

半导体自组织量子点量子发光机理与器件

尚向军 马奔 陈泽升 喻颖 查国伟 倪海桥 牛智川

Physics and devices of quantum light emission from semiconductor self-assembled quantum Dots

Shang Xiang-Jun Ma Ben Chen Ze-Sheng Yu Ying Zha Guo-Wei Ni Hai-Qiao Niu Zhi-Chuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 227801 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180594

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180594>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I22>

---

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>

[低温生长砷化镓的超快光抽运-太赫兹探测光谱](#)

Study on ultrafast dynamics of low-temperature grown GaAs by optical pump and terahertz probe spectroscopy

物理学报.2017, 66(8): 087801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.087801>

[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>

专题: 单量子态探测及其相互作用

## 半导体自组织量子点量子发光机理与器件\*

尚向军<sup>1)2)</sup> 马奔<sup>1)2)</sup> 陈泽升<sup>1)</sup> 喻颖<sup>1)</sup> 查国伟<sup>1)</sup>倪海桥<sup>1)2)</sup> 牛智川<sup>1)2)†</sup>

1) (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)

2) (中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

(2018年4月3日收到; 2018年7月28日收到修改稿)

介绍了自组织量子点单光子发光机理及器件研究进展. 主要内容包括: 半导体液滴自催化外延 GaAs 纳米线中 InAs 量子点和 GaAs 量子点的单光子发光效应、自组织 InAs/GaAs 量子点与分布布拉格平面微腔耦合结构的单光子发光效应和器件制备, 单量子点发光的共振荧光测量方法、量子点单光子参量下转换实现的纠缠光子发射、单光子的量子存储效应以及量子点单光子发光的光纤耦合输出芯片制备等.

关键词: 自组织量子点, 纳米线, 微腔, 单光子, 纠缠光子

PACS: 78.30.Fs, 78.67.Hc, 78.67.Tf, 78.67.-n

DOI: 10.7498/aps.67.20180594

## 1 引言

自组织量子点是一种“类原子”结构, 基于应力驱动外延生长机理实现人工制备. 高密度系综量子点 ( $\sim 100/\mu\text{m}^2$ ) 发光谱呈现连续包络, 反映量子点尺寸和能级的连续分布; 低密度分立量子点 ( $1-10/\mu\text{m}^2$ ) 发光谱呈现孤立多峰, 反映了量子点尺寸涨落导致的不连续能态; 若能隔离单个点, 其发光谱将呈单线, 体现类原子二能级跃迁效应, 也就是每次只发射一个光子(图 1)在时间序列上彼此孤立的反聚束发光效应. 采用 50 : 50 分光的 Hanbury-Brown-Twiss (HBT) 光子符合计数测试方法可以验证其反聚束性  $g^2(0) < 1$ . 理论上纯净单光子的多光子概率  $g^2(0)$  为 0. 半导体 InAs/GaAs 自组织量子点结构在实现单光子发光方面具有的优势在于: 1) 其离散化局域电子态对外场响应非常强(弱激发下, 单激子态发光产生稳定的单光子流; 强激发下, 双激子态级联发光产生稳定的偏振关联光子对), 是制备单光子源/纠缠光子

源的理想材料; 2) 可集成光学微腔、二极管、波导和光纤, 增强定向发光, 实现器件化; 3) 其激子态自旋可通过外界光/电/磁场调控, 其发射光子也“携带”激子态自旋信息, 是研究量子自旋态制备操纵、实现远程纠缠的理想体系.

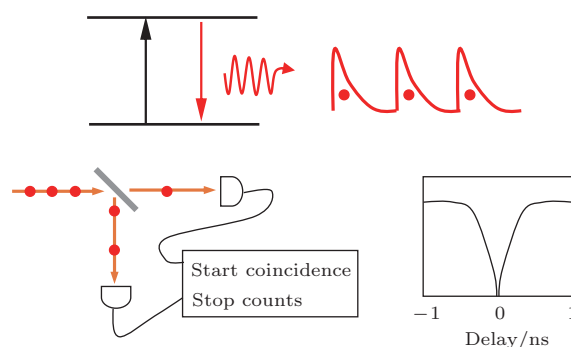


图 1 量子二能级跃迁发射单光子及 HBT 符合计数检测  
Fig. 1. Single photons emitted from quantum 2-level transition and HBT coincidence count test.

自从 2000 年首次在 InGaAs 量子点中测到单光子以来, 量子点单光子源研究一直在进行, 已制备出 GaAs/AlGaAs DBR (distributed Bragg reflector) 平面腔耦合量子点光致/电致单光子源、微

\* 国家自然科学基金(批准号: 91321313, 90921015, 61505196)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zcniu@semi.ac.cn

柱腔耦合量子点单光子源、光子晶体腔耦合量子点单光子源. 在国内, 我们于2008年率先研制出工作于77 K的InAs量子点电致单光子源<sup>[1]</sup>. 波长和模式精确匹配的DBR微柱腔可极大地增强单量子点发光(Purcell因子达6.3<sup>[2]</sup>). 电脉冲频率可达10 GHz, 有望提高单光子发射速率. 2010年, 德国Wurzburg大学研制出DBR微柱腔(共振)耦合量子点电致单光子源, 采用电脉冲驱动实现最高35 MHz的单光子发射<sup>[3]</sup>. 针对量子点发光时间抖动、相干性差的问题, 国际上分别用脉冲驱动、载流子注入调控、光学共振激发技术进行改进. 2013年, 德国Stuttgart大学在微柱电致单光子源中通过电脉冲调控载流子注入, 降低了单光子发射时间抖动<sup>[4]</sup>. 2012—2013年, 中国科学技术大学和德国Stuttgart大学分别用脉冲共振激发实现了量子点全同单光子、纠缠光子对的确定发射<sup>[2,5]</sup>, 单光子高度全同, 即使对15  $\mu\text{s}$ 间隔的两个单光子, 其干涉可见度仍有92%<sup>[6]</sup>. 用脉冲光场相干调控激子自旋态可发射Raman单光子, 其频率和发光寿命可调, 便于在多量子点间扩展<sup>[7]</sup>. 同时也开展了量子点纠缠光子源研究. 应力S-K模式生长的自组织InAs量子点形状不对称, 产生较大的精细劈裂(fine structure splitting, FSS), 导致级联发射的偏振关联光子对失去简并性, 不是纠缠光子. 在液滴蚀刻纳米孔中生长的GaAs单量子点应力小、对称性高, FSS极小且可通过优化成岛、施加应力予以消除<sup>[8,9]</sup>, 是制备纠缠光子源的更佳量子点.

量子点单光子源研制需重点解决: 1) 分立量子点波长、尺寸、形貌的可控制备和发光效率优化; 2) 高 $Q$ 值微腔制备、微腔增强单量子点发光和光子提取效率优化; 3) 外部光路收光效率优化. 我们针对上述难题开展研究, 取得了多项进展: 1) 面向光纤量子通信应用, 首次用应力耦合双层点结构使GaAs基InAs分立量子点波长从传统的0.9  $\mu\text{m}$ 拓展至1.3  $\mu\text{m}$ , 并集成DBR腔实现1.3  $\mu\text{m}$ 高计数率单光子源<sup>[10]</sup>, 未来争取拓展到1.55  $\mu\text{m}$ ; 2) 用排式光纤与微柱阵列黏合实现光纤输出920 nm波段量子点单光子源, 提高了器件稳定性<sup>[11]</sup>; 3) 在自催化生长GaAs纳米线上制备出InAs或GaAs分立量子点、量子环<sup>[12]</sup>, 实现了量子点单光子发射<sup>[13,14]</sup>和光纤输出<sup>[15]</sup>; 4) 用DBR腔增强InAs单量子点发光, 观测到微柱腔模和 $Q$ 值; 引入GaAs/空气

隙HCG (high index contrast grating) 结构增强了偏振选择出光; 5) 与中国科学技术大学合作, 用0.87  $\mu\text{m}$  InAs量子点单光子源实现了确定性单光子在稀土掺杂晶体中的100个时间模式的量子存储<sup>[16]</sup>; 6) 与美国南佛罗里达州大学合作开展InAs量子点共振荧光研究, 共振激发使相距40  $\mu\text{m}$ 的两个频率相近的单量子点发射同频单光子, 但其干涉可见度只有40%, 原因是量子点周围电荷涨落<sup>[17]</sup>; 另外增加一束带上激发激光可消除电荷涨落、光谱抖动、发光闪烁, 增强共振激发效果<sup>[18]</sup>; 采用双色共振荧光技术, 使量子点光谱在激光频率与谐振子差异的一半处引入振荡, 其相干保持时间超过自然寿命, 反映“缀饰态”梯子无穷多能级<sup>[19]</sup>; 将量子点单光子经偏振编码后用于量子弱测量研究<sup>[20]</sup>; 7) 用纳米线量子点波长775 nm单光子发射, 通过参量下转化实现了1.55  $\mu\text{m}$ 纠缠光子源, 纠缠保真度达91.8%<sup>[21]</sup>. 本文介绍这些成果, 为后续的研究提供借鉴.

## 2 纳米线中量子点生长及单光子发射

纳米线上生长分立量子点的优势有: 1) 纳米线生长对晶格失配容忍度高, 在同一种衬底上可生长GaAs, InAs, InP, GaN和InSb等多种纳米线, 以纳米线为基体可制备全波段量子点; 2) 纳米线空间分立性有助于控制量子点密度; 3) 纳米线光场具有宽带模式分布(轴向波导模与截面回音壁模), 可增强各波段量子点发光, 使之从纳米线顶端“定点”输出; 4) 可获得无缺陷陡峭界面异质结量子点. 纳米线气-液-固模式生长需要液滴催化, Ga液滴无污染、更合适. 通过调控外延速率、时间、As压、淀积温度和AlGaAs盖层厚度, 我们在Si衬底上生长出长度和取向一致、密度可控的GaAs/AlGaAs核/壳结构纳米线, 并通过二次Ga液滴催化外延制备出Y字形分叉纳米线; 继续喷射InAs或GaAs在纳米线侧壁长出InAs/GaAs分立量子点和GaAs/AlGaAs分立量子点(图2). 量子点成核与表面应力有关. InAs量子点优先在纳米线分叉处定位生长, 这里GaAs/AlGaAs界面应力大. GaAs量子点均在纳米线侧壁成岛. 这些量子点可发射单光子. InAs/GaAs单量子点在4.2 K下光谱呈现细锐峰, 线宽仅101  $\mu\text{eV}$ ,  $g^2(0)$ 低至0.031<sup>[9]</sup>. GaAs/AlGaAs单量子点晶体质量优

异, 77 K 下都能测到反聚束,  $g^2(0)$  仅 0.18<sup>[10]</sup>, 且有微腔增强效果. 通过调节生长参数, 我们还在 GaAs 纳米线侧壁长出 GaAs 量子环、环中点等结构, 其密度和形貌可控. 量子环发光用 10 K 光致荧

光和 77 K 阴极荧光进行分析, 光谱呈锐利峰, 间隔 1—3 meV, 最窄线宽仅 578  $\mu\text{eV}$ , 表明环形电子态的量子性<sup>[12]</sup>.

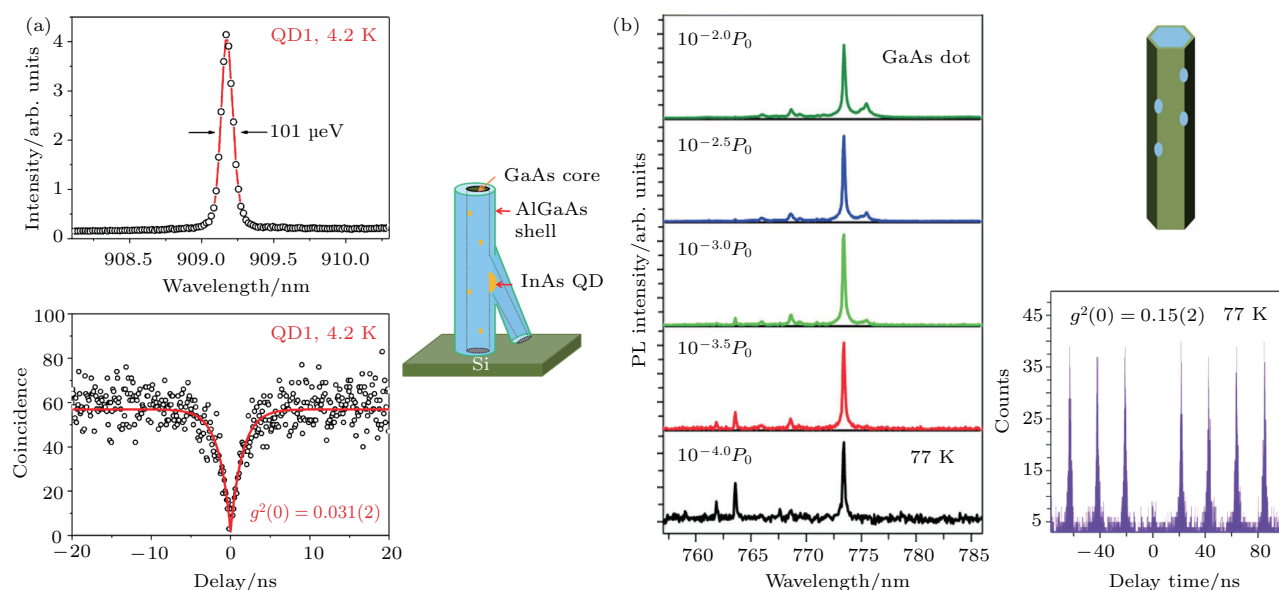


图 2 液滴自催化 GaAs 纳米线侧壁 InAs (a)、GaAs (b) 分立量子点及其激子发光

Fig. 2. Individual InAs (a), GaAs (b) quantum dots on droplet self-catalyzed nanowires and their excitonic emission.

### 3 自组织量子点发光波长拓展

InAs 单量子点在临界成岛点附近形成, 偏离该点将形成密点或无点. 分子束外延设备虽能精确控制生长参数, 但生长中温度漂移、束流不稳、真空背景浮动、不同钨托热导差异会导致临界成岛点每次不同. 用固定的表头参数生长单量子点成功率低. 梯度束流可拓宽 In 淀积量参数容差, 保证片上存在单点区. 原位烧点法可用 RHEED 精确监控每次生长牺牲层量子点的 In 临界成岛淀积量  $\theta_c$  (牺牲层量子点随后被原位退火解吸附), 从而确定生长正式层单点的最佳 In 淀积量  $\theta$ . 由于牺牲层量子点与正式层量子点生长环境基本相同, 其单点生长的最佳淀积量一致,  $\theta$  与  $\theta_c$  比值不依赖每次温度和束流涨落, 具有普适性. 通过长期生长实验和统计分析, 我们获得了生长单量子点正常成岛判据  $\theta_c = 1.73\text{—}2.31$  ML 和  $\theta/\theta_c$  稳定参数<sup>[22]</sup>. 当  $\theta/\theta_c = 0.964\text{—}0.971$  时, 单点在衬底边缘低温区形成; 当  $0.989 < \theta/\theta_c < 0.996$  时, 单点在中心高温区形成且密度极低 ( $1/25 \mu\text{m}^2$ ); 量子点高度和密度随

$\theta/\theta_c$  的增大而演化. 900—935 nm 波段光谱单线对应高度 7—8 nm 单点. 单点片上分布取决于温度分布. 由于量子点下面是  $>20$  对 DBR, 耗时耗源较多, 正常成岛判据可避免由温度分布异常造成的长点失败、高纯源和机时浪费.

光纤量子通信需要 1.3 或 1.55  $\mu\text{m}$  单光子源, 而自组织 InAs/GaAs 分立量子点波段通常位于 0.9  $\mu\text{m}$ . 我们在国际上首次引入应力耦合双层 InAs 量子点结构缓和应力积累和增加上层无缺陷发光大点尺寸, 通过优化量子点密度、长点温度、引入带电激子态, 使 InAs/GaAs 单量子点波长拓展到 1.3  $\mu\text{m}$  (图 3), 提高了其发光效率, 未来争取拓展到 1.55  $\mu\text{m}$ . 我们还引入 AlGaAs 势垒层, 使 InAs/GaAs 单量子点波长蓝移至 0.84—0.86  $\mu\text{m}$ . 1.3  $\mu\text{m}$  单量子点的微区光谱显示单激子态发光.

量子点波长拓展还可通过对顶砧施加静水压实现. 在 6.58 GPa 压力下, 波长 1.3  $\mu\text{m}$  的量子点发光蓝移到 0.9  $\mu\text{m}$ ,  $g^2(0)$  小于 0.3, 表明单光子性保持<sup>[23]</sup>. 该方法提供了一种有别于偏压调节和温度调节的量子点波长大范围调节方法.

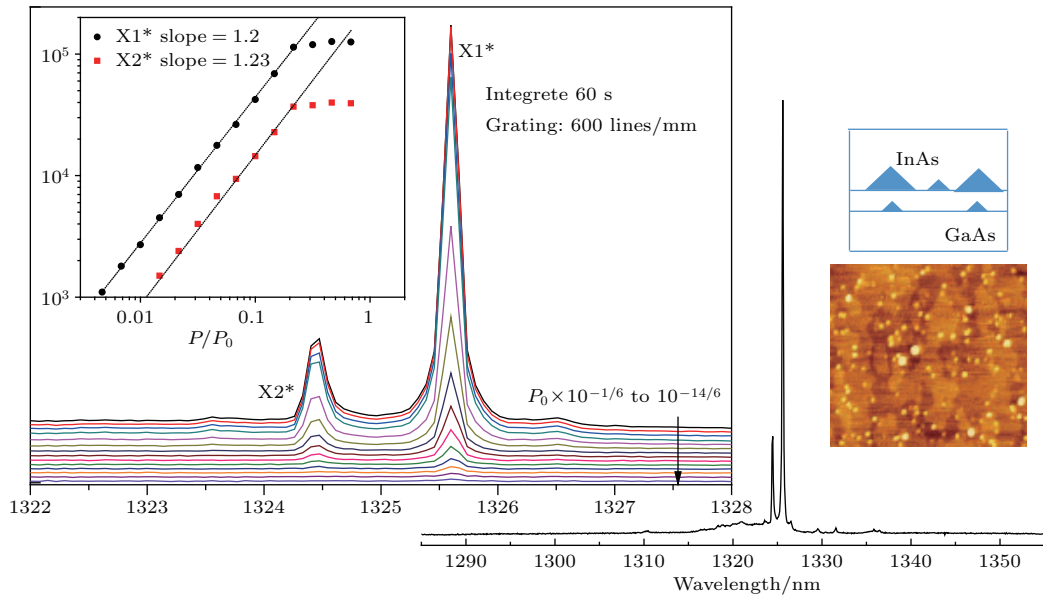


图3 应力耦合 InAs/GaAs 单量子点实现 1.3 μm 发光

Fig. 3. Strain-coupled InAs/GaAs single quantum dots emit at 1.3 μm.

#### 4 高 Q 值 DBR 微腔增强 InAs 单量子点发光

GaAs/AlGaAs DBR 微柱腔可通过光学曝光 + 离子刻蚀在单片上一次性批量制备. 主要考虑: 1) 与单量子点波长匹配(需精确校准 DBR 厚度和腔模); 2) 上下 DBR 对数; 3) 微柱直径和形状; 4) 侧壁光滑度(需优化刻蚀工艺). 不同几何工艺参数使 Q 值从几百到几千不等(6124<sup>[2]</sup>). 对于大直径(>2 μm)微柱, 除 F-P 主模外, 还允许许多阶回音壁模存在. 侧壁光滑微柱的回音壁模 Q 值极高(Q = 17000<sup>[24]</sup>). 椭圆微柱可实现各向异性腔模劈裂, 便于偏振激发. 我们用 20 对下/8 对上 DBR 结构, 通过优化光刻胶和 SiO<sub>2</sub> 作为掩膜的 ICP (ion coupled plasma) 深刻蚀工艺(刻蚀速率、气体配比), 制备出侧壁光滑正台微柱(Cl<sub>2</sub> 和 Ar) 和倒台微柱(CH<sub>4</sub> 和 Ar) (图 4). 光谱研究发现, 920 nm 微柱 Q 值介于 1063—8840(已测到 Q 值 1063—5240 的腔模光谱, 图 5), 高 Q 值腔模的光谱很弱难测. 1.3 μm 微柱 Q 值为 300—1890 (已测到 Q 值 300 的腔模光谱<sup>[14]</sup>).

调节腔模与单量子点共振可实现高计数率单光子源. 对于 1.3 μm 波段应力耦合 InAs 单量子点, HBT 测试端雪崩光电探测器(avalanched photon

detector, APD) 测到单光子饱和计数率达 60000/s, 推算到一阶透镜前达 3.45 MHz,  $g^2(0)$  最低可到 0.14<sup>[14]</sup>(图 6).

由于 GaAs 折射率高, 样片表面全反射强, 出光效率低. 我们在 DBR 腔表面集成 GaAs/空气隙 HCG 结构, 使垂直出光效率提高, 实现单光子偏振出光. 光栅图形用 ICP 刻蚀, 选择性腐蚀液经光栅缝隙进入 AlGaAs 掩埋层进行腐蚀, 形成 HCG. 这种复合三维腔体积大、工艺容差大, 易与单量子点耦合(图 7).

量子点单光子测试需采用空间分辨共聚焦光路, 激发光和荧光都要经物镜汇聚或收集, 光斑大小决定 XY 面内空间的分辨力, 后端针孔进行 Z 轴空间滤波, 有自由空间共聚焦光路(图 6, 针孔

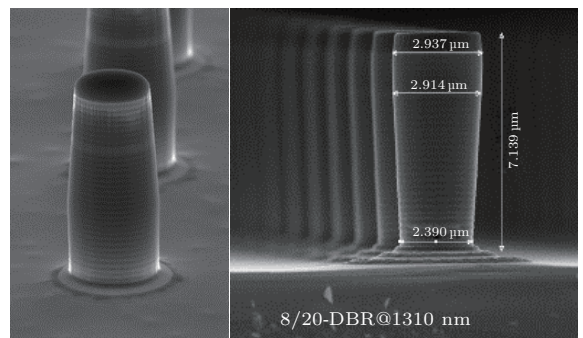


图 4 侧壁光滑的正台微柱和倒台微柱

Fig. 4. Forward and reversed tapered micro-pillars with smooth facet.

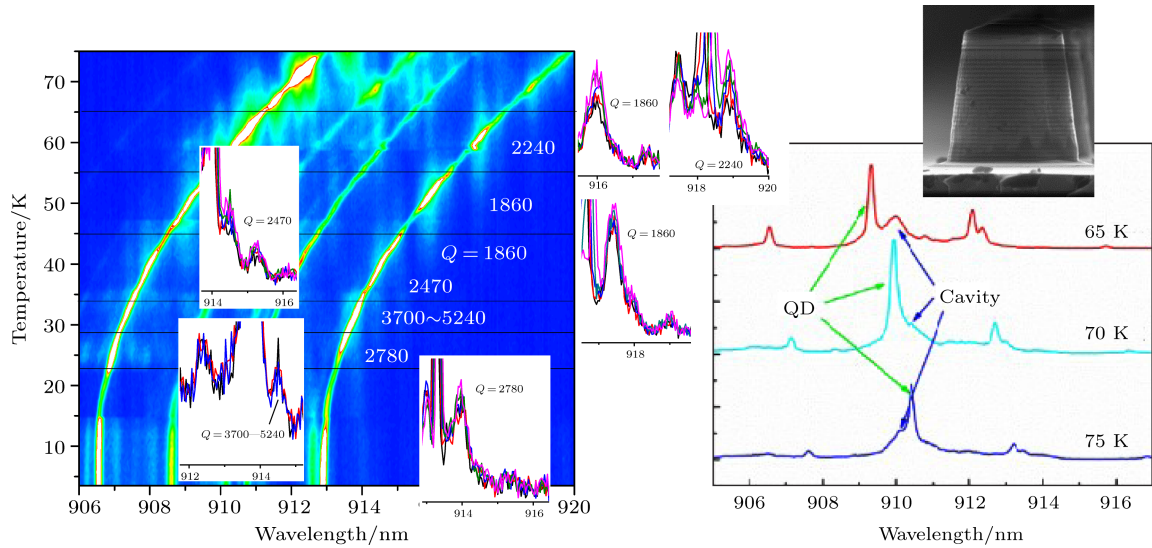


图5 920 nm DBR 微柱的腔模光谱 ( $Q$  值: 左 1860—5240; 右 1063)

Fig. 5. Cavity mode spectra of DBR micropillar at 920 nm ( $Q$  factor: left 1860—5240; right 1063).

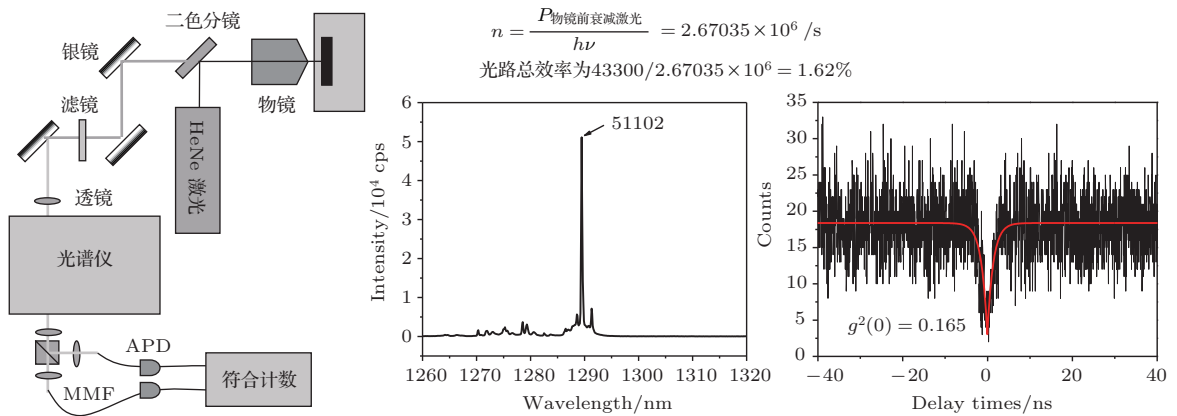


图6 1.3  $\mu\text{m}$  微柱耦合量子点单光子源测试

Fig. 6. Test of 1.3  $\mu\text{m}$  micropillar-coupled quantum dot single photon sources.

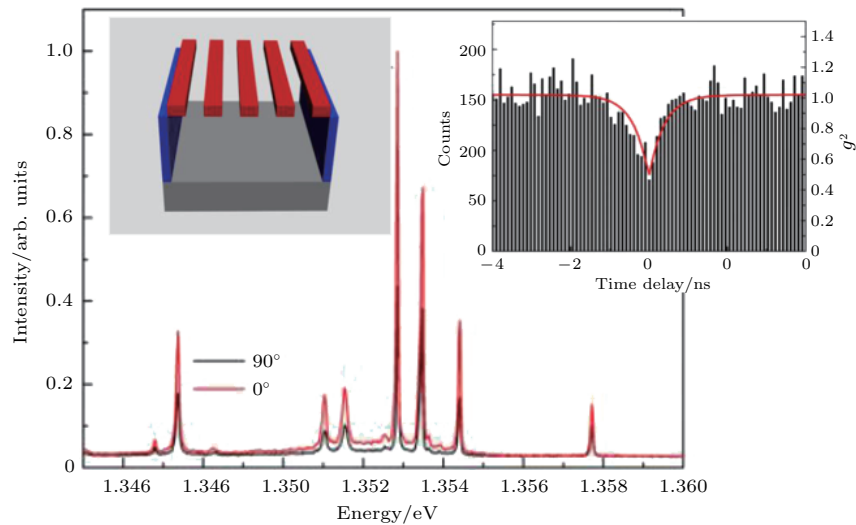


图7 HCG+DBR 复合三维微腔实现偏振选择发光增强

Fig. 7. HCG+DBR hybrid 3D micro-cavity realizes polarization-selective emission enhancement.

由光谱仪狭缝替代)和光纤共聚焦光路(针孔由光纤芯径替代). 单光子信号经光栅或滤光片从包括GaAs峰、浸润层峰、小点峰的宽谱荧光信号中滤取,经HBT装置后用多模光纤耦合进入APD计数. 系统定位稳定性、调焦精密性对光路效率影响显著. 自由空间共聚焦光路的APD单光子收集效率一般为1%—3%(图6). 采用精密调焦和定位装置的光纤共聚焦光路的APD单光子收集效率可达7%<sup>[2]</sup>.

### 5 量子点单光子发光的光纤耦合输出芯片

用光纤直接黏合上述微腔可保证系统稳定,测试简单,使单光子源有望走出实验室. 光纤端面与微腔出光面贴合,收光效率取决于光纤数值孔径和对准精度,用熔融光纤波分复用器将激发光

(650 nm)光纤和荧光(980 nm)光纤传入一路光纤探针,近场扫描样品表面寻找单点,荧光光纤连接光谱仪实时表征. 测试时,样品槽加注液氮使量子点降温发光. 找到单点后,待液氮挥发后进行黏接. 采用这种方法我们实现了纳米线量子点单光子源光纤输出(图8(a))<sup>[15]</sup>. 由于光纤端面小,这种黏接方法难免光纤与量子点芯片对歪,影响收光. 我们采用微柱阵列与排式光纤阵列盲对黏合(光纤阵列提供平整端面作为芯片黏接端面,微柱周期保证每个光纤下均有微柱),实现了920 nm波段量子点单光子光纤输出,输出端单光子光谱计数率最高达420 kHz,  $g^2(0)$ 最好为0.02,推算到光纤耦合端面收到的单光子计数率最高1.8 MHz<sup>[11]</sup>(图8(b)). 结合光纤收光效率25%、后端滤光效率30%,光路整体效率最高1.7%,接近共聚焦光路.

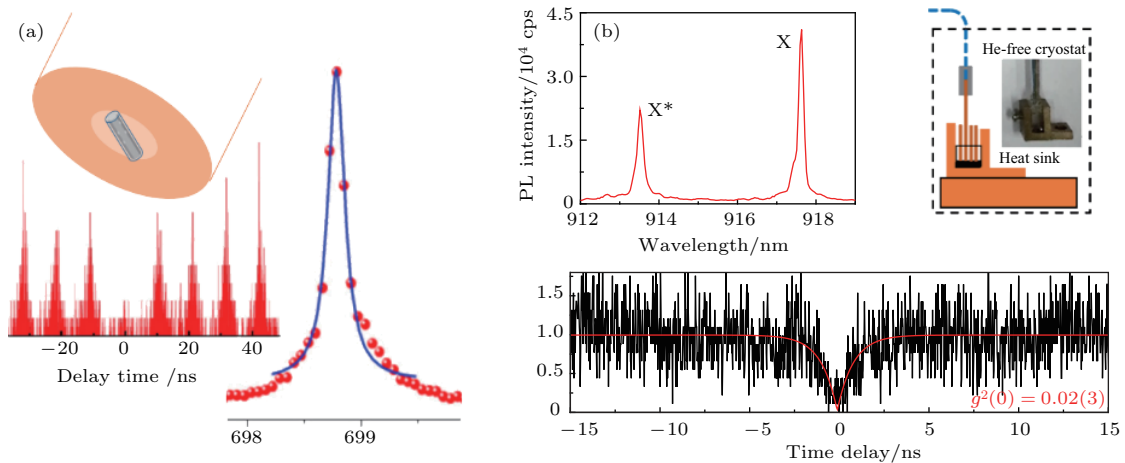


图8 光纤直接输出量子点单光子源

Fig. 8. Direct fiber extracted quantum dot single photon source.

### 6 单量子点共振荧光

共振激发可提高量子点发射单光子的相干性,其难点在于激发光与荧光的完全分离,通常采用侧向激发垂直收光光路实现. 我们与美国南佛罗里达州大学Muller研究组合作开展了量子点共振荧光研究(图9). 两个相距40 μm的单量子点波长接近,通过共振激发调控使其发射同频率单光子. 我们测试了两者的干涉,干涉可见度仅40%<sup>[17]</sup>. 其原因是单量子点周围电荷占据涨落引起的量子点发光频率抖动. 采用另外一束带上激发激光以填充

这些电荷态,可消除电荷涨落、光谱抖动和闪烁发光<sup>[18]</sup>. 我们深入研究了共振荧光中的相干散射和非相干散射成分、弱激发下的纯相干散射及失相退相干以及光谱抖动对光谱、关联函数、相位相干性的影响<sup>[18]</sup>. 我们首次研究了InAs单量子点对两束独立可调谐连续激光的共振散射. 在该双色共振荧光实验中,额外光场在激光频率与谐振子频率差异的一半处引入了振荡,该振荡的保持时间超过自然寿命,反映每组“缀饰态”梯子包含的无穷多个能级. 光谱和二阶关联函数能用Bloch方程和量子回归理论再现<sup>[19]</sup>.

## 7 量子点单光子参量下转换实现纠缠光子发射

我们研究了量子点单光子通过非线性晶体参量下转换产生纠缠光子对方案. 纳米线量子点波段位于 650—780 nm. 选择波长为 775 nm 的纳米线量子点激子发光峰, 通过紫外脉冲光激发、共聚焦光路收集, 经偏振极化后进入周期极化铌酸锂 (PPLN) 晶体波导, 自发参量下转换为波长 1.55  $\mu\text{m}$  纠缠光子对. PPLN 波导非线性转换效率高, 且可通过精密温控实现较宽工作波段 (770—780 nm) 和输出波长调谐 (1550—1600 nm). 产生的纠缠光子对的纠缠保真度达到 91.8% [21].

## 8 量子点单光子的固态量子存储和量子测量

纠缠分发是构建量子网络的核心技术. 由于信道传输损耗, 在信道中直接进行纠缠分发只能达到百公里量级, 要实现长程纠缠分发需要基于单光子量子存储和两光子 Bell 基测量的量子中继技术. 目前已经实验验证的量子中继方案都基于概率性量子光源 (光子产生概率低且存在多光子脉冲), 长程纠缠分发时间预计在分钟量级以上. 我们与中国科学技术大学合作, 利用自组织量子点产生 0.87  $\mu\text{m}$  波段确定性单光子, 通过光纤传输到 5 m 外的另一张光学平台上的掺稀土离子 YVO<sub>4</sub> 晶体 (即固态量子存储器) 中, 实现确定性单光子最高 100 个时间模式、最低 1 个时间模式的量子存储, 模式数创

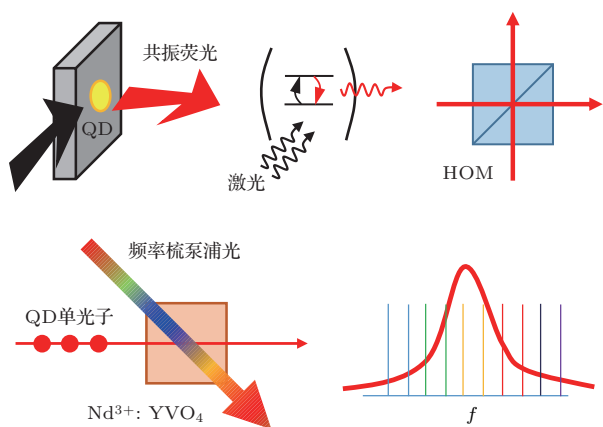


图9 量子点共振荧光、单光子固态存储

Fig. 9. QD resonant fluorescence and single photon quantum memory.

最高水平 [16]. 确定性量子光源和多模式量子存储结合预计可使长程纠缠分发时间缩短到毫秒量级. 量子点单光子波长 (线宽  $\sim$  GHz) 通过变温调节, 以便与 Nd<sup>3+</sup> 离子吸收峰 (879.7 nm, 线宽  $\sim$  100 MHz) 共振. 为了增强吸收, 我们还在 YVO<sub>4</sub> 晶体中引入周期性调频 879.7 nm 抽运光, 在 Nd<sup>3+</sup> 离子中产生原子频梳以拓宽其吸收谱 (图 9).

我们与中国科学技术大学合作, 首次将量子点单光子经偏振编码后, 用于验证弱测量下量子态测量强度与可逆恢复概率之间的折衷关系 [20]. 该实验对量子点单光子在量子测量、量子通信方面的应用具有重要意义.

## 9 总结与展望

自组织量子点单光子源已被证明具有高纯度、高计数率、共振激发下高相干性, 可用于光量子计算、量子相干操纵、量子存储等. 材料和器件方面未来需重点解决: 1) 纯化单量子点周围环境, 减少引起量子点光谱抖动, 研制高对称量子点减小 FSS; 2) 掌握精密定位技术, 实现微腔与单量子点对准、与光纤芯心对准, 提高激发效率和单光子收集效率; 3) 开发适于片上全同单光子产生、操纵、HBT 符合/Hong-Ou-Mandel 干涉测试的有源微腔-无源波导复合结构、高透过率波导分束器和 Mach-Zender 干涉仪的集成量子芯片, 提高单光子微腔提取效率、光路收集效率、符合计数率.

## 参考文献

- [1] Dou X M, Chang X Y, Sun B Q, Xiong Y H, Niu Z C, Huang S S, Ni H Q, Du Y, Xia J B 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 101107
- [2] Ding X, He Y, Duan Z C, Gregersen N, Chen M C, Unsleber S, Maier S, Schneider C, Kamp M, Hoffing S, Lu C Y, Pan J W 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 020401
- [3] Heindel T, Schneider C, Lermer M, Kwon S H, Braun T, Reitzenstein S, Höfling S, Kamp M, Forchel A 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 011107
- [4] Hargart F, Kessler C A, Schwarzback T, Koroknay E, Weidenfeld S, Jetter M, Michler P 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 011126
- [5] Muller M, Bounouar S, Jons K D, Glassl M, Michler P 2014 *Nat. Photon.* **8** 224
- [6] Wang H, Duan Z C, Li Y H, Chen S, Li J P, He Y M, Chen M C, He Y, Ding X, Peng C Z, Schneider C, Kamp M, Hoffing S, Lu C Y, Pan J W 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 213601



- [7] He Y, He Y M, Wei Y J, Jiang X, Chen M C, Xiong F L, Zhao Y, Schneider C, Kamp M, Hofling S, Lu C Y, Pan J W 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 237403
- [8] Keil R, Zopf M, Chen Y, Hofer B, Zhang J X, Ding F, Schmidt O G 2017 *Nat. Comm.* **8** 15501
- [9] Chen Y, Zhang J X, Zopf M, Jung K, Zhang Y, Keil R, Ding F, Schmidt O G 2016 *Nat. Comm.* **7** 10387
- [10] Chen Z S, Ma B, Shang X J, Ni H Q, Wang J L, Niu Z C 2017 *Nanoscale Research Lett.* **12** 378
- [11] Ma B, Chen Z S, Wei S H, Shang X J, Ni H Q, Niu Z C 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 142104
- [12] Zha G W, Shang X J, Su D, Yu Y, Wei B, Wang L, Li M F, Wang L J, Xu J X, Ni H Q, Ji Y, Sun B Q, Niu Z C 2014 *Nanoscale* **6** 3190
- [13] Yu Y, Li M F, He J F, He Y M, Wei Y J, He Y, Zha G W, Shang X J, Wang J, Wang G W, Ni H Q, Lu C Y, Niu Z C 2013 *Nano Lett.* **13** 1399
- [14] Yu Y, Dou X M, Wei B, Zha G W, Shang X J, Wang L, Su D, Xu J X, Wang H Y, Ni H Q, Sun B Q, Ji Y, Han X D, Niu Z C 2014 *Adv. Mater.* **26** 2710
- [15] Zha G W, Shang X J, Ni H Q, Yu Y, Xu J X, Wei S H, Ma B, Zhang L C, Niu Z C 2015 *Nanotechnology* **26** 385706
- [16] Tang J S, Zhou Z Q, Wang Y T, Li Y L, Liu X, Hua Y L, Zou Y, Wang S, He D Y, Chen G, Sun Y N, Yu Y, Li M F, Zha G W, Ni H Q, Niu Z C, Li C F, Guo G C 2015 *Nat. Comm.* **6** 8652
- [17] Konthasinghe K, Peiris M, Yu Y, Li M F, He J F, Wang L J, Ni H Q, Niu Z C, Shih C K, Muller A 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 267402
- [18] Konthasinghe K, Walker J, Peiris M, Shih C K, Yu Y, Li M F, He J F, Wang L J, Ni H Q, Niu Z C, Muller A 2012 *Phys. Rev. B* **85** 235315
- [19] Peiris M, Konthasinghe K, Yu Y, Niu Z C, Muller A 2014 *Phys. Rev. B* **89** 155305
- [20] Chen G, Zou Y, Xu X Y, Tang J S, Li Y L, Xu J S, Han Y J, Li C F, Guo G C, Ni H Q, Yu Y, Li M F, Zha G W, Niu Z C, Kedem Y 2014 *Phys. Rev. X* **4** 021043
- [21] Chen G, Zou Y, Zhang W H, Zhang Z H, Zhou Z Q, He D Y, Tang J S, Liu B H, Yu Y, Zha G W, Ni H Q, Niu Z C, Han Y J, Li C F, Guo G C 2016 *Sci. Rep.* **6** 26680
- [22] Shang X J, Xu J X, Ma B, Chen Z S, Wei S H, Li M F, Zha G W, Zhang L C, Yu Y, Ni H Q, Niu Z C 2016 *Chin. Phys. B* **25** 107805
- [23] Zhou P Y, Dou X M, Wu X F, Ding K, Li M F, Ni H Q, Niu Z C, Jiang D S, Sun B Q 2014 *Sci. Rep.* **4** 3633
- [24] Michler P, Kiraz A, Zhang L, Becher C, Hu E, Imamoglu A 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 184

SPECIAL TOPIC — Quantum states generation, manipulation and detection

# Physics and devices of quantum light emission from semiconductor self-assembled quantum Dots\*

Shang Xiang-Jun<sup>1)2)</sup> Ma Ben<sup>1)2)</sup> Chen Ze-Sheng<sup>1)</sup> Yu Ying<sup>1)</sup> Zha Guo-Wei<sup>1)</sup>  
Ni Hai-Qiao<sup>1)2)</sup> Niu Zhi-Chuan<sup>1)2)†</sup>

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

2) (College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

( Received 3 April 2018; revised manuscript received 28 July 2018 )

## Abstract

Self-assembled semiconductor single quantum dots (QDs), as a good candidate of solid-state real single photon (SP) emitters in high purity and counting rate, have attracted great attention in recent two decades, promising for quantum information, optical quantum computation, quantum storage, and quantum coherent manipulation. To isolate single QD from the other QDs surrounding, 1) dilute QD density is well controlled during epitaxy; 2) micro-pillars or nanowires individually in space as hosts are fabricated. To enhance their uni-directional emission, GaAs/AlAs distributed Bragg reflector (DBR) planar cavity is integrated. To improve the system (i.e. confocal microscope, traditionally) stability and its optical collection efficiency, a near-field fiber coupling by adhering a micro-pillar chip to fiber facets directly is used. To enhance the coherence of QD spontaneous emission, resonant excitation technique is applied. In this article, we review our research progress in self-assembled QD SP emission, including SP emission from InAs or GaAs QDs on Ga droplet-self-catalyzed GaAs nanowires (with  $g^2(0)$  of 0.031 or 0.18, respectively), SP emission from InAs/GaAs QDs coupled with high- $Q$  (1000–5000) DBR micro-pillar cavities and their fiber-coupled device fabrication with SP fiber output rate  $\sim 1.8$  MHz, single QD resonant fluorescence with inter-dot coherent visibility of 40%, strain-coupled bilayer InAs QDs to extend their emission wavelength to 1320 nm and parametric down conversion of 775 nm SP emission from single QD in nanowire to realize entangled photon pairs at 1550 nm (entanglement fidelity of 91.8%) for telecomm application, and definite quantum storage of InAs QD SPs at 879 nm in ion-doped solid (at most 100 time-bins). In future, there will be still several urgent things to do, including 1) purging the environment of a single QD (e.g. growing GaAs QDs to avoid the wetting layer, and optimizing QD growth to avoid smaller QDs) to reduce its spectral diffusion and developing a high-symmetric QD (e.g. GaAs QD) to reduce the fine structure splitting of its emission; 2) positioning single QD precisely for a good alignment of single QD to a micro-cavity or fiber cone (single mode with high numerical aperture) to increase optical excitation efficiency and SP collection efficiency; 3) developing optical quantum integrated chip, including hybrid structures of active micro-cavity and passive waveguide, and high-transmission waveguide beamsplitter or Mach-Zender interferometer to improve SP extraction (micro-cavity), collection (optical setup) and counting rate (at avalanche photon detectors and coincidence counting module).

**Keywords:** individual quantum dots, nanowire, micro-cavity, single photon, entangled photon pair

**PACS:** 78.30.Fs, 78.67.Hc, 78.67.Tf, 78.67.-n

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180594

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91321313, 90921015, 61505196).

† Corresponding author. E-mail: [zcnium@semi.ac.cn](mailto:zcnium@semi.ac.cn)