

文章编号: 1007-6654(2009)03-0279-04

利用高质量单光子和光学腔实现延迟选择实验的方案

李 园, 张 静, 李志刚, 张玉驰, 李 刚, 王军民, 张天才[†]

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 延迟选择实验是量子物理中一项重要的实验。本文利用单光子与腔的关系, 提出了一种变通的可操作验证延迟选择实验方案。在光子进入腔中之后, 通过控制光子与腔的失谐控制光子的人射(光子位于腔内) - 反射(光子位于腔外)行为。该方案与传统的方案比较有一定的特点。

关键词: 延迟选择; 单光子源; 光学腔

中图分类号: O431 **文献标识码:** A

光(子)的本性问题一直是量子光学研究的重要问题。从过去的光束双缝干涉到不久前的一系列基于单个光子的实验都清楚地证实了光的波粒二象性^[1-3]。1979年, 在普林斯顿纪念爱因斯坦诞辰100周年的专题讨论会上, 惠勒提出了延迟选择实验的思想^[4], 通过控制干涉仪中的第二个分束器, 能够选择当初光子只走一条路径(粒子性)还是同时走两条路径(波动性)。“即便是在光子已经上路之后, 人们照样可以决定光子到底是走一条路还是走两条路”^[5]。这一思想把量子力学的测量行为和时间本性之间的关系突出的表现出来, 把哥本哈根学派的思想推到了逻辑上的极致^[6]。

自从延迟选择实验的思想提出以来, 引发了人们在实验上验证它的兴趣^[7-12]。早在1982年, Scully 和 Drühl 就提出了以两原子代替双缝的理论方案, 并且利用延迟选择的实验, 第一次提出了“量子擦除器”这一概念, 即观测者的选择可以将储存在双缝(原子)处的信息擦除从而恢复干涉条纹^[7]; 1987年, Hellmuth 等人不仅理论

分析了而且还利用衰减的脉冲光在实验上验证了延迟选择实验^[8]; Baldzuhn 等利用参量荧光的光子对进行了该项实验, 光子对中的一个光子作为触发而另一个进入 Mach-Zehnder 干涉仪^[9]; 后来 Lawson-Daku 等利用原子的 Stern-Gerlach 干涉实验完成了延迟选择实验^[10]; 2000年, Yoon-Ho Kim 等人利用纠缠光子对实验实现了延迟选择的量子擦除器, 与之前的工作不同的是, 对第一个光子的延迟选择不是人为的, 而是由第二个光子随机决定的^[11]。2007年, V. Jacques 等人利用 N-V 色心产生的接近理想的单光子源, 以当初惠勒提出的原始思想为基础, 在真正意义上实现了延迟选择的实验, 证实了惠勒所作解释的正确性^[12]。V. Jacques 等人在实中采用了长达 48 m 的干涉臂, 目的是增加单光子穿过第一个分束器到达控制器之间的时间。长距离干涉给实验带来很大困难, 也不可避免会带来干扰。

本文提出了一种基于高质量(相干性好)的单光子和光学腔的延迟选择实验的方案。利用腔中光场的干涉导致输入输出场的变化, 通过控制

收稿日期: 2008-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(60578018, 60808006, 60821004); 国家 973 计划(2006CB921102); 长江学者和创新团队发展计划基金以及山西省青年科技研究基金(2008021003); 山西省归国留学基金和明星专项项目(08121019)

作者简介: 李园(1981-), 山西大同人, 光学专业博士研究生。

[†] 通讯作者: E-mail: tczhang@sxu.edu.cn

入射光子与腔的共振(失谐),由测量反射和透射光的光子数(通过光子计数)完成延迟选择实验。

基本思路如图 1 所示,腔镜 M_1 和 M_2 构成一个标准的 F-P 腔,其中, M_1 和 M_2 分别表示输入和输出耦合镜,其透射率分别为 T_1 和 T_2 ,反射率分别为 R_1 和 R_2 。为方便假定 M_2 置于一压电陶瓷(PZT)上改变位移(实际过程中可以通过电光调制获得更快的速度)。当来自脉冲单光子源的光子从 M_1 一端入射,如果没有腔镜 M_2 ,则光子有 R_1 的概率被 M_1 反射,而有 T_1 的概率穿过 M_1 ; 如果当单光子通过第一个腔镜 M_1 进入腔中,在其到达第二个腔镜 M_2 前,将 M_2 放入并与 M_1 形成光学腔,此时整个腔的反射和透射状况将受到 M_2 放置位置的影响,会随腔长周期变化。所以 M_2 的插入可以实现“事后”改变“光子是被输入耦合镜 M_1 反射”还是“继续前进穿越 F-P 腔”的状态,即证明延迟选择的想法。

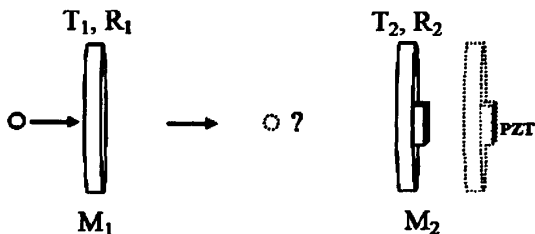


图 1 利用光学腔实现延迟选择实验的示意图

Fig. 1 Experimental principle of delay-choice experiment with optical cavity

下面我们实际分析该方案在实验上的可行性以及优缺点。我们知道,单光子能否通过与之共振的光学腔是有条件限制的^[13],受到其自身线宽和腔的线宽 $\Delta\nu$ 以及腔的有用和无用损耗的影响。实际上,考虑腔镜的透射(反射)率分别为 T_1 (R_1), T_2 (R_2),腔的其它无用损耗(内部吸收和散射等导致)为 α ,则腔的透射场、反射场以及内腔场的相对强度可以表示为:

$$\begin{aligned} \frac{P_{out}}{P_{in}} &= \frac{T_1 T_2}{\sqrt{R_1 R_2}} \cdot \frac{g_m}{(1 - g_m)^2 + 4g_m \sin^2(\delta\phi/2)} \\ \frac{P_{ref}}{P_{in}} &= \frac{(R_1 - g_m)^2 + 4R_1 g_m \sin^2(\delta\phi/2)}{R_1 (1 - g_m)^2 + 4R_1 g_m \sin^2(\delta\phi/2)} \\ \frac{P_{cav}}{P_{in}} &= \frac{T_1}{(1 - g_m)^2 + 4g_m \sin^2(\delta\phi/2)} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $g_m = \sqrt{R_1 R_2} \exp(-2\alpha d)$ 表示光在腔内循

环一周的损耗因子, d 表示腔长, $\delta\phi$ 表示光在腔内循环一周引起的相位差。

这里假定入射光子是完全相干的,线宽为 0,如果考虑入射光的线宽,透射和反射将会减小,实际上,如果入射光的相干时间长于腔内光子的寿命,则共振时光的透射最大。因此要求单光子源具有很好的相干性。目前已经有多种方式产生单光子源,包括单原子、单分子、单离子、量子点、色心以及参量下转换等^[14-23]。他们各有特点,能产生相干性各异、速率不同的单光子源。其中单分子和 N-V 色心都可在室温下产生单光子源,发射效率高,但二者所产生单光子源的谱线都比较宽^[14-17],而且单分子不稳定,有光漂白效应。III-V 量子点^[18,19]和 II-VI 纳晶^[20]覆盖波长范围大,但谱线也较宽。利用参量下转换产生的预告式单光子源线宽很窄^[23],而且产生效率高,但是单光子的发射无法确定性地控制。中性原子或者带电离子可以通过脉冲光激发,而且产生的单光子源相干性要好得多^[21,22],可以完成上述设想。

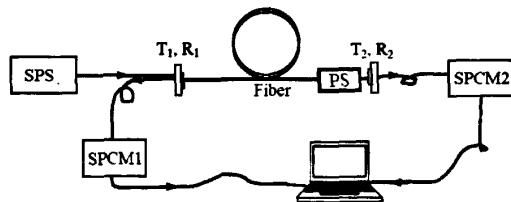


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Experimental sketch

实际可以采用如图 2 所示的结构。来自单原子(离子)辐射的单光子源入射到 M_1 ,通过光纤耦合输出,经过相移器 PS (phase shifter),到 M_2 透射光和反射光都通过单光子探测器 SPCM2 和 SPCM1 测量。采用光纤腔,一方面可以增大腔的长度,同时方便操作、节省空间和减小外界的干扰^[24],但缺点是增加了额外损耗;采用单光子计数模块 (SPCM) 对反射光子和透射光子进行探测,可以提高对单个光子探测的灵敏度,并且快速响应快。

不失一般性,假定我们可以通过 PS 在一个半周期内改变失谐相位,分别控制在 $k\pi/20$,其中 $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm 20$,对于每个相位改变,用单光子计数器分别测量相同时间间隔内反射和透射的光子数,即可以得到不同失谐量下的反射和透

射强度。

以目前的中性铯原子产生的单光子源为例,线宽 $\gamma = 2\pi \times 2.6 \text{ MHz}^{[21]}$, PS 开关时间 $0.1 \mu\text{s}$ (以快速 PZT 也可以达到这个响应^[24]),这要求腔的长度至少大于 30 m 。采用光纤腔时,其内腔损耗可以控制在 20% 左右^[25]。我们选择输入和输出耦合镜的透射率分别为 65% 和 56% ,反射率分别为 35% 和 44% (满足最佳耦合条件),腔的长度为 35 m ,则相应的腔线宽为 $\Delta\nu = 2\pi \times 2.8 \text{ MHz}$,满足 $\gamma < \Delta\nu$ 。图 3 是该条件下得到的反射和透射信号。

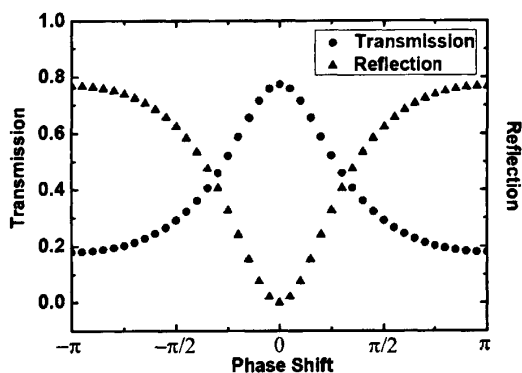


图 3 透射场与反射场的干涉信号
Fig. 3 The interference signals of transmitted light (a) and reflected light (b)

由图 3 可以看到,当单光子进入 FP 腔后,通过改变失谐相位,可以看到光子由于延迟选择而产生的透射场和反射场的干涉信号。同时,由于 F-P 腔的使用,我们的方案将传统的 Mach-Zehnder 型两光束干涉实验扩展为多光束干涉实验,从而也证明单个光子可以同时走多条路径。

参考文献:

- [1] JELEZKO F, VOLKMER A, WRACHTRUP J, *et al.* Coherence Length of Photons from a Single Quantum System [J]. *Phys Rev A*, 2003, **67**: 041802.
- [2] ZEILINGER A, WEIHS G, *et al.* Happy Centenary, Photon [J]. *Nature*, 2005, **433**: 230-238.
- [3] JACQUES V, WU E, ASPECT A, *et al.* Single-photon Wavefront-splitting Interference [J]. *Eur Phys J D*, 2005, **35**: 561-565.
- [4] WHEELER J A. Problems in the Formulations of Physics [M]. North-Holland, Amsterdam, 1978.
- [5] WHEELER J A, ZUREK W H. Quantum Theory and Measurement [M]. Princeton University Press, 1984.
- [6] DAVIES P. Time Asymmetry and Quantum Mechanics [M]. The Nature of Time, edited by FLOOD R and LOCKWOOD M, BLACKWELL B, Basil Blackrell 1986.
- [7] SCULLY M O, DRÜHL K. Quantum Eraser: A Proposed Photon Correlation Experiment Concerning Observation and "delayed choice" in Quantum Mechanics [J]. *Phys Rev A*, 1982, **25**: 2208-2213.

根据干涉条纹的可见度的表示

$$v = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2)$$

我们可以得到,反射场与入射场的干涉信号的对比度与内腔损耗的关系,如图 4 所示。由此可见,当内腔损耗较小时,此方法可以获得较高的对比度。另外,实际的过程中还会受到模式匹配因素的影响,以及需要对触发式单光子源和 PS 时序控制,但这些因素不会影响实验的完成。

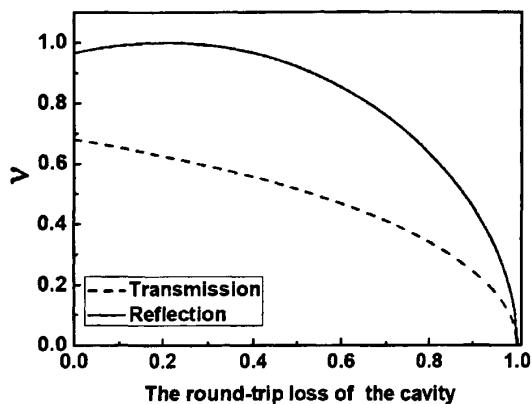


图 4 可见度随内腔损耗的变化
Fig. 4 The visibility versus the round-trip loss of the cavity

本文提出了一种利用光学腔和高质量单光子源实现延迟选择实验的一种方案,在光子进入腔中之后,通过改变光子与腔的共振失谐和用单光子探测器计数透射和反射光子来延迟选择光子被反射还是透射的路径。采用实际参数估算显示可以获得较高的对比度。该方案的优点是装置简单、操作方便,缺点是对单光子的质量有一定要求,就目前的实际系统,要提高对比度到传统的 Mach-Zehnder 干涉的对比度还有困难。

- [8] HELLMUT T, WALTHER H, *et al.* Delayed-choice Experiments in Quantum Interference [J]. *Phys Rev A*, 1987, **35**: 2532-2541.
- [9] BALDZUHN J, *et al.* A wave-particle Delayed-choice Experiment with a Single-photon State [J]. *Z Phys B*, 1989, **77**: 347-352.
- [10] LAWSON-DAKU B J, ASIMOV R, *et al.* Delayed Choices in Atom Stern-Gerlach Interferometry [J]. *Phys Rev A*, 1996, **54**: 5042-5047.
- [11] KIM Y H, YU R, SCULLY M O, *et al.* Delayed "Choice" Quantum Eraser [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **84**: 1-5.
- [12] JACQUES V, Wu E, A. Aspect, *et al.* Experimental Realization of Wheeler's Delayed Choice Gedanken Experiment [J]. *Science*, 2007, **315**: 966.
- [13] BACHOR H, RALPH T C. A Guide to Experiments in Quantum Optics. 2nd edition [M]. Berlin, Wiley, 2004.
- [14] LOUNIS B, MOERNER W E. Single Photons on Demand from a Single Molecule at room Temperature [J]. *Nature*, 2000, **407**: 491-493.
- [15] TREUSSART F, ROCH J F, *et al.* Direct Measurement of the Photon Statistics of a Triggered Single Photon Source [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **89**: 093601.
- [16] GRUBER A, *et al.* Scanning Confocal Optical Microscopy and Magnetic Resonance on Single Defect Centers [J]. *Science*, 1997, **276**: 2012-2014.
- [17] JELEZKO F, *et al.* Single Spin States in a Defect Center Resolved by Optical Spectroscopy [J]. *Appl Phys Lett*, 2002, **81**: 2160.
- [18] GAMMON D, SNOW E S, *et al.* Nuclear Spectroscopy in Single Quantum Dots; Nanoscopic Raman Scattering and Nuclear Magnetic Resonance [J]. *Science*, 1997, **277**: 85-88.
- [19] ZWILLER V, *et al.* Quantum Optics with Single Quantum dot Devices [J]. *New J Phys*, 2004, **6**: 96.
- [20] BROKMANN X, *et al.* Highly Efficient Triggered Emission of Single Photons by Colloidal CdSe/ZnS Nanocrystals [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **85**: 712.
- [21] MCKEEVER J, KIMBLE H J, *et al.* Deterministic Generation of Single Photons from One Atom Trapped in a Cavity [J]. *Science*, 2004, **303**: 1992-1994.
- [22] GUTHÖRLEIN G R, *et al.* A single Ion as a Nanoscopic Probe of an Optical Field [J]. *Nature*, 2001, **414**: 49-51.
- [23] Neergaard-Nielsen J S, *et al.* High Purity Bright Single Photon Source [J]. *Optics Express*, 2007, **15**: 7940-7949.
- [24] http://www.noliac.com/Standard_products-10.aspx.
- [25] SANDERS G A, *et al.* Hollow Core Fiber Optic Ring Resonator for Rotation Sensing [C]. The 18th International Conference on Optical Fiber Sensors, 2006.

A Scheme for Realizing the Delayed-choice Experiment with High-quality Single Photons and an Optical Cavity

LI Yuan, ZHANG Jing, LI Zhi-gang, ZHANG Yu-chi,

LI Gang, WANG Jun-min, ZHANG Tian-cai

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Device, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Wheeler's delayed-choice gedanken experiment plays an important role in the quantum physics because it can help us understand the meaning of single-photon interference. In this paper, a kind of delayed-choice experimental scheme is discussed according to the relationship between the single photon and a cavity. When the photon gets into a cavity, its behavior of whether entering the cavity or reflecting by cavity can be controlled by changing the detuning between the photon and the cavity. This scheme has its own characteristics compared with the traditional ones.

Key words: delay-choice; single-photon source; optical cavity