

InAs/GaAs 量子点 1.3 μm 单光子发射特性

张志伟 赵翠兰 孙宝权

1.3 μm single photon emission from InAs/GaAs quantum dots

Zhang Zhi-Wei Zhao Cui-Lan Sun Bao-Quan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 237802 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181592

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181592>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[氢化杂质和厚度效应对高斯势量子点中二能级体系量子跃迁的影响](#)

Influence of Hydrogen-like impurity and thickness effect on quantum transition of a two-level system in an asymmetric Gaussian potential quantum dot

物理学报.2018, 67(17): 177801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180341>

[室温下表面极化效应对量子点带隙和吸收峰波长的影响](#)

Effects of surface polarization on the bandgap and the absorption-peak wavelength of quantum dot at room temperature

物理学报.2017, 66(13): 137802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.137802>

[半导体三量子点电磁感应透明介质中的非线性法拉第偏转](#)

Nonlinear Faraday rotation in electromagnetically induced transparency medium of semiconductor three quantum dots

物理学报.2016, 65(24): 247801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.247801>

[脉冲激光原位辐照对 InAs/GaAs\(001\) 量子点生长的影响](#)

Effects of in-situ surface modification by pulsed laser on InAs/GaAs (001) quantum dot growth

物理学报.2016, 65(11): 117801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.117801>

[利用 N 型半导体纳米材料抑制单量子点的荧光闪烁特性](#)

Suppression of the blinking of single QDs by using an N-type semiconductor nanomaterial

物理学报.2015, 64(24): 247803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.247803>

InAs/GaAs 量子点 1.3 μm 单光子发射特性*张志伟¹⁾ 赵翠兰^{1)†} 孙宝权^{2)‡}

1) (内蒙古民族大学物理与电子信息学院, 通辽 028043)

2) (中国科学院半导体研究所, 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

(2018年8月24日收到; 2018年9月26日收到修改稿)

采用双层耦合量子点的分子束外延生长技术生长了 InAs/GaAs 量子点样品, 把量子点的发光波长成功地拓展到 1.3 μm . 采用光刻的工艺制备了直径为 3 μm 的柱状微腔, 提高了量子点荧光的提取效率. 在低温 5 K 下, 测量得到量子点激子的荧光寿命约为 1 ns; 单量子点荧光二阶关联函数为 0.015, 显示单量子点荧光具有非常好的单光子特性; 利用迈克耳孙干涉装置测量得到单光子的相干时间为 22 ps, 对应的谱线半高全宽度为 30 μeV , 且荧光谱线的线型为非均匀展宽的高斯线型.

关键词: InAs/GaAs 量子点, 1.3 μm , 单光子发射

PACS: 78.67.Hc, 78.55.Cr, 42.50.Ct

DOI: 10.7498/aps.67.20181592

1 引言

由于光通信波段单光子源在光纤传输中的优势, 研制该波段半导体单量子点单光子源得到了格外的重视^[1-8]. 目前在自组织半导体量子点体系中, InP 基的 InAs/InP 单量子点可以制备出光通信波段中 O 带和 C 带的单光子源. 但是由于形成分布布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR) 的两种半导体材料 InP 和 InGaAsP 的折射率差比较小, 导致很难形成高品质因子的 DBR 微腔, 从而影响单光子发射的提取效率^[9,10]. 对应 GaAs 基的 InGaAs 量子点, Olbrich 等^[11] 将 InGaAs 量子点嵌入应力缓冲层中, 从而将量子点的发光波长红移到大于 1 μm . Seravalli 等^[12] 研究了 InAs 量子点/In_xGa_{1-x}As 限制层/GaAs 衬底结构, 发现通过改变 InAs 和 In_xGa_{1-x}As 层的失配度以及调节 In_xGa_{1-x}As 层的组分, 可以实现量子点发光波长范围为 1300—1550 nm 的调节. 另外, Ozaki 等^[13] 制备了双层 InAs 量子点, 其中包括种子层 (seed

layer) 和有效量子点层 (active layer) 以及两层之间的 GaAs 空间层. 通过调节外延过程中种子层的生长温度、InAs 的沉积量和空间层的厚度等参数, 可以降低种子层量子点的密度, 从而将多余的应力释放到有效层使得有效层量子点的尺寸变大, 量子点发光波长实现红移. 但是该小组生长的量子点密度特别大, 难以通过微区光谱分离出单个量子点谱线. 目前, 关于低密度双层量子点在光通信波段单光子源的报道却很少, 因为耦合量子点需要同时控制两套不同的量子点生长参数, 低密度耦合点的生长非常困难. 在以往的研究中, 研究人员均倾向于生长高密度的耦合量子点, 并做了大量的相关研究, 并证实了双层量子点的生长是一种垂直耦合式结构. 中国科学院半导体所牛智川研究员课题组^[14,15] 采用较高的种子层生长温度 (540—545 °C), 同时将梯度外延生长方法引入双层耦合量子点生长过程, 通过种子层的量子点密度梯度变化实现对耦合层量子点密度的调控. 成功地将量子点密度降低到平均每平方微米一个量子点. 这样可以借助微区荧光光谱测量实现单个量子点的空间

* 国家自然科学基金 (批准号: 11464034) 和内蒙古自治区自然科学基金 (批准号: 2016MS0119) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: nmdzcl@163.com

‡ 通信作者. E-mail: bqsun@semi.ac.cn

分辨.

本文采用双层耦合量子点分子束外延方法生长了 InAs/GaAs 量子点样品, 量子点的波长成功地拓展到 1.3 μm . 并结合量子点外延梯度生长技术得到较稀量子点密度的样品, 采用微区光谱测量可以分辨出单个量子点发光谱线. 为了提高量子点发光的收集效率, 采用光刻的工艺制备了直径为 3 μm 的柱状微腔样品. 在低温 5 K 下, 详细地研究了量子点发光的光谱特性, 激子的荧光寿命, 单光子发射的纯度和单光子的相干时间.

2 实 验

如图 1(a) 所示, 在 (001) 半绝缘 GaAs 衬底上外延生长 300 nm 的 GaAs 缓冲层, 接着生长 GaAs/AlGaAs DBR 反射镜, 底部有 20 对, 顶部有 8 对. 样品微腔由中间的 1λ GaAs 平面腔构成. 量子点发光波长约为 1.3 μm , 与 DBR 腔模匹配. 测量得到微腔的品质因子为 300, 为弱耦合微腔. 双层量子点的生长次序如下: 先用“烧点法”生长了一层量子点, 得到量子点生长临界厚度参数. 然后高温 (670 $^{\circ}\text{C}$) 退火完全解吸附牺牲层中的量子点, 使其不影响接下来的外延生长. 然后关掉基片的旋转, 稍微调低 InAs 的淀积量, 从而梯度生长出种子层量子点, 种子层量子点的生长温度控制在 540 $^{\circ}\text{C}$. 接着种子层上面覆盖 8 nm 的 GaAs 间

隔层, 此时衬底恢复旋转. 在间隔层生长好后在 610 $^{\circ}\text{C}$ 退火 10 min, 然后与种子层相同的角度停止衬底旋转, 衬底降温至 480 $^{\circ}\text{C}$ 进行耦合层梯度量子点密度生长. 由于种子层的应力诱导作用从而优先在由种子层量子点的位置上方成岛, 实现耦合层量子点的密度梯度生长, 接着生长 5 nm 的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 覆盖层和上 DBR 反射镜. Unsleber 等 [16] 研究了不同直径的微柱样品的单光子荧光的提取效率和品质因子的大小关系, 得到最大提取效率在微柱直径为 3 μm . 因此, 本文通过光刻和刻蚀工艺, 制备了直径为 3 μm 的微柱, 由扫描电子显微镜 (scanning electron microscopy, SEM) 得到的量子点微柱形貌如图 1(b) 所示.

量子点微柱样品放在无液氦低温冷头上, 样品的温度为 5 K. 半导体激光器 (PicoQuant, LDH-640 nm) 可以工作在连续或脉冲模式, 激光波长为 640 nm, 脉冲重复频率为 80 MHz. 采用共聚焦显微光谱测量量子点的荧光光谱 (photoluminescence, PL), 其中物镜的数值孔径 (numerical aperture, NA) 为 0.5, 光谱测量由 300 mm 的光谱仪和 InGaAs 线列探测器完成. 时间分辨 PL 光谱采用时间相关单光子测量技术, 单光子探测器为 ID 230 红外单光子探测器, 测量系统的时间分辨率为 100 ps. 利用 Hanbury-Brown and Twiss (HBT) 测量量子点荧光的二阶关联函数, 即检测单光子发射的纯度.

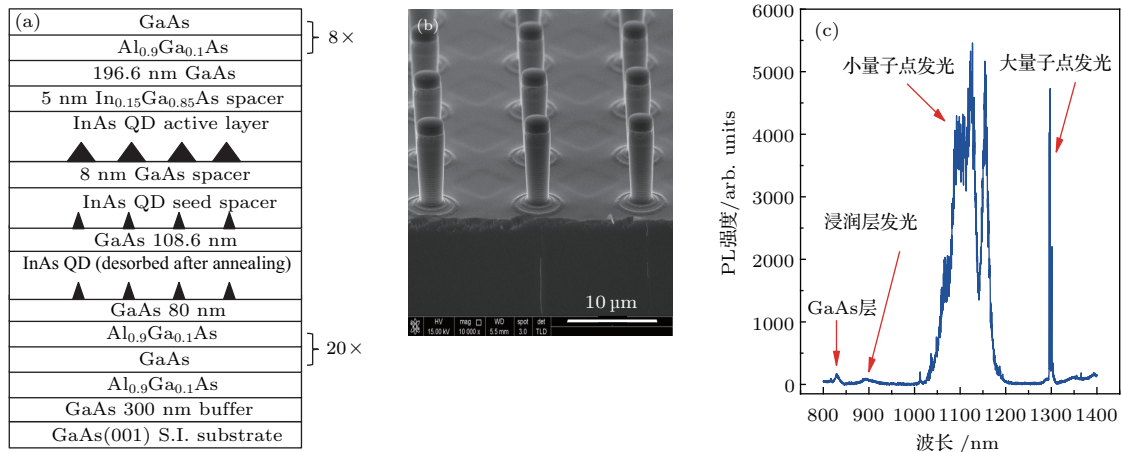


图 1 量子点样品结构、微柱形貌、PL 光谱图 (a) 外延生长量子点样品结构示意图; (b) 制备的量子点微柱 SEM 形貌照片; (c) 双层 InAs/GaAs 量子点样品的宽波长范围 PL 光谱 (800—1400 nm)
 Fig. 1. Structure, micropillar appearance and PL spectrum of quantum dot (QD) sample: (a) Schematic diagram of the QD sample structure grown by molecular beam epitaxy (MBE); (b) SEM image of the QD micropillar; (c) PL spectrum of QD sample measured from 800 nm to 1400 nm.

3 实验结果与分析

首先测量了低温 5 K 下量子点样品的宽波长范围的全光谱图, 如图 1(c) 所示, 光谱测量范围为 800—1400 nm. 其发光峰的指认为: 在 820 nm 附近的小峰来自 GaAs 层发光, 900 nm 附近的荧光来自量子点的浸润层发光; 中心波长在 1100 nm 的大包络发光则来自第一层密度较高的小尺寸量子点 (seed QDs) 的发光, 为系综量子点的发光光谱, 光子统计为经典光谱特性; 在 1300 nm 的锐线来自于大尺寸单量子点 (active QDs) 的发光. 说明我们成功地把 InAs 量子点的波长红移到光通信波段, 并且得到不错的单量子点发光强度. 下面将重点研究在 1300 nm 附近单量子点的光谱特性.

研究的量子点光谱来源于同一样品上的不同微柱上的量子点发光, 具有代表性的 PL 光谱如图 2(a) 所示, 图中清晰地显示一个特别强的发光

峰, 波长位于 1305 nm, 激发功率为 16 μ W. 另外, 旁边的小峰可能来自于其他量子点的发光, 但不会影响我们研究主峰量子点的 PL 光谱特性, 它们彼此是独立分开的. 这说明生长的量子点样品已经达到了可以通过微区光谱分离出单个量子点. 图 2(b) 显示单量子点 PL 强度随激发功率的变化, 可以看到在双对数坐标下 PL 强度随激发功率为线性增大, 且斜率接近 1, 说明 PL 谱线来自于量子点中单激子的辐射发光. 图 2(c) 显示测量的单量子点时间分辨光谱, 用自然指数拟合得到的激子发光寿命为 1.12 ns, 与发光波长在 920 nm 波段单量子点激子寿命相同 [17,18]. 为了研究光通信波段量子点荧光峰的单光子特性, 在连续激光激发下, 采用 HBT 测量了单量子点荧光的二阶关联函数, 如图 2(d) 所示. 拟合得到在零时刻延迟的二阶关联函数 $g^{(2)}(\tau = 0) = 0.015$, 说明单量子点同时发射多光子的概率很低, 具有很好的单光子特性.

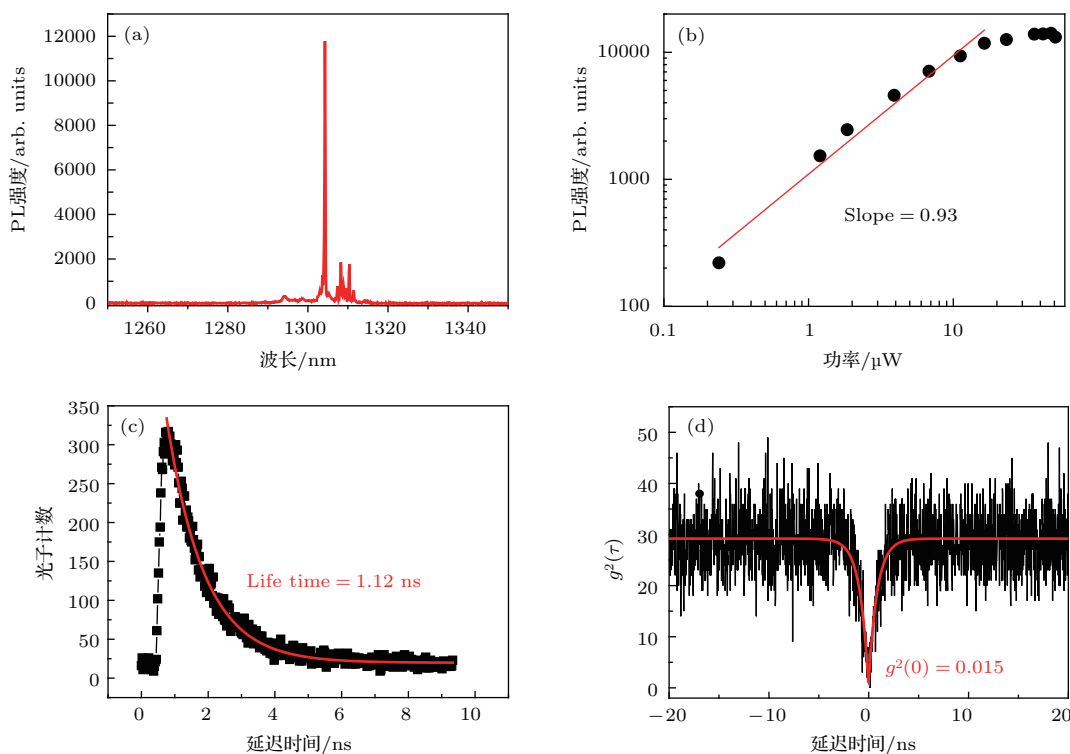


图 2 单量子点的 PL 光谱、PL 强度、时间分辨光谱及二阶关联函数 $g^2(\tau)$ (a) 波长位于 1305 nm 单量子点 PL 光谱; (b) 双对数坐标下荧光强度随激发功率的变化; (c) 量子点激子荧光时间分辨光谱, 拟合得到激子的寿命为 1.12 ns; (d) 在连续光激发下测量的单量子点荧光的 $g^2(\tau)$, 拟合得到的零延迟的 $g^{(2)}(0) = 0.015$

Fig. 2. QD PL, PL intensity, time-resolved PL spectrum and second-order correlation function $g^2(\tau)$: (a) QD PL at wavelength of 1305 nm; (b) PL intensity as a function of excitation power in logarithmic coordinates; (c) time-resolved PL spectrum of QD exciton emission and the obtained exciton lifetime of approximately 1.12 ns; (d) $g^2(\tau)$ measured under continuous wave (CW) laser excitation and the corresponding $g^{(2)}(0) = 0.015$.

对于理想的单光子源,除了单光子发射纯度指标外,另一个判断单光子源的重要指标是单光子的相干性,即发射单光子的全同性.而测量光子相干性的实验是所谓的Hong-Ou-Mandel (HOM)双光子干涉实验^[19].通常只有单量子点荧光相干时间足够长(ns量级)才能得到较好的双光子的干涉结果.所以,可以通过测量量子点荧光的相干时间,计算得到量子点荧光光谱的谱线宽度及单光子的相干性.为此我们搭建了测量量子点荧光相干性的迈克耳孙干涉装置,用来测量量子点荧光的一阶关联函数,其光路示意图如图3(a)所示.图中单量子点荧光经过一个50:50的分束器,一束光入射到装在导轨上的镜子上返回,导轨可以在较大的范围内移动.另一束光入射到放在电驱动压电陶瓷(PZT)的镜子上折回.PZT可以在纳米量级精细扫描,用来测量荧光的干涉强度变化.实验中,先调节导轨

使得两路光程差相同,然后用PZT精细扫描得到光程差为零时刻的干涉度(V).干涉度定义为

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (1)$$

(1)式中 I_{\max} 和 I_{\min} 分别为荧光干涉强度的最大值和最小值(见图3(a)).然后再移动导轨改变光程差,仍旧通过扫描PZT得到此时的干涉度,以此类推,得到一系列干涉条纹的干涉度随延迟时间的变化关系,如图3(b)所示.这里,为了验证干涉仪测量系统的可靠性,需要标定迈克耳孙干涉仪光路的准直性,为此利用此干涉装置测量了已知线宽为4 MHz的窄线宽激光的相干时间,实验数据显示在图3(b).可以看到延迟时间一直到500 ps,系统仍然保持很高的干涉度,说明我们的干涉仪具有很好的准直性.500 ps的测量范围足以满足测量量子点的相干时间的需求(见图3(c), (d)).

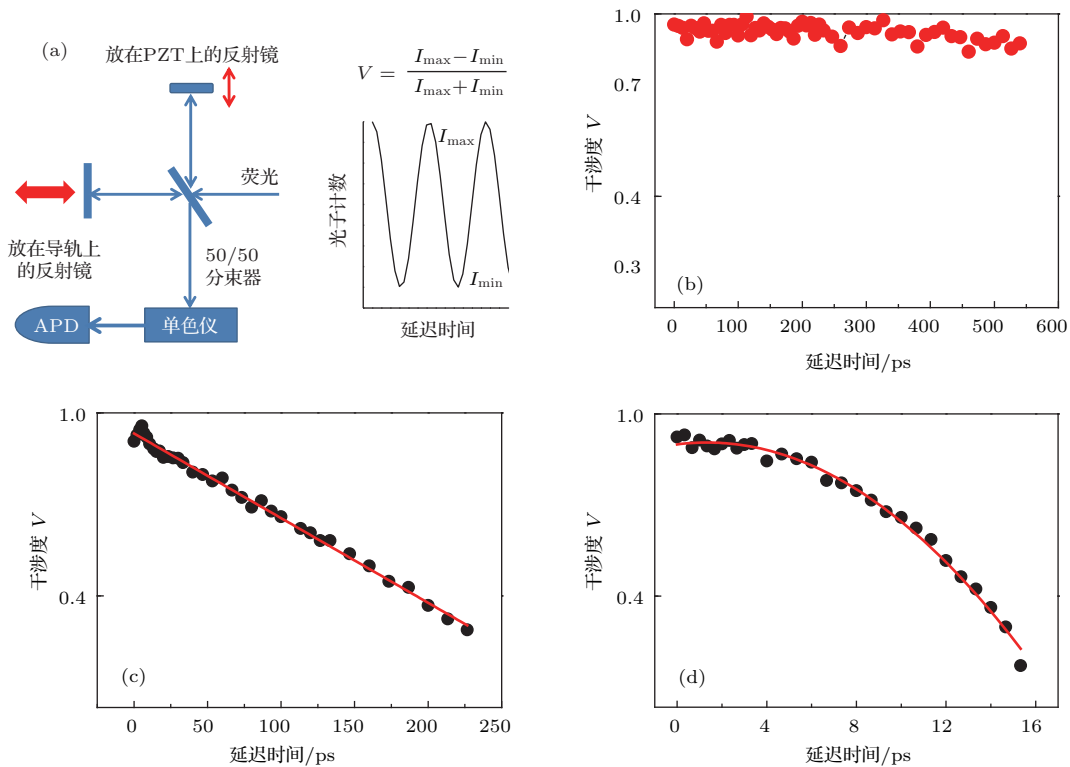


图3 量子点荧光一阶关联函数的测量示意以及干涉度与延迟时间的关系 (a) 一阶关联函数测量示意图; (b) 用4 MHz线宽连续激光测得的干涉度随延迟时间的关系; (c) 920 nm波长单量子点单光子发射荧光干涉度随延迟时间的变化,用洛伦兹函数拟合得到量子点荧光谱线的线宽为3 μeV ; (d) 1305 nm波长单量子点单光子源的干涉度随延迟时间的变化,通过用高斯函数和洛伦兹函数卷积的方式拟合得到量子点荧光谱线的线宽约为30 μeV

Fig. 3. Schematic diagram of first-order correlation function of QD PL, and interferometric as a function of delay time: (a) Schematic diagram of first-order correlation function; (b) interferometric of 4 MHz CW laser as a function of delay time; (c) interferometric of 920 nm QD emission as a function of delay time, QD PL spectral line width is 3 μeV by Lorentz function fitting; (d) interferometric of 1305 nm QD emission as a function of delay time. QD PL spectral line width is 30 μeV by Gaussian function and Lorentz function convolution fitting.

在迈克耳孙干涉仪中, 两路光束光程差导致的时间差 (时间延迟) $t = |t_1 - t_2|$, 考虑一阶关联函数 $g^{(1)}(t)$ 与光谱线型函数 $F(\omega)$ 的关系为

$$g^{(1)}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} F(\omega) d\omega, \quad (2)$$

其中 $F(\omega)$ 为洛伦兹线型的光源, 即

$$F(\omega) = \frac{1}{\pi} \frac{(\Delta\omega)^2}{4(\omega - \omega_0)^2 + (\Delta\omega)^2}, \quad (3)$$

其中 $\hbar\Delta\omega = \Gamma$ 为谱线的半高全宽度. 将 (3) 式代入 (2) 式可得

$$g^{(1)}(t) \sim e^{-i\omega_0 t - t/\tau_c}, \quad (4)$$

其中 τ_c 为相干时间, 而相干时间和荧光谱线的线宽 Γ 间关系为 $\Gamma = 2\hbar/\tau_c$.

因此, 由迈克耳孙干涉装置测量得到单光子源的相干时间 τ_c , 再计算得到量子点荧光的谱线线宽 [20].

作为对比, 首先测量了发光波长在 920 nm 附近单量子点单光子源的相干时间, 实验结果显示在图 3(c) 中. 图中的纵坐标取为对数坐标, 可以看到干涉条纹的干涉度随时间呈现线性变化关系, 可以用 (4) 式来描述, 即对应的量子点激子发光谱线的线型属于均匀展宽的洛伦兹线型为主导. 线性拟合得到激子的相干时间 $\tau_c = 216$ ps, 对应的谱线半高全宽为 3 μeV . 而对于 1305 nm 的量子点激子峰, 测量的干涉度随延迟时间的函数关系是非线性的 (这里纵坐标取为对数坐标), 实验结果如图 3(d) 所示. 说明量子点的谱线展宽以非均匀展宽为主, 不能用单一的洛伦兹函数来描述. 考虑到量子点光谱为非均匀展宽, 即非均匀展宽导致的谱线线型为高斯函数. 则一阶关联函数需要用洛伦兹线型和高斯线型的卷积得到, 即

$$g^{(1)}(t) \sim e^{-t/\tau_{1c}} e^{-t^2/\tau_{2c}^2}, \quad (5)$$

(5) 式取对数后用来拟合图 3(d) 中的实验数据, 拟合得到相干时间 $\tau_{1c} = 91$ ps, $\tau_{2c} = 22$ ps, 则谱线的相干时间为 22 ps, 主要由非均匀展开引起, 对应量子点荧光谱线的线宽约为 30 μeV . 因此, 对比波长在 920 nm 的量子点, 光通信波段量子点的单光子源质量还有很大的提升空间. 量子点荧光谱线线宽较宽的原因主要是由量子点附近缺陷或缺陷荷电态的散射导致的, 影响单光子的相干性.

4 结 论

采用双层耦合量子点的外延生长方法生长了 InAs/GaAs 量子点样品, 量子点发光波长成功地拓展到 1.3 μm . 量子点嵌在上下 DBR 的 1λ 微腔中, 微腔的品质因子为 300. 结合量子点外延梯度生长技术得到较稀量子点密度的样品, 在微区光谱中可以分辨单个量子点荧光谱线. 同时, 采用光刻的工艺制备了直径为 3 μm 的柱状微腔样品. 在低温 5 K 下, 测量单个量子点激子的荧光寿命约为 1 ns, 与研究较多的波长为 920 nm 附近单量子点激子的寿命一致. HBT 测量显示, 1.3 μm 量子点荧光二阶关联函数为 0.015, 具有非常好的单光子特性; 同时采用迈克耳孙干涉装置测量了 1.3 μm 量子点的单光子相干时间为 22 ps, 对应的谱线半高全宽度约 30 μeV . 相比 920 nm 的量子点, 其谱线为本征的洛伦兹线型, 半高全宽度约 3 μeV . 而 1.3 μm 的量子点发光谱线线型为非均匀展宽导致的高斯线型. 后续工作是如何提高量子点样品质量及改进光谱测量方法, 降低杂质散射导致的单光子相干性的减小.

参考文献

- [1] Tang J, Xu X L 2018 *Chin. Phys. B* **27** 27804
- [2] Zhang X, Li H O, Wang K, Cao G, Xiao M, Guo G P 2018 *Chin. Phys. B* **27** 20305
- [3] Xue Y Z, Chen Z S, Ni H Q, Niu Z C, Jiang D S, Dou X M, Sun B Q 2017 *Chin. Phys. B* **26** 84202
- [4] Xue Y Z, Chen Z S, Ni H Q, Niu Z C, Jiang D S, Dou X M, Sun B Q 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 182102
- [5] Yue P Y, Dou X M, Wang H Y, Ma B, Niu Z C, Sun B Q 2018 *Opt. Commun.* **411** 114
- [6] Dou X M, Yu Y, Sun B Q, Ni H Q, Niu Z C 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 104203
- [7] Seravalli L, Minelli M, Frigeri P, Allegri P, Avanzini V, Franchi S 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 2341
- [8] Shimomura K, Kamiya I 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 082103
- [9] Takemoto K, Sakuma Y, Hirose S, Usuki T, Yokoyama N, Miyazawa T, Takatsu M, Arakawa Y 2004 *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** L993
- [10] Liu X, Ha N, Nakajima H, Mano T, Kuroda T, Urbaszek B, Kumano H, Suemune I, Sakuma Y, Sakoda K 2014 *Phys. Rev. B* **90** 081301
- [11] Olbrich F, Kettler J, Bayerbach M, Paul M, Höschele J, Portalupi S L, Jetter M, Michler P 2017 *J. Appl. Phys.* **121** 184302

- [12] Seravalli L, Frigeri P, Minelli M, Allegri P, Avanzini V, Franchi S 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 063101
- [13] Ozaki N, Nakatani Y, Ohkouchi S, Ikeda N, Sugimoto Y, Asakawa K, Clarke E, Hogg R 2013 *J. Cryst. Growth* **378** 553
- [14] Chen Z S, Ma B, Shang X J, He Y, Zhang L C, Ni H Q, Wang J L, Niu Z C 2016 *Nanoscale Res. Lett.* **11** 382
- [15] Huang S S, Niu Z C, Ni H Q, Xiong Y H, Zhan F, Fang Z D, Xiao J B 2007 *J. Cryst. Growth* **301–302** 751
- [16] Unsleber S, Schneider C, Maier S, He Y M, Gerhardt S, Lu C Y, Pan J W, Kamp M, Höfling S 2015 *Opt. Express* **23** 32977
- [17] Zhou P, Wu X F, Ding K, Dou X M, Zha G W, Ni H Q, Niu Z C, Zhu H J, Jiang D S, Zhao C L 2015 *J. Appl. Phys.* **117** 014304
- [18] Chang X Y, Dou X M, Sun B Q, Xiong Y H, Ni H Q, Niu Z C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4282 (in Chinese) [常秀英, 窦秀明, 孙宝权, 熊永华, 倪海桥, 牛智川 2010 物理学报 **59** 4282]
- [19] Lounis B, Orrit M 2005 *Rep. Prog. Phys.* **68** 1129
- [20] Kammerer C, Cassabois G, Voisin C, Perrin M, Delalande C, Roussignol P, Gérard J 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 2737

1.3 μm single photon emission from InAs/GaAs quantum dots*

Zhang Zhi-Wei¹⁾ Zhao Cui-Lan^{1)†} Sun Bao-Quan^{2)‡}

1) (College of Physics and Electronic Information, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028043, China)

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

(Received 24 August 2018; revised manuscript received 26 September 2018)

Abstract

Single-photon emitters are crucial for the applications in quantum communication, random number generation and quantum information processing. Self-assembled InAs/GaAs quantum dots (QDs) have demonstrated to have single-photon emission with high extraction efficiency, single-photon purity, and photon indistinguishability. Thus they are considered as the promising deterministic single-photon emitters. To extend the emission wavelength of InAs/GaAs QDs to telecom band, several methods have been developed, such as the strain engineered metamorphic quantum dots, the use of strain reducing layers and the strain-coupled bilayer of QDs. In fact, it is reported on single-photon emissions based on InAs/InP QDs with an emission wavelength of 1.55 μm , but it is difficult to combine such QDs with a high-quality distributed Bragg reflector (DBR) cavity because the refractive index difference between InP and InGaAsP is too small to obtain a DBR cavity with high quality factor. Here we investigate 1.3 μm single-photon emissions based on self-assembled strain-coupled bilayer of InAs QDs embedded in micropillar cavities. The studied InAs/GaAs self-assembled QDs are grown by molecular beam epitaxy on a semi-insulating (100) GaAs substrate through strain-coupled bilayer of InAs QDs, where the active QDs are formed on the seed QDs capped with an InGaAs layer, and two-layer QDs are vertically coupled with each other. In such a structure the emission wavelength of QDs can be extended to 1.3 μm . The QDs with a low density of about $6 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ are embedded inside a planar $1-\lambda$ GaAs microcavity sandwiched between 20 and 8 pairs of $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ as the bottom and top mirror of a DBR planar cavity, respectively. Then the QD samples are etched into 3 μm diameter micropillar by photolithography and dry etching. The measured quality factor of studied pillar cavity has a typical value of approximately 300. Photoluminescence (PL) spectra of QDs at a temperature of 5 K are examined by using a micro-photoluminescence setup equipped with a 300 mm monochromator and an InGaAs linear photodiode array detector. A diode laser with a continuous wave or a pulsed excitation repetition rate of 80 MHz

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11464034) and the Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region, China (Grant No. 2016MS0119).

† Corresponding author. E-mail: nmdzcl@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: bqsun@semi.ac.cn

and an excitation wavelength of 640 nm is used to excite QDs through an near-infrared objective (NA 0.5), and the PL emission is collected by the same objective. The time-resolved PL of the QDs is obtained by a time-correlated single photon counting. The second-order correlation function is checked by a Hanbury-Brown and Twiss setup through using ID 230 infrared single-photon detectors.

In summary, we find that the 1.3 μm QD exciton lifetime at 5 K is measured to be approximately 1 ns, which has the same value as the 920 nm QD exciton lifetime. The second-order correlation function is measured to be 0.015, showing a good characteristic of 1.3 μm single photon emission. To measure the coherence time, i.e., to perform high-resolution linewidth measurements, of the QDs emitted at the wavelength of 920 and 1300 nm, we insert a Michelson interferometer in front of the spectrometer. The obtained coherence time for 1.3 μm QDs is 22 ps, corresponding to a linewidth of approximately 30 μeV . Whereas, the coherence time is 216 ps for 920 nm QDs, corresponding to a linewidth of approximately 3 μeV . Furthermore, both emission spectral lineshapes are different. The former is of Gaussian-like type, while the latter is of Lorentzian type.

Keywords: InAs/GaAs quantum dots, 1.3 μm , single photon emission

PACS: 78.67.Hc, 78.55.Cr, 42.50.Ct

DOI: [10.7498/aps.67.20181592](https://doi.org/10.7498/aps.67.20181592)