

单光子与 量子通信加密

Single-Photon and Quantum
Communication Cryptography

张昭理 刘三妍 张镇九 著



科学出版社

单光子与量子通信加密

张昭理 刘三妍 张镇九 著



科学出版社

内 容 简 介

近年来一些新的量子现象,如量子纠缠、量子超距传态、量子非定域性均已得到实验证实,信息科学、量子力学和计算机科学已结合成新的量子信息科学。光是由单光子组成的。单光子有波动和粒子双重特性。单光子的相干性和纠缠性在量子信息理论上和量子通信加密、量子计算机应用上有重要意义。本书是论述单光子与通信加密的理论和实验基础新进展的一部专著。

本书可供信息科学、信息安全、光学、量子物理、量子光学及单光子物理学、单光子信息论、单光子通信及加密、光子计算机,以及单光子的基本问题及其应用等专业在校大学生、研究生、学者及教学科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

单光子与量子通信加密/张昭理,刘三妍,张镇九著. —北京:科学出版社, 2013. 7

ISBN 978-7-03-038122-4

I. ①单… II. ①张… ②刘… ③张… III. ①单光电子技术—研究
②通信保密—研究 IV. ①TN2 ②TN918

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 150086 号

责任编辑:张颖兵 / 责任校对:吴 森

责任印制:彭 超 / 封面设计:苏 波

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本: A5(890×1240)

2013 年 7 月第 一 版 印张:5 5/8

2013 年 7 月第一次印刷 字数:179 000

定价:49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

通过光的干涉、衍射和偏振现象,人们认识到光的波动性,光是电磁波;通过光的光电效应等现象,人们认识到光的粒子性,光是光子流。随后的研究指出,电磁场的量子就是光子。人们认识到光的波动和粒子二相性后,进而通过大量实验事实,认识到所有粒子都具有波粒二相性。日常认识的光是由大量的光子组成。随着实验水平的提高,人工可以产生很弱很弱的光,以致使一个一个的单个光子单独运动,人工能产生单光子,并能探测单光子。单光子的静质量为零,不荷电。在真空中以光速 c 运行,其自旋为 1,是玻色子。早在 1900 年,普朗克解释黑体辐射能量分布时作出量子假设,物质振子与辐射之间的能量交换是不连续的,每一份的能量为普朗克常量 h 和电磁辐射频率 ν 的乘积 $h\nu$;1905 年爱因斯坦进一步提出光波本身就不是连续的而具有粒子性,爱因斯坦称之为光量子;1923 年康普顿成功地用光量子概念解释了 X 射线被物质散射时波长变化的康普顿效应。1926 年正式命名了光子。量子电动力学确立后,确认光子是传递电磁相互作用的媒介粒子。带电粒子通过发射或吸收光子而相互作用,正反带电粒子对可湮没转化为光子,它们也可以在电磁场中产生。后来人们又发现了光子的纠缠态。例如一个单光子通过一种特殊的晶体,可以出现两个单光子,而它们之间是纠缠的,即它们之间具有的量子关联,当其中一个的状态发生变化(例如被测量),另一个(不论相距多远)的状态会立即发生相应的变化。

现在人们认识到,光是由一个一个的光子(单光子)组成,单光子有波动和粒子双重特性;单光子的相干性和纠缠性在量子信息理论上和量子通信加密、量子计算机应用上有重要意义。

根据现有的实验和理论,对于每个电磁场量子-光子,具有能量 $\epsilon = \hbar\omega$,动量 $p = \hbar k$,波矢量 $k = n \frac{\omega}{c}$,自旋角动量 $s = \frac{\hbar}{2}\sigma$ (对应偏振),其中,

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$, h 为普朗克常量, ω 为圆频率, n 为传播方向的单位矢量, c 为真空

中的光速, σ 为泡利算符。

光辐射的能量只能是 ϵ 的整数倍(如黑体辐射、原子发光), 光与物质相互作用时传递的能量也是 ϵ 的整数倍(如光电效应), 固体中原子振动对比热容的贡献所对应的能量还是 ϵ 的整数倍。康普顿效应显示光子的动量。

迄今实验测量结果和电磁场理论、狭义相对论、量子力学、量子光学和单光子学表明: 光由单光子组成, 单光子具有波动性和粒子性, 光子不可分, 光子具有相干和纠缠的特性(这是光量子通信和量子计算机的基础), 光在真空中的传播速度是一切物体和信息传播速度的极限。

近些年来, 一些新的量子现象, 如量子纠缠、量子超距传态、量子非定域性均已得到实验证实, 这是可以肯定的, 而且是非常重要的。我们认为, 由信息科学、量子力学和计算机科学结合而成的新的量子信息科学已经建立起来。量子技术在信息科学方面的应用正导致量子通信和加密系统以及量子计算机从实验室走向实用。就其对科学本身发展的重要性以及在应用方面的前景来看, 发展量子技术将可能带来信息科学的革命性发展, 因而是新世纪的巨大挑战之一。

2012 年诺贝尔物理学奖获得者阿罗什与瓦恩兰“提出了突破性的实验方法, 使测量和操控单个量子体系成为可能”。两人“开启量子物理学实验新时代的大门”。这将加快量子计算和量子通信加密进入我们现实生活的步伐。

2012 年 12 月《物理评论》发表的英国剑桥大学等的实验研究结果, 显示量子密钥能在商用噪声光纤通道中传输 90 km。这是在实用方面迈出的一大步。

本书的安排如下: 首先将真空中的自由单光子看作是具有相近的波矢量的一些具有确定振动方向的经典电磁波所形成的经典波包; 接着将真空中的自由单光子看作为静止质量为零、以光速运动的完全狭义相对论性的经典粒子; 第 3 章从电磁场的量子化得到光子的概念, 每个单光子有波动和粒子双重特性; 第 4 章讨论单光子的不可分性; 第 5 章讨论单光子的相干与纠缠特性; 第 6 章讨论量子计算的理论和实验研究近况; 第 7 章讨论单光子通信与加密的理论和实验研究近况; 第 8 章讨论光速, 包括光速理论和实验研究近况以及对“超光速”的理论和实验的评述, 结论是:

在真空中光的传播速度是一切物体和信息传播速度的极限。真空中光速不变是相对论的基础,与此相关的因果性是物理学的基础。一些超光速的理论和实验还在讨论之中,量子塌缩和量子纠缠与因果性的不相容还有待进一步的研究。

感谢科学出版社编辑们的大力支持及提出宝贵修改意见。

张昭理 刘三妍 张镇九

于华中师范大学桂子山

2012年10月

目 录

前言	i
第 1 章 自由单光子是经典波包	1
1.1 光的干涉、衍射和偏振实验	2
1.1.1 理论基础	2
1.1.2 光的干涉	3
1.1.3 光的衍射	4
1.1.4 光的偏振和偏振光的干涉	12
1.2 经典电磁波	15
1.2.1 四维矢量势和四维电磁场张量	15
1.2.2 电磁场方程与电磁波方程	18
1.2.3 平面电磁波	22
1.3 光子波包	26
1.3.1 波源的振动	27
1.3.2 脉冲	27
1.3.3 调幅的行波	27
1.3.4 单光子波包	28
1.4 偏振	30
1.4.1 偏振的概念	30
1.4.2 产生偏振光子的方法	31
1.4.3 偏振光的干涉	32
第 2 章 单光子是经典粒子	33
2.1 光电效应实验	33
2.2 单光子	34
2.2.1 真空中的经典粒子	34
2.2.2 四维动量	34
2.2.3 单光子的质量、能量、动量、速度	35

2.2.4 单光子的力学量的洛伦兹变换	36
2.3 单光子是一个“粒子包”	38
第3章 光子是电磁场量子	39
3.1 经典电磁场的量子化	39
3.1.1 正则量子化	39
3.1.2 福克态空间	40
3.1.3 单光子电磁场的量子化	42
3.2 光子	43
3.3 光子的偏振与自旋	44
3.3.1 一个光子的两个偏振本征态的相干叠加	44
3.3.2 光子的两个偏振态的密度矩阵	45
3.3.3 单光子的自旋	46
3.3.4 自旋极化矢量	47
3.4 单光子波包	47
3.4.1 单光子波包	47
3.4.2 在坐标空间中	48
3.4.3 在动量空间中	49
3.4.4 单光子的能量	50
3.5 单光子的 Wigner 函数	51
3.6 单光子波包是空心的	53
第4章 单光子干涉实验:单光子不可分	55
4.1 单光子源	55
4.2 单光子探测器	56
4.3 一个单光子同时被反射和透射	57
4.4 透射光通过多个 $\frac{1}{2}$ 分光器	58
4.5 反射光和透射光汇聚于第二个 $\frac{1}{2}$ 分光器	60
4.5.1 实验一	60
4.5.2 实验二	61
4.5.3 实验三	61

4.5.4 实验四	61
4.5.5 实验小结	62
4.6 单光子的相干态	63
4.6.1 非相对论量子力学的原理	63
4.6.2 单光子的偏振态的干涉	66
4.6.3 在量子统计力学中	67
第5章 光子纠缠态	70
5.1 量子纠缠态	70
5.2 双光子纠缠实验	72
5.3 双光子纠缠	74
5.3.1 量子非定域相关性	75
5.3.2 双光子不是两个光子	77
5.4 纠缠的光子波包塌缩的实验	79
5.4.1 实验	79
5.4.2 对实验结果的解读一	79
5.4.3 对实验结果的解读二	80
第6章 量子算法及实验实现	82
6.1 量子位	83
6.2 量子逻辑门	84
6.2.1 经典逻辑门	84
6.2.2 量子逻辑门	84
6.2.3 量子“非”门	85
6.2.4 量子复制门	85
6.2.5 量子“与”门	85
6.2.6 量子门的矩阵表示	86
6.2.7 量子门与泡利矩阵的关系	86
6.2.8 量子 $\sqrt{\text{NOT}}$ 门	87
6.2.9 量子空间的旋转和 Hadamard 门	88
6.2.10 量子控制非门与 EPR 态	90
6.3 量子并行计算	91
6.4 量子编码	93

6.5 量子逻辑门的实验实现	93
6.5.1 么正厄密矩阵	93
6.5.2 量子非门与单量子位旋转	94
6.5.3 A_j -变换的实现	98
6.5.4 B_{ij} -变换的实现	99
6.5.5 么正变换的实现	99
6.5.6 Hadamard 变换	101
6.6 量子计算的实验实现	103
6.6.1 概述	103
6.6.2 四粒子纠缠的实验实现	104
6.6.3 量子交换门	106
6.6.4 量子网络	106
第7章 单光子通信与加密	107
7.1 经典密码术	110
7.1.1 秘密密钥加密术	111
7.1.2 公开密钥加密术	111
7.1.3 经典加密术的问题	116
7.2 量子通信	116
7.2.1 概述	116
7.2.2 两粒子纠缠态的实验产生	118
7.2.3 量子超传的实验实现	122
7.2.4 长距离量子通信	124
7.2.5 星-地单光子通信	125
7.2.6 用单光子实现两单分子间通讯	126
7.2.7 光量子通信的安全性	127
7.3.8 评论	128
7.3 量子加密术	129
7.3.1 概述	129
7.3.2 量子密码技术的非一般安全性	132
7.3.3 利用非正交量子态加密的安全性	133
7.3.4 利用纠缠量子态加密的安全性	134

7.3.5 单光子密码技术的示例	135
7.3.6 量子银行支票	140
7.4 量子加密的实验实现	141
7.4.1 偏振加密	141
7.4.2 相位加密	141
7.4.3 利用纠缠双光子加密	142
7.4.4 单光子量子加密的实验实现	145
7.4.5 噪声量子通道	145
第 8 章 光速	146
8.1 关于光速	148
8.1.1 首次计算出光速	148
8.1.2 光是电磁波	148
8.1.3 光速作为测量标准	149
8.1.4 光速不变原理是相对论的基础	149
8.1.5 在真空静态引力场中的光速	149
8.1.6 光速是极限速度与物理学的因果性	151
8.2 一些实验结果	152
8.2.1 量子纠缠态(EPR 态)与超距作用	152
8.2.2 量子隧穿与超光速	154
8.2.3 介质中的超光速现象	154
8.2.4 介质中使光速变慢甚至完全停止	155
8.2.5 天文学中的视超光速现象	156
8.2.6 宇宙暴涨与超光速	157
8.2.7 在介质中的光脉冲的群速度超过真空中光速	158
8.3 超光速理论	159
8.3.1 超光速理论	159
8.3.2 第二届电磁波波速学术会议	160
8.4 真空中的光速仍是速度极限	160
8.4.1 证明洛伦兹不变性和狭义相对论的新实验	160
8.4.2 现代版的 Michelson-Morley 实验	160
8.4.3 真空中光速仍是速度极限	160

8.5 评述	161
8.5.1 量子隧穿不是超光速传递信息	161
8.5.2 天文学中的视超光速现象	161
8.5.3 放慢或停止光的脚步的应用前景	161
8.5.4 小结	162
参考文献	163

第 1 章 自由单光子是经典波包

本章先讨论光具有波动性的实验,再说明真空中的自由电磁场的主要特性,真空中的自由单光子是具有相近的波矢量的一些具有确定振动方向的电磁振荡的经典波包。

电磁场可由四维矢量势 $\mathbf{A}^\mu$ 描写,或由反对称的张量 $\mathbf{F}_{\mu\nu}$ 描写,或由电场强度矢量 $\mathbf{E}$ 和磁感应强度矢量 $\mathbf{B}$ 联合描写。为使 $\mathbf{A}^\mu$ 较确定,常附加条件 $\mathbf{A}^\mu_{,\mu} = 0$ 。

真空中的自由电磁场意指电荷密度、电流密度矢量均为 0。在这种情况下,为使 $\mathbf{A}^\mu$ 确定,再附加一个条件(即选定标量势为 0),这样,自由电磁场完全由三维矢量势 $\mathbf{A}$ 描写。自由电磁场以电磁波形式在真空中传播。真空中传播速度在任何惯性系中均为常数 c 。

真空中电磁场的正则坐标即为三维矢量势 $\mathbf{A}$,正则动量即为电场强度 $\mathbf{E}$ 的相反矢量。磁感应强度 $\mathbf{B}$ 为矢量势 $\mathbf{A}$ 的旋度。哈密顿密度就是电磁场能量密度。哈密顿正则方程就是真空中电磁场的运动方程——麦克斯韦方程。

$$\begin{aligned} \text{对于波矢量 } \mathbf{k} \text{ 为常矢量的平面电磁波, } \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\mathbf{E}, \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \mathbf{B} = \frac{\mathbf{E}}{c}, \\ \mathbf{E} \perp \mathbf{B}, \mathbf{k} \cdot \mathbf{A} = 0, \mathbf{E} = -i\omega \mathbf{A}, \mathbf{B} = i\mathbf{k} \times \mathbf{A}, \text{平均能量密度 } \varpi = \frac{\epsilon_0 \mathbf{E}^2 + \frac{\mathbf{B}^2}{\mu_0}}{2} \\ = \frac{k^2 \mathbf{A}^2}{\mu_0}, \text{能流密度矢量 } \mathbf{S} = \mathbf{E} \times \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} = \varpi c \mathbf{n}. \end{aligned}$$

真空中的一个自由单光子可视为具有以波矢量 $\mathbf{k}$ 为中心,宽度为 Δk 的一些具有确定振动方向的电磁振荡所形成的一个空间脉冲,一个经典波包。第 3 章中,当考虑到电磁场的量子效应时,一般($m_0 \neq 0$)的粒子的波包将扩散,但是,自由单光子($m_0 = 0, m = \frac{h\nu}{c^2}$)的波包不扩散。

1.1 光的干涉、衍射和偏振实验

1.1.1 理论基础

由狭义相对论,静止质量为 m_0 ,速度为 v 的自由粒子,其三维动量矢量 $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$,能量 $\epsilon = mc^2$,质量 $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$,能量 - 动量四维矢量 $\mathbf{p}_\mu = \left\{ \mathbf{p}, \frac{\epsilon}{c} \right\}$,其中 $\mu = 1, 2, 3, 0$; $\mathbf{p}^\mu = \eta^{\mu\nu} \mathbf{p}_\nu$; $\text{diag} \eta^{\mu\nu} = \{1, 1, 1, -1\}$ 。所以 $\mathbf{p}_\mu \mathbf{p}^\mu = \mathbf{p}^2 - \frac{\epsilon^2}{c^2} = -m_0^2 c^2$ 是一个不依赖于观察者所在的惯性参考系的不变量。对于真空中的光子, $m_0 = 0, v = c$, 则 $\mathbf{p}_\mu \mathbf{p}^\mu = \mathbf{p}^2 - \frac{\epsilon^2}{c^2} = -m_0^2 c^2 = 0, \epsilon = cp$ 也是不依赖于观察者所在的惯性参考系的不变量。光子的能量 $\epsilon = \hbar\omega$, 动量 $\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$, $\mathbf{k}$ 称为光波的波矢量, $|\mathbf{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ 为光波的波长, 且满足 $\frac{\lambda\omega}{2\pi} = \lambda\nu = c, \nu$ 为光的频率。利用四维波矢量 $\mathbf{k}_\mu = \left\{ \mathbf{k}, \frac{\omega}{c} \right\}$, 则 $\mathbf{p}_\mu = \mathbf{k}_\mu \hbar$ 。这时, $\mathbf{p}_\mu \mathbf{p}^\mu = -m_0^2 c^2 = \mathbf{k}_\mu \mathbf{k}^\mu \hbar^2 = 0, \mathbf{k} = \frac{\omega}{c}$ 。

基于现在认识到的量子现象,现在的量子力学理论不能预言各个物理量观测值的精确值,只能预言各个物理量观测值出现的概率。实验说明,概率概念本身,量子概率的概念与经典概率的概念有着不完全相同的含义;计算概率的方法和概率的合成法则也不相同。经典概率由概率描写。量子概率由概率幅描写,量子概率等于概率幅的模方,概率幅中包含相位因子。在态叠加时,叠加态的概率幅由于相对相位而有相干效应。在相干效应不存在的特殊情况下,经典概率与量子概率相同。在量子力学中,波包是不稳定的。

从一个波源发出、偏振方向为 y 方向而沿 r 方向传播的平面波,

$$y = A \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} + \varphi \right) = \text{Re} [A \exp(i \mathbf{k}_\mu x^\mu)] = \text{Re} [f(x) e^{-i\omega t}]$$

其中: $f(x) = A \exp\left(-i\omega \frac{r}{c}\right)$, $\mathbf{k}_\mu = \left\{\mathbf{k}, \frac{\omega}{c}\right\}$; $x^\mu = \{\mathbf{r}, -ct\}$ 。借助于复变量, 上式可写为

$$\psi = A \exp(i\mathbf{k}_\mu x^\mu)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^\mu \partial x_\mu} = -\mathbf{k}^\mu \mathbf{k}_\mu \psi = -\left(\mathbf{k}^2 - \frac{\omega^2}{c^2}\right) \psi = 0 \quad \left(\text{因为 } \mathbf{k} = \frac{\omega}{c}\right)$$

因此, $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^\mu \partial x_\mu} = \square \psi = 0$, 这就是光所满足的波动方程, 其中 $\square \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^\mu \partial x_\mu}$, 称为达朗贝尔算子。

光波的强度与振幅 A 的平方成正比。光在真空中的传播速度为 c , 是一个常数。真空中的光速是一切物质运动的最大速度, 是不依赖于光源和观察者的运动的常数, 它既是相位传播的速度(相速), 也是能量传播的速度(群速)。非真空的介质中, 情况有所不同。

1.1.2 光的干涉

对于满足一定条件的两束光, 在它们相交的区域, 各点的光强与各光束单独作用的光强之和可能是极不相同的, 这种现象称为光的干涉。干涉是光的波动性的表现。

如图 1.1 所示, 在空间某一点 p 接收到从两个狭窄光源 s_1 和 s_2 发出、具有相同的圆频率 ω 、振动方向同为 y (例如垂直纸面), 分别沿 $\mathbf{r}_1$ 和 $\mathbf{r}_2$ 方向传播的平面波,

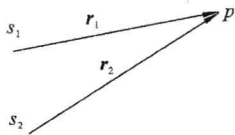


图 1.1

$$y_1 = A_1 \cos\omega\left(t - \frac{r_1}{c}\right) = \text{Re}[A_1 \exp(i\mathbf{k}_1 x^{\mu 1})]$$

$$y_2 = A_2 \cos\omega\left(t - \frac{r_2}{c}\right) = \text{Re}[A_2 \exp(i\mathbf{k}_2 x^{\mu 2})]$$

在 p 点的合振动为

$$\begin{aligned} y &= y_1 + y_2 = A_1 \cos\omega\left(t - \frac{r_1}{c} + \varphi_1\right) + A_2 \cos\omega\left(t - \frac{r_2}{c} + \varphi_2\right) \\ &= A \cos(\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

按三角函数公式 $\cos(a+b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b$ 展开并对比, 即得

$$\tan \varphi = \frac{A_1 \sin \alpha_1 + A_2 \sin \alpha_2}{A_1 \cos \alpha_1 + A_2 \cos \alpha_2}, \quad \alpha_1 = -\frac{r_1}{c} + \varphi_1, \quad \alpha_2 = -\frac{r_2}{c} + \varphi_2$$

$$A^2 = (A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 \cos \delta), \quad \delta = \varphi_2 - \varphi_1 - \frac{2\pi(r_2 - r_1)}{\lambda}$$

当 $\delta = \pm 2\pi n, n = 0, 1, 2, 3, \dots, A = A_1 + A_2$, 将出现相长干涉;

当 $\delta = \pm 2\pi\left(n + \frac{1}{2}\right), n = 0, 1, 2, 3, \dots, A = |A_1 - A_2|$, 将出现相消

干涉。

若 $A_1 = A_2$, 合成后的光强 $I = A^2 = 2I_1 + 2 I_1 \cos \delta = 4 I_1 \cos^2 \frac{\delta}{2}$

($I_1 = A_1^2$), 最大为 $4 I_1$, 最小为 0。

以上处理光的干涉时含了如下条件: 它们来自不同的光束, 具有相同的圆频率, 它们在接收地 p 点有相同的振动方向而且有固定的位相差; 在求合成时是对各自的振动求和。当然, 为了使干涉条纹达到一定的可见度, δ 不能太大, 还必须满足空间相干性(狭窄波源) 和时间相干性(单色性)。

设想一束单色光(具有相同的圆频率), 通过一个小孔(狭窄波源), 被分光器分为两束, 再汇聚于空间一点, 将出现相干现象。再设想, 使光束的强度变得越来越弱, 使到达分光器的是一个一个的单光子, 也将出现相干现象。这就是单光子相干实验(见第 4 章)。

对于不同频率的两束光之间的干涉, 可能形成拍。拍的频率为这两束光的频率之差。形成拍的时间相干性要求两个带宽都比拍频小很多。这里不作进一步讨论。

光的干涉的关键是, 振动的合成和相位差。

1.1.3 光的衍射

光的衍射是指光能绕过障碍物进行传播的性质。这种性质不能由光的直线传播定律所解释。衍射是光的波动性的表现。

首先考虑一束平行光(波长为 λ) 通过宽度为 $a(a \sim \lambda)$ 的单狭缝 BB' 后会聚于屏上所产生的单狭缝衍射, 如图 1.2 所示。

1690 年, 惠更斯提出“次波”的假设来阐述波的传播现象, 称作惠更

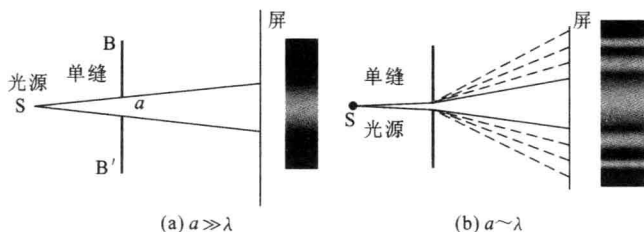


图 1.2

斯原理。认为波前上的每一点都可以看作是发出球面次波的新的波源,这些次波的包络面就是下一时刻的波前,如图 1.3 所示。我们现在知道,光波是电磁波,是电磁振荡的传播,因此“次波”假设在 300 多年后的现在看来是合理的。

于是,平面波的下一时刻的波前还是平面波。对于平面波通过单狭缝的情况,可以认为,光波在单狭缝处是一个平面波的波振面,而且具有相同的初位相。然后,单狭缝处的一个局部平面波上面的每一点都可以看作是发出球面次波的新的波源。

1818 年,菲涅耳根据惠更斯次波假设,补充了次波位相和振幅的定量描述,并增加了“次波相干叠加”的思想。他认为从同一波面上各点发出的子波,在传播到空间某一点时,各个子波之间也可以相互叠加而产生干涉现象,如图 1.4 所示。这就是惠更斯-菲涅耳原理。按现在的电磁波理论看,这也是合理的。可以作为我们现在讨论的基础。

于是,单狭缝处的一个局部平面波上面的每一点发出球面次波在屏幕上任一点的相干叠加,就是屏上该点的振动。而被单狭缝其他部分挡住的光就不能到达屏上。

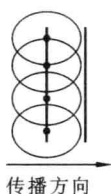


图 1.3

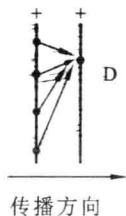


图 1.4

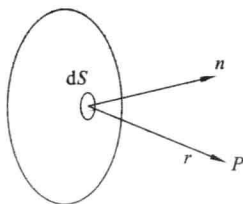


图 1.5

如图 1.5 所示,面积元 dS 上各点所发出的各次波的振幅和位相符合