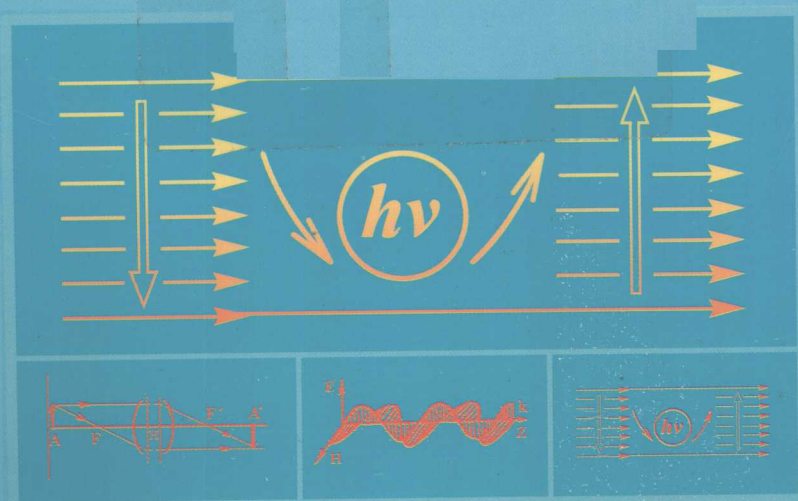


光子光学

Photon Optics

李桂春 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

光子光学

Photon Optics

李桂春 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书以光子学的基本原理为基础,系统地论述了光的辐射、光的吸收、光的色散、光的散射和光的发射等光与物质相互作用的现象,最后介绍应用于光学系统中典型的光子光学器件。本书是一部学科基础理论专著,也是一部研究与光学相关的许多交叉学科发展的基本理论参考书。

本书可供从事光学以及相关交叉学科研究的科技工作者和教师阅读参考,以及理、工、医、农等与光学交叉的各类专业的学生使用,还可作为高等院校《普通光学》课程的教材。

图书在版编目(CIP)数据

光子光学/李桂春编著. —北京:国防工业出版社,2010.4

ISBN 978-7-118-06722-4

I. ①光… II. ①李… III. ①光子-研究
IV. ①O572.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 042402 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 26 $\frac{1}{4}$ 字数 489 千字

2010 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 52.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

光是一种无需介质而能在真空中传输的电磁波;光是由光子组成的能量波;光是可视而触摸不到的特殊物质;光是能量传输的一种过渡态……由于光的本质太复杂了,要回答光是什么的问题,真是一言难尽。因此,描述光的本质的光学原理就更为复杂和丰富了。从常见的光学现象出发,在线性光学范围内,光学原理基本上可分为光线光学、光波光学和光子光学三大部分。光子光学是现代光学测量技术发展的理论基础。

光线光学的光线理论,较完善地描述了光的折射和光的反射等有关现象;光波光学的电磁波理论较满意地论述了光的干涉、光的衍射和光的偏振等有关现象;而光子光学的光量子理论准确地阐述了光的辐射、吸收和光的发射等光的产生和光的湮灭现象,成为现代光学原理的重要组成部分。本书以第1章光子原理为基础,在后五章中系统完整地分别论述光的辐射,光的色散,光的吸收,光的散射和光的发射等五类光学现象;第7章介绍应用于光学系统中典型的光子光学器件。光子光学的核心是光子能量的传递和物质分子的能态改变。光子光学研究的对象是光与物质的相互作用,光子光学试图回答光从何处来,又到哪里去的问题。

本书是作者在航空气动力技术研究院几十年的光学研究工作的结果,表达了对光学科学发展的关切之情,期盼现代光学原理更好地应用和发展。本书的重点是对基本光学现象的分析,同时又注重应用研究的需要,避免复杂数学公式的推导。不仅考虑光学学科研究的深度,而且又顾及基本原理应用的广度;既立足于分支学科的深入分析,又放眼于相关交叉学科的横向发展。由于现代科学的飞速发展,知识已突破学科的界限,新兴边缘学科不断涌现,任何学科都不能孤立地存在和发展,因而必须重视学科前沿的研究发展趋势。

《光子光学》是一部学科基础理论著作,论述了近百年来现代光学理论的

发展和应用,是光学原理的重要组成部分,它与光线光学和光波光学一起构成光学基本原理,是很多相关交叉学科发展不可缺少的理论基础。随着科学技术发展,无论你在哪个领域,无论是哪一门技术学科都与光学密切相关。光学以前所未有的速度渗透到理、工、医、农等自然科学的各类专业中,与光学交叉的高新技术十分普遍,各类专业的学生都需要掌握现代光学基础理论知识。随着高等教育课程的有所创新,本书也可作为高等院校相关专业《普通光学》课程的基本教材。

本书若能对今后承担光子光学研究与发展任务的学生和青年科技工作者有一些帮助,作者将深感欣慰。

限于作者的水平,书中难免有错误和不当之处,敬请读者批评指正。

李桂春

2009年10月

目 录

绪论	1
第 1 章 光子原理	10
1.1 光量子学说	10
1.1.1 普朗克的振子能量分立说	10
1.1.2 爱因斯坦的光量子理论	14
1.1.3 玻尔的原子结构理论	15
1.2 能态体系	16
1.2.1 波函数、态矢及算符	16
1.2.2 薛定谔方程	23
1.2.3 密度算符	27
1.2.4 能级跃迁	35
1.3 光子的量	46
1.3.1 光子场	46
1.3.2 光子的量	55
1.4 光子的态	61
1.4.1 光子的状态	61
1.4.2 光子数态	64
1.4.3 光子位相态	68
1.4.4 光子相干态	72
1.5 光子在介质中的传输	78
1.5.1 光子分布函数和传输基本方程	78
1.5.2 光子的吸收、散射和辐射	80
1.5.3 光子传输的一般方程	82
第 2 章 光的辐射	85
2.1 光辐射的基本概念	85
2.1.1 热辐射和光量子	85
2.1.2 基本辐射量	86
2.1.3 辐射光谱	89

2.2	光辐射的基本理论	96
2.2.1	偶极子辐射理论	96
2.2.2	电极化率理论	98
2.2.3	洛伦兹线型和高斯线型	100
2.2.4	辐射的光子理论	101
2.3	光辐射基本定律	106
2.3.1	基尔霍夫定律	107
2.3.2	经典黑体辐射定律	108
2.3.3	普朗克黑体辐射定律	110
第3章	光的色散	116
3.1	光色散的基本概念	116
3.1.1	色散介质中的光波	116
3.1.2	分子的极化特性	118
3.1.3	分子的色散	122
3.2	光色散的基本原理	124
3.2.1	洛伦兹色散理论	124
3.2.2	色散的光子理论分析	127
3.2.3	色散函数	128
3.2.4	用高斯单位制表示色散公式	130
3.2.5	折射率随波长变化的分析	131
3.2.6	离子—离子型偶极子色散	134
3.3	导体和等离子体的色散	135
3.3.1	导体的色散原理	135
3.3.2	等离子体的色散	140
第4章	光的吸收	146
4.1	光吸收的概念	146
4.1.1	光的吸收	146
4.1.2	介质的光吸收系数	147
4.1.3	光的吸收定律	154
4.2	光吸收的光子原理	166
4.2.1	光吸收过程	166
4.2.2	吸收光谱	172
4.2.3	光吸收的动力学	179
4.3	光吸收效应	185
4.3.1	光能量的转化	185

4.3.2	光子化学效应	187
4.3.3	光子物理效应	191
4.3.4	光子化学—物理效应	199
4.3.5	光子生物效应	202
第5章	光的散射	208
5.1	光散射的基本原理	208
5.1.1	散射现象	208
5.1.2	散射的基本原理	209
5.1.3	晶体中光的散射	212
5.1.4	大气中光的散射	213
5.1.5	生物组织体的光散射	214
5.2	微粒散射和分子散射	216
5.2.1	微粒散射	216
5.2.2	移动微粒散射的多普勒频移	221
5.2.3	分子的散射	222
5.3	喇曼散射	229
5.3.1	自发散射和受激散射	229
5.3.2	喇曼散射经典理论	231
5.3.3	受激喇曼散射的光子理论	233
5.3.4	相干反斯托克斯喇曼散射	238
5.3.5	光声喇曼散射	240
5.4	布里渊散射	241
5.4.1	普通布里渊散射	241
5.4.2	受激布里渊散射	242
5.5	其他光子散射	246
5.5.1	光子散射的形式	247
5.5.2	康普顿散射的光子理论	248
第6章	光的发射	252
6.1	发光	252
6.1.1	光的分类	252
6.1.2	发光的一般概念	264
6.1.3	发光的基本原理	267
6.2	自发辐射发光——热光	272
6.2.1	自发光	272
6.2.2	热辐射发光	273

6.3	场致受激辐射发光——冷光	275
6.3.1	电致固体发光——半导体发光	276
6.3.2	光致发光——荧光和磷光	295
6.3.3	电致气体发光——气体放电发光	315
6.3.4	其他场致发光	321
6.4	受激放大辐射发光——激光	327
6.4.1	激光光子学概述	327
6.4.2	激光的光子理论	333
第7章	光子光学器件	346
7.1	发光器件	346
7.1.1	热辐射光源	346
7.1.2	气体放电光源	350
7.1.3	固体光源——发光二极管	359
7.1.4	激光光源	359
7.2	光电变换器件	363
7.2.1	光辐射探测器	363
7.2.2	光电成像器件	371
7.3	光电显示器件	382
7.3.1	显像管	383
7.3.2	等离子体显示器	384
7.3.3	液晶显示器	385
7.4	光存储器件	386
7.4.1	感光化学乳胶	387
7.4.2	磁带和磁盘	390
7.4.3	光盘	393
附录A	物质方程中的物理量及其关系	403
附录B	光的基本参数及相互关系	404
附录C	量子力学的基本假设	406
参考文献		410

绪 论

1. 光是什么

光是那么神奇,常用光怪陆离来形容多彩的世界。阳光,如同水和空气一样,具有能量,是生命三要素之一。数百年来,在漫长的现代科学发展史上不断地追问,光是什么?!笼统地说,光是一种看得见摸不到的特殊物质。说其特殊,是它不同于常见的固体、液体和气体物质,它是一种电磁波,但它与电、磁又有不同之处,它是具有视觉效应的电磁波,可以在真空中传输。

光是一种重要的自然现象。由于人眼能接收光,人眼又是一种极其高级精密全自动的光接收器,因此能看到宏观世界瞬息变化的景象。人类的生存离不开光,最基本的有自然光,如太阳光、月光、星光、火光等。几百年来,随着科学进步,人类创造了很多人造光源,如最初的热发光的白炽灯;又发明了气体放电发光的放电灯;激光是第三次发明的新光源,激光的强度远远大于前两次发明的光源;近 20 年来,又第四次发现了新光源,是在同步加速器上产生的辐射光,也称为同步光。

光不是气体,但可以充满空间;光不是液体,但可以像液体一样流动并用器件成形,即可以用光子器件进行准直、会聚、发散、过滤,形成一定品质和形状的光束;与液体和气体在导管内流动相似,光还可以在光导纤维中作长距离的传输。

固体、液体是由分子、原子等粒子组成,是连续的有形体的物质,人们能直接感触到;气体同样也是由粒子组成,但是无色的气体看不见也摸不到,因为其最后的集成形态太小而不能被直接感知,光这种物质既有像液体、气体在管道中的流动性,也有像气体那样不能触摸到。由于光是由触摸不到的更小集成形态的光子组成,光子是能量分立形态的粒子,既然有流体的一些特性,因此从形态上可以说,光是一种光子流体,可以形成光刀、光镊、光笔等准物体。虽然光没有形体,却能感受到热辐射光的电磁辐射的热量,因为光子是能量的独立单元,所以也可以说光是物质的过渡态。光不能被直接储存,一旦被储存,光则转变成其他的物质形态了。光储存是一种状态转变过程,如光电、光热、光声、光磁等各种复杂的效应。

光究竟是什么?光是一种光子流体;光是物质能量传递的过渡态,是一种波动;光是一种可见或准可见波段的电磁波;光是一种无形体的特殊物质。

2. 光本质的探索步伐

在一个很长的历史时期里,人类对光的本质的认识只限于某些现象和简单的规律描述,例如,中国春秋战国时代的“墨经”中记载了投影、小孔成像等光学现象。古希腊学者欧几里德的“反射光学”就论述了光在传输过程中的直线传播原理和光的反射定理。事实上,对光本性的探讨是从 17 世纪开始的,到今天为止,能量子微粒的波动说树立在第三个台阶上。

牛顿最早认为,光是由发光物质发射出来的微粒,在一定的均匀介质中,光是沿直线路径传播的微粒流,最直观的实验证明就是物体能挡住光而形成阴影。从这种粒子流的概念出发,研究光线的反射和折射现象,产生了光线光学原理。

但是,对光线传播过程中产生的干涉和衍射现象,用微粒论是无法解释的。在三百多年前,惠更斯曾经从经典力学理论引申,并提出光是一种特殊的弹性介质中传播的机械波,但也未能如愿。19 世纪初,菲涅尔等人通过实验研究,提出光是从光源发出的波动,并用初始波和次级子波的传播图像解释了光从薄膜上反射形成的干涉现象,初步确立了光的波动理论。

19 世纪 60 年代,麦克斯韦在前人的基础上,在研究电、磁、光等现象时,预言了电磁波的存在,在 1864 年提出了电磁场运动方程;而后,在 1888 年赫兹实验发现光是一种具有极宽频率范围的电磁波,波长较短,约在 10^{-5} cm 量级。从此奠定了光是一种电磁波的波动光学理论,标志光学科学的发展进入一个新阶段,麦克斯韦的电磁理论得到广泛应用。波动说战胜了微粒说。

从牛顿力学到麦克斯韦电磁理论,基本的经典物理学形成了一套严格的理论体系。19 世纪末 20 世纪初,大部分物理学家认为物理学各种基本问题原则上都已得到解决,物理的理论体系囊括了物理现象的基本规律。但是,当人们用电磁理论进一步解释光与物质相互作用时,却遇到了本质上新的困难,如黑体辐射、原子的线状光谱以及光电效应等现象。

正当科学旅程举步维艰时,奇迹般地产生了普朗克量子假设和爱因斯坦的相对论与量子论,为越过光学“黑障”带来了希望,其中也孕育着光学的新生命。

为了解决黑体辐射在理论上的矛盾,1900 年普朗克提出了电磁辐射能量量子化的假设。以光的辐射理论作为突破口,对光本性的认识又向前推进了一大步。在此基础上,导出了在形式上与实验符合的黑体辐射定律。普朗克的这一成就难能可贵,不仅从形式上克服了经典电磁理论的困难,更重要的是这个需要勇气的假设成为未来量子力学的开端。

1905 年,爱因斯坦发展了普朗克的量子化假设,提出了光量子学说,以一种全新的物理意义确认光辐射就是能量为 $h\nu$ 的光量子流。根据光量子理论,爱因斯坦成功地解释了光电效应,认为光照射到金属表面可以使电子逸出,逸出的电子仅与光的频率有关,与光的强度无关,圆满地解释了光的吸收现象。

1913年,玻尔综合了普朗克的量子化理论假设、爱因斯坦的光量子学说以及卢瑟福的原子模型,建立了氢原子光谱理论。玻尔理论认为,原子中的电子是依照壳层结构形式分布的,为光量子理论的建立作出了重大贡献。

1917年,爱因斯坦又根据光子概念和玻尔理论,深入研究黑体辐射,不仅得到了普朗克公式,同时在原子系统中又引入了自发发射和受激发射的概念(即爱因斯坦系数 A 和 B),为研究光与物质相互作用建立了正确的物理模型,用光子概念解释了光的吸收和辐射现象。

在20世纪前20年内,以普朗克、爱因斯坦和玻尔等人开创新的光学理论——电磁波能量的量子化概念,使光学原理又得到发展,光子光学原理诞生了。

光线光学原理和光波光学原理描述了光的传输现象,而光子光学阐明了光与物质相互作用的原理。描述了光的辐射、吸收和发射现象,回答了光从何处来,又到哪里去的简单而又极其复杂的问题。近代科学研究表明,光是一种十分复杂的客观现象,只能用光所表现的性质和规律来回答光是什么的问题。

20世纪60年代,激光器的发明,使光子光学原理从理论上和应用上达到新的高度,赋予崭新的内容,开创了激光研究的新时代,古老的光学又焕发出新的光芒,形成了很多激光交叉学科。

光线光学、光波光学和光子光学三种光学基本原理的同时并存,足以说明光学原理的复杂性。面对复杂的光学现象各具优势,因而形成了“一国三公”、各有适从的局面,可以预料将来一定会产生一言以蔽之的高度概括的完美理论。

3. 普朗克常数的发现

光学是一门历史悠久而又非常活跃的学科。20世纪60年代,激光器的发明开拓了光学科学的范畴,进入到可以广泛地探索光与物质相互作用为主要内容的近代光学领域。而普朗克常数的发现,其意义在于展示科学发展的原理以及研究思路的形成,追本寻源而达到举一反三的目的。

19世纪末,对黑体辐射定律已经进行了详细的研究,并建立了一个非常简单的关系式,表述黑体壁温(T)与光波波长(λ)的关系,有

$$\lambda_{\max} T = C_0 = 0.289 \text{ cm} \cdot \text{K} \quad (1)$$

式中 C_0 为普适常数。等式被称为维恩位移定律,概括地描述了黑体腔的一个引人注目的性质。

如果黑体腔内处于某个温度的状态,则黑体腔内壁的辐射将达到某种平衡,也就是说,发射率等于吸收率。辐射能密度与波长和温度的关系可表示为

$$(\lambda_{\max}/c) k_B T = X_1 = C_0 k_B/c \quad (2)$$

式中, c 为光速, k_B 为玻耳兹曼常数,而 X_1 是一个新的常数。公式(2)的右边具有[时间]×[能量]的量纲,因此常数 X_1 应该是一个作用量。虽然已知腔内的

辐射能与腔壁是处于热平衡状态,但这种黑体腔性质如何与电子质量 m_e 以及电子电荷 e 等参数相关联呢?事实上,在经典物理学基础上无法解释公式(2),应用经典理论曾导致下述似乎荒唐的黑体辐射定律,即辐射强度以这样的方式随频率单调增加,以至总的辐射能是无限大。也就是说在任何温度下,辐射与介质都不可能处于热平衡。黑体辐射的理论推导被经典力学的闸门拦截了。经典理论是唯象理论,唯象理论描述和概括的是物理学中某些有限领域内的实验事实。

1900年12月14日,在柏林的德国物理学会会议上,普朗克发表了具有重要历史意义的黑体辐射定律推导,背离经典物理学,提出了一个特殊的假设。假定一个自然频率为 ν 的振子,只能以一份份微粒形式的能量吸收或释放,微粒的能量为 $h\nu$,其中 h 是自然界的一个新的基本常数。根据这个假设,可以将公式(2)中的常数 X_1 推导出一个简洁的表达式,有

$$X_1 = 0.2014h \quad (3)$$

常数 h 的第一次露面,震动了科学界,它开启了又一扇研究光学的大门。

此后,普朗克仍然不懈地试图从经典物理去理解这个黑体辐射关系。直到爱因斯坦从光电效应的研究中提出能量平衡方程后,才奠定了量子力学的基础,同时也使普朗克假设的真正含义清晰可见。有

电子的动能

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_e u^2 = h\nu - W \quad (4)$$

光子的动能

$$P = h\nu/c = h/\lambda = \hbar k \quad (5)$$

式中: W 为金属中电子的逸出功; m_e 为电子质量; u 为电子速度; c 为光速; ν 为光波频率; λ 为波长; k 为波数;而 h 被命名为普朗克常数。

普朗克辐射定律的完整形式为

$$M_{\lambda bb} = \left(\frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \right) \frac{1}{\exp(hc/\lambda k_B T) - 1} \quad (6)$$

式中, $M_{\lambda bb}$ 是黑体腔内在温度 T 与波长 λ 时单位波长间隔内的辐射出射度,公式描述了黑体腔壁上小孔发射的辐射强度与温度(T)、波长(λ)的关系(曲线见图2.3.4)。

当温度不变时,在辐射能量密度 $W_\rho(\lambda, T)$ 的极大值位置,用 $W_\rho(\lambda, T)$ 对波长 λ 求导数等于零,求出波长极大值 λ_{max} ,得到与公式(3)等价的关系式为

$$\lambda_{\text{max}} T = C_0 = 0.2014 \times (hc/k_B) \quad (7)$$

普朗克定律圆满地解决了黑体辐射定律,揭示了辐射的本质,其产生的历程引人入胜。这个里程碑式的定律标志了光量子时代的开始,具有划时代的重要

意义。

普朗克从“微观”领域成功地导出公式(6)之前,实际上已经预料到 $E(\lambda, T)$ 对波长(λ)和温度(T)的依赖关系。因为在 1900 年 10 月 19 日的报告中,已经提出了没有任何说明的两个常数($2\pi hc^2$)和(hc/k_B),这与后来被命名的第一辐射系数 $c_1(=2\pi hc^2)$ 和第二辐射系数 $c_2(=hc/k_B)$ 密切相关。

4. 光量子理论与激光

在科学发展的过程中,新效应的发现,新概念的建立,新原理的提出往往对一门学科、一系列的技术乃至对人类文明带来巨大的影响,光子光学的发展明显地证明了这一点。激光的发现,使光子原理在走向实用技术的发展过程中迈出了突破性的一大步。光量子理论推进了激光的产生,激光的研究成功发展了光量子理论。激光给光学带来了深刻的革命,也给其他学科带来了新的活力。

20 世纪 30 年代确立了量子电动力学,不仅是光的波粒二象性的物理解释得到了合理统一,而且能正确地描述电磁辐射与原子体系相互作用时可能发生的三种过程(自发发射、受激发射和吸收)。按照这个理论,当原子体系按能级的分布服从玻耳兹曼热平衡定律时,原子体系对辐射场所表现出的总效应为自发发射和吸收。反之,如果由于某种外场扰动使原子体系失去正常分布状态,出现原子布居数分布的反转状态,则原子体系在外场作用下的受激发射占优势,并出现受激发射的放大作用。

20 世纪 40 年代,在量子力学基础上形成的量子电子学,更仔细地研究电磁辐射与各种物质分子、原子的相互作用,建立了布居数反转状态的原子体系,揭示了产生受激放大的可能性。1951 年,利用受激发射原理形成了电磁波放大的量子放大器概念,在无线电电子学的微波波段首先实现受激放大,其标志是在 1954 年制成了第一台微波量子放大器(Maser),早期文献中音译成蔓塞,意译是辐射的受激发射微波放大(Microwave amplification by stimulated emission of radiation)。此后,用相同的原理向红外到紫外的光频波段的扩展成为探索的新目标。微波放大器的成功为激光问世提供了理论基础和技术条件。

从 1958 年开始提出光学辐射场受激发射应用的可能性,到 1960 年 6 月美国科学家梅曼(Maiman)研制出第一台红宝石激光器,短短的 3 年时间,在光频波段实现了受激发射放大,沿用微波量子放大器的名称 Maser(蔓塞),称光频受激发射放大器为 Laser(莱塞)(Light amplification by stimulated emission of radiation),后来由中国科学家钱学森建议将“Laser”意译成中文——激光。

激光的出现使传统光学技术发生了革命性变化,促进了光电子学和光辐射理论的发展。在量子电子学发展的基础上,产生了以光频波段为特征的光子光学(或称量子光学)。新的学科的诞生就如同打开了巨大的闸门,激流涌进,一泻千里,光子光学的研究范围大大地扩展和延伸,形成了很多新的交叉学科。

激光的出现为人类带来第三次新光源,以强相干光为主要特征的激光被广泛应用于多个科技领域,产生了巨大影响,许多边缘交叉学科应运而生,例如光化学、光物理、光信息学、光生物学、光子医学等。激光给光子学带来的变革恰似半导体的发展给电子学带来的革命一样,意义极其深远。

激光的发光机制是基于体系中粒子数反转发生的受激发射,属于强光与物质的相互作用,与普通光源相比,除了单色性、准直性、高亮度外,显著的特点是具有相当高的光子简并度,因为普通光源属于自发发射机制,光子简并度较低。这两种发光机制体现在介质电极化强度矢量和辐射场强度矢量的不同关系。普通光源发光是用两个矢量的线性关系描述的,而激光是用两个矢量的非线性关系描述的。

由于激光的优良特性和广泛应用,大大推动了科学进步,形成了能源光学和信息光学两个主要分支学科。大功率激光器已成为时间、空间以及能量的凝聚器,并应用于高能源科学技术的各个领域。用激光作为信息载体,光通信、光储存和光计算的器件层出不穷。在光通信中,应用光子技术实现了大容量的承载信息,并以光的速度传递;光子在高度透明的光导纤维中以极低的损耗传输,实现遥远距离的传输。

光子是电中性的波色子,相容性好,具有并行处理信息的能力(并行度大于 10^9),而且具有高度互联特性。光子以全息方式在光敏材料中写入二维图像,以及三维物体的光强度、相位和偏振态等信息,光子容易深入穿透光子介质制成的三维光存储器,光子不仅是存储信息的载体,而且也是远距离无接触传输信息的载体。光之所以能作为信息载体,也是由于物质可以控制和改变光的状态,反之,光也能改变物质的形态。

5. 光子光学的研究核心

光学是研究光的传输以及光与物质相互作用的科学。光学原理是一门基础科学,对基础科学的研究可以拓展人类对自然规律的认识。光学原理是从观察和研究光的传输、光的吸收和光的发射等基本现象的过程中逐步发展起来的。随着人们对光的认识逐步深刻,光学理论越来越丰富,以不同方式揭示了各种光学现象的本质。以光线折射率(n)为核心参数的光线光学原理;以光波波长(λ)为核心参数的光波光学原理;以光子能量($h\nu$ 或 $\hbar\omega$)为核心参数的光子光学原理。因此,基本光学原理可以分为三大部分,即光线光学(ray optics)、光波光学(wave optics)和光子光学(photon optics)。

从立竿见影的现象、最古老的铜镜反射和小孔成像,人类发现了光的直线传播规律,产生了透镜成像原理。通过研究光的直线传播和光的反射定律,认知了光传播过程中有关传播方向的几何量的变化。从几何学观点对光的传输变换作了总结,因此有“几何光学”之称。随着光学透镜的研究深入,逐步建立了较完善

的光线光学理论。

最具代表性的显微镜、望远镜和成像物镜三大基本光学仪器系统成为光线光学的重要内容。望远镜和显微镜开阔了人类的视野,认识了遥远的宏观世界和眼下的微观世界,成像物镜记录了复杂多变的万象世界。传统光学打开了光学研究的大门。

当人们观察到在传播过程中发生光的干涉现象和光的衍射现象时,光线理论遇到了难于解释的障碍,但波动理论解释了光绕过障碍传播的现象,因此提出了光是以某种方式向空间传播的一系列波动。最初,惠更斯是引用了力学上的横向振动波的传播概念,但是物质波是需要介质的,而光波可以在真空中传输,这又产生了疑问。直到麦克斯韦的电磁波理论产生,并确立了电磁波方程组,证实以光速传播的电磁波的存在,光的波动理论才找到可靠的物理基础,终于建立了光波光学的完整理论。当波长视为极短并趋近于零的状况下,波动效应不明显,可以把光的传输看成沿一根根细线方向传播的线束。因此,光的直线传播定律、反射定律和折射定律得以进一步巩固。

根据光的电磁波理论,基本上比较圆满地解释了光的反射、折射、干涉、衍射、偏振、散射和色散等与光传播特性相关的重要光学现象。随着研究范围扩大,光波光学原理日趋完善。由于传统的光线光学理论十分适用于光的反射、折射以及光学成像现象研究,因而在光学原理上形成了两种理论兼收并蓄的局面。

当人们进一步设问“光从哪里来?光又到何处去?”的时候,光线光学原理和光波光学原理又显得无能为力了。用经典物理学理论解释黑体辐射、原子光谱、光电效应等现象时又遇到了新的困难,不得不重新思考光的本性,究竟光是什么?在探索的过程中总是疑团重重,必须有新的思想和新的途径。被重重疑团挡住前进方向的普朗克苦苦思索,以无与伦比的智慧,绝处逢生提出了辐射能量的量子化创新学说,并在此基础上建立了形式上与实验规律符合的黑体辐射定律。而后爱因斯坦发展了普朗克的量子化假设,提出了具有全新物理意义的光量子理论。光是光量子组成的能量流,即光是由具有确定能量和动能的光子组成,而且在数值上与光的频率(或波长)相对应。

在研究光与物质相互作用的过程中,普朗克和爱因斯坦提出了光量子(light quantum)理论。在波动理论的基础上,用能量子($h\nu$)建立了全新的微粒说;用波数(κ)表示折射率(n)、频率(ν)和波长(λ)之间的关系($\kappa=1/\lambda=n\nu/c$),揭示了三种光学原理的内在联系。不同频率(ν)的光具有不同的光子能量($h\nu$)。例如X射线频率高(波长短),光子能量大,量子性质明显,而无线电波频率低,量子能量小,很难看出能量的不连续性,呈现为连续的波动。

光量子的奇异特性启迪于电子学是从电学中脱颖而出的思路。在20世纪70年代,从光学中提出了光子学(photonics)的概念,光学向光子学扩展是现代

光学发展的主流方向,而光子学是现代物理学发展的一个重要领域。光子学是研究光子基本特性的科学,也是研究光与物质相互作用现象的理论基础。利用光子学原理可以深入研究光子现象的微观物理状态,而将光的辐射、吸收、发射等光子现象的研究归纳为光子光学的范围,以光子能量($h\nu$ 或 $\hbar\omega$)为核心参数的光学原理称为光子光学。阐述了光子能量在物质中的转换特性,揭示了物质吸收光和发射光的本质是原子内部电子能级(E_n)的跃迁。核心理论是描述电磁场与原子体系相互作用时,可能发生的能量转换的三种过程,即自发发射、受激发射和受激吸收。其中包含普朗克常数(h)和著名的爱因斯坦系数(A, B)的能级跃迁过程中的能量变换公式。光子光学的奠基人应该是普朗克、爱因斯坦和玻尔。要全面论述光子光学的发展而无所遗漏是难于做到的,需要不断地承前启后的努力。

光子光学是从光与物质相互作用的研究过程中发展起来的。首先是积累了实验事实,发现个别的半经验规律以及建立初步的假设和理论,然后用于分析许多现象,发现具有普遍适用的规律,同时将其应用在新的研究中,激光的产生与发展是最典型的例子。光子光学是光物理学科的组成部分,既是基础科学又是应用科学和技术科学。

基础理论的研究是科学技术应用开发的源泉。光与物质相互作用的研究涉及广泛的基础研究和应用研究,例如激光学、发光学、辐射学、光物理、光化学、生物光子学等,它们的理论基础都是光子光学。学科之间的交叉在不断地扩展和深化,不断地形成新的研究方向和潜在的应用领域。光不仅是一种能量载体,也是一种信息载体。在此意义上,光子光学又可分为能源光学和信息光学。光可以从控制和改变物质的能量状态得到,反之,光又可以改变物质或其他过渡态物质(如电、热、磁、声等)的形态。无形体能量子(光子、电子、声子、激子等)是能量的过渡态。

从发明电话为标志的电子学的产生,到当代电子计算机的高速发展,证明科学的发展是无止境的,可以借鉴电子技术向微电子突破的思路,逐步使光子技术向微光子方向发展,创造新的理论,发展新的技术。光子光学的兴起,标志着光学进入了一个新的发展时期,从 20 世纪以广电信网为代表的“电子时代”迈向 21 世纪以互联网为代表的“光子时代”。光子技术的发展像电子技术一样,给人类社会带来巨大进步,使人们的生活变得丰富多彩。

光学像普照大地和宇宙空间的阳光一样,波及到科学的各个门类。光学如人眼的目光观察自然界的一切,可以发现其内部的秘密。科学的眼光具有无可比拟的神奇力量。