

半导体量子点 Rabi 振荡品质因子及其退相干机制

Quality Factor and Decoherence Mechanism of Rabi Oscillation in Semiconductor Quantum Dot

王取泉/WANG Qu- quan, 刘绍鼎/LIU Shao- ding, 周慧君/ZHOU Hui- jun, 程木田/CHENG Mu- tian,
肖 思/XIAO Si

武汉大学物理系, 武汉 430072

Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072, China

[摘要] 采用光致发光方法和纳米光谱成像技术, 研究了单个半导体量子点中激发态激子的 Rabi 振荡。观测了在两个延时位相可控的 $\pi/2$ 脉冲激发下, 激发态激子数随其量子比特位相旋转而振荡的特性。由实验观测结果分析得知此单个半导体量子点量子比特的自由旋转品质因子约为 9.8×10^4 , 动力旋转品质因子约为 18。讨论了激子从浸润层到量子点的俘获过程对 Rabi 振荡衰减退相干的影响。简要分析了量子点的激子自旋操控和单光子发射统计特性。

[关键词] Rabi 振荡, 半导体量子点, 量子比特, 量子计算

[中图分类号] O431.2, O471.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1000- 7857(2006)01- 0011- 04

Abstract: The Rabi oscillations of the exciton of the excited state in single semiconductor quantum dots were investigated by using the photoluminescence and nano- spectroscopy technique. The population on the excited state oscillated as a function of phase angle of the qubit were recorded, in which pulse- pairs with the adjustable time delay were used as the excitation. The quality factors of free rotation is about 9.8×10^4 , and that of the dynamic rotation is about 18 for the single quantum dot excitonic qubit based on the experimental observations. The decoherence mechanism of Rabi oscillation stem from the capture processes from wetting layer to quantum dot is also analyzed. The exciton coherent control and the statistic characteristics of single photon emission in single semiconductor quantum dot are discussed as well.

Key Words: Rabi oscillation, semiconductor quantum dot, qubit, quantum computation

CLC Numbers: O431.2, O471.1

Document Code: A

Article ID: 1000- 7857(2006)01- 0011- 04

1 引言

量子信息和量子计算是当今物理学的前沿课题之一^[1-2]。近几年来, 固态体系中的 Rabi 振荡和量子逻辑门方面的研究取得了一些十分重要的进展^[3-4], 使得固态量子比特体系的研究引起了人们的极大关注。半导体量子点作为固态量子比特体系中一种, 具有能级结构可调节并且可以实现全光操作等优点, 在量子信息领域中具有很好的应用前景。有关半导体量子点的相干特性和量子态操控等方面的研究已经有大量的文献报道^[5-9]。

2001 年, Stievater 等利用微分透射法(DT)首次在 InGaAs 界面涨落量子点(IFQD)的基态中观测到 Rabi 振荡^[10]。次年, 有报道利用光致发光法(PL)在 InGaAs 自组织量子点(SAQD)的激发态中^[11], 以及利用光电流法(PE)在 InGaAs 自组织量子点(SAQDs)的基态中都分别实现了约 3π 的 Rabi 振荡^[12]。随后, 一系列的文献报道了半导体量子点中的 Rabi 振荡的理论和实验研究^[13-14]。在半导体量子点系统中, 激子 Rabi 振荡的振幅随激发光强的增大而迅速衰减, 其退相干机制引起了广泛关注。2003 年, Förstner 等分析了电子与声子的相互作用退相干过程造成的 Rabi 振荡衰减的特点^[15]。最近研究表明, 短脉冲(1 ps)激发下激子到浸润层的泄

漏和双激子对 Rabi 振荡衰减的影响也不可忽略^[16]。

本文介绍了单个半导体量子点的光谱成像和激子量子比特(qubit), 研究在两个延时可控的 $\pi/2$ 脉冲激发下其量子比特位相旋转的特性, 通过观测半导体量子点中激发态激子数的 Rabi 振荡, 分析其 Rabi 振荡的品质因子和位相旋转的品质因子, 并对激子从浸润层到量子点的俘获过程对 Rabi 振荡衰减的影响作了分析。

2 单个半导体量子点量子比特旋转操控

2.1 半导体量子点的量子比特

在光致发光和纳米光谱成像实验中所用的 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}$ 半导体量子点样品由分子束外延方法制备^[17], 其平均大小约为 30 nm, 平均间距约为 100 nm; 考虑量子点中激子的 3 个能级(如图 1a 所示): 激子真空态(标记为 $|0\rangle$), 单激子第一激发态(标记为 $|1\rangle$)和单激子的基态(标记为 $|2\rangle$)。在共振脉冲激光的激发下, 一个激子被激发到其第一激发态 $|1\rangle$, 然后通过与声子相互作用非辐射弛豫到基态 $|2\rangle$, 最后复合并发射光子, 回到激子真空态 $|0\rangle$ 。由于激子基态的寿命大大高于激发态, 因此可以近似认为激子基态辐

收稿日期: 2005- 12- 09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10534030, 10474075)

作者简介: 王取泉, 男, 武汉市珞珈山武汉大学, 教授, 主要研究方向为量子计算和量子信息处理; E- mail: qqwang@whu.edu.cn

- 11 -

射到真空态的发光强度与激发态的激子数成正比,即在讨论激子与外场的相互作用时可将此系统简化为 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 组成的二能级系统^[14],此二能级系统中波函数可表示为 $|0\rangle$ 态和 $|1\rangle$ 态的叠加态:

$$|\Psi\rangle = a(\theta)|0\rangle + b(\theta)e^{i\phi}|1\rangle \quad (1)$$

其中, a 和 b 分别表示处于 $|0\rangle$ 态和 $|1\rangle$ 态的归一化几率振幅,满足 $a^2 + b^2 = 1$ 。理想情况下, $a = \cos\theta/2$, $b = \sin\theta/2$ 。(1) 式中所有可能的叠加态构成一个量子比特球 (如图 1b), θ 和 ϕ 分别表示态矢量与极轴的夹角以及态矢量在 xy 平面内的位相角。量子比特球与光学 Bloch 球等价, (1) 式中的 θ 值就等于光学 Bloch 方程中的脉冲输入面积 (input pulse area)。

由 (1) 式可知, 对量子比特旋转的操控包含两种途径: 即 θ 旋转和 ϕ 旋转。其中, 量子比特的 ϕ 旋转称为自由旋转 (或位相旋转); 而量子比特的 θ 旋转则称为动力旋转, 它对应于共振激发时的 Rabi 振荡。在实验中, 通过调节激发脉冲的强度实现 θ 旋转, 通过调节两个 $\pi/2$ 脉冲的延时实现 ϕ 旋转。实验采用掺钛蓝宝石脉冲激光作为激发光源, 脉冲宽度为 9.3 ps, 脉冲重复频率为 80 MHz。实验过程中半导体量子点样品恒温在 5 K。半导体量子点的光致发光信号经过物镜收集后传输到光谱仪, 在面阵 CCD 上得到多个量子点在空间和频谱上分立的像 (如图 1c)^[15]。由 CCD 上像点的光子计数值表示该量子点的光致发光强度从而得到其激发态的激子数。

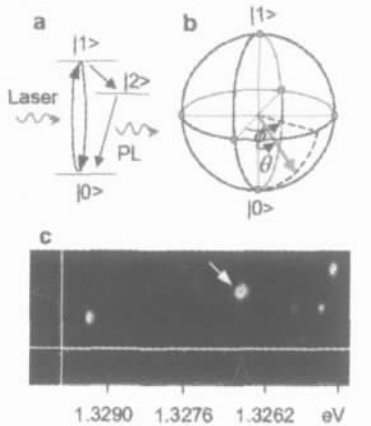


图 1 (a) 半导体量子点的激子能级结构图; (b) 二能级系统叠加态波函数构成的量子比特球; (c) 半导体量子点的光谱成像。

Fig. 1 (a) The exciton level configuration of a semiconductor quantum dot; (b) The qubit sphere; (c) Spectral image of the semiconductor quantum dot.

2.2 量子比特位相旋转及其品质因子 Q_0

在两个脉冲的间歇期间, 波函数态矢量在量子比特的赤道面内作旋转, 旋转的位相角 ϕ 与脉冲延时 t_d 和脉冲激光频率 ν 的关系为: $\phi = \nu t_d$ 。经过第二个 $\pi/2$ 脉冲的作用后, 激发态 $|1\rangle$ 上的粒子数随位相角 ϕ 的不同而振荡。当 $\phi = (2k+1)\pi$ ($k=0, 1, 2, \dots$) 时, 经过第二个 $\pi/2$ 脉冲的作用后系统的态矢量指向量子比特球的南极 (如图 2a 所示), 此时激发态上的粒子数达到极小值; 当 $\phi = 2k\pi$ ($k=0, 1, 2, \dots$) 时, 经过第二个 $\pi/2$ 脉冲的作用后系统的态矢量指向量子比特球的北极 (如图 2b 所示), 此时激发态上的粒子数达到极大值。图 2c 和图 2e 中的两幅插图分别是在两个脉冲的重叠区间和非重叠区间激发态粒子数随位相角 ϕ 在 4π 范围内的振荡关系 (点为实验观测值, 线为理论拟合值)。图 2d 给出了激发态粒子数的极大值和极小值随位相角 ϕ 变化的实验观测点和理论模拟曲线, 图中可见, 激发态粒子数的极大值与极小值的差随位相角 ϕ 值的增大而指数衰减。这种衰减是由量子系统中的解相干效应造成的。当 $\phi \approx 9.8 \times 10^4$ 时 (对应时间延时为 45

ps), 粒子数振荡的振幅下降到 $1/e$ 。

对于一个能级间距为 ΔE 、解相干时间为 T_2 的二能级系统, 其量子比特自由旋转的品质因子 Q_0 的定义式为:

$$Q_0 = (\Delta E/\eta)T_2 = 2\pi\nu T_2 \quad (2)$$

其中 ν 为 ΔE 所对应的光频 ($\Delta E = h\nu$), νT_2 则表示在解相干时间内振荡的次数 (即量子比特旋转的圈数): $N_{\text{rot}}(t=T_2)$ 。而在 $t=T_2$ 时, 其振荡的振幅 A_{osc} 衰减到归一化振荡振幅 A_0 的 $1/e$ 。因此量子比特自由旋转的品质因子 Q_0 的另一种表示形式为:

$$Q_0 = 2\pi N_{\text{rot}}(t=T_2) = \phi(A_{\text{osc}}=A_0/e) \quad (3)$$

由图 2d 可知, 该半导体量子点的激子量子比特的自由旋转品质因子的值为: $Q_0 \approx 9.8 \times 10^4$ 。

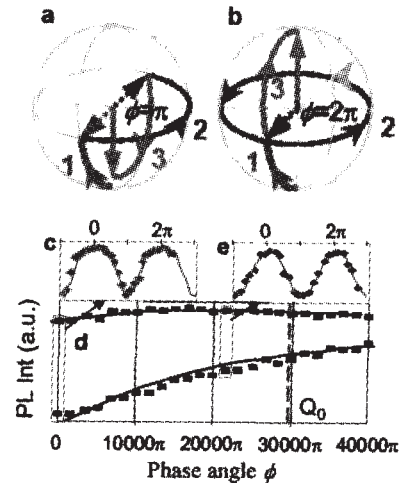


图 2 两个脉冲面积 θ 值为 $\pi/2$, 位相延时为 π (a) 和 2π (b) 的脉冲激发下波函数态矢量运动示意图; (c) 和 (e) 分别为当 ϕ 处于 $(0, 2\pi)$ 和 $(22\,000\pi, 22\,002\pi)$ 范围内时, 激发态粒子数随位相 ϕ 旋转的振荡; (d) 粒子数随 ϕ 的振荡包络。

Fig. 2 Free rotation of the qubit excited by delayed $\pi/2$ pulses. (a) and (b) Trajectory of the pseudospin vector on the qubit sphere when the free rotation angles are π and 2π , respectively. (c) and (e) Populations on the upper level as a function of the free rotation angle in the ranges of $0-2\pi$ and $22\,000\pi-22\,002\pi$, respectively. (d) Envelope of the population oscillation as a function of phase angle.

通过以上分析可知, 对于量子比特的自由旋转 (位相 ϕ 旋转), 其旋转的频率是二能级的能级间隙 ΔE 所对应的光频率 ν 。增大能量间隙 ΔE 有利于提高自由旋转品质因子 Q_0 的值。在位相 ϕ 旋转中, 激发光场的强度是一个固定值, 量子系统的解相干系数是一个与 ϕ 值无关的常量。

2.3 Rabi 振荡和量子比特动力旋转品质因子 Q_R

通过改变脉冲激发场的强度可以操控量子系统波函数态矢量在量子比特球上与极轴的夹角 θ , 从而实现量子比特的 θ 旋转, 即量子比特的动力旋转。其物理过程的实质就是二能级系统在共振激发下的 Rabi 振荡。而且 θ 角的值正好就是 Rabi 振荡中的脉冲输入面积, 它与激发光波的电场强度的关系为: $\theta(t) = (\mu/\eta) \int_{-\infty}^t \varepsilon(t') dt'$, 其中 μ 为二能级系统的跃迁偶极矩, $\varepsilon(t')$ 为激发场的电场强度随时间变化的包络函数。对于 ps/fs 锁模脉冲激光, $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \text{sech}(t/\tau_p)$, ε_0 和 τ_p 分别为脉冲的峰值振幅和脉宽。

对于一个无衰减的二能级系统, 激发态上的粒子数与脉冲输入面积 θ 的关系为: $\rho_{11} = \sin^2(\theta/2)$ 。即粒子数随激发电场强度呈周期振荡, 当 $\theta = (2k+1)\pi$ 时 ($k=0, 1, 2, \dots$), 激发态粒子达到极大值, 系统波函数矢量指向量子比特球的北极 (如图 3a 所示); 当 $\theta =$

$2k\pi$ 时($k=0, 1, 2, \dots$), 激发态的粒子数达到极小值, 系统波函数态矢量指向量子比特球的南极(如图 3b 所示)。图 3c 是半导体量子点中激发态粒子数随 θ 的振荡关系, 点为实验观测值, 实线为光学 Bloch 方程给出的理论模拟曲线。由图 3c 可见, 随着 θ 值的增大, Rabi 振荡的振幅指数衰减。通过定量分析得到在 $\theta \approx 6\pi$ 时其 Rabi 振荡的振幅下降到初始值的 $1/e$ 。造成 Rabi 振荡的振幅衰减的原因是半导体量子点体系中解相干效应随着激发电场强度的增加(即 θ 值增加)而迅速增大。

引入量子比特动力旋转品质因子 Q_R 描述量子比特 θ 旋转的衰减特性, 参照量子比特自由旋转品质因子 Q_0 的计算关系式(3)得到 Q_R 的关系式:

$$Q_R = 2\pi N_{\alpha}(t=T_c) = \theta(A_{\alpha\alpha}/A_0/e) \quad (4)$$

(4) 式与 (3) 式在形式上相似, 差别在于: (3) 式中的 N_{α} 表示态矢量沿量子比特球的赤道的旋转圈数, 而 (4) 式中的 N_{α} 表示态矢量沿量子比特球的子午线的旋转圈数。由图 3c 得到该半导体量子点量子比特的动力旋转品质因子 $Q_R \approx 18$ 。

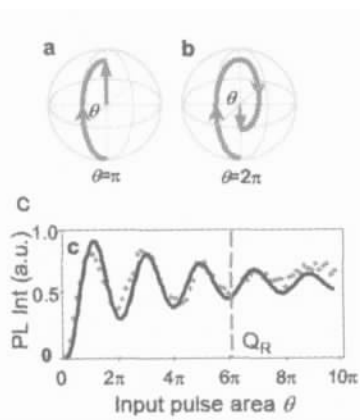


图 3 (a)和(b)分别为 θ 由 0 增加到 θ 和 2π 时系统波函数态矢量旋转示意图; (c) θ 由 0 增加到 10π 激发态粒子数的振荡曲线。

Fig. 3 (a) and (b) Motion of the pseudospin vector corresponding to input pulse areas π and 2π , respectively; (c) Population of the upper level as a function of the input pulse area θ when θ increased from 0 to 10π .

综上所述, 对于量子比特的动力旋转(θ 旋转), 其旋转频率是 Rabi 振荡频率 Ω , 而 Rabi 频率与二能级之间的跃迁偶极矩 μ 成正比。由于 Rabi 振荡频率远远小于位相旋转的频率, 因此, 动力旋转品质 Q_R 远远小于自由旋转品质因子 Q_0 。在动力旋转过程中, 量子系统的解相干系数随激发光场的增加而迅速增大。造成 Rabi 振荡振幅随 θ 增加而衰减的关键因素是系统解相干系数随光场而变化的增量。因此, 在保持相同 θ 值的条件下, 通过适当增加激发脉冲宽度而降低激发光场强度有利于获得较高的动力旋转品质因子 Q_R 。

3 激子 Rabi 振荡退相干

众所周知, 电子-声子相互作用^[19]、双激子态和浸润层的影响^[20]等都会导致量子点中的激子退相干。其中量子点系统在脉冲激光的激发下, 激子真空态 $|0\rangle$ 上部分粒子泄漏到浸润层能级 $|w\rangle$ (如图 4a 所示), 同时浸润层上的粒子将会通过俘获过程进入半导体量子点的激子能级^[19-21]是造成 Rabi 振荡衰减的一个重要退相干过程。本文主要考虑基态的俘获过程, 如图 4a 中 Γ_{wg} 所示。

图 4b 显示了当脉冲宽度为 7 ps, 运用光学 Bloch 方程, 考虑(实线)和忽略(虚线)俘获过程时激子基态 $|2\rangle$ 的粒子数随输入脉冲面积的变化关系。由图 4b 可见, 向浸润层的泄漏可以得到与实验相似的衰减速率, 但随着输入脉冲面积的增大, 更多的粒子会泄漏到浸润层中, 造成激子态 $|1\rangle$ 上粒子数的减少, 进而导致基态

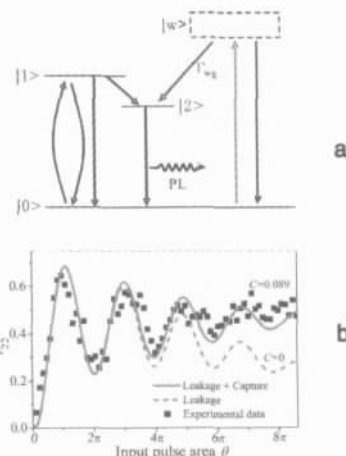


图 4 (a) 激子到浸润层的泄漏和被激子基态 $|2\rangle$ 俘获过程示意图; (b) 考虑和忽略俘获过程时激子基态粒子数随输入脉冲面积的变化关系。

Fig. 4 (a) A schematic representation of the excitons leakage to wetting layer and captured by excitonic ground state $|2\rangle$ in this system; (b) Numerical simulation of population of ground state ρ_2 as a function of input pulse area θ

$|2\rangle$ 上粒子数减少, 从而出现模拟曲线的下降趋势, 这与实验结果不符; 而加入俘获过程之后的理论计算结果与实验数据符合较好, 这说明粒子向浸润层泄漏并通过俘获过程回到量子点中是导致 Rabi 振荡衰减的两个主要退相干过程。

4 激子自旋操控

近年来, 自旋由于具有长相干寿命成为量子计算、量子信息中的一种极有前景的信息载体, 如何对量子系统中的自旋进行操控是其应用的关键。由分子束外延方法制备的半导体量子点具有形状各向异性, 即 x 方向和 y 方向的尺寸不同。这种形状各向异性导致激子激发态 $|1\rangle$ 分裂成两个偏振正交的本征态 $|x\rangle$ 和 $|y\rangle$ ^[22], 且这两个偏振态上粒子的自旋不同。因此这两个态上粒子数的交换等同于系统自旋翻转。通过操纵两态粒子数就可以实现对系统自旋的操纵。使用线偏振脉冲光激发此量子点体系, 通过改变偏振光偏振方向与态 $|x\rangle$ 和 $|y\rangle$ 间的夹角, 可以实现两态上激子数的不同分布。如图 5 所示, 若偏振光偏振方向与两态间夹角为 $\pi/4$ (左上脉冲), 激子将同时被激发到态 $|x\rangle$ 和态 $|y\rangle$, 并且这两态上粒子数运动基本相同; 若运用两个不同偏振方向的脉冲激发量子点 (右上脉冲), 第一个脉冲偏振方向与态 $|y\rangle$ 平行, 脉冲面积为 π , 此脉冲过后, 绝大部分粒子将被激发到态 $|y\rangle$, 一段时间间隔后输入与两态间夹角为 $\pi/4$ 的第二个脉冲, 在脉冲面积为 2π 处, 大部分粒子跃迁到态 $|x\rangle$ (如图 5d, e 中虚线所示), 从而实现了两个正交态之间的粒子数交换, 也就是实现了自旋的翻转。可见, 通过调节入射脉冲的偏振方向以及入射脉冲面积可对量子点中激子及自旋进行操控。

5 单光子发射

高效单光子和纠缠光子对在量子信息和量子保密通讯中也有广泛应用。图 1a 的量子点体系受到脉冲激发后产生 1 个电子-空穴对, 通过声子作用电子-空穴对无辐射弛豫到激子基态 $|2\rangle$, 然后复合发射光子, 故半导体量子点亦可作为一种很好的单光子源^[23]以及纠缠光子对源。采用量子回归理论结合光学 Bloch 方程^[24], 分析后可知: 对于固定脉宽的脉冲激发, 随着输入脉冲面积 θ 的增大, 产生多个光子的几率变大, 但在脉冲面积 $\theta \approx \pi$ 处, 产生单光子效率最高; 减小激发脉冲宽度, 可以提高单光子发射效率。

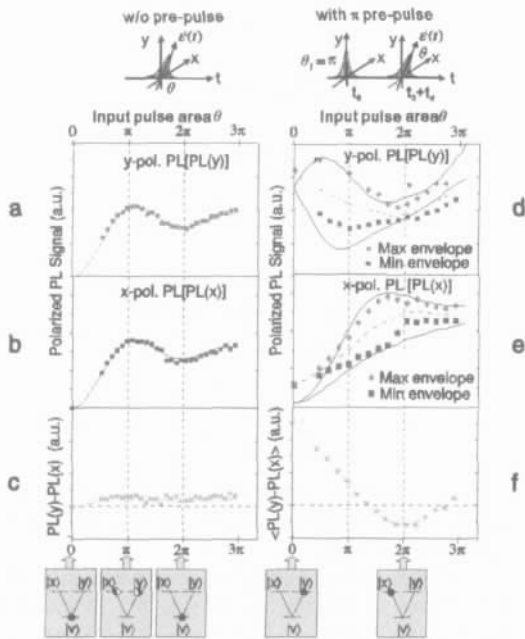


图5 用单个脉冲(左侧)和两个脉冲(右侧)激发量子点V型三能级体系,探测到的光致发光信号。(a)和(b)分别为单个脉冲激发下,y偏振和x偏振方向上光致发光信号随输入脉冲面积的变化关系。(c)x和y偏振方向上光致发光信号的强度差。(d)和(e)分别为两个脉冲激发下,y偏振和x偏振方向上光致发光信号随输入脉冲面积的变化关系,其中第一个脉冲为y偏振,脉冲面积为 π ,第二个脉冲与两偏振方向间的夹角为 $\pi/4$ 。(f)x和y偏振方向上光致发光信号的强度差。

Fig. 5 Experimental evolution of the three-level V system, using single-pulse (left) and two-pulse excitation (right). (a) y-polarized and (b) x-polarized PL signal as a function of pulse area, for an excitation polarization angle $\pi/4$. The difference $PL(y)-PL(x)$ is plotted in (c). (d) y-polarized and (e) x-polarized PL signal as a function of pulse area, using a π prepulse with angle $\pi/2$. The temporal delay between the two pulses was fixed, while the pulse area of the second pulse with angle $\pi/4$ was varied. (f) Difference between the averages of $PL(x)$ and $PL(y)$.

6 结论

在半导体量子点激发态激子构成的量子比特中,采用共振脉冲激发实现了 10π 的Rabi振荡,其量子比特的动力旋转(θ 旋转)的品质因子约为18;采用两个延时可控 $\pi/2$ 脉冲激发实现了量子比特的位相旋转(ϕ 旋转),其量子比特的自由旋转的品质因子达到 9.8×10^4 。通过与实验数据的对比可以发现,粒子从浸润层到量子点的俘获过程是造成其Rabi振荡衰减的一个重要退相干过程。实验也证明了用多个偏振脉冲激发量子点体系可以实现对激子数的调控。对固定脉宽脉冲激发,可以在脉冲面积约为 π 处得到较高的单光子发射效率,半导体量子点可以作为很好的单光子及纠缠光子对源。

(致谢:对中国科学院物理研究所薛其坤研究员、陈东敏研究员和美国Texas大学Austin分校的C. K. Shih教授,以及A. Muller和P. Bianucci给予的帮助和有益讨论,作者深表谢意。)

参考文献(References)

- [1] BENNETT C H, DIVINCENZO D P. Quantum information and computation [J]. Nature, 2000, 404: 247- 255.
- [2] BIOLATTI E, IOTTI R C, ZANARDI P, et al. Quantum information

processing with semiconductor macroatoms [J].Phys. Rev. Lett., 2000, 85: 5 647- 5 650.

- [3] LI X Q, WU Y W, STEEL D, et al. An all- optical quantum gate in a semiconductor quantum dot [J].Science, 2003, 301: 809- 811.
- [4] CHIORESCU I, NAKAMURA Y, HARMANS C J P M, et al. Coherent quantum dynamics of a superconducting flux qubit [J].Science, 2003, 299: 1 869- 1 871.
- [5] BONADEO N H, ERLAND J, GAMMON D, et al. Coherent optical control of the quantum state of a single quantum dot [J].Science, 1998, 282: 1 473- 1 476.
- [6] CHEN G, BONADEO N H, STEEL D G, et al. Optically induced entanglement of excitons in a single quantum dot [J].Science, 2000, 289: 1 906- 1 909.
- [7] WANG Q Q, MULLER A, CHENG M T, et al. Coherent control of a V- type three- level system in a single quantum dot [J].Phys. Rev. Lett., 2005, 95: 187 404.
- [8] ZHOU H J, CHENG M T, LIU S D, et al. Complex probability amplitudes of three states in a V- type system with two orthogonal sub- states [J].Physica E, 2005, 28: 219- 224.
- [9] WANG Q Q, MULLER A, BIANUCCI P, et al. Quality factors of qubit rotations in single semiconductor quantum dots [J].Appl. Phys. Lett., 2005, 87: 031 904.
- [10] STIEVATER T H, LI X Q, STEEL D G, et al. Rabi oscillations of excitons in single quantum dots [J].Phys. Rev. Lett., 2001, 87: 133 603.
- [11] HTOON H, TAKAGAHARA T, KULIK D, et al., Interplay of Rabi oscillations and quantum interference in semiconductor quantum dots [J].Phys. Rev. Lett., 2002, 88: 087 401.
- [12] ZRENNER A, BEHAM E, STUFLER S, et al. Coherent properties of a two- level system based on a quantum- dot photodiode [J]. Nature, 2002, 418: 612- 614.
- [13] BORRI P, LANGBEIN W, SCHNEIDER S, et al. Rabi oscillations in the excitonic ground- state transition of InGaAs quantum dots [J].Phys. Rev. B, 2002, 66: 081 306(R).
- [14] WANG Q Q, MULLER A, BIANUCCI P, et al. Decoherence processes during optical manipulation of excitonic qubits in semiconductor quantum dots [J].Phys. Rev. B, 2005, 72: 035 306.
- [15] FÖRSTNER J, WEBER C, DANCKWERTS J, et al. Phonon- assisted damping of Rabi oscillations in semiconductor quantum dots [J].Phys. Rev. Lett., 2003, 91: 127 401.
- [16] VILLAS- B?AS J M, ULLOA SERGIO E, GOVOROV A O. Decoherence of Rabi oscillations in a single quantum dot [J]. Phys. Rev. Lett., 2005, 94: 057 404.
- [17] BAKLENOV O, NIE H, CAMPBELL J C, et al. Long- wavelength luminescence from In_{0.5}Ga_{0.5}As/GaAs quantum dots grown by migration enhanced epitaxy [J].J. Vac. Sci. Technol. B, 1999, 17: 1 124- 1 126.
- [18] HTOON H, KULIK D, BAKLENOV A, et al. Carrier relaxation and quantum decoherence of excited states in self - assembled quantum dots [J].Phys. Rev. B, 2001, 63: 241 303.
- [19] RAYMOND S, HINZEL K, FAFARD S, et al. Experimental determination of Auger capture coefficients in self - assembled quantum dots [J].Phys. Rev. B, 2000, 61: (R)16 331- 16 334.
- [20] USKOV A V, MCLNERNEY J, ADLER F, et al. Auger carrier capture kinetics in self - assembled quantum dot structures [J]. Appl. Phys. Lett., 1998, 72: 58- 60.
- [21] ZHOU H J, LIU S D, CHENG M T, et al. Rabi oscillation damped by exciton leakage and Auger capture in quantum dots [J].Optics Letters, 2005,30:3 213- 3 215.
- [22] MULLER A, WANG Q Q, BIANUCCI P, et al. Determination of anisotropic dipole moments in self - assembled quantum dots using Rabi oscillations [J].Appl. Phys. Lett., 2004, 84: 981- 983.
- [23] MICHLER P, IMAMOGLU A, MASON M D, et al. Quantum correlation among photons from a single quantum dot at room temperature [J].Nature, 2000, 406: 968- 970.
- [24] 李耀义,程木田,周慧君,等. 脉冲激发三能级体系半导体量子点的单光子发射效率[J]. 物理学报, 2006(印刷中).

(责任编辑 胡春华)