



上海普通高校“九五”重点教材

光子学与光通信导论

黄肇明 编著



GUANGZIXUE
YU
GUANGTONGXIN
DAOLUN

2.31-43

上海大学出版社

上海普通高校“九五”重点教材
上海市教育委员会组编
世界银行贷款资助项目

光子学与光通信导论

黄肇明 编 著

上海大学出版社
·上海·

内 容 简 介

本书简要介绍了近代物理学中的“光子学”基本知识。着重介绍了光和物质的波粒二象性和测不准原理及激光的产生、光束在自由空间和光波导中传输、光的调制、光的放大与检测等物理概念。对光子学基本问题的计算和设计方法也作了简要介绍。

本书作为通信工程专业的教材，也可作为相关科技工作者的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

光子学与光通信导论 / 黄肇明编著. —上海: 上海大学出版社, 2001.3

ISBN 7-81058-274-7

I. 光... II. 黄... III. ①光子 - 理论 ②光通信 - 理论
IV ①O572.31 ②TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 12045 号

上海大学出版社出版发行

(上海市延长路 149 号 邮政编码 200072)

上海市印刷七厂一分厂印刷 各地新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 10.75 字数 255 千字

2001 年 3 月第 1 版 2001 年 3 月第 1 次印刷

印数: 1~1050

定价: 18.00 元

序

本世纪，电子学的发展把人类带入信息社会的新时代。电子作为能量与信息的载体已作出了巨大的贡献，但是电子在信息科学中的制约因素——通信容量、响应速度、空间兼容性等“瓶颈”效应也越来越突出了。20 世纪 60 年代，激光被发现之后，用光子替代电子作为能量与信息载体的新学科——“光子学”，已显示出无可争辩的优越性。电子器件的响应时间最长(约 10^{-9} s)，光子器件为 $10^{-12} \sim 10^{-15}$ s；电波最高工作频率约 100 GHz，光的频率约 100 THz；电子是带电的，会相互干扰，光子信息却有可以平行处理的优点。这就是现在人们认为 21 世纪是“光子学”世纪的一个理由。当然，电子学并未发展到尽头，还有很大的发展空间。未来的时代将会是“电子学”与“光子学”密切结合、相互补充、相互促进，把信息科学推向更高阶段的时代。

20 世纪 70 年代之后，在纤维波导中传输的光纤通信技术得到了突飞猛进的发展。电子与光子相互配合，相得益彰，使通信技术向更高码率、更大容量方向稳步前进。光纤通信技术已成为当代通信的主力之一，但就光通信技术本身而言，仍处在其初级阶段，它的发展余地还十分广阔。同时，光在信息处理中的地位也将越来越显得重要。

目前，通信专业的大学本科生，不可能花太多的时间学习物理专业的课程，但是，作为一个面向 21 世纪的大学生，只精通“电子学”而不了解“光子学”显然是不足的。本书作者根据他多年科研工作的心得和为研究生讲授光子学、光电子学等课程的经验，编成此书，用于本科生。该书的取材，弥补了现有此类教材或偏理或偏工的缺陷，进行了理工合一的尝试。做到既重视授予学生正确的时空观、波粒二重性等基本概念，同时又给出了光子学的主要内容及其基本方法。该书内容较为丰富，阐述深入浅出，具有基础理论与基本方法并重、基本技术与科技发展兼顾的特色。为此特向读者介绍推荐。

张 煦

1999 年 3 月

前 言

20 世纪的信息科学取得了惊人的发展，形成一门独立的科学。19 世纪末，数学、力学、电磁学等都已有相当的发展，为电子学的发展打下基础。电子学是以电子及电磁场作为信息或能量载体而发展起来的。直到本世纪初，电子技术还十分落后，只有有线的莫尔斯电报和电火花式的无线电。20 世纪 20 到 30 年代，人类认识了电子在真空中的运动规律，电真空技术的进步，电子二极管、三极管的发明大大推动了电报、电话、无线广播等电子技术的发展。40 年代，由于战争的需要，雷达、原子弹的发明推动了微波技术、半导体技术、电子计算机的发展。50 年代信息论出现，结合电子技术，半导体技术使通信技术成为一门精密的科学。六七十年代以后，通信技术与微电子技术及大型电子计算机结合为构成全球的大型通信网络铺平了道路。

一般把电子学的发展划分为五个阶段：产生与传播、控制、网络化、自支持、自导。目前正处在第五阶段——最高阶段。电子学与大规模集成电路相结合仍然有广阔的发展空间，但电子学也已表现出“瓶颈”现象，限制了电子学的发展。究其根源，乃是电子荷电并具有固有质量，其弛豫（开关）时间在纳秒（ 10^{-9}s ）量级，用电子学方法产生的最高工作频率在 100GHz 左右。这就限制了在高速大容量方向的发展。寻找新的信息载体，突破在高速、大容量方向的发展，这将是人类永恒的追求。

1960 年以来，激光技术的崛起带动了光电子技术和光纤技术的进步，迅速形成光纤通信新技术。70 年代荷兰科学家 L.J.Poldervaart 教授首先提出光子学（Photonics）的概念，认为光子学是以光子作为信息或能量载体的一门科学。1979 年，我国科学家钱学森教授明确提出，光子学是一门和电子学平行的科学，应当大力发展形成光子产业。光子作为信息的载体具有极大的优点：响应时间可达 10^{-15}s ，频率达到 10^{14}Hz 。电子学的“瓶颈”限制被有力地打破了。70 年代之后，光子学，特别在光纤通信技术方面发展极其迅速，已成为当代通信的主力。但是，一般认为，光子学还处在相当于电子学的第二阶段，即矿石收音机的时代，因此，光子学还有很大的发展空间，势必成为 21 世纪通信技术的主力。

光子学相对于电子学而命名，被定义为“以光子作为信息或能量载体的一门科学”。事实上，在科学技术中光子学涵盖很宽的学科领域：物理学中的激光物理、量子光学、激光等离子体物理；化学中的激光化学、分子束激光光谱学；生物学中的生物化学、激光生物学以及激光医学等等。在技术领域，光子学与机械、化工、材料、能源、计量、环保以至于军事领域都有十分密切的联系。我们特别感兴趣的是与信息技术的联系，如光通信、光计算机、光传感、光存储、激光印刷、激光显示等。光子学已成为这些相关学科与应用技术的共同基础。

展望 21 世纪，光子技术与电子技术、微电子技术、电子计算机技术相结合必将成为新世纪信息产业的主力。现在一种普遍的看法是：20 世纪是电子学的世纪，21 世纪是光子学的世纪。当前，在光纤通信工程中，光子技术已从物理层次上的科学研究跃升为工程技术层次上的应用技术。因此“光子学基础”的课程也应当从研究生的专业课下降为通信专业本科大学生的基础课程。目前，为研究生用的教材很多，为激光专业用的教材也很多，但为电类通信专业用的教材却不多，这就是编写本教材的目的。

编成本书，作者得到了上海大学校、院有关领导的支持和鼓励，也得到通信工程系有关同志的支持，本书内容曾安排在 1997、1998 两年进行教学实践，得到广大学生的欢迎和认可。作者特别要感谢妻子刘尚仁多方面的支持和许多有益的讨论。作者也十分感谢陈建芳老师在文字和作图上的帮助。

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 从牛顿力学到相对论	1
1.2 物质的粒子性	2
1.3 普朗克常数的发现	3
1.4 光电效应	5
1.5 用光电效应测定普朗克常数	6
1.6 从电子学到光子学	7
第二章 光的波粒二重性与测不准原理	10
2.1 光是波也是粒子	10
2.2 粒子的二象性	12
2.3 测不准原理	15
2.4 测不准关系式的应用	16
第三章 激光的产生与激光的性质	19
3.1 爱因斯坦的受激辐射理论	19
3.2 激光振荡条件	22
3.3 泵浦技术	24
3.4 法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 激光器	26
3.5 几种常见的激光器	29
3.6 激光的性质	34
第四章 光的传播	39
4.1 射线矩阵光学	39
4.2 透镜波导与谐振腔、腔的稳定性	44
4.3 均匀介质的高斯光束	48
4.4 高斯光束的传播规律——ABCD 定律	52
4.5 高斯光束变换的应用实例	54
4.6 谐振腔的自洽性	57
4.7 均匀介质的高阶高斯模	58
第五章 光波导与光纤	63
5.1 平面光波导	63
5.2 光纤波导	74

5.3 特种光纤	84
第六章 光的调制	96
6.1 光的内调制技术	96
6.2 光的外调制技术	105
6.3 磁光效应简介	120
第七章 光的放大与光的检测	126
7.1 光纤放大器	126
7.2 半导体光电二极管	129
7.3 噪声问题	137
7.4 光源起伏的噪声	142
第八章 光子技术的应用	145
8.1 光子技术应用之一——光纤通信	146
8.2 光子技术应用之二——光存储技术	151
8.3 光子技术应用之三——光纤传感器	154
参考文献	164

第一章 绪 论

1.1 从牛顿力学到相对论

19世纪末到20世纪初,以牛顿力学为代表的物理学已发展到十分完美的程度,以致于物理学的目的就在于把一切现象简化为遵守牛顿定律的粒子运动形式,怀疑这些定律则成为异端。但是,科学的进步是无法阻挡的,一些带有革命性的发现不断地涌现,如 X 射线、放射性、电子、光子、黑体辐射、光电效应等等。20世纪初正好成为两个不同时期的分界。在此以前的物理学称为经典物理学,以后的称为近代物理学。1905年爱因斯坦提出相对论和光量子的理论,成为近代物理学时代的标志。

在经典物理学中时间与空间是绝对的,一切物体在绝对时空中运动都有其绝对的位置和绝对的速度等等。总之,人们可以唯一地确定一个物体的状态,并且可以进一步确定下一时刻物体的状态,即是说可以预言未来,就像可以预先计算地球卫星的运行轨道一样。在考虑电磁学问题时,空间充满了“以太”,它也是一个绝对静止不动的参照系。绝对空间服从欧几里德几何学。在绝对时空中存在一个能知过去和未来的绝对观察者——上帝。

在相对论力学中,时间概念的相对化,不同地方发生的两个事件本身是无所谓同时的。对观察者甲来说可以是同时的,但对另一个相对于甲是运动的观察者乙,则不是同时的。这是因为在两个地点之间观察时钟的光信号来回是需要时间的。根据爱因斯坦相对性原理,光速是一个与参照系及观察者的状态都无关的常数 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

在牛顿看来光是经典粒子,光粒子在“以太”中以速度 c 作均速直线运动。在爱因斯坦看来,光子存在质量和能量,因此在引力场的作用下,光子不再以光速 c 作直线运动,而受到引力场的吸引其运动轨迹变弯曲。爱因斯坦(1915年)这一论断,于1919年和1922年日食时所测量到的恒星光线经受太阳引力的弯曲度所证实。最近,英国天文学家更进一步观察到“爱因斯坦环”,它是质量巨大的星系产生“引力透镜”的作用,使天体发出的光线在星系周围形成的圆环。在爱因斯坦看来不存在绝对的时空:“时间、空间以及运动着的物质不可分割地联系成一个整体”,时空是扭曲的,不再服从欧几里德几何学规律,而要采用黎曼几何学来描述。这就是现代的时空观。

当代伟大的物理学家史蒂芬·霍金(1942—)在广义相对论的基础上,深刻研究了现代天文观察到的“白矮星、中子星、黑洞(black holes)——完全坍缩的质量巨大的恒星”等现象。一切物体(包括光子)经过“黑洞”附近时,都将受到其巨大引力场的吸引而落入“黑洞”中不再发射出来。随后,他又从量子理论——不确定性原理出发,提出“黑洞”并不完全是黑的,落入“黑洞”的粒子还会以恒定的速度再发射出来,只不过发射出来时已不是原先落入

的粒子了，只有能量是相同的。随着“黑洞”释放粒子和辐射，它将损失质量。这将使“黑洞”质量变得越来越小，并更迅速地发射粒子。如果一个宇航员落入“黑洞”那将是悲惨的，他将被头与脚的重力差拉长并撕开最后变成基本粒子。这样的“黑洞”被称为婴儿宇宙(baby universes)。

霍金的工作使宇宙学的理论得以形成和发展，从而脱离宗教成为一门严格的、成熟的科学。现代科学家普遍相信宇宙受物理学定律的制约，这些定律原则上允许人们去预言未来。有兴趣的读者可以参阅霍金的名著《时间简史》、《时空本性》(许明贤、杜欣欣等译，湖南科学技术出版社)

19世纪末，对物理学来说是一个变革的年代。对于宏观的大世界来说，从牛顿的经典力学发展为相对论力学。经典力学与相对论力学的适用范围，视物体速度相对于光速 c 的比值而定。当物体运动速度远小于光速 c 时，经典的牛顿力学就有足够高的精度达到实用的要求，当速度与 c 可以比拟时，牛顿力学就失败了，必须用相对论力学来处理。 c 成为牛顿力学或相对论力学的判据。另一方面，微观小世界，根据物质的可分性，对于微小的粒子其性质是用经典物理学还是量子物理学来描述是否也存在一个判据呢？下面我们将要回答这个问题

1.2 物质的粒子性

古希腊哲学家最早引进物质可分性的概念。他们认为取一块物体，将它一再分割成小而又小的碎块，最后达到不可分的终极——原子，古希腊人认为物质的最小单元是原子。现代化学告诉我们，能保持物质固有化学特性的最小单元是分子，分子则由原子构成。希腊哲学家最早引入物质由一些多面体(四面体、六面体、八面体、十二面体、二十面体)的微粒构成的概念。现代科学表明原子构成上述的多面体为基本单元，然后由这些单元构成各种物质。现代用先进的加速器可以将原子打破分解为基本粒子，如质子、中子、电子、介子、光子等等。

哪一个物理量是联系宏观物理学与微观物理学的纽带呢？这就是阿佛伽德罗常数 ($N_0 = 6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$)。 N_0 是 1 摩尔(克分子)任何气体的分子数，早在 1900 年就已从气体动力学中得出这个常数。利用大学物理与化学的知识，我们可以列举出由阿佛伽德罗常数 ($N_0 = 6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$) 联系起来的微观量与宏观量：

(1) 质子的质量

质子的质量 M_p 是 1.0073 原子质量单位。所以阿佛伽德罗常数与质子的质量的乘积 $N_0 M_p = 1.0073 \text{ g}$ 为 1 mol 氢原子的质量，即一个氢原子的质量为 $M_p = 1.67252 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。

(2) 基本电荷 e 与电子的荷质比 e/m

电子的电荷为 $-e$ ，质子的电荷为 $+e$ ，两者数值相等、符号相反。从电解中知道分解 1 mol 物质的电量 $F = N_0 e = 96500 \text{ C}$ 。所以电子电荷 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。电子的荷质比为 e/m 。用电子束在磁场中的偏转实验测定出来 $e/m = 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ 。同样，质子的荷质比 $e/M_p = 9.6 \times 10^7 \text{ C/kg}$ 。这个常数也是用质子束在磁场中偏转的实验而测定出来的。由此可得，电子的质量 $m = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ，质子的质量 $M_p = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。电子的荷质比是

J.J.汤姆逊在1897年测定的. 1911年密立根用油滴实验对电子的荷质比重新做了精密的测量, 证实上述结果是可靠的.

(3) 气体的普适常数 R 与玻尔兹曼常数 k_B

气体的普适常数 R 是一个宏观上可测量的量, 而玻尔兹曼常数 k_B 是一个微观量, 代表每个分子的气体常数, 并有关系式 $R = k_B N_0 = 8.314 \text{ J/K mol}$, 由此得

$$k_B = 1.3805 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

上面我们简要地叙述了一些宏观物理量与微观物理量之间的联系. 现在的问题是宏观物理学在什么条件下出现矛盾, 变得不适用了, 我们能不能找到一个像光速 c 一样的判据来划分宏观物理学与微观物理学的适用范围. 回答是肯定的.

1.3 普朗克常数的发现

从19世纪末到20世纪初, 一直困扰物理学家的一个难题是“黑体辐射定律问题”. 经验事实如下: 处于高温下物体的表面发射各种频率的射线(包括可见光). 人们经常考虑将材料围成个封闭的腔体. 处在一定温度下, 腔体内表面的发射经过多次反射之后, 通过一个小孔向腔体之外的发射, 被称为黑体辐射. 黑体辐射有下面几方面性质:

1) 来自小孔的辐射强度与波长 λ 的曲线图形是在长波和短波方向都下降到零的平滑曲线. 在辐射强度的某处有一波长的极大值 $\lambda_{\max}$. 它与腔壁的温度 T 有简单的关系

$$\lambda_{\max} T = C_0 = 0.2898 \text{ cm} \cdot \text{K} \quad (1.1)$$

这个关系式被称为维恩位移定律, 参看图 1.1.

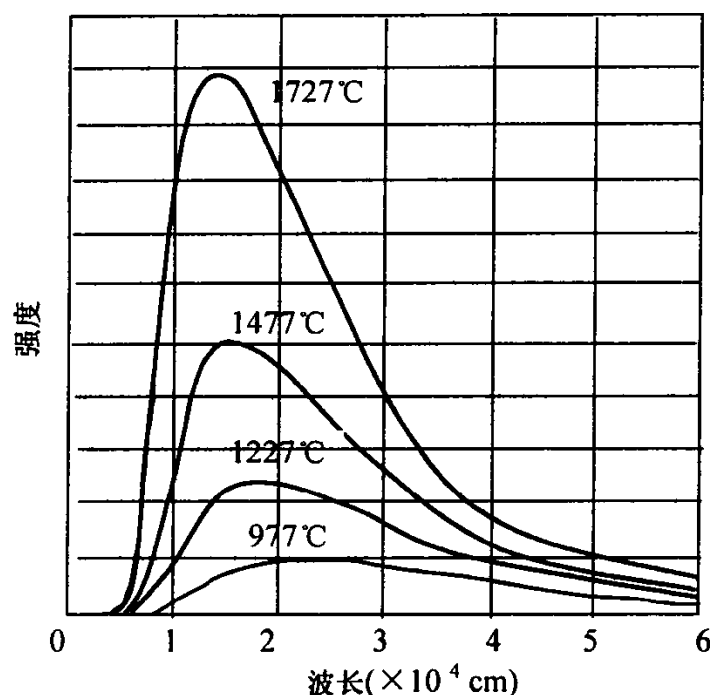


图1.1 黑体辐射图

2) 黑体辐射强度的光谱分布, 即曲线的形状与制造腔体的材料无关, 因此 C_0 是一个

普适常数

3) 在任一波长，来自黑体小孔的辐射强度，总大于与腔壁处在同样温度的材料表面的辐射强度，但数量级相同。基尔霍夫从非常普遍的热力学定律出发，证明了任一波长、任一材料表面的辐射率与黑体表面的辐射率之比等于该材料在这个波长的吸收系数，因此，黑体表面是标准发射体。黑体辐射与腔的大小、形状无关，而且与腔壁的材料也无关

19世纪末，已经对黑体辐射定律进行了十分仔细的测量，建立了(1.1)式，因此，突出的问题是要从基本原理推导出辐射定律。

表1 几个重要的物理参数

普朗克常数	$h=6.62559 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
光速	$c=2.997925 \times 10^8 \text{ m/s}$
电子电量	$e=1.60210 \times 10^{-19} \text{ C}$
电子质量	$m=9.10908 \times 10^{-31} \text{ kg}$
质子质量	$M_p=1.67252 \times 10^{-27} \text{ kg}$
阿佛伽德罗常数	$N_0=6.02252 \times 10^{23} (\text{mol})^{-1}$
玻尔兹曼常数	$k_B=1.38054 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

为了理解(1.1)式涉及到什么物理内容，将(1.1)改写成

$$\frac{\lambda_{\max}}{c} \cdot k_B T = X_1 = \frac{C_0 k_B}{c} \tag{1.2}$$

其中 c 为光速， k_B 为玻尔兹曼常数。因此，上式中的 X_1 成为一个新的常数，它具有能量与时间乘积的量纲，称为作用量。

(1.1)式或(1.2)式是一个实验物理的事实，它是经过许许多多的人反复测量建立起来的。可是没有人能从经典理论出发导出这个关系式。在1900年之前，这个关系式使物理学家陷入绝境。

德国物理学家普朗克(Planck)让他的学生做一个非常大胆的假设：一个自然振动频率为 ν 的振子只能一份一份地、成包地获取或释放能量，每个能包的大小为 $E = h\nu$ ， ν 为辐射线的频率。这个 h 成为自然界新的基本常数。根据这个假设，普朗克取得了极大的成功。(1.2)式可以写成

$$\frac{\lambda_{\max}}{c} \cdot k_B T = \frac{C_0 k_B}{c} = X_1 = 0.2014h \tag{1.3}$$

X_1 这个未知数等于 $0.2014h$ 。1900年12月14日普朗克在柏林德国物理学会的会议上提出了黑体辐射定律的推导，以后人们就把这一天定为量子物理学的诞辰，并把 h 命名为普朗克常数(将在第三章介绍黑体辐射公式的推导)。

普朗克本人在接受这个背离经典物理学的假定时是非常勉强的，以致在他提出这个伟大的发现之后，他仍然非常努力地试图在纯粹经典理论的基础上解释黑体辐射现象，但这一切终归于无效。后来他说，他并不认为它们是无用的劳动；仅仅由于他的重复失败才使他最后相信不可能在经典物理学内求得说明。

普朗克黑体辐射表达式的推导留待以后再进行。现在来回答，是否可以找到一个自然常数作为经典物理学或量子物理学适用性的判据呢？

黑体辐射的 $\lambda_{\max}$ 和 T 是可以精确测量的,而 c , k_B 是常数,因此从式(1.3)可以求得 h 的值. $h=6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$,其量纲是“能量·时间=作用量”.因此,判定体系是否必须用量子物理学处理,可以计算其作用量的大小并与 h 值进行比较.当体系的作用量远大于 h 值时,经典物理学适用,当作用量与 h 值可以比拟时,则量子物理学适用

例 1 考虑摆钟的摆锤,作用量取摆的周期与摆动的总能量之乘积,设摆的周期为 $T=1\text{s}$,总能量显然比 10^{-7}J 大得多,今取 10^{-7}J ,所以其作用量远大于 $10^{-7} \text{ J}\cdot\text{s}$,它比 h 值大 10^{26} 以上 显而易见,摆锤属于经典物理学范畴.

例 2 一个宏观的谐振子,其质量为 1g ,最大运动速度为 1cm/s ,振幅为 1cm ,所以动量是 $P=1\text{g cm/s}$,作用量= $P \cdot 10^{-7} \text{ J}\cdot\text{s}$,比 h 值大 10^{26} ,所以谐振子也属经典物理学问题.

例 3 若上述的谐振子不是质量为 1g 重的物体而是一个电子,运动速度为 100m/s ,振幅为 0.001cm ,这样,作用量= $9.1 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$,与 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 大体相当,因此这个电子谐振子应当用量子力学处理.

1.4 光电效应

光电效应是指单色光入射到真空管中用碱金属构造的光阴极上,光以粒子的形式在光阴极表面上打出光电子的现象,如图1.2.逸出的电子被带正电位的阳极所接收,从而形成光电流.爱因斯坦天才地洞察到从金属表面逸出的光电子的能量 E 与光的频率之比为常数 $E/\nu = X_2$,其中 X_2 是一个与光的强度、光的频率以及金属材料都无关的常数,这也是经典物理学无法理解的.当时, X_2 是另一个神秘的常数.今天我们知道这个 X_2 就是普朗克常数 h .这样就建立了在量子物理学中一个非常基本的原理 $E = h\nu$.这个关系式与经典物理是完全不相容的,但它支持了爱因斯坦一个极其重要的思想:辐射能量是量子化的.

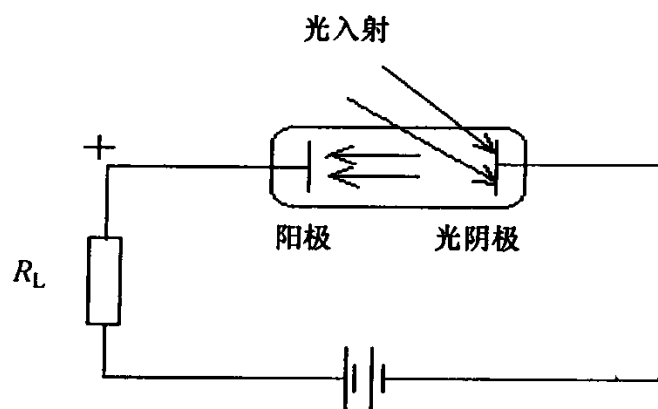


图1.2 光电效应原理图

在光电效应中,光不再以波的形式出现,而是以粒子的形式出现,并被爱因斯坦称为电磁量子,现在我们知道电磁量子就是光子.如果光的频率为 ν ,则每个光子的能量 $E = h\nu$.如果金属中电子从表面逸出所需的功函数为 W ,则逸出后电子的动能 E_k 为:

$$E_k = h\nu - W \quad (1.4)$$

这就是有名的爱因斯坦的光电方程式. 从中可见, 发射出来电子的能量随光的频率线性地增加, 而与光的强度无关. 但是发射出来电子的数目即光电流的大小则与光强成正比

应该说, 普朗克对“黑体腔中辐射能的大小由能量为 $h\nu$ 的电磁量子组成”这一概念的引入, 只是在理论上没有出路时让学生做着试试看, 虽然获得很大的成功, 但他并非自觉的, 甚至取得成功之后, 仍有怀疑, 仍然希望在经典物理学的框架下来解释黑体辐射问题. 爱因斯坦则大大不同, 对于光电效应, 他一开始就深刻认识到光具有粒子的本性. 并且, 利用光电效应可以对普朗克常数 h 作出新的测量. 以后, 我们将回到黑体辐射理论的爱因斯坦处理方法. 那时, 我们将理解到他对量子本性的认识的确比普朗克要深刻得多

1.5 用光电效应测定普朗克常数

将一个光电管接成如图1.3 的电路. 光电管的光阴极用一高压汞灯经单色滤光片之后的单色光照射形成光电子流. 光电子的动能 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$, m 为电子质量, v 为电子的速度. 若在光电管的阳极加上正电压则在电路中形成光电流 I . 若在光电管的阳极施加负电压则在

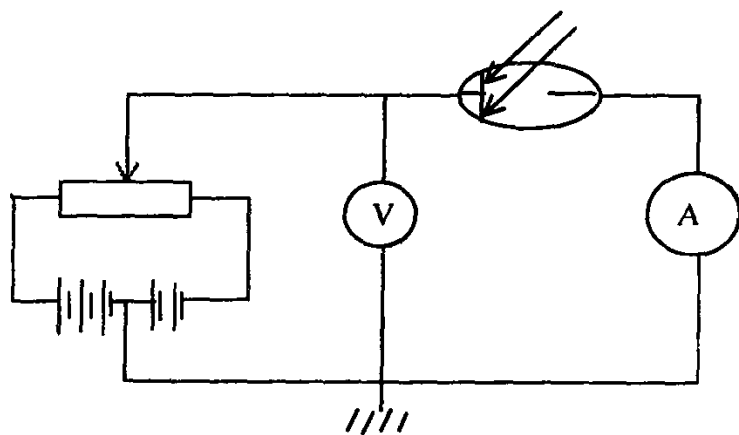


图1.3 用光电效应测量 h 的原理图

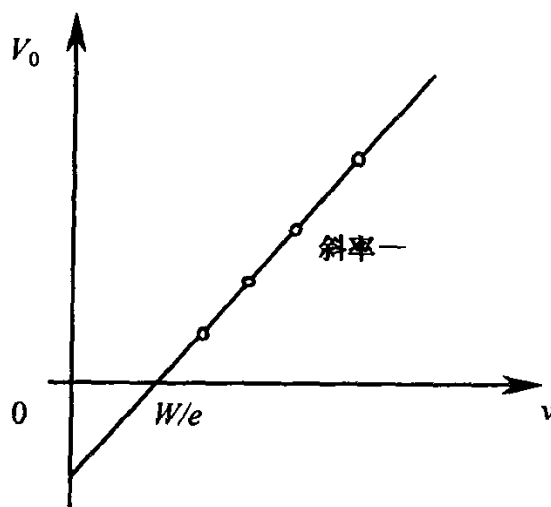


图1.4 减速电势 V_0 与光频 ν 的关系图

某一数值 V_0 时, 光电流 $I=0$ 出现截止现象, V_0 为截止电压. 这时电子动能被电能 eV_0 平衡, 所以有关系式

$$eV_0 = h\nu - W \quad \text{或} \quad V_{0i} = \frac{hc}{e\lambda_i} - \frac{W}{e} \quad (1.5)$$

其中 λ_i 为第 i 个人射光的波长, V_{0i} 为相应于 λ_i 作用下出现的截止电压.因此我们可以画出 V_{0i} 与 $1/\lambda_i$ 的曲线如图1.4,对实验点作线性拟合即可求出普朗克常数 h 和材料的逸出功函数 W .

精确的光电实验是1916年由密立根(R.A.Milliken)进行的,这个实验定量地说明了1905年爱因斯坦提出的光电效应,精确地测量了普朗克常数 h .

1.6 从电子学到光子学

古代中国人与希腊人早就认识到不同的两种物体摩擦之后会产生互相吸引的现象,并称为静电.直到17世纪电学才有较大的进步,首先是发明了起电机来产生静电,并且用莱顿瓶(即电容器)来收集电荷.这时电学仅限于静电学的研究.

18世纪意大利人伽伐尼研究了不同金属连接起来的导体使蛙腿产生电击的现象,此后,发明了伏打电池,这种电池可以通过导线形成电流的传导.有了可传导的电流之后,电磁学得到巨大的发展.可以说18世纪是电磁学大发展的世纪,如奥斯特、安培研究了电流的磁现象;欧姆研究了电势、电流及电阻之间的互相关系;法拉第研究了电磁感应的现象.19世纪,麦克斯韦从理论上研究了电磁现象并与光的现象统一了起来,认为光只是波长更短的电磁波.18、19世纪电学的进步为20世纪电子学的发展准备了条件.电子信息技术也逐步发展了起来.

1825年,利用电池作电源,用电键来产生信号,用导线以光速来传导信息,以电磁铁来接收信号而发明了早期的莫尔斯电报.

1858年,第一条跨越大西洋的海底电缆铺设成功,并开始了发送越洋电报的服务.1876年,美国的贝尔(Bell)发明了电话.1900年,马可尼等人利用电火花方法产生电磁波,用金属粉末、稍后用矿石晶体来检波,发明了无线电.

真正电子学的形成,则应归功于人类对真空中电子运动规律的彻底认识.20世纪20年代之后相继发明了电子真空二极管(1906)、三极管,无线电电子学才真正成为一门系统的科学得到长足的发展.

对电子学可以定义为:“以电子作为信息或能量载体的一门科学”.电子学的发展大约可分为五个阶段,如图1.5所示.

1900年左右即马可尼时代,人们掌握了电火花产生电磁波,电磁波可以在空间传播,并用矿石晶体来直接接收.这就是无线电电子学发展的第一个阶段.

真空三极管发明之后,人类进入了可以“控制”的第二个阶段,信号可以通过电子管的栅极来调制,20—30年代出现无线电广播电台.

到40年代中期,人类对固体特别是半导体中电子运动的规律有了彻底的认识,发明了半导体二极管、三极管以及集成电路,这时由于第二次世界大战,人类发明了雷达、计算机等等使电子技术深入到人类生活的方方面面,可以说电子技术改变了人们的生活,使人类社会从“工业化社会”开始进入“信息化社会”.

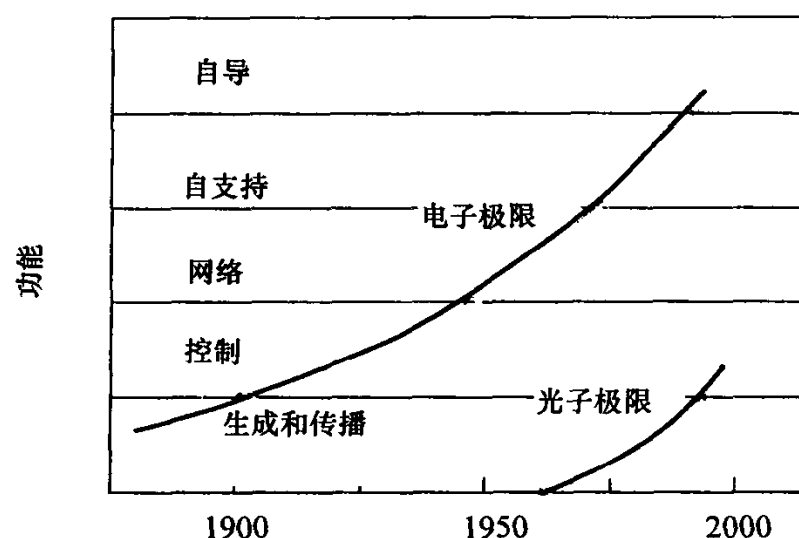


图1.5 电子学与光子学发展概况图

当前，电子学也进入到高级阶段——自导(self directing). 随着“纳米”技术的开发，电子学有可能得到一次新的突破性发展的机会。

随着“信息化社会”的到来，人们对通信的需求也越来越高，例如，电话的服务已不能满足通信要服务到人而不是服务到家、到单位的需要，由此就产生了无线移动蜂窝电话(大哥大)。最近由于 Internet 网的发展，利用计算机的多媒体服务开始进入寻常百姓家，加上有线电视等等，对一个家庭或个人，信息量不是一门电话(64 kbit/s)所能满足的，可以说人类对信息量的要求，如爆炸般地增长。

然而，电子学出现了“瓶颈”现象。由于电子是荷电粒子，在基本粒子中虽属“轻子”一类，但仍有静止质量 $m=9.11 \times 10^{-31}\text{kg}$ ，电子的弛豫时间(开关时间)大约在 10^{-9}s 量级，因此它的交换时间，最高工作频率都受到一定的限制。

展望21世纪，人类将生活在高度信息化的社会中，因此必须寻找一种新的信息载体来突破电子学的“瓶颈”效应。回头来看看各种基本粒子，其中哪一种会优于电子，作为新的信息载体呢？质子与中子质量是电子的 $\frac{1}{1840}$ ，所以它们的弛豫频率应当比电子小三个数量级，并且这种“重子”不容易产生，也不容易接收、检测，显然它们是不适合的。

在“轻子”中只有“光子”和“中微子”，而光子容易产生，通过光电效应等很容易接收、检测。更重要的是光子的工作频率更高——光频在 10^{14}Hz 量级，无静止质量，所以弛豫时间可达 10^{-15}s ，远远高于电子。光传播的速度就是光速，很清楚，光子作为新的信息载体是十分适当的。

1960年激光的发现，注定了激光可以像无线电波一样用于通信技术。激光与热辐射光(如太阳光，电灯光等)的关系如同无线电波与电火花产生的电磁波一样。热辐射光和电火花都不能用于信息技术。

1964年英籍科学家高锟提出光纤作为光信息的媒介，他认为，当光纤的损耗可降低到 20dB/km 以下时，便可用于光通信。1976年，人类做到了，第一条光纤通信的线路在美国的亚特兰大开通。1979年，国内的第一条光纤通信线路也在上海开通。

由图1.5可以看到,当今光通信的方式是强度调制/直接接收 IM/DD,即将电脉冲信息直接加载在半导体激光器上,由半导体激光器产生激光信息脉冲,然后将光信息引入光纤传输到接收端,再用光电二极管接收还原成电脉冲信号.这种 IM/DD 方式,它就像电子学中的马可尼时代一样.所以光信息技术尚处在第一阶段和即将进入第二阶段“控制”之间.

1970年,荷兰科学家首次提出光子学这一概念,1979年我国科学家钱学森给光子学以定义.“以光子作为信息载体或能量载体的科学”,并提出我国应当大力发展光子技术和光子产业.光子学和年轻人一样处在青少年时代,光子学是属于青年人的,世界也是属于青年人的,21世纪也是他们的,努力吧!

习 题 一

1 试求光波长为550 nm(绿光)的光子的质量等于多少?

2 当某一光阴极表面用不同波长的单色光去照射时,观察到不同的截止电压,如下表所示

波 长 (nm)	366	405	436	492	545	579
截止电压 (V):	1.48	1.15	0.93	0.62	0.36	0.24

(1) 试画出截止电压 V_0 与光频率 ν 的关系曲线.

(2) 试求截止波长、截止频率、材料的逸出功 W 及普朗克常数 h 各等于多少?

3 试估计温度为 3 K (K 为绝对温标)的黑体的最大辐射波长为多少? 当温度升至 0 °C 和 1000 °C 时,黑体的最大辐射波长又等于多少?

4 热核爆炸中火球的峰值温度达 10 000 000K

(1) 试估算辐射最强的波长,属什么波段?

(2) 试估算这时光子的能量为多少电子伏特(eV).

5 一般热辐射体为“红热”时,辐射波长的极大值在红外区(约为850 nm),“白热”在可见光区(约为550 nm),“蓝热”则在紫外区(约为300 nm),试求这三种情况的温度各为多少度?

6. 太阳以每平方米1340 W的功率垂直辐射到地球的表面,设阳光全部被地球吸收,地球直径为6400 km,问太阳给地球的推力是多少?

7 试求在300 K 的温度下,钠(原子量为23)原子的布朗运动速度等于多少?