

## InAs 单量子点中级联辐射光子的关联测量\*

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16日收到;2010年5月14日收到修改稿)

利用分子束外延生长 InAs 单量子点样品,温度为 5 K 时,测量了单量子点中单、双激子自发辐射的荧光(PL)光谱.研究了单、双激子发光强度随激发功率的变化及对应发光峰的偏振特性和精细结构劈裂.基于 Hanbury-Brown Twiss (HBT) 实验,测量了单、双激子间发光光谱的关联函数,证实了其发光过程为级联发射过程.

**关键词:** InAs 单量子点, 单、双激子, 荧光光谱, 级联辐射

**PACS:** 78.67.Hc, 78.55.Cr, 42.50.-p, 71.35.-y

## 1. 引言

非经典光源如单光子源<sup>[1]</sup>、纠缠光子源<sup>[2]</sup>在量子信息<sup>[3]</sup>以及量子计算<sup>[4]</sup>有重要的应用前景.由于半导体量子点<sup>[5,6]</sup>不存在光漂白效应,且易于光电集成等优点,所以用半导体量子点来获得非经典光源有着广阔的发展前景.通过电脉冲或光脉冲激发单个量子点产生的单光子源具有非常窄的谱线宽度和较大的波长选择范围,被许多小组用于量子信息通讯的研究<sup>[7-9]</sup>.另外,利用单个量子点中双激子自发辐射过程能够发射有序的关联光子<sup>[10]</sup>,可以用来制备纠缠光子<sup>[11,12]</sup>.

量子点中的双激子态 (XX) 是包含有两对电子-空穴对的激子态,其中一对电子-空穴复合并辐射一个光子.双激子发射后留下一个电子-空穴对成为单激子态 (X),单激子态的电子-空穴复合成为基态 (G),同时发射第二个光子.这两个先后发出的光子就称为级联光子对,由于它们之间有很强的关联或纠缠特性,目前有许多小组<sup>[13,14]</sup>研究利用双激子实现纠缠光子源及其在量子信息应用.而激子本征态对应发光光谱的偏振特性和激子本征态精细结构劈裂直接与单、双激子发射光子的纠缠度相关.因此,从实验上识别发光谱线所对应激子的本征态、发光的偏振特性、发光谱线的精细结构及单/双激子发射的级联过程是非常重要的.

在本文中,通过测量 InAs 单量子点中单、双激子自发辐射的荧光(PL)光谱,观察了其发光强度随激发功率的变化以及发光谱线的偏振特性及发光谱线的精细结构劈裂.基于 Hanbury-Brown Twiss (HBT) 方案测量了单、双激子间发光光谱的关联函数,从而证明了单、双激子的发光是级联发射过程.

## 2. 实验

图 1 是测量 InAs 量子点中单、双激子自发辐射 PL 光谱以及 PL 光谱间的关联函数测量的实验原理图. InAs 量子点样品是在 GaAs 衬底上通过分子束外延自组织<sup>[15]</sup>生长成的.样品的结构为在 n 型 GaAs 衬底上首先生长 20 对 n 型掺杂的 GaAs/Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As 分布布拉格反射镜 (DBR), InAs 量子点处在 2λ GaAs 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<sup>-2</sup><sup>[16]</sup>.在实验中,量子点样品放在液氮循环的低温样品架上,样品温度为 5 K.利用 He-Ne 激光器 (632.8 nm) 激发量子点样品,PL 光谱通过共聚焦显微物镜由光谱仪和 CCD 收集测量.

测量单、双激子间关联函数时,PL 首先经过分束器 BS 分成两部分,分别进入两个光谱仪中.根据所测 PL 发光峰位置,利用光谱仪分别选择波长为 922.4 nm (1.345 eV) 单激子发光峰和 918.9 nm

\* 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

(1.350 eV) 双激子发光峰位置,使单、双激子发光经过光谱仪的出射狭缝分别进入两个单光子探测器 (SPCM-AQR-14) 进行测量. 探测器将所测信号

分别输入时幅转换仪 (TAC) 的 start 和 stop 端口, TAC 的输出结果通过多通道分析仪 (MAC) 和计算机被记录.

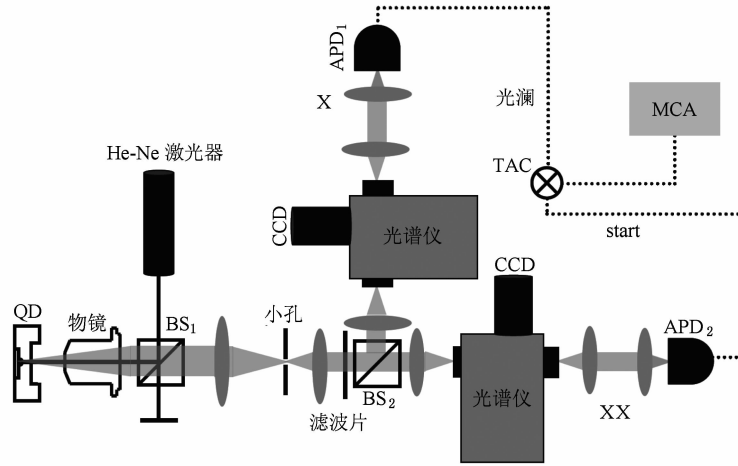


图1 量子点单、双激子自发辐射 PL 谱以及关联函数测量实验装置图(其中 QD 为量子点;BS 为分束器;CCD 为电荷耦合器件;APD 为单光子探测器;TAC 为时幅转换仪;MCA 为多道分析仪)

### 3. 实验结果及分析

图 2 是温度为 5 K 时, InAs 单量子点的 PL 光谱. 从图中可以看到当激发功率  $P$  为  $1 \mu\text{W}$  时, 只有一条谱线位于 1.345 eV 处 (图 2(a)), 对应单激子发光, 用 X 表示. 随着激发功率的增加, 这条谱线的强度会逐渐增加 (图 2(b)). 当激发功率增加到  $93.7 P$  时, 在 1.350 eV 处出现一条新的发光谱线 (图 2(c)), 用 XX 表示. 随着激发功率的进一步增加, 两条谱线的强度都会增加, 但是 XX 发光谱线强度增加的更快, 且发光强度超过单激子的发光强度, 如图 2(d) 所示.

为识别发光峰 XX 的物理机理, 详细测量了 InAs 单量子点 PL 光谱发光强度随激发功率的变化, 如图 2(a) 中的插图. 在对数坐标下, 得到单激子发光 (X) 和发光峰 XX 的斜率分别为 1.0 和 1.7. 理论上, 单、双激子发光强度与激发功率的关系<sup>[17]</sup>可以表示为  $I_{X,XX} \propto P^{n_x}$ , 其中  $n_x = 1, 2$  分别对应单、双激子发光过程. 因此,  $n = 1.7$  接近于理论值 2, 是双激子发光过程.

下面讨论单、双激子发光的偏振特性. 在测量光路中加入检偏器, 对 PL 光谱进行偏振测量, 测量

结果如图 3 所示. 测量结果显示单、双激子的发光都是线偏振, 发光谱线的水平偏振 (H) 与垂直偏振 (V) 的劈裂大小基本相同, 约为  $130 \mu\text{eV}$ , 而且对于单激子 (谱线 X) 水平偏振 (H) 谱线在垂直偏振 (V) 谱线的高能侧, 而对于双激子 (谱线 XX) 水平偏振 (H) 谱线在垂直偏振 (V) 谱线的低能侧. 单、双激子谱线的线偏振劈裂源于量子点形状的不对称而导致的电子-空穴交换相互作用产生的激子能级分裂<sup>[18]</sup> (如图 3 中插图). 这种分裂只产生在单激子态, 而双激子态和基态的载流子总自旋为零, 所以都没有能级分裂. 双激子谱线的终态即为单激子谱线的初态. 因此它们线偏振的水平和垂直谱线的相对位置是相反的.

通过单、双激子间关联函数的测量, 我们可以更加深刻地理解单、双激子间级联辐射过程及它们的关联特性. 图 4 是利用 HBT 光子强度关联方法测量的单、双激子间 PL 光谱的关联函数. 在实验中, 将双激子辐射光子的信号输入 TAC 的 start 端, 单激子辐射光子的信号经过一段时间延迟后输入 stop 端, 进行关联测量. 经过 5400 s 积分时间, 测量结果由图 4 所示. 图中横坐标为 start-stop 的延迟时间, 纵坐标为关联测量结果. 其中灰色线是通过下式对实验结果的拟合:

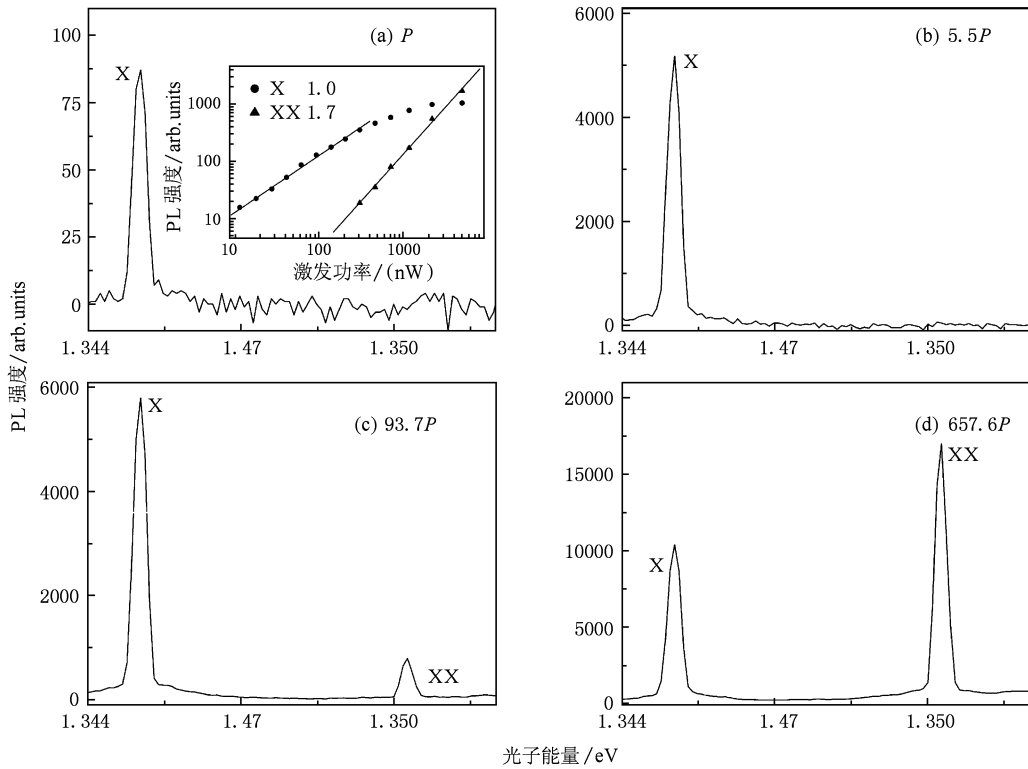


图2 温度为 5 K 时, InAs 单量子点的 PL 光谱随激发功率的变化 (a) 激发功率为  $P$ ; (b) 激发功率为  $5.5P$ ; (c) 激发功率为  $93.7P$ ; (d) 激发功率为  $657.6P$  (单、双激子发光强度随激发功率的变化显示于(a)中插图)

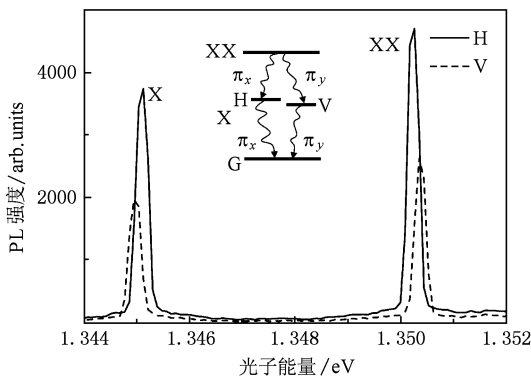


图3 温度为 5 K 时, InAs 单量子点的水平 (H) 和垂直 (V) 线偏振分辨 PL 光谱 (插图为双激子-单激子级联跃迁过程)

$$g_{X,XX}^{(2)} = \begin{cases} a - b \exp(-|\tau|/c), & \tau \leq 0, \\ a + b \exp(-|\tau|/c), & \tau > 0, \end{cases} \quad (1)$$

可以看到, 当延迟时间为正时, 归一化的关联强度  $g_{X,XX}^{(2)} = 3.36$ , 且在一定延迟时间中有  $g_{X,XX}^{(2)}(\tau_1) > g_{X,XX}^{(2)}(\tau_2)$ , 其中  $\tau_1 < \tau_2$ , 所以所测光场呈现光子群聚效应<sup>[19]</sup>. 当延迟时间为负时,  $g_{X,XX}^{(2)}(0) = 0.36$  且  $g_{X,XX}^{(2)}(0) < g_{X,XX}^{(2)}(\tau)$ , 所测光场呈现光子反群聚效应<sup>[19]</sup>. 关联相干度呈现群聚-反群聚特性的结果是由于单双激子的级联辐射引起的. 群聚效应体

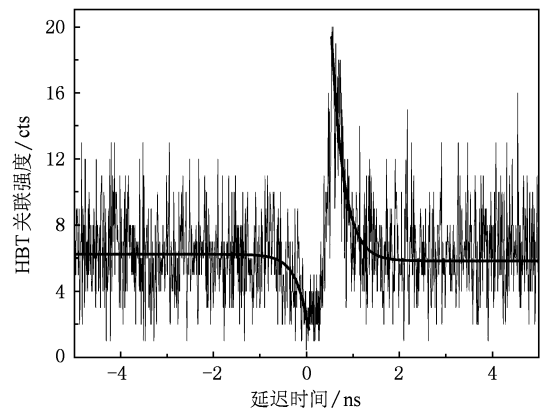


图4 单、双激子级联辐射光场的关联函数

现了在级联辐射过程中, 双激子复合辐射的光子总是先发出来, 之后在一定时间间隔内, 会有单激子复合辐射的光子发出; 而反群聚效应则说明当单激子复合辐射的光子首先被探测到时, 系统在被重新激发前处于基态, 所以不会有双激子辐射对应的光子发出. 相当于单激子的 HBT 测量结果.

## 4. 结 论

本文测量了 InAs 单量子点中单、双激子自发辐射的 PL 光谱, 观察了其发光强度随激发功率的变化以及发光峰的偏振劈裂特性. 基于 HBT 方案, 测量了单、双激子复合光子的关联函数. 所测得的

关联函数呈现群聚( $\tau > 0$ )-反群聚( $\tau < 0$ )的效应, 证明了单、双激子复合过程的级联特性. 量子点中单、双激子的级联辐射产生的双光子研究有助于在消除激子精细结构劈裂后制备纠缠光子源, 纠缠光子是量子计算和量子通信的重要信息载体, 目前许多研究小组都在进行这方面的理论与实验研究.

- [1] Ma H Q, Wang S M, Wu L A 2009 *Chin. Phys. B* **58** 717
- [2] Jia X J, Pan Q, Peng K C, Su X L, Xie C D 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2717 (in Chinese) [贾晓军、潘庆、彭堃擢、苏晓龙、谢常德 2005 物理学报 **54** 2717]
- [3] Pan J W, Bouwmeester D, Daniell M, Weinfurter H, Zeilinger A 2000 *Nature* **403** 515
- [4] Knill E, Laflamme R, Milburn G J 2001 *Nature* **409** 46
- [5] Charles S, Matthew P, Glenn S S 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 1502
- [6] Cheng M T, Li Y Y, Liu S D, Wang Q Q, Xue Q K, Zhou H J 2006 *Chin. Phys.* **15** 1781
- [7] Michler P, Kiraz A, Becher C, Schoenfeld W V, Petroff P M, Zhang L, Hu E, Imamoglu A 2000 *Science* **290** 2282
- [8] Charles S, David F, Jelena V, Glenn S S, Yoshihisa Y 2002 *Nature* **419** 594
- [9] Flagg E B, Muller A, Robertson J W, Founta S, Deppe D G, Xiao M, Ma W, Salamo G J, Shih C K 2009 *Nature Physics* **5** 203
- [10] Moreau E, Robert I, Manin L, Thierry-Mieg V, Gerard J M, Abram I 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 183601
- [11] Stevenson R M, Andrew J H, Anthony J B, Robert J Y, Christine A N, David A R, Andrew J S 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 170501
- [12] 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]
- [13] Robert J, Nikolay A G, Guillaume M 2009 *Phys. Rev. B* **79** 155317
- [14] Ding F, Singh R, Plumhof J D, Zander T, Krapek V, Chen Y H, Benyoucef M, Zwiller V, Dorr K, Bester G, Rastelli A, Schmidt O G 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 067405
- [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] Brunner K, Abstreiter G, Bohm G, Trankle G, Weimann G 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 1138
- [18] Michler P 2003 *Single quantum dots fundamentals, applications, and new concepts* (Berlin: Springer) p344
- [19] Gerry C, Knight P 2005 *Introductory quantum optics* (Cambridge: Cambridge University Press) p171

## Correlation measurement of quantum cascade photons in single InAs quantum dot<sup>\*</sup>

Li Yuan Dou Xiu-Ming Chang Xiu-Ying Ni Hai-Qiao Niu Zhi-Chuan Sun Bao-Quan<sup>†</sup>

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

(Received 16 April 2010; revised manuscript received 14 May 2010)

### Abstract

Single InAs quantum dot (QD) sample was grown by molecular-beam epitaxy (MBE). The Photoluminescences (PL) of the exciton and biexciton in a single QD were measured at 5 K. The PL intensity as a function of the laser excitation power, the fine structure splittings of the exciton and biexciton, and the corresponding linearly polarized emissions were analyzed. By means of Hanbury-Brown and Twiss (HBT) setup, the photon correlation between the PL of exciton and biexciton were measured, which is gave an evidence of the quantum cascade emissions between biexciton and exciton PL.

**Keywords:** single quantum dot, exciton and biexciton, photoluminescence spectrum, cascade emission

**PACS:** 78.67. Hc, 78.55. Cr, 42.50.- p, 71.35.- y

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 90921015).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: bqsun@red.semi.ac.cn