

现代技术科学中的一门新兴学科—光子学

Photonics—A New Discipline in Modern S & T

王玉堂

(国家自然科学基金委员会 北京 100083)

董孝义

(南开大学 天津 300071)

光子学是随着近代科学技术的飞跃发展而兴起的一门新学科,其英文名称为 Photonics。这门学科对一些人来说也许是陌生的,因为从它的提出至今只有 20 多年,而作为一门新学科真正得到迅速发展,并被多数人所认识还只是近几年的事。虽然如此,光子学及光子技术已在高新技术领域崭露头角,它展现出来的活力以及揭示出来的应用前景已经引起了人们的广泛关注。就其实质而言,光子学既是一门新兴学科,同时又与古老的光学及近年来得以飞速发展的光电子学(Opto-electronics 或 Optonics 等)有着密切的关系。因此,光子学从提出、发展直到学科的形成并被人们所承认,经历了一个复杂的过程。有人讲,在我们的时代,物理学的两大分支——电子学与光学正在迅速融合,这种融合的初期产物即是光电子学,而其发展的更高级形式则是光子学。也有人仍然坚持“光、电不要分家”的观点,对于光子学的概念、内涵、研究范围等若干重要问题持不同看法,尤其是对光子学以及由此发展起来的光子学技术在未来科技发展中的重要作用,在认识或理解上存在不少差异。

一些科技发达国家,如美国、日本等在评价光子学时,认为它是电子学、光电子学发展的高级形式,是科学发展的必然与飞跃。光子学及其技术的出现标志着当今的科学已开始步入“光子时代”,因此对人类社会的发展具有划时代的意义。鉴于此,这些国家已正式将光子学确定为国家发展之重点,并制定出发展规划。但是,在另一些国家,包括我国,光子学作为一个独立的学科尚未得到认可。基于上述情况,本文拟就光子学的提出与学科的形成,发展光子学及光子技术的重要意义等方面的问题提出一些意见。

一、光子学的提出、发展与学科的形成

关于光子学的提出及其产生背景,可追溯到本

世纪初。1906 年爱因斯坦关于光电效应的发现与解释,以及其后有关原子、分子系统受激与自发辐射的论述,开始引入“光子(Photon)”概念。但在其后差不多 50 多年间,“光子”的“能力”似乎被埋没了,而“电子”则恰恰相反,在这段时间里,特别是在信息领域中锋芒毕露,迎来了一次次飞跃,并最终成为一门新的重要学科——电子学。但到了 60 年代,激光的问世及其在各个领域应用的展开,以及紧随其后的光纤及其技术的崛起,使光的地位骤增。量子电子学、光电子学及其技术的兴起与发展推动了信息科学的进步,光波技术的应用与推广成为信息科学中的一支生力军。光纤通信与信息处理技术极大地改变了现有通信技术的面貌。此时,科学家们进一步发现,电子学中变频、混频、调制、解调,以及通信与信息处理等均可在光频段得以实现。面对这样多的事实,并考察电学发展到电子学的几十年的历史,人们自然提出由光学向光子学开拓的思路。

给光子学以定义的应首推荷兰科学家 Polder vaart。他在 1970 年的一次国际高速摄影会议上提出了“光子学”的概念,并定义“它是研究以光子为信息载体的科学”。后来为光子学定义的还有:美国的《Photonics News》杂志定义光子学是一门“发生和利用以光子为量子单位的光或其它辐射形式能量的技术,光子学的应用范围从能量发生到通信与信息处理”;美国人 J·罗斯(J·Ross)则定义,光子学是“关于光子及其应用的科学”。在我国,著名科学家钱学森在一篇题为“光子学、光子技术、光子工业”的论文中认为“光子学是研究光子的产生、运动和转化的科学”。还可以找到另外一些定义和提法,但是大体相仿,别无悖意。

应该说,光子学最早发祥于欧洲,而且最早认识和推动其发展的也是欧洲各国。在 Polder vaart 提出光子学后不久,法国的科学技术研究全权代表团(DGRST)便提议广泛使用这一概念,并认

为激光二极管(LD)的问世使光子已替代电子成为信息的载体。1973年法国在世界上率先召开了光子学国际会议。在欧洲有关国家的共同努力下,欧洲光子学会于1978年正式成立。它在世界范围产生了显著影响,并对以后光子学的发展及其作为独立学科的形成起了重要的推动作用。近年来,欧洲各国又相继成立了为数可观的研究与开发光子学的联合机构,并且在光子材料与高速光子器件方面已取得了一系列高水平的成果。

除欧洲外,对光子学及光子技术予以高度重视的还有美国、日本、前苏联及澳大利亚等。在欧洲光子学会成立后不久,美国光学学会会刊《光学通信》更名为《光学与光子学通信》,《光谱》杂志也改名为《光子学集锦》,等等。最近在美国接连出版了《光子学基础》、《光子学词典》、《光子学指南》等系列著作,并在高等院校开设光子学课程,开始培养光子学专门人才。美国政府对发展光子学及光子技术也给以极大的重视,先后组建了诸多光子学技术中心。以南加州大学为中心,由多所高校联合建立的著名的“光子工艺中心”就是其中之一。美国在研究与开发上已投入大量资金,有人统计,每年投入的经费在10亿美元以上。日本也是开展光子学研究起步较早的国家,有人估算,目前日本在光子学研究方面的投资超过美国的三倍。在光子材料及高速光子器件的开发上日本已经显示出优势。

鉴于国际上许多国家对光子学的广泛关注,已有相当可观的资金支持这个新学科的开发,并已形成相当规模的研究机构,并获得了一系列高水平的成果,应该确认,光子学已经成为一门独立的专门学科。

关于光子学的研究内容或范围,可以与电子学作类比。从实质上讲,电子学是研究电子运动(电子运动学)、作用(电子动力学)及其应用的科学,因此光子学应该是研究光子运动(光子运动学)、作用(光子动力学)及其应用的科学。最近,美国巴哈(Bahaa)与马尔文(Malvin)两位教授合著的《光子学基础(Fundamental of Photonics)》一书大体上就是按这种思路撰写成的。它论及的范围包括:由激光器发出的相干光,由发射光源(如LED)发射的非相干光,光通过光学元部件或在自由空间的传播,借助于电的、声的以及光的控制器件对光进行的调制、开关与扫描,利用光与物质的相互作用实现光的放大、变频以及对光进行的探测,等等。显然,在主导思想上作者的论述似乎局限于光子受控与承载信息的范围。笔者认为,这是对光子学的一种狭义理解。广义的理解应该是,除上述内容之外,还应包括光与物质(包括光子与光子)的相互作用等诸多基本问题及其应用。这样,光子学应含如下分支:光谱学、非线性光学、光化学、光生物学、量子光学、

信息光学等众多学科,或者说,它包含了光学与光电子学的绝大部分内容。但是,需要特别指出的是,光子学绝不是这些分支的概念、知识、理论等的简单相加,而是从更高的高度,在光子的层次上进行的融合、贯通、统一和升华。

在我国,老一辈科学家如龚祖同、钱学森等早在70年代就对光子学及其发展寄以极大期望,并多次撰写专文,频频发出呼吁,希望开展光子学学科建设。但是这些都未能引起有关领导与科技工作者们的足够重视。近年来随着国际上光子学研究的飞速发展,促使越来越多的人关注光子学,并对这门新兴学科的发展与作用产生兴趣和紧迫感。但从总体来看,我们与国际上的差距还很大。例如,在我国,通过各种重要渠道安排的项目中光子学和光子技术的项目比例较小,经费强度不高。另外,在我国尚无光子学的专著和课程,甚至在即将实施的学科分类中,光子学尚未占据应有的位置,或者说尚未被认可。

二、光子学的崛起及其意义

随着光子学的逐渐形成及光子技术的迅速发展,人们对其认识与评价也在不断变化和深化。例如,美国政府已经确认,光子学在国家安全和经济发展方面有着深远意义和潜力,并且断定,通信与计算机研究与发展的未来属于光子学领域。1991年美国已政府已将光子学确定为国家发展的重点。公开出版的《数学科学、技术、经济竞争力》一书中正式公布,美国国防部、能源部将光子学在当前20项关键技术中被列在第五位。有些科学家预言:“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,将给工业和社会带来比电子技术更为巨大的冲击”。日本较早地认识到了这一点,因此,他们对光子学研究做出了较大投资,并制定了一系列促进其发展的重大举措,而且已经取得了引人注目的进展。发达国家为什么重视光子学的发展,其背景在于光子技术与光子产业具有巨大的潜在市场。

在当今世界的经济、科技、军事等众多领域中,发挥首要作用的产业无疑是电子产业。回顾电子产业的发展历史就可以看出,其发展过程是电学→电子学→电子技术→电子工程→电子产业,如果从1883年爱迪生实验算起,其间历经了110多年。现在人们细心考察和分析光子学的发展,又看到了一条类似的路线在迅速开拓着,即光学→光子学→光子技术→光子工程→光子产业。这种在发展模式上的惊人相似,激励了我们的创造思维。如果说现今的光子学正处于50年代电子学的地位的话,那么下个世纪,光子学定将迅猛发展,并迎来一个光子

时代及其顶峰时期。其实,近十年来,当人们致力于开发多方位信息处理系统、超高速计算机和通信系统时已面临电子学带来的许多不可克服的困难,例如电子学逻辑元件的开关速度已接近极限等。然而,光子学及光子技术尽管目前还不如电子学及其技术成熟和完善,但从实质上讲它却能克服和冲破电子学遇到的种种困难和障碍。我们将电子与光子的性质作一比较,如下表所示。从中可以看出,作为

特 征	电 子	光 子
静止质量	m_0	0
运动质量	m	$h\nu/c$
传播速度	小于光速	等于光速
时间特性	具有时间不可逆性	具有时间可逆性
空间特性	具有高度的空间局域性	不具有高度的空间局域性
粒子特性	费米子	玻色子
电 荷	$-e$	0
自 旋	$1/2(h)$	$1(h)$

支撑当今和未来信息社会的两大微观信息载体的电子和光子,除了有能承载信息的共性之外,还有其各自的个性。例如,光子属于玻色子,不带电荷,不易发生交互作用,因此光束可以交叉通过而互不影响;光子在真空中的速度为光速,不受RC时间常数的限制;光子的时空特性使之能形成前向和后向共轭波,补偿掉传播中的畸变和失真等等。这些特性反映在技术上,可以归纳出如下几点:

1. 目前电子器件及其系统的响应时间最快达到纳(10^{-9})秒量级,几乎到了其固有极限值,突破这个极限值是不可能的。光子器件及其系统的响应速度则远比其高,由测不准关系得知,光子的响应时间可达飞(10^{-15})秒量级,目前已能获得十几飞秒的光子脉冲。显然,这一点在未来信息时代的各种关键技术中将发挥巨大作用,尤其是在计算机技术中将会促成根本性变革。1990年1月,美国贝尔实验室完成了世界第一台数字光处理器,其中作为核心部件的光开关速度达到每秒10亿次。这种高速度运转及其并行处理特性为其发展和应用展示出十分诱人的前景。

2. 光子技术的信息传输容量大,这一优异特性已在现代光通信中得以充分体现。或者说,近十年中光纤通信的迅猛发展恰恰是光子技术促成的。有人估算,光纤通信的主干线在世界上每年以百万公里的速度向前延伸。目前已完成了从第一代0.85微米波段与多模光纤、第二代1.3微米波段零色散与单模光纤至第三代1.55微米波段与低损耗色散

位移单模光纤的换代发展。传输容量从1978年的10吉比特/秒·公里以每年增长10倍的速度提高,到1986年达1太比特/秒·公里。在传输模式上已打破常规的IM/DD(强度调制/直接检测)方式,相继推出了相干光通信、复用光通信、光孤子通信以及量子光通信等等。特别是近年来在光纤放大技术上的突破,使光孤子通信变成了现实,开创了本世纪的前沿传输系统,为全光和最终无限距离的超高速通信提供了希望。量子光通信,又称光子通信,是一种概念全新的通信系统。理论上已证明,一个光子在室温下可以携带近30比特的信息量,如果在低温下,这个数值将随温度下降以指数形式增加,以至无限。因此从理论上讲,光子通信有望借助一个光子将无穷多个信息传送给无穷多个受信者。这将使光子学在通信领域的优势得以充分显露。

3. 光子技术在信息存储领域的潜力令人刮目相看。近年来光存储技术长足进展,光盘以其数据存储密度高、误码率低、可靠性好以及适应性强等诸多优点而广泛受到青睐。目前,一张直径200毫米的双面光盘,其厚度不超过2.4毫米,却可存储两部电影的全部声像信息。随着可擦除大容量光盘的普及,价格低廉、复制方便的光盘将格外受到重视。特别是全光光盘一经问世就立即较之磁光光盘显示出独特的优越性。科学家们预计,光盘将在众多存储器件中形成优势,成为20世纪继汽车、电视、微机之后的又一项极具潜力的重要发明。特别要提及的是,利用光子学方式可以实现的三维立体存储,其容量之大,令人惊叹不已。一旦其关键技术取得突破,其无与伦比的优势便会即刻显露出来。

4. 90年代是第一代微光子技术趋于成熟的时期。这一领域涉及梯度折射率光学、二元光学、纤维光学等许多分支。已研制出的许多元器件,包括自聚焦微透镜阵列、光纤面板与微通道板、软X射线光刻及光互连用微小光学阵列器件等,真是五光十色。另外,在有源器件方面,仅就信息处理单元来说,其元件的微集程度已远远超过集成电路中的电子元件。例如,单量子阱激光器或量子点处理元件的尺寸均在0.1微米以下。微光子技术的发展与现已成熟的微电子技术相结合,有可能开拓出新一代更高水平的信息技术。

光子学中引人注目的另一个重要分支是光子集成(Photonics IC)。它形成于80年代后期,其特点是,可将有源光电子器件(如半导体激光器、光放大器、光探测器等)与光波导器件(如分/合波器、耦合器、滤波器、调制器、光开关等)集成在一块半导体芯片上,构成一种单片全光功能性器件。这从根本上改变了集成光学和光电子集成中有源无源器件分别集成后再用光纤连接的弊端,从而使器件在

(下转第33页)

学术水平与他们相比毫不逊色,对中国学者参与这项计划一直寄予厚望。

我国已拥有数家国家重点实验室,它们均可承担相应的工作,如复旦大学基因工程和分子遗传学实验室、中国科学院分子生物学实验室、上海癌基因和相关基因实验室、中国医学科学院肿瘤分子生物学实验室、实验血液学实验室、医学分子生物学实验室、中国预防医学科学院分子病毒学实验室、湖南医科大学医学遗传学实验室等。国家自然科学基金委员会、国家科委和卫生部相继资助了有关项目。“八·五”期间,国家科委投资2300万元开展水稻基因组研究,这为我国开展人类基因组计划研究打下了一定的基础。此外,我国在血友病B的基因治疗、食管癌发病机制和防治等方面作出了很有特色的成果,得到了国际同行的广泛赞誉。法国巴黎人类多态性研究中心(CEPH)主任丹尼尔·科恩(Daniel Cohen)教授今年初访华时对中国学者在低投资条件下做出这么大的成绩感到惊讶。所有这些为以后开展国际合作奠定了基础。我国在技术贮备方面也取得可喜进展,如人染色体高分辨带型分析、显微切割和PCR扩增等,已初步形成了结构合理的研究队伍,其中有长期从事分子生物学、细胞生物学和人类遗传学研究的骨干科学家,有造诣深厚的学术权威,有学成回国的年富力强的中青年学者,也有技术精湛操作娴熟的技术人员。

“中国不同民族基因组中若干位点基因结构的比较研究”已列入国家自然科学基金委员会“八·五”期间第二批重大项目,形成了“中国人的基因组计划”。今春,上海和北京的科学家从法国引进了一套人工酵母染色体文库,将为我国人的基因组DNA大片断分析和开展国际性合作开创新的局面。

我国的人基因组研究的目标和内容

根据我国的特点,我们制定了有效的目标,即

(上接第30页)

体积、功耗等众多方面更具有竞争力。正因为如此,光子集成受到格外重视,成为当前光子学的重要发展方向。

综上所述不难看出,利用光子技术形成的诸多器件或系统在响应速度、传输容量、存储密度,以及在微型化、集成化程度方面,或者说在信息科学领域所关注的几个重要指标上都显示出明显的优势。因此可以说,光子工程与光子产业的潜力是巨大的,前景是诱人的。科学家们曾经指出,下个世纪的三大产业将是生物工程、材料科学与光电子,就是说,已成为时代标志的光子学产业也将是其中的最重要的部分。

有条件地收集、保存不同民族的基因组,研究民族间基因组的结构及其差异,并分析差异的遗传学意义,查明我国若干重要疾病致病基因和易感基因的分布特征,为以后进行基因诊断和治疗提供理论依据。

研究内容包括:

1. 基因组收集和保存,收集并保存我国西南、东北若干民族或隔离群(包括具有特异标志的民族大家系)的基因组,如单基因遗传病、多基因遗传病和染色体畸变个体的细胞培养和建株,为人类基因组计划提供充分而有特色的DNA样本。

2. 建立和改进用于基因组研究的新技术,如定点突变分析,大尺度DNA片段的分子克隆,特有基因文库构建等。构建1~2个中国人基因组YAC库、粘粒(Cosmid)和P₁噬菌体等克隆载体。此项研究可通过技术培训,统一标准与国际同类研究接轨。

3. 中国民族致病基因、易感性基因与正常人生长、发育和衰老相关基因位点的比较。对特定区带测序,形成2~3区带图谱。测序中心负责制图、测序、汇集、储存以及分发中国人类基因组数据信息。这样的研究成果必将在国际人类基因组计划中占有一席之地。

我国人基因组研究计划的实施,可望弄清我国若干民族在若干基因位点的差异以及致病基因和易感基因在不同民族中出现的频率,为基因诊断和基因治疗奠定基础,也为我国民族学研究提供生物学依据,以促进和提高我国人类遗传学、神经生物学、医学和生物技术的总体研究水平,稳定生命科学基础研究,培养一批跨世纪的生命科学研究人才,分享国际人类基因组计划的研究成果。

(责任编辑 刘先曙)

需要反复提及的是,光子与电子是一对具有高度互补性的自然伙伴,电子能态的改变导致光子的发射,而光子被物质吸收时又引起电子能态的变化,等等。光子学与电子学的关系也是如此,实际上它们总是相互依赖、相互补充、相互渗透、相互结合和相互促进的。正是这种依赖、补充、渗透、结合和促进才不断地为社会与文明创造出一个个硕果。上面曾多次提到的“我们将迎来一个光子时代”,这决非意味着电子学将过时。电子学与光子学,连同它们结合的产物——光电子学永远是为社会创造财富和文明的亲密伙伴。

(责任编辑 刘先曙)