

基于 InAs 单量子点的单光子干涉*

李园 窦秀明 常秀英 倪海桥 牛智川 孙宝权†

(中国科学院半导体研究所超晶格与微结构国家重点实验室, 北京 100083)

(2010年4月13日收到; 2010年7月1日收到修改稿)

利用分子束外延生长 InAs 单量子点样品, 测量了温度为 5 K 时单量子点的荧光 (PL) 光谱. 采用时间关联光子强度测量 (HBT) 验证了 PL 光谱具有单光子发射特性. 单光子通过马赫曾德尔 (MZ) 干涉仪, 验证了单光子自身具有干涉特性. 测量了当 MZ 干涉仪两臂偏振方向的夹角改变时对应的单光子干涉条纹可见度的变化.

关键词: 量子点单光子源, 反群聚效应, 马赫曾德尔干涉

PACS: 78.67.Hc, 78.55.Cr, 42.50.-p, 42.25.Kb

1. 引言

1905 年爱因斯坦提出了光量子的假设, 第一次揭示了光的波粒二象性. 从此, 人们希望通过各种实验来验证光的这种性质. 在早期, 人们通过衰减很弱的经典光来演示单光子干涉实验^[1, 2]. 由于这些实验所用光源并不具备单光子态反群聚的特性, 所以还不足以证明单光子自身干涉这种基本的量子现象^[3]. 直到 20 世纪 80 年代, Grangier 通过原子级联发射的光子证明了单光子的反群聚效应以及干涉现象^[4]. 近几年来, 随着实验技术的发展, 人们利用单原子^[5, 6]、单分子^[7, 8]、半导体缺陷态^[9]、单量子点^[10, 11]、纠缠光子对^[12]等制备了真正的单光子源. 单光子干涉是一种非经典现象, 通过真正的单光子源可以更清楚地证明单光子的自身干涉, 文献^[13]和^[14]分别基于连续激发和脉冲激发金刚石色心产生的单光子源验证了单光子干涉现象. 与其他方式的单光子源相比, 量子点单光子源具有窄的谱线宽度, 易于集成, 发光稳定, 发光波长范围广等优点, 使其在量子光学实验和量子信息通讯中有广阔的应用前景. 在本文中, 首先利用时间关联光子强度测量验证了 InAs 单量子点的荧光具有单光子特性, 然后单光子通过马赫曾德尔 (MZ) 干涉仪验证了单光子干涉实验. 从实验上验证了单光子的波粒二象性.

2. 实验

图 1 是测量 InAs 单量子点荧光 (PL) 光谱的单光子特性和单光子干涉特性的实验光路图. 所用量子点样品是在 GaAs 衬底上通过分子束外延自组织生长的^[15]. 样品结构为: 在 n 型 GaAs 衬底上首先生长 20 对 n 型掺杂的 GaAs / Al_{0.9}Ga_{0.1}As 分布布拉格反射镜 (DBR), InAs 量子点处在 2λGaAs 腔的波腹位置, 最后是 p 型掺杂的 GaAs 层. 量子点的密度约为 1 μm⁻²^[16]. 在光学测量中, 量子点样品放在液氮循环的低温架上, 样品温度为 5 K. 利用 He-Ne 激光器 (632.8 nm) 激发量子点样品, 产生的 PL 光谱通过共聚焦显微物镜由光谱仪和 CCD 收集测量. 为验证 PL 光谱的波粒二象性, 选择光谱仪的出射波长为 PL 发光峰位置, 此时光谱仪作为带通滤光片. 利用光路中的可折叠 45° 高反射镜 (F), 使 PL 分别进入时间关联光子强度 (HBT) 测量系统 (图 1 中虚线框所示) 或 MZ 干涉仪, 其中 HBT 用来验证发光光子的粒子特性, MZ 用来验证光子的波动特性. 在 MZ 干涉仪中, 其中一臂的长度可以通过压电陶瓷 (PZT) 来改变, 从而达到改变两路位相差的目的. 两路经分束器 BS3 合并后, 在其中一个输出端用单光子探测器 (SPCM-AQR-14) 进行测量, 探测器将所测信号通过计数器以及计算机进行记录.

* 国家自然科学基金 (批准号: 90921015) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: bqsun@red.semi.ac.cn

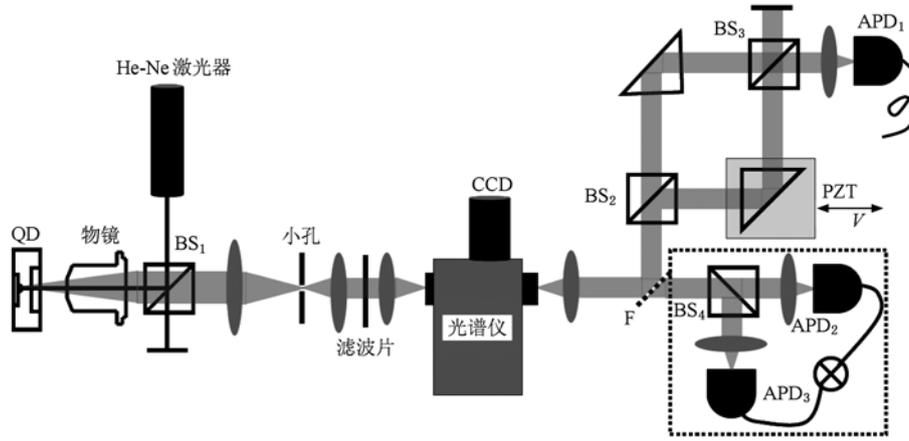


图1 量子点单光子干涉实验装置图(其中 QD 为量子点;BS 为分束器;CCD 为电荷耦合器件;PZT 为压电陶瓷;APD 为单光子探测器;F 为可折叠 45°高反射镜)

3. 实验结果与分析

图 2(a)是在温度为 5 K 时测量的 InAs 单量子点的 PL 光谱图,其主峰发光位置为 926.98 nm. 为了验证 PL 具有单光子特性,对经过光谱仪出射狭缝的 926.98 nm PL 光谱进行 HBT 测量,测量结果如图 2(b) 所示. 在延迟时间零点出现符合计数的极小值,即光子的反群聚效应. 利用下式对实验结果进行了拟合:

$$g^{(2)}(\tau) = a - b \exp\left(-\frac{|\tau|}{c}\right), \quad (1)$$

其中 $\frac{a-b}{a}$ 和 c 分别表示延迟时间为 $\tau = 0$ 时的归一化的二阶相干度 $g^{(2)}(0)$ 以及激子复合发光寿命. 由拟合可知 $g^{(2)}(0) = 0.31$, 这个值小于 0.5, 表明 InAs 单量子点的 PL 光谱具有单光子粒子特性^[17], 且对应的发光寿命 $c = 781$ ps.

下面利用量子点单光子光源和 MZ 干涉仪验证单光子的波动特性,即单光子的自身干涉现象. 并通过改变干涉仪两臂光的偏振方向,测量了干涉条纹可见度随偏振方向的变化,实验光路图见图 1 所示. 测量中,每改变一次 PZT 的位置,单光子探测器进行一次光子计数测量,并将其记为图 3 中的一个点. 根据(2)式可以得到图 3(a)的干涉条纹可见度为 $v = 57.3 \pm 0.7\%$, 这里干涉仪两臂光具有相同的偏振. 实验中对可见度的影响主要来源于以下三个方面: 1) 背景噪声的影响;包括单光子探测器的暗计数、环境噪声以及量子点中与所测波长相同位置

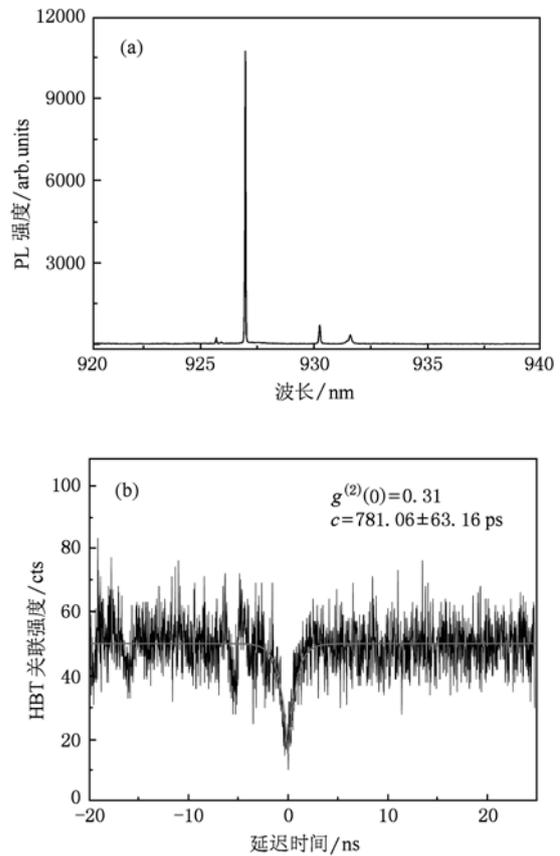


图2 InAs 量子点 PL 光谱及 HBT 测量结果 (a) InAs 单量子点 PL 光谱; (b) PL 光谱 HBT 测量及拟合结果

的本底发光; 2) 两分束器分光比不完全相同; 3) 经过干涉仪两臂的光束在 BS_3 处没有完全重合. 通过以上三方面的改进来进一步提高干涉条纹的可见度.

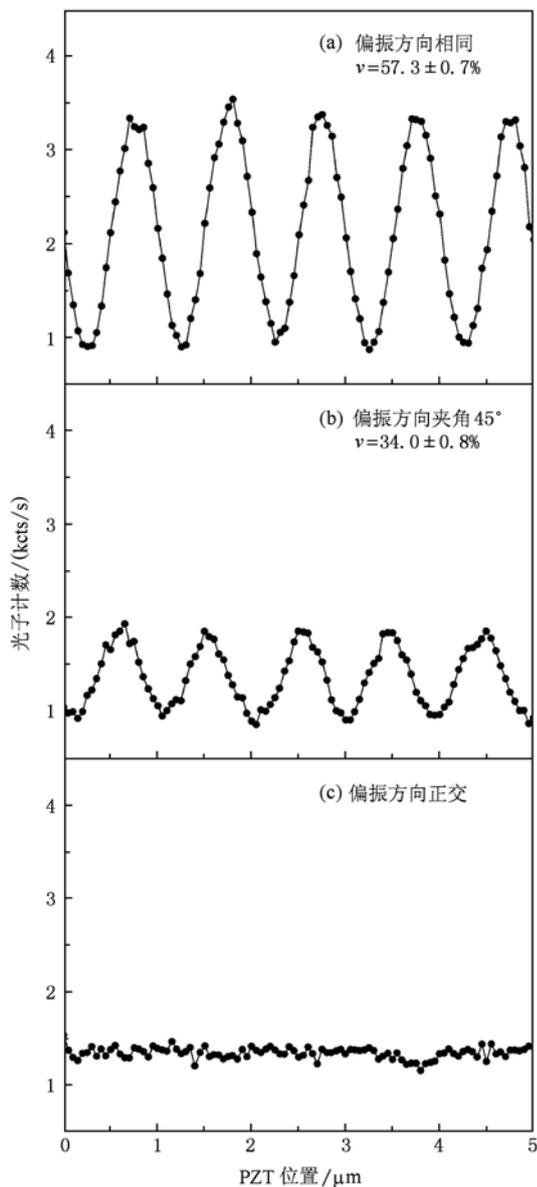


图3 当干涉仪两臂偏振方向夹角变化时对应的单光子的干涉
(a) 偏振方向相同; (b) 偏振方向夹角为45°; (c) 偏振方向正交

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

图3(b)和(c)是当MZ干涉仪两臂偏振方向的夹角改变时测量的单光子干涉结果. 实验中在MZ干涉仪的两臂各加入一个起偏器,通过改变起偏器的偏振方向来改变通过两臂光的偏振方向. 图3(a), (b)和(c)分别表示偏振方向夹角为0°, 45°和90°的情况. 对应的可见度依次为57.3 ± 0.7%, 34.0 ± 0.8%和0. 因此, HBT的实验结果说明单量子点的PL光谱具有单光子粒子特性, 而MZ实验结果说明单光子自身又具有干涉特性, 及单光子的波粒二像性. 由于单光子是不可分的(HBT实验结果), 即单光子不能同时通过MZ干涉仪的两臂而产生干涉. 那么, 正确理解这个实验是依据量子力学的态叠加原理, 即探测器接收的信号是来自MZ干涉仪两路的叠加, 和光子通过两臂路径的不可分辨性. 当两臂可分辨时, 如两臂光子的偏振相互垂直, 其干涉条纹消失, 如图3(c)的实验结果.

4. 结 论

利用HBT实验证实InAs单量子点的PL光谱是很好的单光子源, 即具有单光子的粒子特性. 通过MZ干涉实验说明单光子同时也具有波动特性. 这种单光子干涉是一种典型的非经典现象, 是单光子的自身干涉, 是量子力学中态叠加原理与路径的不可分辨性的体现. 这种基于InAs单量子点的单光子发射有利于在固态体系中开展量子光学实验^[18]及量子信息研究^[19, 20].

[1] Taylor G I 1909 *Proc. Com. Philos. Soc.* **15** 114
 [2] Dempster A J, Batho H F 1927 *Phys. Rev.* **30** 644
 [3] Dirac P A M, 1947 *The principles of quantum mechanics* 3rd edition (Oxford: Oxford University Press) p9
 [4] Grangier P, Roger G, Aspect A 1986 *Europhys. Lett.* **1** 173
 [5] McKeever J, Boca A, Boozer A D, Miller R, Buck J R, Kuzmich A, Kimble H J 2004 *Science* **303** 1992
 [6] He J, Wang J, Yang B D, Wang J M, Zhang T C 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3404
 [7] Treussart F, Alleaume R, Xiao L T, Courty J M, Roch J F 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 093601
 [8] Zhang G F, Zhang F, Cheng F Y, Sun J H, Xiao L T, Jia S T 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2364 (in Chinese) [张国峰、张芳、程峰钰、孙建虎、肖连团、贾锁堂 2009 物理学报 **58** 2364]
 [9] Gruber A, Dräbenstedt A, Tietz C, Fleury L, Wrachtrup J, Borczyskowski C V 1997 *Science* **276** 2012
 [10] Michler P, Kiraz A, Becher C, Schoenfeld W V, Petroff P M, Zhang L, Hu E, Imamoglu A 2000 *Science* **290** 2282
 [11] Cheng M T, Li Y Y, Liu S D, Wang Q Q, Xue Q K, Zhou H J 2006 *Chin. Phys.* **15** 1781

- [12] Ma H Q, Wang S M, Wu L A 2009 *Chin. Phys. B* **58** 717
- [13] Braig C, Zarda P, Kurtisiefer C, Weinfurter H 2003 *Appl. Phys. B* **76** 113
- [14] Jacques V, Wu E, Toury T, Treussart F, Aspect A, Grangier P, Roch J F 2005 *Eur. Phys. J. D* **35** 561
- [15] Grundmann M, Stier O, Bimberg D 1995 *Phys. Rev. B* **52** 11969
- [16] Huang S S, Niu Z C, Ni H Q, Xiong Y H, Zhan F, Fang Z D, Xia J B 2007 *J. Crystal Growth* **301** 751
- [17] Zwiller V, Aichele T, Hatami F, Masselink, Benson O 2005 *App. Phys. Lett.* **86** 091911
- [18] Jacques V, Wu E, Grosshans F, Treussart F, Aspect A, Grangier P, Roch J F 2007 *Science* **315** 966
- [19] Hu P H, Huang Y X, Liu S H, Lu W, Lu Y Q, Wang J D, Zhang J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5605 (in Chinese) [胡华鹏、黄宇娴、刘颂豪、路魏、路铁群、王金东、张静 2008 物理学报 **57** 5605]
- [20] Bennett C H, Bessette F, Brassard G, Salvail L, Smolin J 1992 *J. Cryptol* **5** 3

Single-photon interference based on a single InAs quantum dot*

Li Yuan Dou Xiu-Ming Chang Xiu-Ying Ni Hai-Qiao Niu Zhi-Chuan Sun Bao-Quan[†]

(State Key Laboratory for Superlattices and Microstructure, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(Received 13 March 2010; revised manuscript received 1 July 2010)

Abstract

Single InAs quantum dot (QD) sample is grown by molecular-beam epitaxy (MBE), and the photoluminescence (PL) from a single QD at 5 K is measured. By means of Hanbury-Brown and Twiss (HBT) setup, we measure the photon correlation of the PL which indicates that the PL of QD is single-photon emission. This single-photon source is used to demonstrate experimentally the single-photon interference via Mach-Zehnder (MZ) interferometer. In addition, the measured interference and fringe visibility are analyzed by changing the different linear polarization of the photon between two arms of MZ interferometer.

Keywords: single quantum dot, antibunching effect, Mach-Zehnder interferometer

PACS: 78.67.Hc, 78.55.Cr, 42.50.-p, 42.25.Kb

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 90921015).

[†] Corresponding author. E-mail: bqsun@red.semi.ac.cn