

# 现代光学与光电子学

## 张家森

### 第一章 绪论

#### 1.1 光学简史

#### 1.2 光量子

- 1.2.1 光子和电子的比较
- 1.2.2 自由空间传播的色散关系
- 1.2.3 光子和电子的限域
- 1.2.4 经典禁带中的传播：隧道效应
- 1.2.5 在周期势场中：带隙
- 1.2.6 费曼变分表述和光子

### 第二章 光的吸收和色散

#### 2.1 光的吸收

- 2.1.1 光在线性介质中的传播
- 2.1.2 吸收的线性规律
- 2.1.3 复折射率
- 2.1.4 吸收与波长的关系

#### 2.2 光的色散和群速色散

- 2.2.1 色散
- 2.2.2 群速色散
- 2.2.3 脉冲畸变

#### 2.3 吸收和色散的经典描述

- 2.3.1 电介质的洛伦兹模型
- 2.3.2 金属的特鲁德(Drude)模型
- 2.3.3  $D$  和  $E$  的关系中的因果性：克喇末-克朗尼格关系

### 第三章 导波光学

#### 3.1 导波光学基础

- 3.1.1 平面波导中的光线
- 3.1.2 光纤

#### 3.2 光波导的一般理论和波导模式

- 3.2.1 亥姆霍兹方程
- 3.2.2 光波导中的模式的概念
- 3.2.3 模式的分类

#### 3.3 平面光波导

- 3.3.1 基本概念
- 3.3.2 模式场
- 3.3.3 特征方程
- 3.3.4 截止条件、单模传输及远离截止频率的情况

### 第四章 非线性光学效应

#### 4.1 光在非线性介质中的传播

- 4.1.1 非线性光学过程的描述
- 4.1.2 非线性极化率的求解
- 4.1.3 非线性极化率的对称性

#### 4.2 非线性光学相互作用下的波动方程

#### 4.3 二阶非线性光学过程

- 4.3.1 非线性耦合波方程
- 4.3.2 光的二次谐波
- 4.3.3 其它二阶非线性光学现象
- 4.4 三阶及高阶非线性光学过程
  - 4.4.1 三次谐波产生
  - 4.4.2 光学克尔效应
  - 4.4.3 自聚焦现象
  - 4.4.4 简并四波混频与光学相位共轭
  - 4.4.5 高次谐波的产生

## 第五章 纳米光子学

- 5.1 近场光学显微镜原理
  - 5.1.1 光场的角谱表示
  - 5.1.2 近场到远场的信息转换
  - 5.1.3 扫描近场光学显微镜
- 5.2 光子晶体
- 5.3 表面等离激元光学
  - 5.3.1 表面等离激元
  - 5.3.2 光场和表面等离激元的耦合

## 第六章 光调制

- 6.1 电光调制
  - 6.1.1 电光效应
  - 6.1.2 线性电光效应
  - 6.1.3 电光调制原理
  - 6.1.4 电光光束偏转
- 6.2 声光调制
  - 6.2.1 弹光效应
  - 6.2.2 声光衍射
  - 6.2.3 声光器件
- 6.3 磁光效应
  - 6.3.1 法拉第磁光效应
  - 6.3.2 其它磁光效应
- 6.4 集成光学调制器
  - 6.4.1 相位和偏振调制器
  - 6.4.2 麦克耳逊调制器
  - 6.4.3 耦合波导调制器

## 第七章 光辐射探测技术

- 7.1 光电探测器的物理效应
  - 7.1.1 光电效应
  - 7.1.2 光电导效应
  - 7.1.3 光伏效应
  - 7.1.4 光电转换定律
- 7.2 光电探测器
  - 7.2.1 光电倍增管
  - 7.2.2 电荷耦合器件
  - 7.2.3 微通道板
  - 7.2.4 硅光电池
  - 7.2.5 光电二极管
  - 7.2.6 pin 光电二极管

- 7.2.7 雪崩光电二极管
- 7.3 光电弱信号探测
  - 7.3.1 锁相放大器
  - 7.3.2 取样平均器
  - 7.3.3 单光子计数器
- 第八章 光子的吸收和发射
  - 8.1 吸收、受激辐射和自发辐射
  - 8.2 选择定则
  - 8.3 分立光谱和连续光谱
  - 8.4 振子强度
  - 8.5 跃迁几率
  - 8.6 非线性吸收
  - 8.7 电子态的振转结构与弗兰克-康登原理
- 第九章 光谱线的线宽和线型
  - 9.1 光谱线的线型
  - 9.2 自然线宽
  - 9.3 多普勒线宽
  - 9.4 光谱线的碰撞展宽
  - 9.5 飞行时间展宽
  - 9.6 均匀和非均匀谱线展宽
  - 9.7 饱和展宽
    - 9.7.1 均匀饱和
    - 9.7.2 非均匀谱线线型的饱和
  - 9.8 液体和固体中的光谱线型
  - 9.9 一个实际的分子的光谱
- 第十章 激光多普勒极限吸收和荧光光谱学
  - 10.1 高灵敏度的探测方法
    - 10.1.1 激发光谱
    - 10.1.2 光声光谱学
    - 10.1.3 电离谱
    - 10.1.4 各种方法间的比较
  - 10.2 激光光抽运
  - 10.3 激光感生荧光光谱
  - 10.4 激发态光谱
  - 10.5 光学-光学双共振(OODR)
  - 10.6 多光子光谱学
- 第十一章 高分辨率激光光谱
  - 11.1 准直分子束光谱学
  - 11.2 饱和吸收光谱学
  - 11.3 偏振光谱学
    - 11.3.1 基本原理
    - 11.3.2 偏振信号的谱线线型
    - 11.3.3 偏振光谱技术的优越性
  - 11.4 无多普勒多光子光谱学
    - 11.4.1 基本原理
    - 11.4.2 双光子跃迁的谱线线型

## 第十二章 飞秒激光光谱技术

### 12.1 激光脉冲的测量

#### 12.1.1 能量和功率的测量

#### 12.1.2 脉冲形状的测量

### 12.2 飞秒分辨光谱技术

#### 12.2.1 泵浦—探测方法

#### 12.2.2 时间分辨发射谱：光学方法

#### 12.2.3 瞬态光栅技术

## 第一章 绪论

### 1.1 光学简史

公元前 400 多年(先秦): 中国的《墨经》中记录了世界上最早的光学知识。它有八条关于光学的记载, 叙述影的定义和生成, 光的直线传播性和针孔成像, 并且以严谨的文字讨论了在平面镜、凹球面镜和凸球面镜中物和像的关系。

约公元前 300 年, 欧几里得用“光学”(optics)这个词来表示视觉和景观。

伽利略(1564-1642): 第一次测量光的速度。

1665 年, 格里马耳迪描述了光的衍射实验, 并表述了他的光波动理论。

惠更斯(1626-1695): 波动说。

惠更斯原理: 传播中波前上的每一点, 都可以看成是一个新的波或子波的波源, 新的波前位置就是这些小子波的包络线, 这些子波是从原先波前上所有的点发出的。

1704 年, 牛顿(1642-1727)的光学研究在他的《光学》中达到顶峰。

光的微粒说, 认为光是一束通过空间高速前进的粒子流。

证明不同颜色的光有不同折射率。

证明白光由不同颜色的光组成。

发明反射望远镜。

发现“牛顿环”。

1800 年杨氏双缝干涉实验, 证明了光的波动性。

1814 年, 菲涅尔(Augustin Jean Fresnel, 1788-1827)独立发现光的干涉现象, 并按照波动理论解释它的存在原因。

1845 年, 法拉第发现在介质上加磁场后, 可以改变其中光的偏振方向, 这一发现启发人们研究光与电磁场的关系。

1849 年, 斐索(1819 年-1896 年)对光速进行了测量。

1864 年, 麦克斯韦提出完整的电磁场理论, 说明电磁波的波速与测得的光速相等。

1868 年, 麦克斯韦发表《关于光的电磁理论》, 论述了光是电磁波。

1881 年, 迈克尔逊开始干涉仪实验检测传光以太。

1888 年, 赫兹从实验上证实了电磁波的存在, 并发现光电效应。

1900 年, 普朗克从物质的分子结构理论中借用不连续性的概念, 提出了辐射的量子论。他认为各种频率的电磁波, 包括光, 只能以各自确定分量的能量从振子射出, 这种能量微粒称为量子, 光的量子称为光子。

1905 年, 爱因斯坦运用量子论解释了光电效应。他给光子作了十分明确的表示, 特别指出光与物质相互作用时, 光也是以光子为最小单位进行的。

此后，光学开始进入了一个新的时期，以致于成为现代物理学和现代科学技术前沿的重要组成部分。其中最重要的成就，就是发现了爱因斯坦于 1916 年预言过的原子和分子的受激辐射，并且创造了许多具体的产生受激辐射的技术。

爱因斯坦研究辐射时指出，在一定条件下，如果能使受激辐射继续去激发其他粒子，造成连锁反应，雪崩似地获得放大效果，最后就可得到单色性极强的辐射，即激光。1960 年，梅曼用红宝石制成第一台可见光的激光器；同年制成氦氖激光器；1962 年产生了半导体激光器；1963 年产生了可调谐染料激光器。由于激光具有极好的单色性、高亮度和良好的方向性，所以自 1958 年发现以来，得到了迅速的发展和广泛应用，引起了科学技术的重大变化。

光学的另一个重要的分支是由成像光学、全息术和光学信息处理组成的。这一分支最早可追溯到 1873 年阿贝提出的显微镜成像理论，和 1906 年波特为之完成的实验验证；1935 年泽尔尼克提出位相反衬观察法，并依此由蔡司工厂制成相衬显微镜，为此他获得了 1953 年诺贝尔物理学奖；1948 年伽柏提出的现代全息照相术的前身——波阵面再现原理，为此，伽柏获得了 1971 年诺贝尔物理学奖。

自 20 世纪 50 年代以来，人们开始把数学、电子技术和通信理论与光学结合起来，给光学引入了频谱、空间滤波、载波、线性变换及相关运算等概念，更新了经典成像光学，形成了所谓“傅里叶光学”。再加上由于激光所提供的相干光和由利思及阿帕特内克斯改进了的全息术，形成了一个新的学科领域——光学信息处理。光纤通信就是依据这方面理论的重要成就，它为信息传输和处理提供了崭新的技术。

在现代光学本身，由强激光产生的非线性光学现象正为越来越多的人所注意。激光光谱学，包括激光喇曼光谱学、高分辨率光谱和飞秒超短脉冲，以及可调谐激光技术的出现，已使传统的光谱学发生了很大的变化，成为深入研究物质微观结构、运动规律及能量转换机制的重要手段。它为凝聚态物理学、分子生物学和化学的动态过程的研究提供了前所未有的技术。

## 1.2 光量子

### 1.2.1 光子和电子的比较

表 1.1 光子和电子的比较

光子	电子
波长	
$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{c}{\nu}$	$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$
本征（波动）方程	
$\left[ \nabla \times \frac{1}{\varepsilon(r)} \nabla \times \right] \mathbf{B}(r) = \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 \mathbf{B}(r)$	$H\psi(r) = -\frac{\hbar^2}{2m} [\nabla \cdot \nabla + V(r)] \psi(r) = E\psi$
自由空间的传播	
平面波 $\mathbf{E} = \frac{1}{2} \mathbf{E}_0 (e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} + e^{-i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)})$	平面波 $\psi_p = c \exp \left[ -\frac{i}{\hbar} \left( \frac{p^2}{2m} t - px \right) \right]$
和媒体的相互作用	
介电常数（折射率）	库仑相互作用
经典禁带中的传播	

光子隧道（隐逝场） <b>k</b> 为虚数	电子隧道 振幅指数衰减
协同效应	
非线性光学相互作用	多体相关 超导库伯对 双激发

### 1.2.2 自由空间传播的色散关系

光子的能量：  $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{h\omega}{2\pi} = \hbar\omega$

可利用爱因斯坦质能等效方程：

$$E = mc^2$$

$$h\nu = h\frac{c}{\lambda} = mc^2$$

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \hbar k$$

光子的动量：  $\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$

波矢的大小：  $|k| = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi\nu}{c} = \frac{\omega}{c}$ ，  $\omega = c|k|$

自由电子的能量：  $E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$

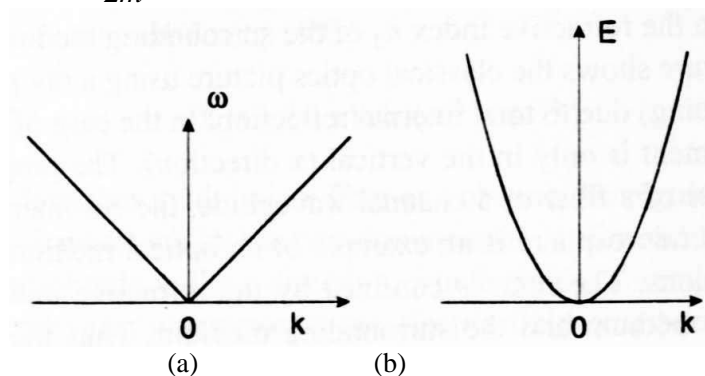


图 1.1 自由空间传播的光子(a)和电子(b)的色散关系

普朗克常数  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J Hz}^{-1}$ ，  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ 。

常用的能量单位： eV 和  $\text{cm}^{-1}$

$$1 \text{ eV} = (1\text{e})(1\text{V}) = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ Js})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}} = \frac{1240 \text{ nm eV}}{E}$$

红外线	1 eV
可见光	2.2 eV
紫外线	5 eV
X射线	$10^4 \text{ eV}$
$\gamma$ 射线	$10^7 \text{ eV}$
室温	25 meV

波长的倒数也常用作能量的单位，即  $\text{cm}^{-1}$ ，称为波数。  
 $1 \text{ cm}^{-1} \approx 1.24 \times 10^{-4} \text{ eV}$

### 1.2.3 光子和电子的限域

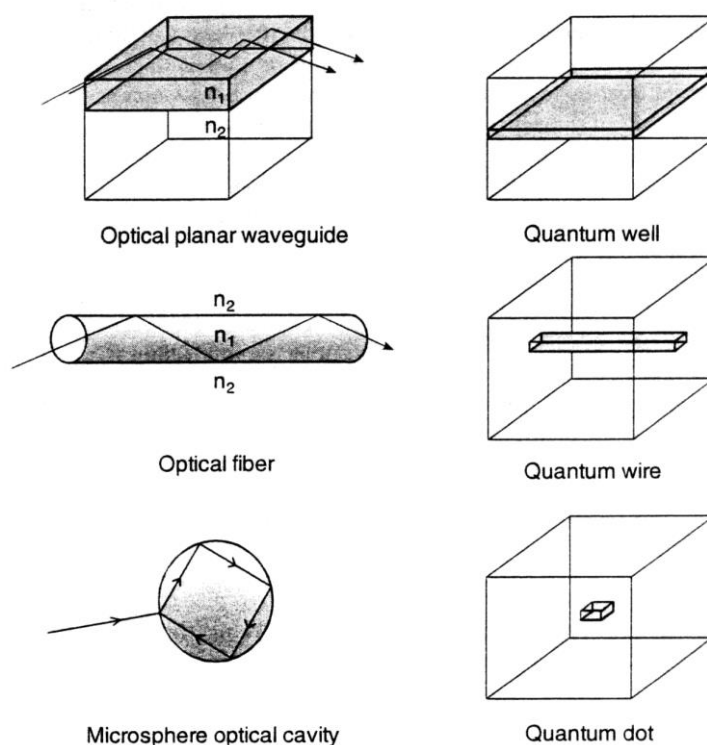


图 1.2 不同维数的光子和电子的定域

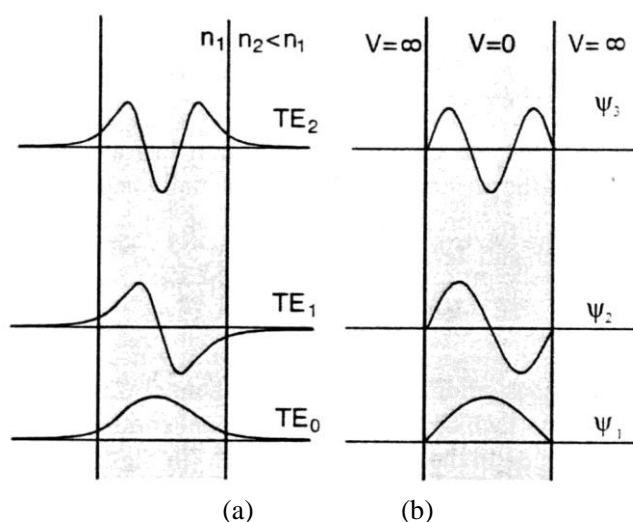


图 1.3 (a)一维定域的平面波导中光子的三个 TE 模的电场分布，(b)一维盒子中的电子的三个波函数。

### 1.2.4 经典禁带中的传播：隧道效应



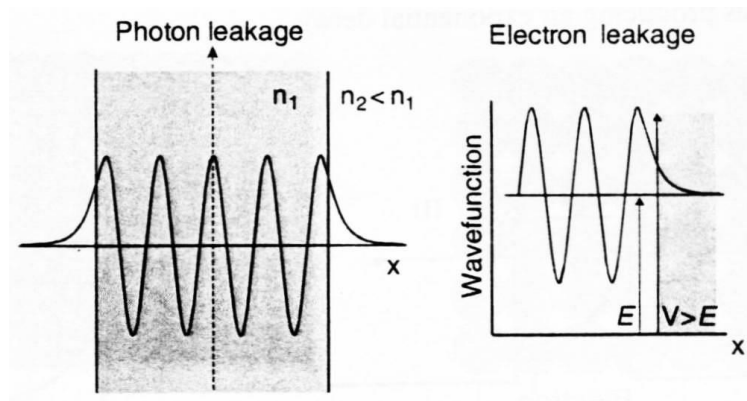


图 1.4 光子和电子向经典禁带的泄漏

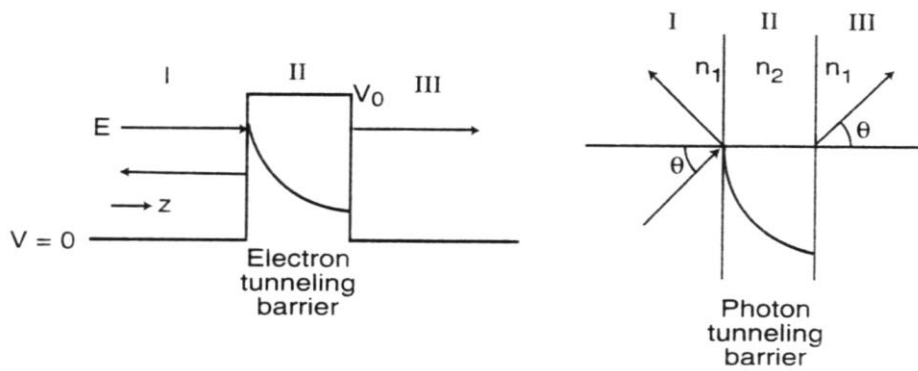


图 1.5 电子和光子通过势垒的隧穿

### 1.2.5 在周期势场中：带隙

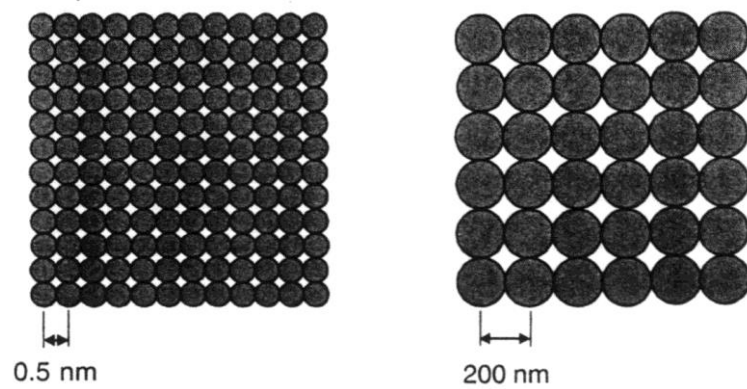


图 1.6 电子晶体（左）和光子晶体的示意图

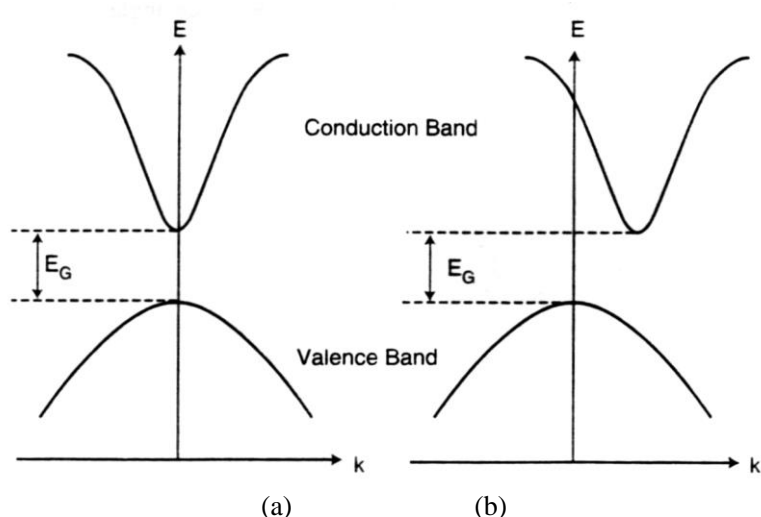


图 1.7 直接带隙(a)和间接带隙(b)半导体中电子的能量示意图

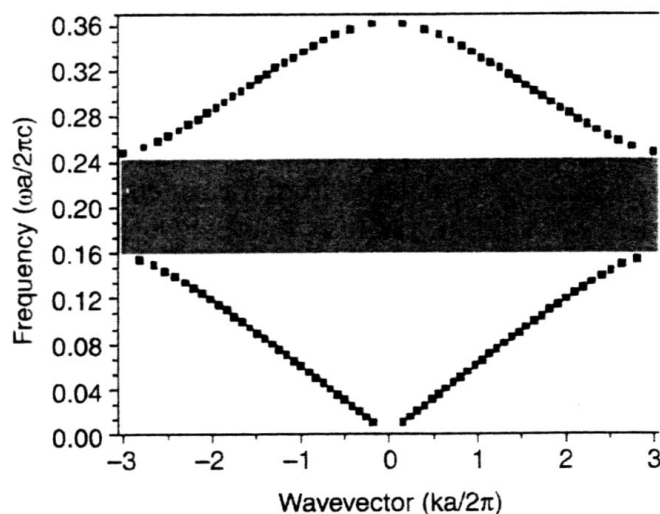


图 1.8 一维光子晶体最低能量带隙的色散曲线。

### 1.2.6 费曼变分表述和光子

假设有一个粒子（光子、电子等）从一源点射出，然后在  $y$  点被检测到。到达的几率  $P$  等于一个复数量  $\Psi$  的绝对值的平方，即  $P = |\Psi|^2$ 。 $\Psi$  是几率幅，其绝对值的平方给出几率分布，其相位是  $y$  的空间位置和时间的函数。就是这个像波一样传播的几率幅，描述了一切干涉效应。例如，在杨氏实验中，光子到达其终态的几率幅是两项之和，其中的每一项同光子通过一条狭缝的几率幅相联系。一种给定情况中各个有贡献的几率幅相互叠加，从而发生干涉。一个事件可以通过几条可资挑选的路径 1,2,3,... 发生，费曼假定在这种情况下，每一条路径都对总几率幅有贡献，并且单个几率幅的大小都相等。

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 + \Psi_3 + \dots$$

$$P = |\Psi_1 + \Psi_2 + \Psi_3 + \dots|^2 \quad (a)$$

$$|\Psi_1|^2 = |\Psi_2|^2 = |\Psi_3|^2 = \dots$$

每一条路径的几率幅的相位不相等并与具体的路径有关。 $P = 1$  意味着粒子肯定会到达  $y$  点，而  $P = 0$  则意味着粒子肯定不到达  $y$  点，对于一般情况， $P$  的值将在 0 到 1 之间。式(a)显然把干涉现象引入到一种理论体制中来，不论这种理论体制是关于光子的还是电子的。

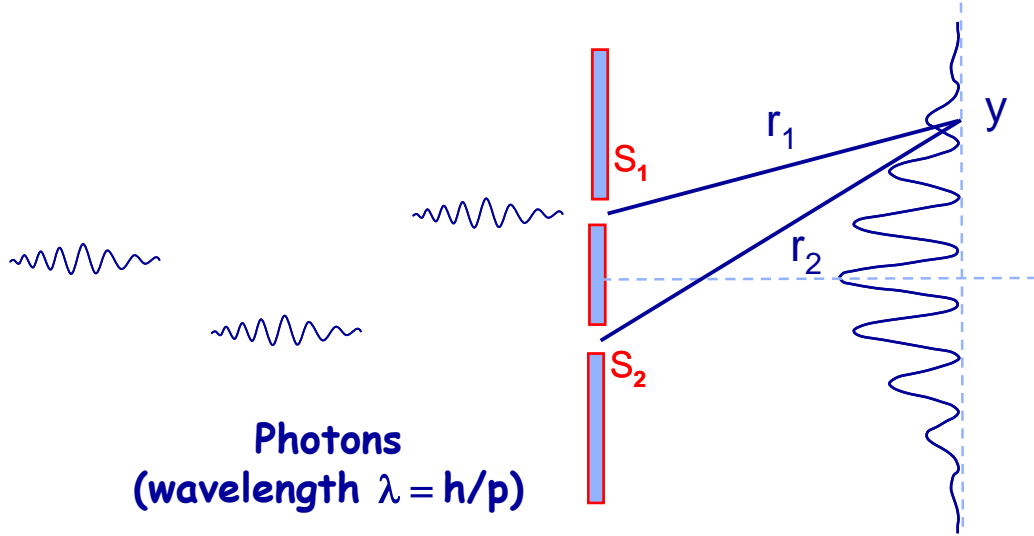


图 1.9 杨氏实验示意图

现在我们来研究由两个极小的缝组成的理想化的杨氏实验。这时有两条有效的路径， $\Psi_1$  表示从源点到达狭缝 1 再到 y 点的几率幅， $\Psi_2$  表示从源点到达狭缝 2 再到 y 点的几率幅。假设  $\Psi_1$  和  $\Psi_2$  的不同由狭缝 1 和 2 到达 y 点的距离不同引起，

$$\Psi_1 \propto e^{ikr_1}, \quad \Psi_2 \propto e^{ikr_2}$$

$$\begin{aligned} P &= |\Psi_1 + \Psi_2|^2 \propto |e^{ikr_1} + e^{ikr_2}|^2 = (e^{ikr_1} + e^{ikr_2})(e^{-ikr_1} + e^{-ikr_2}) \\ &= e^{ikr_1}e^{-ikr_1} + e^{ikr_2}e^{-ikr_2} + e^{ikr_1}e^{-ikr_2} + e^{-ikr_1}e^{ikr_2} \\ &= 1 + 1 + e^{i\phi} + e^{-i\phi} = 2 + 2\cos(\phi) \end{aligned}$$

这里  $\phi = kr_1 - kr_2 = \frac{2\pi}{\lambda}(r_1 - r_2)$ 。可以看到，这里的结果和经典理论给出的结果完全一致。

如果屏上有 N 个狭缝，那么一个光子到达 y 点的几率将是

$$P = \left| \sum_{i=1}^N \Psi_i \right|^2$$

对于大孔径，例如一面透镜或一面反射镜，求和变为对孔面积求积分。费曼已经证明，对于实物粒子，全部路径的几率幅的总和就是波函数，它满足薛定谔方程。

近年来，双光子和多光子之间的干涉的研究成为量子光学领域的一个热门课题，使人们对光子的干涉有了进一步的认识。Dirac 曾经说过，一个光子只同它自身发生干涉效应，不同的光子之间永远不可能产生干涉。对于多光子干涉，Dirac 的结论需要做些小的修正。

量子力学把粒子的波动性和粒子性统一起来，比经典力学和经典电磁场理论更为完善。波函数  $\Psi$  描述的是粒子的统计规律， $\Psi\Psi^*$  表示出现粒子的概率密度。而空间各处出现粒子的概率与当粒子数目趋向无穷时粒子的密度分布是同一回事。另一方面，由概率波  $\Psi$  所得到的量子力学意义下的光强（找到粒子的概率）与经典意义下的光波场的光强（振幅的平方）又相互对应。因而，当光子数目充分大时，主要表现出波动性的一面，这时用经典电磁理论处理就可以了。或者说，只有当粒子数不够大时，微观世界的行为才与经典理论有明显差别。

光子数的多寡与实验的目的、接受器的种类以及光子的能量有着密切的关系。首先，凡是测量空间光强分布的实验，显然都需要大量的光子。其次，当一个光子的能量不大（波长较长），远小于某种检测器的灵敏度极限时，也需要极大数目的光子才能仪器的

可观反应，这时光的粒子性也表现不出来。无线电波和红外线的接受器属于这种情况。对于频率极高的光子（例如 $\gamma$ 射线），少量甚至单个光子的能量已可超过某些检测仪器的灵敏度，这时光的粒子性就明显地表现出来。第三，凡是涉及到光与物质作用的机理时，也都要考虑光的粒子性，因为光与物质中原子、分子的作用都是以一个个光子的发射或吸收来进行的。如光电效应，光化学反应等。

参考文献：

1. Nanophotonics, Paras N. Prasad 著
2. 《光学》 E. 赫克特, A. 赞斯著 秦克诚等 译