

# 光学发展与社会进步

杨宏 李洪云 龚旗煌

(北京大学物理系,人工微结构和介观物理国家重点实验室 100871)

## 一、前言

人从降生开始,光就伴随其一生。宇宙的发展也跟光的发展紧密联系在一起。光学的发展过程是人类认识客观世界进程中的一个重要组成部分,是不断揭露矛盾和解决矛盾,逐渐从不确切认知走向确切认知的过程。光学确实是无处不在的,太阳能的利用,蓝光的发光,激光的焊接和切割,电影的放映,光纤通信,光合作用,X光的应用和显微镜的应用等等。光学仪器已在人们日常生活中起着无可替代的作用。列举一个最熟悉的例子,我们每天都在使用的手机就使用了三十多项光学的技术:光学玻璃、激光切割光滑的玻璃表面、激光打标、OLED和液晶显示、挡光版、背光照明、实现彩色的偏振片和滤光片、增加清晰度的增透膜、照相的镜头、成像的CCD、芯片的制造、光刻技术的应用、通过光纤进行信息的传输、蓝牙无线红外通信、光纤传感和投影等。今天,我们将从光的过去、现在和

未来几个方面来探讨光对我们的生活所起到的至关重要的影响。

光学研究对自然科学的发展起到了非常大的促进作用。回看历史,第一个诺贝尔物理学奖授予了伦琴,伦琴发现了X射线,揭开了20世纪物理学的革命序幕,促进了现代物理学的诞生。时至今日,X射线的应用仍然对生命有至关重要的影响,比如在体检中使用的我们熟知的X光检查身体;2002年诺贝尔物理学奖仍然与X射线相关,授予了对天体物理有开创性贡献的宇宙X射线源的发现,打开了宇宙新窗口。进入21世纪,多项诺贝尔奖授予了光学领域,2017年的诺贝尔物理学奖授予了引力波的探测研究,表彰获奖者们构思和设计了干涉仪引力波天文台,验证了爱因斯坦的百年预言,为人类探索宇宙配上了“耳朵”;2014年的诺贝尔物理学奖授予了半导体照明研究,蓝色发光二极管的发明使白光可以以新的方式被创造出来,人类可以拥有更加持久和高效的灯光替代光源,这也是与光学



图1 光学显微镜



图2 (a) 蓝光LED; (b) LED

紧密相关的;2014年诺贝尔化学奖同样授予了光学研究领域,因光学显微成像技术的最高分辨率一直无法超过光波波长的一半,被认为是光学显微镜理论上的分辨率极限,而获奖者们却将超分辨荧光显微技术的极限拓展到了纳米量级,一百多年没有人能够突破的极限被三位科学家成功地绕过,使得透视生命体分子的运动成为可能。2009年,诺贝尔物理学奖被授予英国华裔科学家高锟及美国科学家威拉德·博伊尔和乔治·史密斯。高锟在“有关光在纤维中的传输以用于光学通信方面”取得了突破性成就。博伊尔和史密斯发明了半导体成像器件—电荷耦合器件(CCD)图像传感器,光纤通讯及CCD成像技术都与我们的日常生活息息相关。光学是物理学中古老的学科,又是当前科学研究中最活跃的学科之一,推动着人类对自然的认知和人类社会的进步。

联合国教科文组织宣布2015年为“光和光基技术国际年”(简称国际光年),以纪念千年来人类在光

领域的重大发现。光科学及其应用带来了直接改变人类活动的革命性的技术,但是,这些重要的技术进步却常常未能吸引人们的关注。国际光年是推进光和光基技术进步、深化国际光学领域合作、促进光学学术交流、普及光学民众教育的一次重要契机,并将成为在国际光学工程领域产生广泛深远影响的一年。随后,在2018年5月16日,确定每年的这一天为国际光日,以纪念1961年这一天的红宝石激光诞生。光日的四大理念在于:1. 光在人类活动最基本的层面发挥了最核心的作用。光是生命本身的起源,比如光合作用,没有光合作用人类将无法生存。2. 以光为基础的工业是主要经济驱动力,光的许多应用通过医学、通信、娱乐和文化彻底改变了社会。例如,光基技术通讯提供信息促进可持续发展,提高社会健康和福祉,直接影响人类的需求。3. 以光为基础的技术越来越多的为全球挑战提供解决方案,包括太阳能利用,特别是能源、教育、农业和公共卫生等领域,应用光基技术改善发展中国家的生活质量是实现可持续发展重要目标的关键。4. 随着光成为21世纪科学与工程交叉的关键学科,全世界已经充分认识到光学研究的重要性,以及光基技术对全球发展的重要性。同样重要的是,最聪明的年轻人继续被这个领域的科学和工程事业所吸引。



图3 威廉·康拉德·伦琴和X光照片

## 二、光的认知历程

光的认知过程可简单划分为两个阶段,17世纪



图4 2015国际光年

以前的直观体验阶段和17世纪以后的科学认知阶段。

中国人在直观体验的感性认知上是很有创造力的。公元前400年,墨子用很美的词句来描述了光的直线传播和小孔成像,这是最早的小孔成像技术记载。“景,光之人,煦若射,下者之人也高;高者之人也下,足蔽下光,故成景于上,首蔽上光,故成景于下……”。指出了小孔成倒像的根本原因是光的“煦若射”,以“射”来比喻光线径直向、疾速似箭远的特征。西汉时期记载,我们的祖先将冰削成球状,对着太阳,在太阳的“影子”位置点燃艾草生火。这是世界上最早的光的聚焦和对太阳能利用的范例。公元500年左右,唐朝记载光是有颜色的,且颜色是光照到雨滴上产生,是光的本质而不是雨滴的性质。古人很早就提出了这个概念,但很遗憾并没有进一步从数学角度对这些光学现象进行描述,进入17世纪我国在光学领域的发展与世界水平逐渐有了差距。

17世纪光学在欧洲诞生了,欧洲成为了当时光学研究的前沿阵地。几何光学和波动光学,从数学和科学的角度描述了光。几何光学阐述了光的直线传播、反射、折射等,波动光学阐述了光是一种电磁波,光学研究进入了科学认知的历程。科学认知即光的科学,需要了解光的本性是什么、光是怎么产生的、怎么传播的,以及与物质的相互作用,甚至通过物质的相互作用怎么去调控光,这些也正是光科学研究主要内容。



图5 光的颜色

几何光学是光学发展史上的转折点,在这个时期建立了光的反射定律和折射定律,奠定了几何光学的基础。其中最重要的是光的折射定律,折射率决定了光的传播和光的相互作用,是光学研究中最基本的数值,介电常数与极化率等都是与折射率紧密关联的常数。折射定律的出现和应用奠定了光纤通讯的基础。折射定律在人类生活中也经常被发现,比如海市蜃楼的现象。当光线在同一密度的均匀介质内传播时,光的速度不变并且以直线方向前进。可是当光线倾斜地由一个介质进入另一密度不同的介质时,光的速度就会发生改变,行进的方向也发生曲折,这是因为折射率的不同决定了光的传播的角度不同。假如在地平线下有一艘轮船,一般情况下是看不到它的。如果在冰冷的海面上,下层空气温度低、密度大,上层空气温度高、密度小。由于这时空气下密上稀的差异较大,来自船舶的光线先由密的气层逐渐折射进入稀的气层,由于折射率的连续变化,光线发生弯曲,又折回到下层密的气层中来,最后投入我们的眼中,就能看到轮船的像,即海市蜃楼的显现。在沙漠里看到虚幻的树木水源,也是同样的原理。利用折射定律可以解释生活中很多的科学问题和应用问题。我们在科研实验中诞生的大的光学仪器也离不开折射原理的应用,照相机,望远镜等接连出现。随着透镜的发展,更进一步促进了几何光学的发展。透镜与物体之间的距离改变时成像会有不同,透镜的组合还

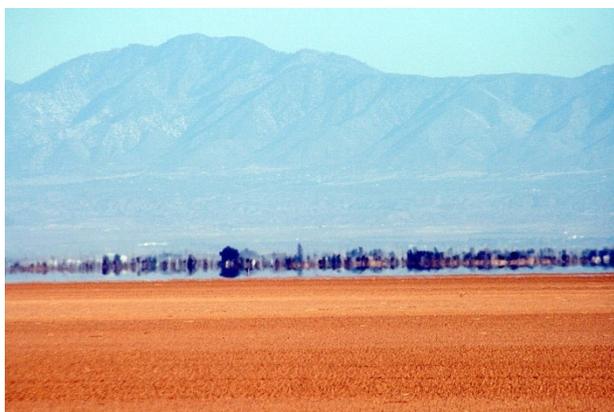


图6 海市蜃楼

会增加放大倍率,从而实现了显微镜放大成像,人们可以看清楚微小的物体,这些对人类社会发展的影响非常大。

17世纪下半叶,牛顿和惠更斯等把光的研究引向进一步发展的道路。1672年牛顿完成了著名的三棱镜色散试验,经过三棱镜的太阳光可分出五颜六色的光,这是最早的波长的概念。但是,牛顿却认为光是粒子性的。牛顿的微粒流的假设则难以解释光在绕过障碍物之后所发生的衍射现象。惠更斯反对光的微粒说,认为光是波动的。光向外传播类似于将石头掷于水中,波向外传播,每一点都是一个源,再次向外传播。这与光是粒子的,类似于打子弹,是一个粒子一个粒子的向前传播的学说相矛盾。惠更斯运用他波动理论中的次波原理,不仅成功地解释了反射和折射定律,还解释了方解石的双折射现象。这个时期也可以说是几何光学向波动光学过渡的时期,是人们对光的认识逐步深化的时期。

1801年,杨氏干涉实验证明了光的波动性。托马斯·杨把一支蜡烛放在一张开了一个小孔的纸前面,这样就形成了一个点光源。在带孔的纸后面再放一张纸,将第二张纸开出两道平行的狭缝。从小孔中射出的光穿过两道狭缝投到屏幕上,到达不同位置时位相不同,叠加后出现强度的增强或减弱,会形成一系列明、暗交替的条纹,这就是著名的双缝干涉条纹。虽然这一实验充分证明了光具有波

动性,但是光的波动理论仍然不被人们认可,光的波动性一直处于争论之中。当时欧洲科学中心,法国科学院提出了一个著名的题目—泊松亮斑,菲涅尔成功地利用这一题目证明了光的波动性。菲涅尔将屏孔改变成与波长量级相当的大小,实验中发现屏幕上出现了干涉条纹,中间出现了亮斑,证明了光的波动性。光的波动性被认可后,还促进了电磁学的快速发展。麦克斯韦方程是现代电磁学的基础,而光的所有性质都可以用麦克斯韦方程来解释,所以,“光也是一种电磁波”这一观点逐渐被大家认可。从无线电波到伽马射线都是电磁波,光只是其中很小的一部分,而可见光400~600 nm的波段是更小的一部分,但却是人们最感兴趣的波段。光的波动理论更是促进了光谱仪、干涉仪、传感器、镀膜光学器件等的出现。

19世纪末,经典物理的大厦已经建成。汤姆逊在新年祝词中讲到,经典物理中只剩下“两朵黑云”,其中一朵与光学紧密相关,即波动理论的困惑。用波动理论计算黑体辐射会无限大的增强—瑞利金斯曲线,与实际测量不符,即紫外灾难。为了解释这个难题,数学家普朗克从物质的分子结构中借用不连续的概念,提出了量子论。他认为光具有量子化特性,能量是一份一份的,并不是连续的,即光是粒子的,这可以很好地解释紫外灾难。

爱因斯坦提出光量子学说,用光电效应证明了光的粒子性,并获得诺贝尔物理学奖。这标志着光



图7 詹姆斯·克拉克·麦克斯韦

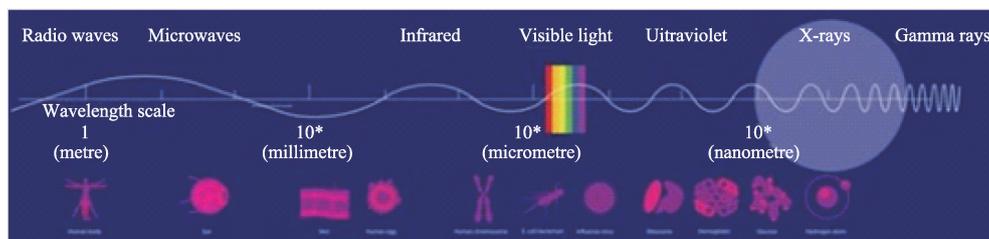


图8 光也是一种电磁波

科学的研究进入了量子光学时期。而另一个促进量子力学诞生的重要研究是对“太阳黑线”的研究。应用光谱仪测量阳光照射的谱线中总是有几条稳定存在的谱线,起初人们无法判定黑色谱线的来源,后确定为太阳光到达地球的过程中吸收了大气中的某些元素,于是在太阳光谱中就没有这些频率的光波,形成了暗线。但吸收线为单线,为了解释此现象,波尔提出了原子构造学说,认为原子由原子核和核外电子组成,电子存在不同的能级,吸收光子后电子从下能级跃迁至上能级将光子能量吸收,由此提出了原子结构和能量不连续性,解释了太阳黑线现象,量子力学由此诞生。我们可以看到,光学在量子力学的建立过程中做出了重要的贡献。光子概念的提出、光电效应的发现、紫外灾难的解释、光谱暗线的解释,以及能级的概念提出等,这些研究奠定了当代量子物理学的框架,而量子物理学的发展又促进了光学的巨大发展。

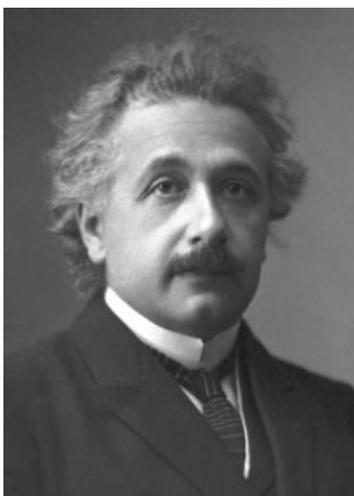


图9 阿尔伯特·爱因斯坦

### 三、现代光学时期

现代光学是基于激光的发展而建立起来的。激光的发明是光学发展史上的一个革命性的里程碑。红宝石激光器的诞生使人类第一次得到自然界中不存在的光源——激光。由于激光具有强度大、单色性好、方向性强等一系列独特的性能,很快被运用到材料加工、精密测量、通讯、测距、全息检测、医疗、农业等极为广泛的领域。现代科学技术的发展,又使激光进入了超快超强领域。激光器可以产生  $4\text{ fs}$  ( $1\text{ fs}=10^{-15}\text{ s}$ ) 的超短脉冲,如此短的时间标尺可以度量飞秒量级的物理变化。物质稳定存在是因为原子核有足够的束缚力将电子禁锢,以氢核对电子的作用为例,作用力大概为  $10^{16}\text{ W/cm}^2$ 。现在激光器产生激光的强度可以达到  $10^{21-22}\text{ W/cm}^2$ ,那么激光场强对于原子的作用力就不再是微扰量级,很容易将电子与原子核撕裂,可以探索亚原子量级的微观结构。激光创造了极端的时间尺度和极端的场强,极大的扩展了光学的应用,将应用扩展到高分辨光学测量、高强度非线性光学、相对论非线性光学、超快动力学和强场物理等领域。利用飞秒激光探究分子的解离过程的研究获得了1999年诺贝尔化学奖,应用激光的超高时间分辨率的特性去探测分子的解离过程,对化学研究来说具有非常重要的意义。激光聚焦可以实现电场高达  $10^{12}\text{ V/m}$ ,超强激光与等离子体相互作用,产生的加速电场可以比常规加速器高出千倍以上。此外,光已经成为当代计量的新标尺,1983年第17届国际计量大会上确定:米是光在真空中传播  $1/299792458$  秒时间间隔所经路径的长度。

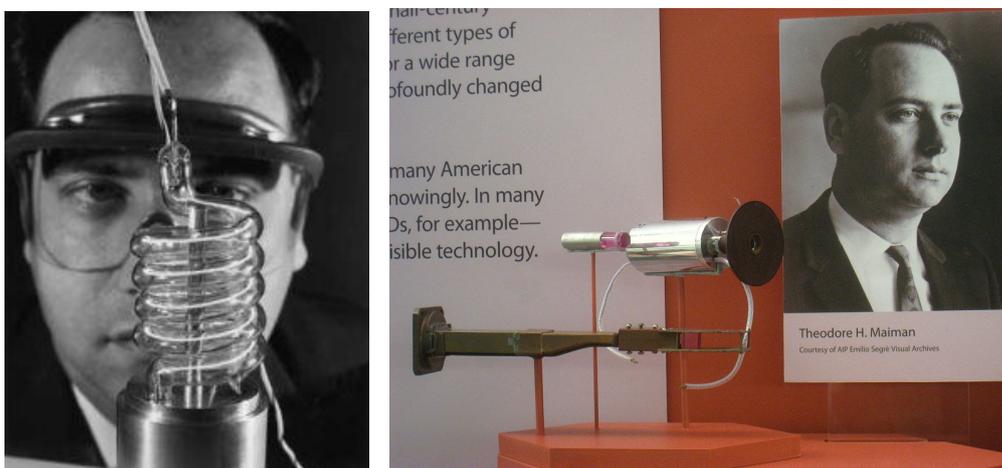


图10 1960年美国科学家梅曼宣布获得了激光

光是现代科技的重要驱动力,光学与信息、先进制造、能源、健康和国家安全密切相关,推动人类社会的发展。1. 光与信息:光纤通信、光开关、光全息、CCD成像、光量子通信、立体电影、光纤胃镜,计算机等等,都能体现光与信息的关系。以互联网计算机为例,如果将光的作用去掉,依赖光纤通信的计算机信息传输和依赖光刻的芯片加工将不复存在,整个信息时代就消失了。光信息传播是以0、1信息先编码,传输后再解码来输出信号,那么光开关决定了信息的通过,有光通过为1,无光通过为0,光开关的响应速度决定了信息传输的快慢。现在新兴的自动驾驶的感知也是依赖光学,车辆的行驶路线、周边的物体避让和路况环境的确定等,都是通过光学信息的采集和处理来实现的,光和信息始终紧密地联系在一起。2. 光与先进制造:光刻技术已经将波长越做越小,现在可做到几纳米的量级和精度,甚至可以制造纳米和微米尺度的微结构,广泛应用于生命科学和医疗等领域。激光打标、激光切割、3D打印等应用也无处不在。例如,现在百分之七十以上的汽车构造都是用激光焊接的技术完成,焊接效果几乎与原型一致,增加了车体的稳定性和安全性。3. 光与能源:LED光源由于其电压低,能耗低,安全性高,目前已经得到普及使用。激光分离铀同位素、激光聚变、太阳能的利用等能源领域都是光学重要的应用体现。4. 光与健康:X光

的发现深刻地影响了医学领域的发展,DNA双螺旋结构就是科学家应用X光解析出来,引发了医学领域颠覆性的变革。光学显微镜的出现,使得人们可以观测细胞、染色体等,随着观测精度进一步提高到百纳米量级,更可观测高分辨荧光蛋白的细微结构,对生物物理的发展起到了极大的推进作用。激光美容、激光眼部手术已经是成熟的技术,被广泛地应用在美容医疗领域。5. 激光与国家安全:激光安检、激光武器、激光制导、激光测距、激光导航等,激光几乎是安全和国防等研究领域的必备利器。

从公元前墨子对光的描述,到1665年显微镜的发现,1704年牛顿光学的出版,1865年麦克斯韦方程的诞生,1905年光电效应的发现确定了光的量子特性,1960年激光的诞生,1965年光纤理论的提出,1973年第一代光纤技术的发展,1999年飞秒激光作为时间分辨对超快动力学的技术测量,这些都是光学发展史上的里程碑。21世纪是光的世纪,光以其不可替代的作用促进着科学及社会的进步。

#### 四、光的未来

光有怎样的未来,未来我们可以做什么? 不难预测,我们将可以得到更多极端的条件,光场的操控方式发生了根本性的改变。首先可以产生非常短的脉冲,目前商用仪器产生的光脉冲最短可达到 $4\text{fs}$ ,另外可精确控制相位,形成完全不同的场强分

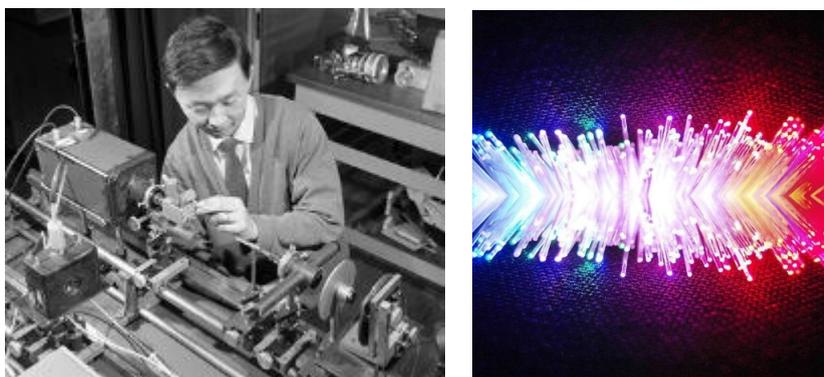


图 11 “光纤之父”高锟

布。光场模式多样化,可进行波长、相位、频率、位置、时间等条件的操控,增加了物理学研究中的变量,拓展了物理学研究的方向和极限。同时也可以在空间尺度进行调控,可突破光的衍射极限,借助一些微纳结构将光斑尺寸约束至纳米尺度以下,比如表面等离子激元,可以带来全新的光学研究思路。空间小尺度光学的出现,开拓了近场光学的研究,包括表面等离子激元的研究、人工纳微结构的研究、特异材料的研究、微纳光电子器件的研究等。纳米光学和激光光学的发展可以使得光与物质相互作用区更小,相互作用尺度更小,使得光信息技术步入了新的时代。

时间小尺度方面,飞秒激光与物质相互作用后可以产生阿秒( $as$ )激光( $1 as=10^{-18} s$ ),现在实验室通过飞秒光高次谐波产生的最短的阿秒光脉冲可达到  $46 as$ 。阿秒的出现使更小时间尺度方面的观测成为可能,我们也就拥有了更短的标尺。氢原子中电子绕核运动一圈的时间是  $150 as$ ,如果我们拥有时间尺度为  $46 as$  的标尺,就可观测电子的运动过程,这是非常有意义的。但是目前人们还面临着阿秒光脉冲能量较低等困难,很多研究还不具备实验条件,这也是光学未来需要攻克的目标。超快技术也应用在生命和材料领域的研究中,光的多维调控为这些交叉领域研究提供了丰富的手段,如生物大分子的四维成像、超快动力学与飞秒医学等等,这些都是非常前沿的光学领域的尝试。比如,以前我们可以产生的光斑是圆的,现在却可以将光斑中心

变成圆的空洞,偏振变成镜像、横向或者螺旋偏振,突破了原来的线偏振、圆偏振和椭圆偏振等等。正是由于有了多样的光结构,应用普通光和结构光先后照明,使空洞处保留原来的粒子的空间分辨,此技术突破了光学显微技术在理论上的极限,实现了纳米高分辨成像。此外,将光脉冲展开成不同的脉冲形状,利用脉冲整形对动力学过程、分子形成和解离、生命和材料等的反应过程进行人工调控。通过精密调控光脉冲各点的位相和振幅,构建特定光场结构的波阵面,实现光场偏振态剪裁,可以控制细胞等微观粒子的运动。在超快计算领域,要求现代的微电子芯片计算量大、计算速度快。通常情况下,超快计算是通过计算机并联实现的,但并联导致能量损耗非常大。如果在微电子芯片里加入光芯片来实现光信息的传输,用光来进行机器间的交互,可以很好地解决能耗问题,极大的增加运算和传输速度,为未来计算和信息处理提供了新的方法。飞秒激光时域和频域的控制还可以对光合作用中的过程进行详细的研究,探索研究光合作用具体的作用过程和原理之后,人们就可以人造光合作用体,解决人类目前所面临的多种能源问题,这些都将是现代光学的前沿和未来光学的发展方向。

以上图片均来自于以下网站:

<http://www.light2015.org/Home.html>

<https://www.nobelprize.org/>

wikimedia commons