

一种全光纤型观测光波粒二象性的方法^{*}

马海强^{1)†} 李林霞¹⁾ 王素梅²⁾ 吴张斌¹⁾ 焦荣珍¹⁾

1) (北京邮电大学理学院, 北京 100876)

2) (北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京 100081)

(2008 年 12 月 7 日收到 2009 年 4 月 2 日收到修改稿)

提出一种结构简单、实验现象明显的光波粒二象性观测方案, 本方案以波的相干叠加突出显示光的波动性, 以粒子在 50/50 分束器的路径随机选择特性突出显示光的粒子性. 以衰减强激光脉冲为光子源, 在实验室获得的干涉对比度超过 99%, 单粒子特性超过 90%. 实验结果表明此方案有望在实际得到广泛应用.

关键词: 单光子源, Sagnac 干涉仪, 波粒二象性, 符合测量

PACC: 0365, 4230, 4250

1. 引言

人们对光本性的思考大约是从 17 世纪开始的, 当时有两个矛盾尖锐的学说并存. 其中之一是以牛顿为代表的一些人提出了光的微粒本质, 认为光是按照惯性定律沿直线飞行的微粒流; 而以惠更斯为首的另一部分人提出了光的波动本质, 认为光是在一种特殊弹性介质中传播的机械波. 经过两个世纪左右的探讨后, 在 19 世纪 60 年代对光的本质有了突破性的认识. 麦克斯韦在前人的基础上, 建立了光的电磁理论, 大量的无可辩驳的事实也证明了光是一种电磁波. 对光本性的认识算是有了一个阶段性的定论. 时至 1905 年, 爱因斯坦发展了光的量子理论并且成功地解释了光电效应. 至此, 光的本性又引起了人们的重新思考, 粒子性、波动性的争论又摆在了科学家面前. 近现代众多的实验对这个问题的回答是: 对于光的本性, 只能根据它所表现出来的性质和规律来判定. 光在某些方面的行为像经典的波动, 某些方面的行为像经典的粒子, 因此光的本性就概括为: 波粒二象性. 与人认识自然界其他事物的本质相似, 对光的本性认识也需要一个测量装置. 在现有的实验设备中, 单光子源的研究已日趋成熟, 并且有各种各样的制备方法, 但是对光本性认识的实验测

量方面研究的较少. 虽然目前已有对波粒二象性的实验测量装置, 但它们结构较复杂^[1-4], 实现起来较繁琐.

本文提出一种观测光波粒二象性的实验方案, 实现对光波粒二象性的验证和观察. 其物理基础是: 观察光的粒子性时, 利用光子经 50:50 X 型光分路/合路器时的路径随机选择特性, 突出显示经典粒子运动轨道、轨迹的特征; 观察光的波动性时, 利用了 Sagnac 干涉仪^[5], 光在 50:50 X 型光分路/合路器再次相遇时的叠加特性, 突出显示经典波的干涉特征. 该方案的实现由单光子源^[6-9]、光环型器、X 型光分路/合路器依次连接构成, 另外再配以两个单光子探测计数器, 具有结构简单、易于构建、抗干扰性强、结果直观易于观察等特点.

2. 观测方案原理图

观测方案光路部分的原理如图 1 所示.

全光纤型光波粒二象性测量装置包括依次连接的单光子源 S , 光环型器 C , X 型光分路/合路器. 其中 S 的输出端连接 C 的同向输入端 C_a , 光环型器 C 的同向输出端 C_b 连接 X 型光分路/合路器的尾纤端口 X_a , 光环型器 C 的反向输出端 C_c , X 型光分路/合路器的尾纤端口 X_b 连接单光子探测计数器, X 型光

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10805006), 中国博士后科学基金(批准号: 20080440307)和北京市教委共建项目(批准号: XK100130837)资助的课题.

[†] E-mail: hqma@bupt.edu.cn

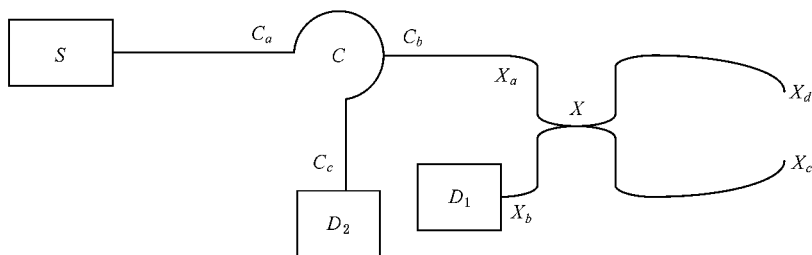


图1 全光纤型光波粒二象性测量原理图(S 为单光子源; C 为光环型器; C_a, C_b, C_c 分别为光环型器的同向输入端、同向输出端、反向输出端; X 为 50/50X 型光分路/合路器; X_a, X_b, X_c, X_d 分别为 X 型光分路/合路器的尾纤端口; D_2, D_1 为单光子探测器)

分路/合路器的尾纤端口 X_c, X_d 可接入单光子探测器 D_2, D_1 , 也可两者直接相连接。

单光子脉冲经 X_a 端口耦合进 X 后, 分下面两种情况进行讨论。

一种情况是使 X 型光分路/合路器的尾纤端口 X_c, X_d 直接连接, 如此就构成了一个 Sagnac 干涉仪, 可以观察波的干涉特征, 这种干涉仪为环状结构, 它可以保证顺时针方向和逆时针方向两路传播光的零光程差。因环形对称的缘故, 对于来自外界的物理因素的影响, 顺时针和逆时针的光均受到相同的相位改变, 而在 X_c, X_d 端口的干涉结果仅取决于两个方向传播光的相位差, 因此该干涉仪自动的补偿了来自光程、外界引起的相位差, 保证了其稳定性, 具有抗干扰性强的特征, 同时也保证了 D_2, D_1 的稳定计数。

另一种情况是使 X 型光分路/合路器的尾纤端口 X_c, X_d 分别接单光子探测器 D_2, D_1 , 由 X_a 端口耦合进来的单光子等概率的选择 X_c 或者 X_d 输出, 产生的结果是 D_2, D_1 的探测结果是互补的, 即或 D_2 有计数, 或 D_1 有计数, 两者不能同时有计数, 这样就可以说明光的单光子特性。经过一段相同时间的累积, 两者的计数量应是相同的, 进而说明单光子在 50/50X 型光分路/合路器随机选择特性。

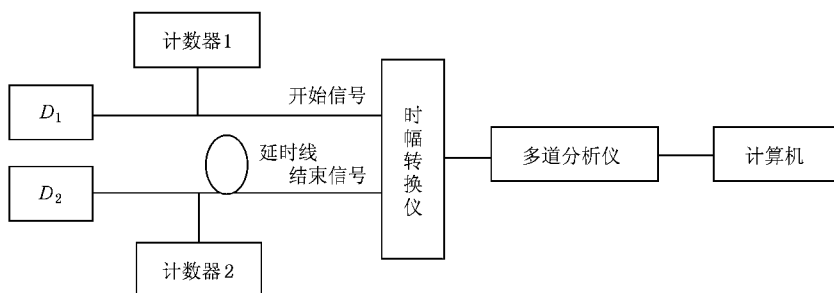


图2 数据采集和分析

3. 实验结果和讨论

3.1. 单光子源和数据采集装置

本方案使用的单光子源采用高度衰减激光脉冲式的近似单光子源, 激光脉冲中的光子数分布属于泊松分布

$$P_m = \frac{\mu^m}{m!} e^{-\mu}, \quad (1)$$

上式表示光脉冲中含 m 个光子的概率, 其中 μ 表示每个脉冲中的平均光子数。当 $\mu \ll 1$ 时, 含有两个光子或两个以上光子(简称为多光子)的脉冲出现的概率 $P_{m>1}$ 占含有光子脉冲的概率为

$$\begin{aligned} \frac{P_{m>1}}{1 - P_0} &= \frac{1 - P_0 - P_1}{1 - P_0} \\ &= \frac{1 - e^{-\mu}(1 + \mu)}{1 - e^{-\mu}} \approx \frac{\mu}{2}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 P_0, P_1 分别为没有光子的脉冲及含有一个光子的脉冲。对于平均光子数为 $\mu = 0.1$ 的光脉冲串来说, 多光子脉冲在全部含有光子的脉冲中出现的概率约为 5%, 人们常把符合这种条件的光源称为单光子源。

实验装置中的数据采集和分析部分如图 2 所示。

实验中使用的单光子源为衰减激光光脉冲,激光器为(Advanced Laser Diode Systems PIL131DFB-SM),其中心波长为 1310 nm,线宽为 0.1 nm,光脉冲宽度约为 20 ps,重复频率 1 MHz,平均功率约为 980 nW,1310 nm 单光子的能量是 1.5×10^{-19} J,经衰减约 81.8 dB,达到平均每脉冲光子数 $\mu = 0.1$.

3.2. 光的波动性实验结果和数据分析

若将单光子探测计数器 D_2, D_1 分别连接到光环型器 C 的反向输出端 C_c , X 型光分路/合路器的尾纤端口 X_b ,同时将 X 型光分路/合路器的尾纤端口 X_c, X_d 直接连接而构成环型光路,这个环型光路就是 Sagnac 干涉仪,干涉后的光子就会在 X 型光分路/合路器的尾纤端口 X_a, X_b 的某一个口出来.对于分光比为 50:50 的 X 型光分路/合路器,光子都会出现在尾纤端口 X_a .观察到的实验现象是计数器 D_2 的计数率约 10^4 s^{-1} ,而计数器 D_1 几乎没有计数量(每秒几十个以内,单光子探测器的暗计数),定义干涉对比度为两计数器的计数之差除以计数之和,得到干涉对比度超过 99%,对该现象只能作如下解释.

输入光,以琼斯矩阵^[10]表示为

$$\psi_{X_a} = \begin{bmatrix} E_x^0 \\ E_y^0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

经 X 型光分路/合路器(假设耦合器是偏振无关的,同时忽略损耗)分束后,尾纤端口 X_c, X_d 中的光表示为

$$\psi_{X_d} = \cos(Cl_c) \cdot \psi_{X_a}, \quad (4)$$

$$\psi_{X_c} = i \sin(Cl_c) \cdot \psi_{X_a}, \quad (5)$$

其中, C 是一个与光的波长有关的量, l_c 表示合路器的耦合长度, i 表示透射光和反射光之间有 $\pi/2$ 的相位差.

将 X 型光分路/合路器的尾纤端口 X_c, X_d 直接连接而构成环型光路的传输矩阵(顺时针方向)描述为(忽略光纤的损耗和双折射效应)

$$M = \begin{bmatrix} \cos \frac{\sigma}{2} + i \sin \frac{\sigma}{2} & 0 \\ 0 & \cos \frac{\sigma}{2} - i \sin \frac{\sigma}{2} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中 σ 表示光纤环引起的相位延迟.

当 ψ_{X_d}, ψ_{X_c} 绕行一周,再次到达 X 型光分路/合路器时,

$$\psi'_{X_d} = M \cdot \psi_{X_c}, \quad (7)$$

$$\psi'_{X_c} = M' \cdot \psi_{X_d}, \quad (8)$$

其中 M' 表示光纤环的逆时针方向传输矩阵.忽略光纤的双折射效应时,

$$M = M'. \quad (9)$$

因此, ψ_{X_d}, ψ_{X_c} 反向通过 X 型光分路/合路器后,

ψ_{X_a}, ψ_{X_b} 可描述为

$$\psi'_{X_a} = \cos(Cl_c) \cdot \psi'_{X_d} + i \sin(Cl_c) \cdot \psi'_{X_c}, \quad (10)$$

$$\psi'_{X_b} = \cos(Cl_c) \cdot \psi'_{X_c} + i \sin(Cl_c) \cdot \psi'_{X_d}. \quad (11)$$

从 X_a 端口输出的光强占输入光强的比例则为

$$R = \frac{\psi_{X_a}^+ \cdot \psi'_{X_a}}{\psi_{X_a}^+ \cdot \psi_{X_a}} = \sin^2(2Cl_c). \quad (12)$$

对于对于分光比为 50:50 的 X 型光分路/合路器,

$$Cl_c = \pi/4. \quad (13)$$

所以 $R = 1$,也即此时的干涉仪相当于一个全反镜.

3.3. 光的粒子性实验结果和数据分析

观测光的粒子性时,也就是检验单光子源的品质,即观察每个脉冲中含有的光子个数.将单光子探测器 D_1, D_2 的输出分别接入到时幅转换仪^[11](EG&G Ortec 公司 567 型,其作用是将时间差转化为相应的电压幅度)的开始信号(START)、结束信号(STOP)端口,并在接入结束信号端口的一路加入 $2.5 \mu\text{s}$ 的延时,时幅转换仪的分析时间范围设为 $5 \mu\text{s}$.时幅转换仪的输出接入到多道分析仪.时幅转换仪接收到开始信号后,立即处于工作状态,等待在分析范围内到来的结束信号,结束信号包括有效的光信号以及探测器的暗噪声信号.若在分析时间内没有结束信号的到来,就恢复原状态,等待开始信号的到来,且不输出任何信号.若在分析时间内有结束信号的到来,就输出幅度与开始信号至结束信号时间差成正比的一个直流电压信号.将此信号输入到多道分析仪(设定量程为 4096 道),不同幅度的电压信号显示在不同的道址上.经过一段时间的积累,就可在多道分析仪的界面上看到如图 3 所示的图形.

从图 3 上可以看出,除了本底的背景外,在大约 400 道、1200 道、2800 道、3600 道,出现了开始信号与结束信号的符合峰.本底是由于探测器的暗计数造成的,因为暗计数是随机出现的,所以组成了均匀的本底.各个峰值分别相应于在相对开始信号延时为

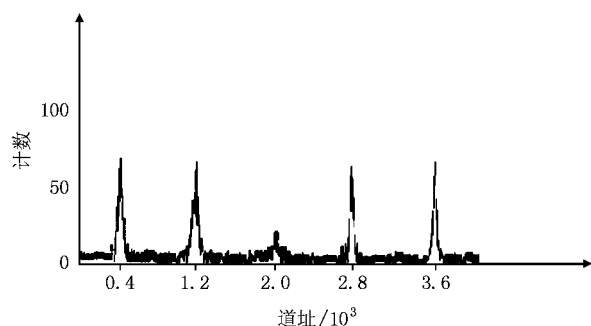


图3 单光子粒子性的测量结果图

$0.5\ \mu\text{s}$, $1.5\ \mu\text{s}$, $3.5\ \mu\text{s}$, $4.5\ \mu\text{s}$ 时的光子出现的概率比较大. 多道分析仪上每两个峰的时间间隔对应于脉冲激光相邻两个脉冲的间隔. 在大约 2000 道的道址上出现的符合峰很低, 也就是相对于 START 信号 $2.5\ \mu\text{s}$ 的时刻光子出现的概率比较小, 这是因为在接入结束信号端口的一路中加加了 $2.5\ \mu\text{s}$ 的延时, 这个时刻相当于是两个单光子探测器对同一个光脉冲中光子的响应, 因为是单光子源, 所以这个道址上的符合峰原理上应该是不存在的. 但是还可隐约的观察到峰, 原因是由衰减激光脉冲获得的单光子源, 其

光脉冲中多光子脉冲(含两个或两个以上光子)出现的概率约是 5%. 2000 道的道址上的计数量占有所有峰的总计数量的 8%, 也即多光子出现的概率约为 8%, 单光子脉冲出现的概率约为 92%.

4. 结 论

本文提出一种全光纤型光波粒二象性测量方案, 其中涉及的各光学器件都是尾纤输入、输出, 使得光路的连接、校准非常容易. 在观测光的波动性时, 所用的干涉仪是将 X 型光分路/合路器的同侧两根尾纤直接相连构成的 Sagnac 干涉仪, 因为相干涉的两个光脉冲走的路径完全相同, 能很容易的摒弃来自外界环境的干扰, 这样巧妙地利用了 Sagnac 干涉仪的易构建性和稳定性. 观察光的粒子性时和波动性唯一不同的是将单光子探测计数器接到不同的尾纤端口, 操作也非常简单. 该测量系统在观察测量波动性和粒子性的差异时, 因为两种情况下的实验现象差别很大, 仅是通过观测单光子探测计数器的示数就能够很容易的观察到光所表现出的不同性质.

- [1] Foster G T, Orozco L A, Castro-Beltran H M, Carmichael H J 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3149
- [2] Zhao K H, Luo W Y 2001 *New Concept Physics-Quantum Physics* (Beijing: Higher Education Press) p13 (in Chinese) [赵凯华、罗蔚茵 2001 新概念物理-量子物理 (北京: 高等教育出版社) 第 13 页]
- [3] Buks E, Schuster R, Heiblum M, Mahalu D, Umansky V 1998 *Nature* **391** 871
- [4] Dimitrova T L, Weis A 2008 *Am. J. Phys.* **76** 137
- [5] Marlan O, Scully M, Zubairy S 1997 *Quantum Optics* (Cambridge University Press) p101
- [6] Townsend P D, Rarity J G, Tapster P R 1993 *Electron. Lett.* **29**

634

- [7] Liao J, Liang C, Wei Y J, Wu L A, Pan S H, Yao D C 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 467 (in Chinese) [廖静、梁创、魏亚军、吴令安、潘少华、姚德成 2001 物理学报 **50** 467]
- [8] Wu E, Rabeau J R, Roger G, Treussart F, Zeng H, Grangier P, Praver S, Roch J F 2007 *New J. of Phys.* **9** 434
- [9] Ma H Q, Wang S M, Wu L A 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 717 (in Chinese) [马海强、王素梅、吴令安 2009 物理学报 **58** 717]
- [10] Birks T A, Morkel P 1988 *Appl. Opt.* **27** 3107
- [11] Hou Y X, Ma H Q, Wu L A 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 574 (in Chinese) [侯岩雪、马海强、吴令安 2005 物理学报 **54** 574]

An all-fiber method to measure the wave-particle duality of light^{*}

Ma Hai-Qiang^{1)†} Li Lin-Xia¹⁾ Wang Su-Mei²⁾ Wu Zhang-Bin¹⁾ Jiao Rong-Zhen¹⁾

1) (School of Sciences, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

2) (Department of Mechanical and Automation Engineering, 3rd School, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Received 7 December 2008 ; revised manuscript received 2 April 2009)

Abstract

A new scheme with very simple implementations giving obvious experimental results has been demonstrated to reveal the particle and wave duality of light. The scheme demonstrates the wave property of light by coherent superposition and the particle property of light by random path selection through a 50/50 beam splitter. Preliminary experiments showed high interference visibility of 99% and the particle nature of light as high as 90% by using a highly attenuated pulsed laser as a single photon source. This scheme displays both the wave and particle nature of light through a simple experimental setup, which makes it a quite promising scheme for revealing the property of light.

Keywords : single photon source, Sagnac interferometer, wave-particle duality, coincidence measurement

PACC : 0365, 4230, 4250

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10805006), China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 20080440307) and the Beijing Municipal Commission of Education (Grant No. XK100130837).

[†] E-mail : hqma@bupt.edu.cn