

单量子点在双脉冲激发下偏振光子发射的统计特性*

古丽娜¹⁾ 王东升²⁾ 彭勇刚²⁾ 郑雨军^{2)†}

1) (昌吉学院物理系, 昌吉 831100)

2) (山东大学物理学院, 济南 250100)

(2010年8月3日收到; 2011年1月24日收到修改稿)

用产生函数 (generating function) 方法对单个半导体量子点系统在外加双脉冲场作用下发射偏振 (x 偏振和 y 偏振) 光子的统计性质进行了研究. 研究表明, 量子相干对单量子点系统的吸收线型、Mandel 参数 Q 与 x 偏振光子和 y 偏振光子之间的高阶交叉关联具有显著的影响.

关键词: 量子点, 三能级体系, 产生函数, 双脉冲

PACS: 42.50.-p, 33.80.-b

1. 引言

半导体量子点因其载流子在三维空间上都受到限制而具有和原子相似的分立能级结构, 并且可以通过控制其大小、形状等参数调节其能级结构^[1]. 近年来, 对半导体量子点的研究有许多进展, 如 Li 等^[2]用 π 脉冲在三能级体系中实现了受控旋转门, 也可以通过控制脉冲相位实现对量子态的操控^[3,4]. 同时, 量子点也可以作为一个利用外加激光脉冲场调控的高效少光子发射源^[5-9].

近期的研究表明, 单量子点体系可以用 V 型三能级体系描述: 单一的基态 $|g\rangle$ 和两个近简并的激发态 $|x\rangle$ 和 $|y\rangle$ ^[3,4,9]. 基态 $|g\rangle$ 与激发态 $|x\rangle$ 和 $|y\rangle$ 之间存在偶极跃迁, 相应的电偶极矩为 μ_{gx} 和 μ_{gy} , 但两个近简并的激发态 $|x\rangle$ 与 $|y\rangle$ 之间没有偶极跃迁. 根据 V 型三能级体系的两个电偶极矩的相对方向, 可以将其分成电偶极矩平行和电偶极矩垂直两种情况来讨论. 文献 [10, 11] 采用产生函数 (generating function) 理论方法对在单一连续外场和单脉冲作用下单量子点的光子发射特性^[12-16] 以及量子相干的影响和其他的有关动力学过程^[17-21] 进行了研究. 研究表明, 高阶累积统计量能够反映出系统动力学更丰富的性质.

本文用产生函数方法对 V 型三能级单量子点

体系在外加双脉冲场作用下单个半导体量子点系统发射 x 偏振光子和 y 偏振光子的性质以及虚光子发射过程进行了研究. 另外, 也对量子相干对系统的线型和 x 偏振光子和 y 偏振光子对应的 Mandel 参数 Q 以及 x 偏振光子和 y 偏振光子之间线性和非线性交叉关联的影响进行了研究.

2. 基本理论

研究单个半导体量子点在双脉冲场激发下发射光子的统计性质. 双脉冲激光场可以表示为^[21,22]

$$\begin{aligned} \mathcal{E}(t) = & \mathcal{E}_0(t) \cos(\omega_L t) \\ & + \mathcal{E}_0(t - t_d) \cos(\omega_L(t - t_d)), \end{aligned} \quad (1)$$

式中 ω_L 是外加激光场的角频率, t_d 是两个脉冲之间的延迟时间. 外加激光场的偏振方向和电偶极矩之间的夹角用 θ_i ($i = 1, 2$) 表示, 其中下标 i 代表第 i 个脉冲.

在单个半导体量子点系统中, 激光脉冲场和偶极矩之间的相互作用可以表示为

$$H_{se} = \boldsymbol{\mu} \cdot \boldsymbol{\mathcal{E}}(t). \quad (2)$$

定义 Rabi 频率 $\Omega_{ij} = \left(\sum \mu_{ij} \right) \mathcal{E}_0(t) e^{i\varphi} / \hbar$, $\phi_n = (n-1)\omega_L t_d$ 表示第 n 个脉冲与第 $n-1$ 个脉冲之间的延迟相位.

系统的密度矩阵满足 Liouville 方程^[23,24]

* 国家自然科学基金 (批准号: 10674083, 10874102) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 200804220004) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: yzheng@sdu.edu.cn

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \rho(t) = [H, \rho(t)]. \quad (3)$$

虽然可以直接计算密度矩阵随时间的演化,但为了能获得量子点系统光子发射的有关信息,定义产生函数^[21]为

$$G = \sum_{n,m,l} \rho^{(n+m+l)}(xyv) s_x^n s_y^m s_v^l. \quad (4)$$

这里参数 s_x, s_y 和 s_v 称为计数参数, $\rho^{(n+m+l)}(xyv)$ 表示系统发射 n 个 x 光子、 m 个 y 光子和 l 个虚光子所对应的密度矩阵. 双脉冲激发下 V 型三能级单量子点体系的产生函数方程可以表示为^[9,12,14,16]

$$\begin{aligned} \dot{G}_{gg} &= -\frac{i}{2} \{ \Omega_x G_{xg} + \Omega_y G_{yg} \} + \frac{i}{2} \{ \Omega_x G_{gx} + \Omega_y G_{gy} \}, \\ &+ 2\gamma_x s_x G_{xx} + 2\gamma_{xy} s_v G_{xy} \\ &+ 2\gamma_{xy} s_v G_{yx} + 2\gamma_y s_y G_{yy}, \\ \dot{G}_{xx} &= -\frac{i}{2} \Omega_x G_{gx} + \frac{i}{2} \Omega_x G_{xg} \\ &- 2\gamma_x G_{xx} - \gamma_{xy} G_{xy} - \gamma_{yx} G_{yx}, \\ \dot{G}_{yy} &= -\frac{i}{2} \Omega_y G_{gy} + \frac{i}{2} \Omega_y G_{yg} \\ &- 2\gamma_y G_{yy} - \gamma_{xy} G_{xy} - \gamma_{yx} G_{yx}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{G}_{gx} &= -i(\omega_{gx} + \omega_L) G_{gx} - \frac{i}{2} \{ \Omega_x G_{xx} + \Omega_y G_{yx} \} \\ &+ \frac{i}{2} \Omega_x G_{gg} - \gamma_x G_{gx} - \gamma_{xy} G_{gy}, \\ \dot{G}_{gy} &= -i(\omega_{gy} + \omega_L) G_{gy} - \frac{i}{2} \{ \Omega_x G_{xg} + \Omega_y G_{yy} \} \\ &+ \frac{i}{2} \Omega_y G_{gg} - \gamma_y G_{gy} - \gamma_{xy} G_{gx}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{G}_{xy} &= -i\omega_{xy} - \frac{i}{2} \Omega_x G_{gy} + \frac{i}{2} \Omega_y G_{xg} \\ &- \gamma_x G_{xy} - \gamma_{xy} G_{yy} - \gamma_{xy} G_{xx} - \gamma_y G_{xy}, \end{aligned}$$

同时有

$$\begin{aligned} G_{yx} &= G_{xy}^*, \\ G_{xg} &= G_{gx}^*, \\ G_{yg} &= G_{gy}^*. \end{aligned}$$

引入与光子发射相应的产生函数

$$Y(s_x, s_y, s_v, t) = \sum_i G_{ii}(s_x, s_y, s_v, t). \quad (6)$$

通过函数 $Y(s_x, s_y, s_v, t)$ 可以提取系统平均发射 x 偏振光子数和 y 偏振光子数、Mandel 参数 Q 、虚光子发射及发射光子的概率等有关物理量. 由产生函数理论方法知^[10,11,25], 系统发射光子的统计的高阶矩和交叉关联为

$$\langle N_{x(y)(v)}^{(m)} \rangle(t) = \left\langle \prod_{i=1}^m (N_{x(y)(v)} - i + 1) \right\rangle$$

$$= \frac{\partial^m}{\partial s_{x(y)(v)}^m} \times Y(s_x, s_y, s_v, t) \Big|_{s_x=s_y=s_v=1},$$

$$\begin{aligned} \langle N_x^{(m)} N_y^{(n)} \rangle(t) &= \left\langle \prod_{k=1}^m \prod_{l=1}^n (N_x - k + 1)(N_y - l + 1) \right\rangle \\ &= \frac{\partial^{m+n}}{\partial s_x^m \partial s_y^n} Y(s_x, s_y, s_v, t) \Big|_{s_x=s_y=s_v=1}, \end{aligned} \quad (7)$$

当 $m = 1$ 时, 得到平均发射光子数; 当 $m = 1, n = 1$ 时, 得到线性交叉关联 $\langle N_x N_y \rangle$; 当 $m = 1(2), n = 2(1)$ 时, 得到非线性交叉关联 $\langle N_x N_y^{(2)} \rangle$ ($\langle N_x^{(2)} N_y \rangle$). 同时, 总的统计的一般高阶矩(包括 x 偏振、 y 偏振和虚光子)表示为:

$$\begin{aligned} \langle N^{(m)} \rangle(t) &= \left\langle \prod_{i=1}^m (N - i + 1) \right\rangle \\ &= \frac{\partial^m}{\partial s^m} Y(s_x = s_y = s_v = s, t) \Big|_{s=1}. \end{aligned} \quad (8)$$

x 偏振和 y 偏振发射光子和总光子的 Mandel 参数 Q 可以表示为

$$\begin{aligned} Q_x &= \frac{\langle N_x^{(2)} \rangle - \langle N_x^{(1)} \rangle^2}{\langle N_x^{(1)} \rangle}, \\ Q_y &= \frac{\langle N_y^{(2)} \rangle - \langle N_y^{(1)} \rangle^2}{\langle N_y^{(1)} \rangle}, \\ Q &= \frac{\langle N^{(2)} \rangle - \langle N^{(1)} \rangle^2}{\langle N^{(1)} \rangle}. \end{aligned} \quad (9)$$

另外, 体系的线型表示为

$$\begin{aligned} I_x(\omega_L) &= \frac{d}{dt} \langle N_x^{(1)} \rangle(t) \Big|_{t \rightarrow \infty}, \\ I_y(\omega_L) &= \frac{d}{dt} \langle N_y^{(1)} \rangle(t) \Big|_{t \rightarrow \infty}, \\ I(\omega_L) &= \frac{d}{dt} \langle N^{(1)} \rangle(t) \Big|_{t \rightarrow \infty}, \end{aligned} \quad (10)$$

3. 结果及讨论

与单脉冲情况不同, 外加两个脉冲激光场时, 作用在量子点系统上总的电场是这两个脉冲场的叠加, 而这两个脉冲场之间的相位变化将导致叠加场发生显著的变化. 因此, 系统对两个脉冲之间的延迟时间非常敏感. 在本文中, 设定延迟时间为 $t_d = 2\tau_p$, 其中 τ_p 为高斯脉冲的半宽度. 调节两脉冲之间的相位在 $0-2\pi$ 变化, 得到各参量的包络. 本文所用的参数与文献[26]中的实验值相同, 均为 $\gamma_x =$

$\gamma_y = 2.59 \times 10^{-12}$ Hz, $\omega_{xy} = 9.14 \times 10^{10}$ Hz, $\tau_p = 15 \times 10^{-12}$ s, $t_d = 30 \times 10^{-12}$ s, $\theta_1 = \theta_2 = \pi/4$. 脉冲面积 $\Theta = \pi/\sqrt{2}$, 初态在基态 $|\psi_0\rangle = |G\rangle$.

图 1 给出了脉冲面积均为 $\Theta = \pi/\sqrt{2}$ 的两个脉冲作用到 V 型三能级单量子点体系上时, 系统总发射光子数、x 偏振光子数、y 偏振光子数、虚光子数和 Mandel 参数 Q 随失谐频率 Δ 的变化关系. 失谐频率定义为

$$\Delta = \omega_L + \omega_{gy}$$

应当注意, 在偶极矩垂直的情况下 (图 1(a)), 没有虚光子的发射过程, 表示总平均光子数的曲线 (实线) 只有一个单一的峰值, 即只有一个吸收峰. 由于没有 x 偏振和 y 偏振之间的相干 ($\gamma_{xy} = 0$), 因此总光子数是 x 偏振和 y 偏振部分的直接叠加. 但是, 在偶极矩平行的情况下 (图 1(b)), 表示总平均光子数的曲线有两个峰值. 这是由于

相干项 γ_{xy} 的影响, 在 $\Delta = 0.5\omega_{xy}$ 处, 即双脉冲同等激发两个激发态时, 总发射光子数的曲线有最小值, 所以出现了两个吸收峰. 对于 x 偏振发射光子和 y 偏振发射光子, 在偶极矩垂直和平行这两种情况下, 总平均光子数没有明显的变化. 然而, 它们的统计性质却发生了明显的变化. 从 Mandel 参数 Q 可以看出: 当偶极矩垂直时, 表现出反聚束现象; 当偶极矩平行时, 即存在相干项 γ_{xy} 的影响时, 这种反聚束现象变得更加明显. 同时, 由于 γ_{xy} 的影响, Q 与 $Q_{x(y)}$ 的包络之间表现出了比垂直情况下更为复杂的非线性关系. 另外还可以看出, 平均虚光子数 (点线) 表现出了明显的负值, 这是因为在虚光子发射过程中存在光子的吸收. 从物理意义上看, 正是虚光子的吸收与发射过程导致了 x 偏振光子和 y 偏振光子之间的量子相干.

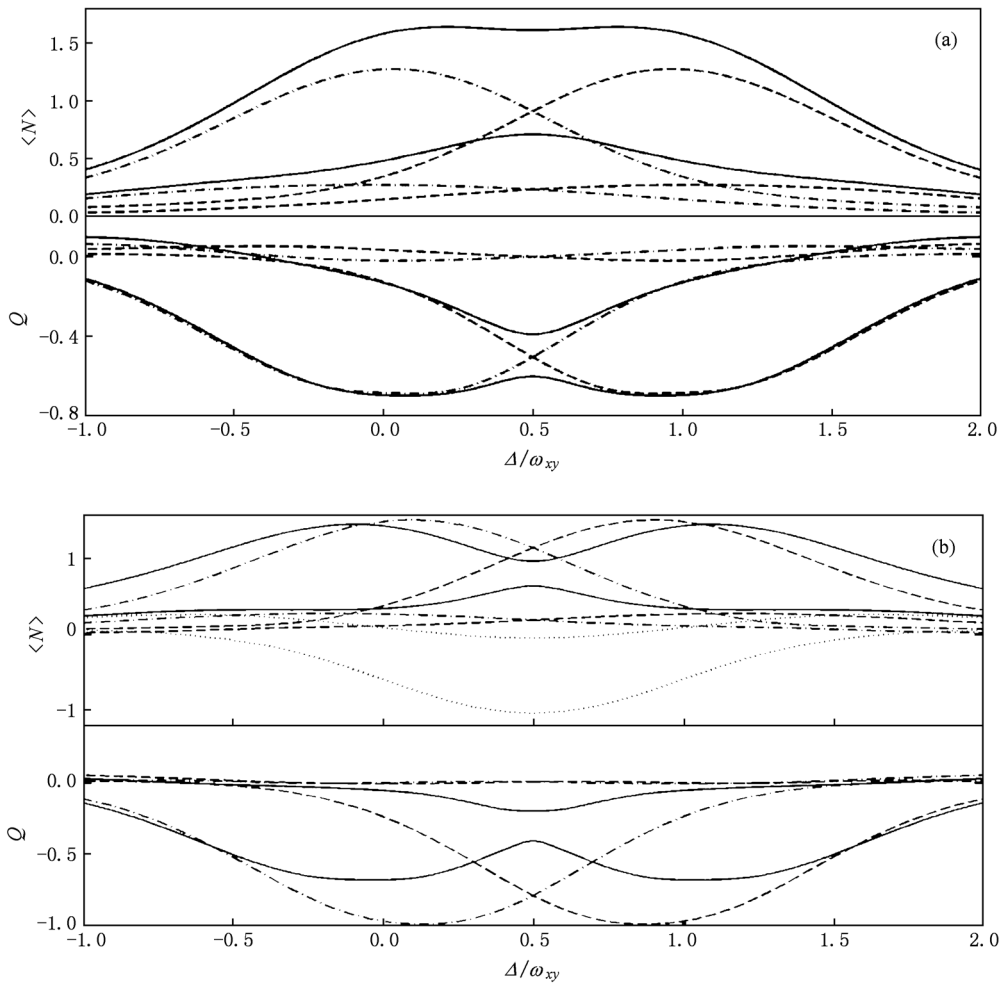


图 1 在双脉冲场作用下, 当延迟时间 $t_d = 2\tau_p$ 时, 总发射光子数、x 偏振发射光子数、y 偏振发射光子数和虚光子数以及 Mandel 参数 Q 随失谐频率的变化关系. 实线、点划线、短划线和点线分别表示总发射光子数、x 偏振光子数、y 偏振光子数和虚光子数. (a) 对应电偶极矩垂直的情况, 即 $\gamma_{xy} = 0$; (b) 对应电偶极矩平行的情况, 即 $\gamma_{xy} = \sqrt{\gamma_x \gamma_y}$

图 2 中给出了交叉关联 $\langle N_x N_y \rangle$, $\langle N_x N_y^{(2)} \rangle$ 和 $\langle N_x^{(2)} N_y \rangle$ 随失谐频率 Δ 的变化关系. 在对单脉冲激发的研究中^[13-16] 已经表明, 交叉关联可以反映出系统更丰富的动力学过程. 从图 2 可以看出, 由于存在 γ_{xy} , 高阶非线性交叉关联 $\langle N_x N_y^{(2)} \rangle$ 和 $\langle N_x^{(2)} N_y \rangle$ 在偶极矩平行的情况比在偶极矩垂直的情况相对

较小. 然而, 线性交叉关联的峰值并没有明显的变化. 另外, 对于 $\langle N_x N_y^{(2)} \rangle$, 由于对应的 y 偏振光子是二阶量, 因而峰值会向 y 偏振的共振方向漂移; 同样, 对于 $\langle N_x^{(2)} N_y \rangle$, 由于对应的 x 偏振光子是二阶量, 因而峰值会向 x 偏振的共振方向漂移. 这说明非线性交叉关联表现出非对称的性质.

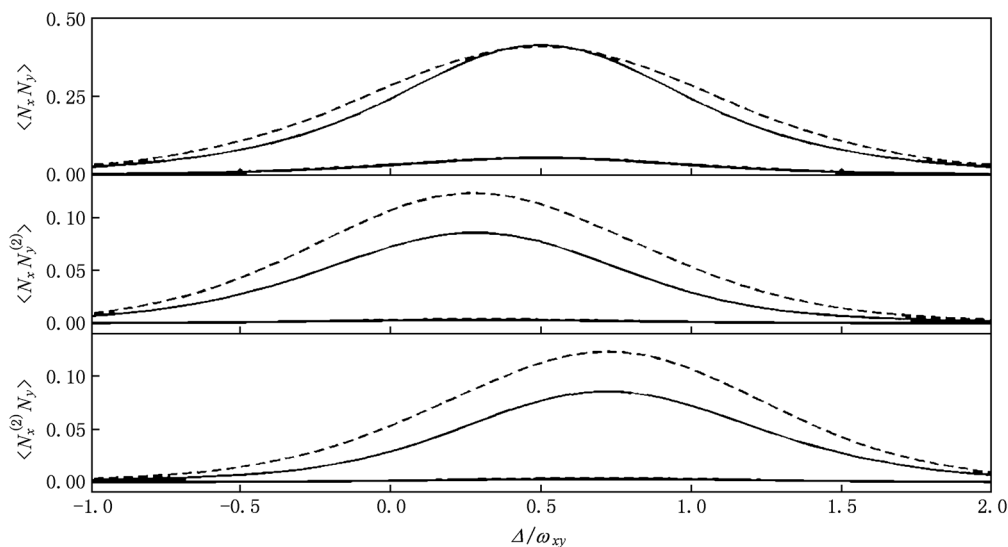


图 2 在双脉冲场作用下单个半导体量子点系统的交叉关联的光谱. 短划线代表偶极矩垂直的情况, 实线代表偶极矩平行的情况.

4. 结 论

本文讨论了 V 型三能级单量子点体系在双脉冲作用下偶极矩平行和垂直两种情况下的 x 偏振光子和 y 偏振光子的吸收线型与 Mandel 参数 Q 以及两者之间的高阶交叉关联和在量子相干项 γ_{xy}

存在时的虚光子发射过程. 在双脉冲作用下, 偶极矩平行和垂直情况下的线型和 Mandel 参数 Q 表现出了不同的行为. 量子相干项 γ_{xy} 对平均光子数以及 Mandel 参数 Q 有显著的影响. 同时, 讨论了 x 偏振光子和 y 偏振光子之间线性和非线性交叉关联, 发现双脉冲作用下包络的交叉关联与单脉冲作用时有相似的性质.

[1] Dong Q R, Niu Z C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1794 (in Chinese) [董庆瑞、牛智川 2005 物理学报 **54** 1794]

[2] Li X, Wu Y, Steel D, Gammon D, Stievater T H, Katzer D S, Park D, Piermarocchi C, Sham L J 2003 *Science* **301** 809

[3] Bonadeo N H, Erland J, Gammon D, Park D, Katzer D S, Steel D G 1998 *Science* **282** 1473

[4] Gammon D, Bonadeo N H, Chen G, Erland J, Steel G 2001 *Physica E* **9** 99

[5] Kim J, Benson D, Kan H, Yamamoto Y 1999 *Nature* **397** 500

[6] Santori C, Fattal D, Vuckovic J, Solomon G S, Yamamoto Y 2002 *Nature* **419** 594

[7] Santori C, Fattal D, Vuckovic J, Solomon G S, Yamamoto Y 2004 *New J. Phys.* **6** 89

[8] 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]

[9] Peng Y, Zheng Y 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 092120

[10] Zheng Y, Brown F L H 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 238305

[11] Zheng Y, Brown F L H 2003 *J. Chem. Phys.* **119** 11814

[12] Peng Y, Zheng Y, Brown F L H 2007 *J. Chem. Phys.* **126** 104303

[13] Zheng Y J, Zhang Z Y, Zhang X Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8194 (in Chinese) [郑雨军、张兆玉、张西忠 2009 物理学报 **58** 8194]

- [14] Peng Y G, Zhang X Z, Zhang Z Y, Zheng Y J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1791 (in Chinese) [彭勇刚、张西忠、张兆玉、郑雨军 2010 物理学报 **59** 1791]
- [15] Wang D S, Zheng Y J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 083202
- [16] Peng Y, Wang D, Zheng Y, Xie S 2010 *Physica E* **42** 2242
- [17] Zheng Y 2008 *J. Chem. Phys.* **129** 246102
- [18] Han B, Zheng Y 2008 *Phys. Rev. A* **78** 015402
- [19] Peng Y, Xie S, Zheng Y, Brown F 2009 *J. Chem. Phys.* **131** 214107
- [20] Han B, Zheng Y 2010 *Chem. Phys.* **370** 151
- [21] Han B, Gu L, Ji Z, Zheng Y 2010 *J. At. Mol. Sci.* **1** 280
- [22] Niu Y, Gong S 2006 *Phys. Rev. A* **73** 053811
- [23] Blum K 1981 *Density Matrix Theory and Applications* (2nd ed) (New York: Plenum Press)
- [24] Mukamel S 1995 *Principles of Nonlinear Optical Spectroscopy* (New York: Oxford University Press)
- [25] Van Kampen N G 1992 *Stochastic Processes in Physics and Chemistry* (Amsterdam: North-Holland)
- [26] Bonadeo N H, Erland J, Gammon D, Park D, Katzer D S, Steel D G 1998 *Science* **282** 1473

Statistics property of polarized photon emission driven by a pair of pulses in single quantum dot^{*}

Gu Li-Shan¹⁾ Wang Dong-Sheng²⁾ Peng Yong-Gang²⁾ Zheng Yu-Ju^{2)†}

1) (Department of Physics, Changji University, Changji 831100, China)

2) (School of Physics, Shandong University, Jinan 250100, China)

(Received 3 August 2010; revised manuscript received 24 January 2011)

Abstract

We study the properties of the x - and the y -polarized photons of the single quantum dot system driven by a pair of pulses using the generating function approach. Our results show that the quantum interference effects on the line shapes and the Mandel's parameter Q of the x - and y -polarized photons and the linear and the nonlinear cross correlations are important.

Keywords: quantum dots, three level system, generating function, a pair of pulses

PACS: 42.50.-p, 33.80.-b

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10674083, 10874102) and the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education, China (Grant No. 200804220004).

[†] Corresponding author. E-mail: yzheng@sdu.edu.cn