

 **CRC Press**
Taylor & Francis Group

量子光学导论

——单光子和双光子物理

An Introduction to Quantum Optics
Photon and Biphoton Physics

史砚华 著 徐平 译 谢渊泓 校

教育出版社

 CRC Press
Taylor & Francis Group

量子光学导论

——单光子和双光子物理

Liangzi Guangxue Daolun
Danguangzi he Shuangguangzi Wuli

史砚华 著 徐平 译 谢渊泓 校

高等教育出版社·北京

图字: 01-2015-6801 号

An Introduction to Quantum Optics: Photon and Biphoton Physics/by Yanhua Shih

© 2011 by Taylor and Francis Group, LLC.
All Rights Reserved.

Authorized translation from the English language edition published by CRC Press, an imprint of Taylor & Francis Group LLC.

Higher Education Press Limited Company is authorized to publish and distribute exclusively the **Chinese (simplified characters)** language edition. This edition is authorized for sale throughout **Mainland China**. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由高等教育出版社有限公司独家出版并仅限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

图书在版编目 (C I P) 数据

量子光学导论: 单光子和双光子物理 / (美) 史砚华著; 徐平译. -- 北京: 高等教育出版社, 2016. 3

书名原文: An Introduction to Quantum Optics:

Photon and Biphoton Physics

ISBN 978-7-04-044763-7

I. ①量… II. ①史… ②徐… III. ①量子光学
IV. ①O431.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 018870 号

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	北京中科印刷有限公司		http://www.hepmall.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	24.75	版 次	2016 年 3 月第 1 版
字 数	450 千字	印 次	2016 年 3 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	69.00 元
咨询电话	400-810-0598		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 44763-00

献给我的家人

前 言

本书是我在马里兰大学为我的博士生讲授量子光学课程时，授课笔记的一份选稿。我的学生和同事鼓励我把这份授课笔记付梓出版，使之成为一份教材或参考书，它或许能在一个相对基础的介绍性层面上对理解光的量子理论有所帮助。

光子或光量子概念的成功确立，催生了一门崭新的基础物理学科，即量子理论。今天，量子理论已经衍生为现代物理学中主体性原理。据惠勒 (John Archibald Wheeler): “在物理科学中，将很难找到某一个学科，它的基础或它的应用没有受到量子理论的影响。” 在经历了整整一个世纪的思索之后，我们对光子到底都知道了些什么呢？光子是一种波：它无质量，在宇宙中极速穿行，它和自身进行干涉。光子是一种粒子：它的动量与能量具有精准定义，它甚至像个粒子般“自旋”。光子既不是波也不是粒子，因为不管我们怎么去想它，我们都会被羁绊于其两种行为的矛盾之中。光子是一种似波的粒子，同时/或者是一种似粒子的波：一个光子永远不可能被分割成几部分，而单光子的干涉现象在现代光学实验室中却很容易看到。这种干涉现象似乎意味着，在发生干涉时，一个光子在穿越干涉仪时同时经历了两条路径。然而，如果干涉仪中两条路径被设置成“可区分的”，光子就会“知道”它该走哪条路，而不是同时经历两条路。显然，光子在面对干涉仪时需要做出一个选择：像波一样选择“两条路”，或像粒子一样只走“某一条路”。令人惊讶的是，似乎光子在进入干涉仪之前不需要做此选择。实验证实，选“某一条路”，及/或选“两条路”可以推迟到光子通过干涉仪之后。更令人惊讶的是，在光子自身湮没后，某一条路径的信息甚至可以被“擦掉” (Scully 的“量子擦除”)。人们对光子的行为试图从不同的理论角度甚至不同的哲学思想去理解、去解释、去辩论，并且设计了不少“假想实验”去辨别它们的正确性。受益于新技术的发展，现在许多历史上的“假想实验”可以得到直接的实证检验了。所有这些“假想实验”中，最具代表意义的恐怕非爱因斯坦-波多尔斯基-罗

森假想实验 (EPR *Gedankenexperiment*, 德文) 莫属。在过去的近二十年里, 我们至少实验性地证实了偶光子 (biphoton) 态^①的存在。偶光子, 或概念更宽泛一些, 偶粒子 (biparticle) 的行为曾被爱因斯坦-波多尔斯基-罗森 (EPR) 在 1935 年准确预测。在一个偶粒子对中, 虽然其中任意一个子系统的动量和坐标都不确定, 然而, 如果一个子系统的动量值及/或坐标值被测定, 则另一对应子系统的动量值及/或坐标值即可百分之百被确定, 尽管二者之间的距离可以如此之大, 以至于在对两个子系统进行测量的时间间隔内绝对无法得到对方的信息。本书用大量篇幅对与 EPR 实验有关的概念, 特别是对偶粒子和偶光子态作了介绍和探讨。除了分析爱因斯坦对量子力学某些基本问题的考虑, 例如, 对量子力学中“物理实在”概念, 对“因果关系”, 和对“非局域性”行为的质疑, 本书更着眼于探讨这些有趣又似乎不可理解的现象的物理本源。尤其令人振奋的是近十年来对“经典”混沌热光多光子关联的实验研究, 观测到类似于 EPR 偶光子纠缠态的非局域性干涉现象: 两个从热光光源随机产生、随机配对的光子和自己干涉, 产生了非局域的点点对应的对应关系, 此非局域性点对点的对应关系已被成功地应用于随机热光的“鬼”成像。使我们更加惊讶的是, “鬼”像不但有趣而且有用。不同于经典成像, 它至少有以下三个特点, (1) 它的“非局域”性使得“鬼”像相机能够“看”到经典相机“看”不到的目标; (2) “鬼”像具有抗干扰能力; (3) 它的空间分辨率主要由光源的张角大小决定。举例: 太阳对地球张角大约为半度, 用太阳为光源, “鬼”像相机拍摄得到任何地球上的物体, 其空间分辨率可以达到 200 μm , 而无论此物与相机相距多远。尽管人们对于“鬼”成像的物理机制仍然争论不休, “鬼”像相机进入人类的应用只有一步之遥。

无论深入考虑几近“佯谬”的基础理论问题, 还是试图理解“不可思议”的应用特点, 我们不得不承认, 一个光子, 或一个偶光子对的行为, 显然与我们日常生活中的任何基本标准—实在性、因果性以及局域性格格不入。然而, 从量子理论的观点来看, 所有这些惊讶之处都是可预见的和可解释的。光量子的非经典行为, 是量子干涉的结果, 其中涉及单光子或多光子振幅的线性叠加。单光子或多光子振幅属于非经典概念。如果有两个或多个可能性 (概率) 激发同一个光电探测事件或同一个联合光电探测事件, 对应于每一个可能性 (概率), 量子光学理论用一个量子振幅 (概率振幅) 作为数学表达。而量子振幅的线性叠加是量子世界中一普遍现象。无论对“量子光场”或“经典光场”进行探测, 量子振幅的叠加都

^① 偶光子和偶粒子的定义请参照第六章。偶光子和偶粒子特指处于纠缠态的双光子和双粒子。

会发生,要么有单光子振幅叠加,要么有多光子振幅叠加。虽然对光子的基本概念我们仍然存在着诸多的疑问,光量子理论恐怕已经对量子力学本身产生了最深远的影响。

经典理论从宏观统计的角度出发,认为两个或多个光电探测器的联合探测反映了光强和光强涨落的统计关联,并断言:光的任何二阶或高阶非平庸关联现象皆源于其强度涨落的相关性。当然,经典理论对多光子纠缠态束手无策,但是似乎对“经典热光”的处理游刃有余。人们也把太多的精力放在了“经典反对量子”之类的争论之上。从唯象理论的角度去看,经典理论是成功的。随机热光的非平庸相干现象的确是从光强涨落中测量到的。然而,随机热光的非平庸相干现象是否源于光强涨落的统计关联?答案是否定的。本书介绍并分析了由以上理论推导出的一个著名不等式。此不等式排除了在随机热光中观察到“反关联”的可能性。不幸的是,前不久,一个违反此不等式的“反关联”现象为实验所证实。结论是不言而喻的:从量子理论的观点来看,无论是对纠缠态还是对随机热光态的两个或多个光电探测器的联合探测,都是由两个或多个光子产生一个联合光电探测事件的所有可能的概率振幅叠加的结果。本书采用统一的量子理论诠释了多光子纠缠态和随机热光态的非平庸高阶关联现象。量子理论从微观角度提供了一个多光子干涉的物理模型。此模型既保持了混沌热光产生过程的随机性以及子场在传播过程中的独立性和随机性,又揭示了混沌热光光强涨落统计相关的物理原因。人们似乎对于区分纠缠态多光子干涉与经典统计理论中的光强涨落关联没有太多意见,然而,在理解“经典”热光中的非局域性、多光子干涉图像,却存在相当多的抵触,哪怕我们的测量是在单光子级别进行。本书为量子干涉理论提供了多个实验证据及理论分析。我希望此种努力能帮助读者看到一个光的基本量子干涉图景,它或许反映出隐藏于所有光学观察之后的物理真相。

本书的目的,在于向学生和科学工作者们用一种简单且直接的方式介绍量子光学,连带其基础理论及概念,以及在量子光学领域那些激动人心的事件。与本科目大部分传统课本不同的是,它更侧重于实验部分的介绍和分析。本书引入的所有基本概念均来自于对典型实验观测的分析。在分析过程中,揭示出经典光学和量子光学的基本方法。此类尝试,其目的(1)帮助学生及年轻的科学工作者们提高其总结、概括及分析、解决量子光学问题的能力,(2)激励学生及年轻的科学工作者们,在寻求真理时进一步开阔思路,并提高其在物理学领域发展创新的能力。为此,本书试图在量子光学领域里对某些特定的历史的及现代的实验发现提

供非传统性分析。读者或许会发现本书与其它传统书籍有着下列的不同: (1) 本书甚至在讲述经典光学时引进原子跃迁的概念。在介绍经典光学的最初阶段, 原子跃迁被处理为经典光场的子光源或子辐射。尽管没有量子化, 这个尝试为进一步引入光子概念及光量子理论提供了基本物理图像及背景。(2) 本书试图将大量的子辐射间的干涉现象与经典光强和光强涨落的统计关联联系起来, 并区分开来。在光学测量中普遍存在着光强涨落现象。光强涨落的物理原因是什么? 本书给出了一个非经典但或许是更有道理的答案。(3) 本书试图把对多光子纠缠态和对多光子随机热光态的测量用一个统一的理论加以诠释。

为将量子光学的基本概念、工具以及令人振奋的进展介绍给读者, 本书始于麦克斯韦 (Maxwell) 方程, 它对光的相干性提供了一个没有量子化的总的概观。然而, 所有概念和工具均是在对大量子辐射间的叠加的分析过程中被介绍引出, 而每一个子辐射产生于一个原子跃迁。心中建立了这幅图像之后, 我们自然而然地在以下几个章节引入光场量子化的理论和概念, 以及整个量子光学学科的理论。在接下来的章节中, 我们也对经典光学相干和量子光学相干间的相似与不同做了详细的分析与讨论。最后的五章介绍了五个不同类型的量子光学及量子信息的近期研究。作为对量子干涉理论的总结, 最后的章节给出贝尔定理及贝尔不等式的详细分析, 可以看作一个更高层次的总结。我希望不光是给读者介绍量子光学的基本概念、理论以及令人振奋的进展, 而且给予读者以能力, 能够使用从本书学到的概念与工具, 投入到这些有趣而且有用的研究中去。我希望本书能给学生、青年科学工作人员、及所有读者带来帮助。简言之, 由他们来努力去理解、发展以及引领这门正在发生巨大变化的古老的光学学科领域。

本书可能存在这样或那样的问题和错误, 恳请读者提出宝贵意见。

作者借此中文译本对英文第一版原文做了一些修改, 增加了一些新的实验内容和理论探讨, 并改正了一些印刷错误。特此说明。

致 谢

我首先要感谢我的可尊敬的老师和多年合作的同事, Carroll O. Alley, David N. Klyshko, Morton H. Rubin, 及 John A. Wheeler。他们不仅授我以物理学的精彩知识, 而且传我以一个物理学家具有的风骨: 寻求真理, 且只寻求真理。我的感谢还要给予我的学生们, 博士研究生们, 以及合作者们, 为了他们那些令人印象至深的实验性及理论性的研究工作, 这些工作极大地支持了本书的写作。同时, 我也要对他们道歉, 因为版面及时间的限制, 未能将他们的研究发现一一列举出来。这里只选择列出了直接对本书内容及讨论观点有支持的实验和理论。我还想向所有量子光学领域里的其他研究者, 为我没有引证他们的工作, 致歉。最后, 我要感谢徐平教授, 她为翻译本书, 付出了非常辛勤的劳动; 感谢谢渊泓博士的精准校订。他们的工作, 使本书有机会与中文读者见面。

作者简介

史砚华 (Yanhua Shih), 物理学教授, 1987 年从马里兰大学 (University of Maryland, College Park) 物理系获得博士学位。1989 年秋在马里兰大学巴尔的摩 (UMBC) 成立量子光学实验室。他的研究组致力于量子理论基础研究, 是量子光学领域领先的课题组之一。他在多光子纠缠、多光子干涉以及量子成像方面卓著的研究成果受到物理学界以及工程界的高度赞赏, 引起了极大关注。2002 年他获得了量子光学兰姆 (Lamb) 奖。

目 录

前言

致谢

作者简介

第 1 章 光的电磁波理论和测量	1
1.1 光的电磁波理论	1
1.2 经典叠加原理	3
1.3 光的测量	8
1.4 光强: 期望值和涨落	11
1.5 光强的测量: 系综平均和时间平均	13
本章小结	19
推荐读物	19
第 2 章 光的相干性—辐射场的态	20
2.1 光的相干性	20
2.2 时间相干性	26
2.3 空间相干	28
本章小结	32
推荐读物	32
第 3 章 光的衍射和传播	33
3.1 光的衍射	33
3.2 光场的传播	36
本章小结	41

推荐读物	41
第 4 章 光学成像	42
4.1 经典成像系统	44
4.2 透镜的傅里叶变换	47
本章小结	48
推荐读物	49
第 5 章 光的一阶相干性	50
5.1 一阶时间相干性	53
5.1.1 $\Gamma(\mathbf{r}_1, t_1; \mathbf{r}_2, t_2)$: 混沌热光	53
5.1.2 $\Gamma(\mathbf{r}_1, t_1; \mathbf{r}_2, t_2)$: 大量的完全重叠及部分重叠的波包	56
5.1.3 $\Gamma(\mathbf{r}_1, t_1; \mathbf{r}_2, t_2)$: 一个波包	58
5.1.4 $\Gamma(\mathbf{r}_1, t_1; \mathbf{r}_2, t_2)$: 两个波包	61
5.1.5 $\Gamma(\mathbf{r}_1, t_1; \mathbf{r}_2, t_2)$: CW 激光辐射	63
5.2 一阶空间相干性	64
本章小结	67
推荐读物	68
第 6 章 光的二阶相干性	69
6.1 相干光的二阶相干性	71
6.2 混沌热辐射二阶关联和 HBT 干涉仪	73
6.2.1 HBT 干涉仪 I: 二阶时间相干性	77
6.2.2 HBT 干涉仪 II: 二阶空间相干性	80
6.3 热光的近场二阶空间相干性	82
6.4 HBT 现象的物理本质	86
6.5 HBT 关联及探测时间平均	93
6.6 光的 N 阶相干性	96
6.7 热光的 N 阶近场空间相干性	100
本章小结	102
附录 A	103
推荐读物	103
第 7 章 光的零拍及差拍测量	105
7.1 光学零拍及差拍测量	105
7.2 平衡零拍探测和差拍探测	107

7.3 独立或耦合热光场的平衡零拍探测	111
本章小结	114
推荐读物	114
第 8 章 光的量子理论——场的量子化和测量	115
8.1 实验基础 I: 黑体辐射	116
8.2 实验基础 II: 光电效应	120
8.3 光量子 and 场的量子化	123
8.4 辐射场的光子数态	132
8.5 辐射场的相干态	136
8.6 密度算符和密度矩阵	139
8.7 辐射场的复合系统及双光子态	143
8.8 非相干和相干辐射源的简单模型	145
8.9 纯态和混态	151
8.10 光子对的直积态、纠缠态和混态	160
8.11 含时微扰理论	167
8.12 光测量: 光子计数	168
8.13 光测量: 光子的联合探测	170
8.14 场的时-空传播	172
本章小结	175
推荐读物	176
第 9 章 光场相干性的量子理论	177
9.1 量子一阶相干性	180
9.2 光子和有效波函数	191
9.3 一阶相干 (关联) 的测量	193
9.4 独立辐射源之间的干涉	195
9.5 量子二阶相干度	198
9.6 双光子干涉与强度涨落的统计关联	211
9.7 热光的二阶空间关联	214
9.8 光子计数和 $G^{(2)}$ 的测量	218
9.9 量子 N 阶相干性	221
本章小结	222
推荐读物	224

第 10 章 量子纠缠	225
10.1 EPR 实验和 EPR 态	226
10.2 直积态、纠缠态和经典关联态	232
10.3 自旋纠缠态	234
10.4 纠缠偶光子态	234
10.5 纠缠偶光子系统的 EPR 关联	239
10.6 纠缠偶光子态中的子系统	246
10.7 色散介质中的偶光子	249
本章小结	252
推荐读物	252
第 11 章 量子成像	254
11.1 偶光子成像	254
11.2 鬼成像	260
11.3 鬼成像和测不准关系	268
11.4 热光鬼成像	274
11.5 鬼成像的经典模拟	280
11.6 抗扰动的鬼成像	285
本章小结	287
推荐读物	288
第 12 章 双光子干涉 I: 偶光子干涉	290
12.1 偶光子干涉是两个光子的干涉吗?	292
12.2 正交偏振的偶光子干涉	301
12.3 Franson 干涉仪	304
12.4 偶光子鬼干涉	307
12.5 延迟选择的量子擦除实验	312
本章小结	318
推荐读物	319
第 13 章 双光子干涉 II: 混沌热光	321
13.1 双光子杨氏干涉	321
13.2 非相干混沌热光的双光子反关联	329
13.3 非相干正交偏振混沌热光的双光子干涉	339
本章小结	347
推荐读物	348

第 14 章 贝尔理论和贝尔不等式测量	349
14.1 隐变量理论和自旋 $1/2$ Bohm 态测量的量子理论	353
14.2 贝尔理论和贝尔不等式	356
14.3 Bell 态	361
14.4 Bell 态制备	364
本章小结	370
推荐读物	371
译后记	373

第 1 章

光的电磁波理论和测量

1.1 光的电磁波理论

相干性是光场的基本特性,在阐述光场的相干特性之前我们先介绍麦克斯韦方程组——光的经典电磁波理论的基石.麦克斯韦方程组由四个方程组成,它奠定了一切经典的电磁现象和电磁波动现象的理论基础.在自由空间,麦克斯韦方程组有如下形式:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.1.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.1.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (1.1.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.1.4)$$

其中 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 都是矢量,分别表示电场和磁场, \mathbf{D} 和 \mathbf{B} 分别是电位移矢量和磁感应矢量.它们和电场、磁场有如下关系:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (1.1.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$$

其中 ϵ_0 和 μ_0 分别是自由空间的介电常量和磁导率.

对 (1.1.1) 式取旋度,并利用 (1.1.2)、(1.1.3) 和 (1.1.5) 式,根据矢量叉乘恒等式

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} \quad (1.1.6)$$

得到电场矢量 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ 应满足如下波动方程

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1.7)$$

类似的我们可以得到磁场矢量 $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$, 或者磁感应矢量 $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ 也满足同样的波动方程

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1.8)$$

其中 $c \equiv 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ 是光在自由空间的速度.

(1.1.7) 式和 (1.1.8) 式都是基本的波动方程 (对变量 v):

$$\nabla^2 v - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1.9)$$

现在, 假设 $v(\mathbf{r}, t)$ 的傅里叶积分形式如下

$$v(\mathbf{r}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega v(\mathbf{r}, \omega) e^{-i\omega t} \quad (1.1.10)$$

它的反变换为

$$v(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dt v(\mathbf{r}, t) e^{i\omega t} \quad (1.1.11)$$

将 (1.1.10) 式代入 (1.1.9) 式, 我们很容易发现傅里叶变换 $v(\mathbf{r}, \omega)$ 也满足亥姆霍兹波动方程

$$\nabla^2 v(\mathbf{r}, \omega) + k^2 v(\mathbf{r}, \omega) = 0 \quad (1.1.12)$$

其中 $k = \omega/c$ 是波数. 根据边界条件, 波数可以取分立值或者连续值. (1.1.13) 式有大家所熟知的平面波解,

$$v_k(\mathbf{r}) = v_k e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} \quad (1.1.13)$$

所以,

$$v_k(\mathbf{r}, t) = v_k e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} + \text{c.c.} \quad (1.1.14)$$

v_k 代表模式 \mathbf{k} 的复振幅, c.c. 表示其复共轭. 后面为了数学上的简化, 我们将略去 c.c., 除非特别说明.

根据微分方程的线性特性, 平面波的任意线性叠加仍然是 (1.1.9) 式的解. 所以对于波函数 $v(\mathbf{r})$, 原则上我们可以找到一组由 $v_k(\mathbf{r}, t)$ 叠加而成的解. 这就是“经典的叠加原理”.

根据惯例, 物理场强是复数解的实部, 我们可以将平面波形式的电场和磁场写成

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E} e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \quad (1.1.15)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H} e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})},$$

其中 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 是不随时间和空间变化的矢量, 通常称为场强.