯坦为原子、分子系统中受激和自发辐射过程做了准确描述，这实际上为光子运动、控制打下了理论基础。它与电磁运动方程相比晚了约半个世纪，但却是在Armstrong发明电子振荡器的四年之后。当时许多研究气体光谱性质的科学家认识到原子、分子体系中布居数的反转在受激发射过程中可能导致辐射的放大，然而他们却粗心地认为这个效应(光放大的幅度)可以忽略不计，没有深入开发。这样一下子就是几十年过去了。1954年C.H. Townes发明了NH₃受激辐射的微波放大器，1960年T. H. Mainau做成了红宝石激光器，这是光的相干电磁振荡器。它比真空管振荡器晚了48年。但是人们对它的重视和激动之情却是高出了不知多少倍。这时不仅科学家们，工程技术人员，连普通百姓也对科学的重大发明更理解了。原因也是清楚的，激光是一种全新的独特的发明。

激光出现后的二十年中，科学、技术、工业界都经历了巨大的，可以说是爆炸性的发展。He-Ne激光、Nd玻璃激光、Ar⁺激光先后制成了，半导体激光，染料激光出现了。功率越来越大，频率范围越来越宽。全息光学出现了，光参量放大器研制出来了，超短脉冲的激光做成了。还出现了纤维光学、集成光学、光学相位

共轭等新领域新概念新应用。激光器犹如当年的真空管推动电子学一样推动着光子学的发展。与此同时各种新名词出现了：量子电子学、光电子学、全息技术、光信息处理技术等等。其实，如同电子学是控制电子运动的各种概念、技术的总和一样，上述各种新名词实际上是控制光子运动的各种概念和技术，因此如法泡制，称之为光子学(photonics)，英文中便是在“光子”后面加后缀ics构成，在中文里就加个“学”字。

如同电子学发展从真空管过渡到固体三极管一样，目前激光器也在从大个子激光腔向固体半导体激光过渡，从而逐步实现集成化，即在一块固体材料上实现光的产生、调制、放大、检测等诸多功能。电子学已达到了超大规模集成的阶段，光子器件的集成化刚刚起步，尚有许多基础的和开发性的研究工作要做，但其前景很乐观。工业化生产的条件正在形成，因此有人说下个世纪的工业革命必将是光子学和光子工业为先导的革命。

三、伙伴，还是对手？

每当新鲜事物出现的时候，人们习惯于问问它比原来的东西是否更好，它与原来的东西是伙伴还是对手？从大的方面看，电子学、光子学都用于过程的控制，信息的处理，都在扩展和延伸人类的体能和智能，他们都是为我们服务的。在目前这个阶段还只能说这两者是伙伴，还不是对手。形象地说一个是大哥哥，一个是小弟弟。一方面电子工业是太强大了，而且实际上没有强大的电子工业，光子学、光子工业的发展几乎是不可能的。那一台激光器能不要“电源”，不要自动控制？目前在西方从事电子学和电子工业研究人员数目约30万人(以IEEE成员计)，而相应的光学工程技术只有3万人。另一方面，光子学从基本材料(Si, Ge, GaAs)、分析测试到加工工艺(外延、光刻、表面分析、超高真空……)都还离不开电子学和它发展出来的先进技术。

事实上，目前电子学和光子学的发展还是互相补充，彼此促进的。没有光，电子测量、控制就无法形象准确地显示出来。50年代制成的GaAs发光二极管在数字显示中有广泛地应用。由于半导体激光和微电子学器件是兼容的，这部分的光子器件已经与传统的半导体电子工业结合，并占据一席之地，在光纤通讯、光数据存贮、光盘记录、激光打印等方面有广泛的应用。厂商们每个月都在生产着几十万只的半导体激光器。光子器件的单独集成目前还不成熟，因此出现了许多混合集成；它博采电子学、光子学的所长形成实用、便宜、方便的各种功能，这也是不可小看的一股潮流，已为人类带来了不少益处。

因此，可以说电子学、光子学彼此完全不是对手，而二者的每一项成就实际上都在促进着他们的发展，彼此借鉴、相互补充，我们衷心地祝愿他们能更快地成

信息光学概说

陈树岭

信息就是消息，就是事物的存在和变化的情况。从信息论的观点看来，无论是电学、光学及声学系统，都是用来传递信息的。电学系统传递的是随时间变化的电讯号，而光学系统传递的是随空间变化的图象。我们把有关图象的传递理论与应用技术称为信息光学。

信息光学是光学最先开拓的领域之一，它可以追溯到原始光学初期，但获得迅速发展还是最近三十多年的事。50年代中期，无线电通讯理论和技术引进到光学中来，推动了信息光学的发展。此后不久，光信息理论和技术成功地应用于微波合成孔径成像雷达，为信息光学树立了第一块丰碑。60年代后，激光技术、全息照相技术的相继出现，电子计算机的普遍应用，特别是遥感技术的需要，更加促进了信息光学的发展。

信息光学可以分为理论与技术两个方面。信息光学理论目前有《傅立叶光学》和《统计光学》两部分。从数学形式上看，它们只不过是经典光学的一种新的数学表述方法——傅立叶变换和概率统计。从物理内容上讲，信息光学所讨论的仍然是关于光的传播特性方面的问题，如干涉、衍射、偏振及成像等。但这正象经典力学引入微积分那样，由于引入傅立叶方法和统计方法，经典光学才真正深刻地揭示了上述光学现象的内在规律性；同时，也使得经典光学理论更加趋于完善。

傅立叶光学是把通讯理论，特别是其中的傅立叶分析方法引入到光学中去。线性系统理论与频谱分析，是傅立叶光学的基本内容。用光学方法实现二维函数的傅立叶变换，在频率域中描述和处理光学信息，是傅立叶光学的基本目的。

一个景物，即一个给定的输入光波场，是由很多细节或复杂的光强分布构成的，而细节的情况，则是用空间频率来描述的。为了描述单色光波的时间周期性，将波重复一次振动形式的时间，称为时间周期，其倒数称为时间频率；与此类似，为

长，为人类做出更大的贡献。

光学和光子工业还处在幼年时期，它有光明的前景。由于光子质量更小，传播速度更快，电荷中性，因此它的特色、潜力是很大的。目前光子学发展出来的产品已在传统的工业中占据了一个层面，在下一个世纪的科学技术中它肯定会稳步前进，发展壮大。回顾历史，如果现在的光子学、光子工业处于50年前电子学、电子工业的地位的话，那么不难想象，它在下一世纪的迅速发展将对科技界，工业界，乃至整个人类社会造成巨大的冲击，产生难以想象的变化。现实地说，光子学会在光纤大容量通讯、光计算机，光数据存储、激光加工、电子学系统的激光连接、医学、军事等五花八门的行业、领域里起作用。

了描述单色光波的空间周期性，就将它的波长与其倒数，称为空间周期与空间频率。对复色光，空间频率就是在空间单位长度内含有不同波长的光波的数量。故一个景物或图象的细节越复杂，它的空间频率就越多。光学系统对输入的物空间频率响应程度是用光学传递函数来量度的。因此，一个光学系统的性能可通过光学传递函数来体现。

在数学上，傅立叶变换是把一个复杂函数分解为一系列简单的正弦、余弦或复指数函数的集合，而傅立叶的逆变换则是把一系列简单函数加以综合或重构。从物理上讲，傅立叶变换是把一复杂的光场分布既物空间函数加以分解，其逆变换则是把一系列简单的点源加以合成。这种分解与合成的方法，即傅立叶方法，无论是对研究光学系统本身，还是对光信息处理，都具有特殊的重要性，傅立叶光学名称的由来也就在于此。

据光的电磁理论，一光波场就是一特定的电磁场。如果把不同的电磁振动看成是不同的光量子，则单个光量子的随机行为是无法确定的，而大量光量子的随机行为却遵从一定的统计规律。因此，有关光学过程的统计特性，都可以用统计的方法加以研究，故通常称为统计光学。但信息光学所侧重的则是光波场的涨落性质及探测方法。从信息论的角度说，信息光学的统计部分则主要研究光“噪声”的产生、控制乃至消除的问题。

一个光波场的随机变化过程，可以用随机变量来描述，而随机变量又可表示为概率分布函数和概率密度函数，统称为随机变量函数，故随机变量函数是反映一个光学系统随机变化规律的物理量。对于一个给定的光学系统，如果有了该系统的传递函数，还能求得其随机变量函数，则这个光学系统的特性就唯一地被确定了。

信息光学技术也称为光信息处理，它是应用信息光学理论具体解决光信息的接收与传递，加工与确认等方面的知识。光信息处理的特点就在于它能同时处理二维图象，而且处理信息量特别大，处理速度也极快。一张照片的傅立叶变换，用计算机需几个小时甚至更长的时间才能完成，但用光学透镜，在一瞬间就完成了。

合成孔径技术是应用信息光学理论而产生的一种先进的接收探测方法。光学仪器的分辨率是与其通光孔径成正比的，这无论对可见光还是无线电波，制造大口径物镜或天线都有很多困难，但如采用小口径天线或望远镜在某确定区域相关地，按一定时空规律地抽样观测，尔后再把这些结果加以相关合成，就相当于合成了一大口径天线或物镜的观测效果。合成孔径生动地说明了傅立叶光学在分解和合成两方面的应用。

全息照相是光信息处理的另一重要成就。一个简单的光振动，同时具有振幅和位相两个方面的信息。光振动非常迅速，振动一次只需 10^{-13} — 10^{-14} 秒。因此普通照相只能记录某一给定方向上的物体表面的光振幅的时间平均值，即光强分布，而无法记录光的位相，物体各点的远近和侧面不能在一张光强分布的平面图上反映出来，这样普通照片就失去了物体原有的立体结构。全息照相则不然，只要能使物体所衍射的光波与另外的光波产生干涉并记录在某种介质中，那么当用适当的方法照明该介质时，就能得到象原物真实存在一样的效果，即三维的立体图象。这是因为全息方法记录的物光