

# 氧化锌纳米棒中自发辐射的回音壁模腔增强

王马华<sup>1</sup> 朱光平<sup>2</sup> 朱汉清<sup>1</sup> 赵正敏<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 淮阴工学院电子与电气学院, 江苏 淮安 223003  
<sup>2</sup> 淮北师范大学物理与电子信息学院, 安徽 淮北 235000)

**摘要** 应用气相传输法制备了氧化锌纳米线和具有六方对称截面的纳米棒, 利用电子扫描显微镜, X-射线衍射仪等进行形貌与结构表征。室温下, 用 355 nm 激光脉冲, 以 260 W/cm<sup>2</sup> 相同光强激励条件, 分别测量其光致发光 (PL) 谱, 在棒状样品中发现 393 nm 有发光峰, 而线状样品是在 382 nm 处。二者相比, 棒状样品的紫光波段自发辐射光强增加、频谱展宽、中心波长红移和绿光波段辐射被显著抑制。基于半导体材料的能带理论、激子复合发光理论和费米黄金定则等, 对样品 PL 谱差异原因进行理论分析, 结果表明上述现象源于棒状样品中回音壁模谐振腔 (WGMRs) 的自发辐射增加。利用强激励条件下样品光致发光谱, 验证了实验结果与理论分析结果较好吻合。

**关键词** 光电子学; 氧化锌; 光致发光; 回音壁模腔; 自发辐射增强

中图分类号 O432 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0706001

## Enhancement for Spontaneous Emission from ZnO Hexagonal Microrods Based on Whispering Gallery Mode Resonators

Wang Mahua<sup>1</sup> Zhu Guangping<sup>2</sup> Zhu Hanqing<sup>1</sup> Zhao Zhengmin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Electronic and Electrical Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an, Jiangsu 223003, China

<sup>2</sup> School of Physics and Electronic Information, Huaibei Normal University, Huaibei, Anhui 235000, China

**Abstract** The samples of zinc oxide nano-wires and hexagonal micro-rods are fabricated by using vapor phase transport method under the almost same conditions. Their morphology and the same crystal structures are examined and characterized by scanning electron microscopy and X-ray diffraction. The photoluminescence (PL) spectra of hexagonal samples, excited by 355 nm laser pulse with excitation power density (260 W/cm<sup>2</sup>), is measured and compared with those from nano-wires with the same exciting condition at room temperature. There are a more intensive broaden violet emission peaking at 393 nm, frequency spectrum broatening, the red shift of center wavelength and an almost disappearing green band emission in the PL of hexagonal rods while an emission peaking at 382 nm, flat green emission for wires samples. The difference of PL spectra between the two kinds of samples may be attributed to the enhancement of spontaneous emission in whispering gallery modes resonators (WGMRs) by theoretical analysis based on the theory of energy bands for semiconductors, emission from excitons, and Fermi golden rules. PL spectrum measuring experiments with higher excitation power density for the same samples are arranged to verify the theoretical analysis results, which fit with experimental results well.

**Key words** optoelectronics; zinc oxide; photoluminescence; whispering gallery modes resonators; enhancement for spontaneous emission

**OCIS codes** 140.3380; 180.2520; 260.2510

## 1 引 言

光致发光 (PL) 谱是研究材料能级结构、物质结

构及光与物质相互作用机理等理论物理问题的重要手段。长期以来, 人们一直致力于以较小的激

收稿日期: 2012-02-01; 收到修改稿日期: 2012-03-01

基金项目: 国家自然科学基金 (60977038)、安徽省自然科学基金 (11040606M10)、安徽省教育厅科学基金重点项目 (KJ0140A306) 和淮阴工学院重点项目基金 (HGA0013) 资助课题。

作者简介: 王马华 (1966—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光电子学、光通信与光电传感等方面的研究。

E-mail: wmh0304@sina.com

励光强,获得特征显著、包含更多精细结构信息 PL 谱途径的探索。根据费米黄金定则,自发辐射跃迁概率决定于初态、终态和光场的模式密度。因此,理论上可以通过对材料发光中心光场模式密度的调控,实现光辐射的增强和频谱变化。Purcell 等<sup>[1]</sup>于 1946 年首次提出利用微腔结构对场模式密度调控,实现谱增强;此后,Schubert 等<sup>[2~5]</sup>,利用包括光子晶体谐振腔在内多种法布里-珀罗(F-P)结构谐振腔,实现了铟掺杂材料在 1.55  $\mu\text{m}$  波段上自发辐射增强与频谱调控。相对于 F-P 腔,基于内全反射的回音壁谐振腔(WGMRs),有着更理想的 Q 值和谱线分辨率<sup>[6,7]</sup>,可以有更强的 PL 谱的增强与谱线调控效果,从而在全光波长变换、基于慢光效应的光缓存等光通信与光传感领域有着更为广阔的应用前景<sup>[8~11]</sup>。

作为自激活纤锌矿结构晶体材料典型,合适的能级结构和较高的室温激子束缚能,使得氧化锌微纳结构晶体具有良好的室温紫外发光特性;六角晶系结构和折射率,又使之在形成 WGMRs 方面,具有天然的优势;自组织生长六方对称氧化锌微纳晶体构成的 WGMRs,可避免人工制备过程中密度起伏等因素引致散射损耗,具有更为优良的谐振特性;纳米结构样品带边的高态密度,意味着对应辐射具有较低的阈值和较高强度,从而在紫外发光器件和光传感领域,有着日益广泛的应用<sup>[12~14]</sup>。基于 WGMRs 的激子复合紫外受激辐射、等离子振荡受激辐射和电抽运紫外发光等现象与应用的研究,已成为氧化锌微纳结构晶体研究新的热点<sup>[13~17]</sup>。微纳 WGMRs 结构对氧化锌自发辐射特性影响的研究,对于新型高效的强度与频谱特性可调制的紫外波段光电器件、高性能生化传感器等,具有重要的理论意义与实践价值。

本文基于气相传输法,在相同条件下制备了氧化锌纳米线与纳米棒结构样品;室温下以 355 nm 激光脉冲,在相同较低光强激励条件下激发样品,观测并比较两种样品 PL 谱的差异;对差异的产生原因和机理进行理论分析;最后,利用较强激励条件 PL 谱,对理论分析的结果进行进一步的验证。

## 2 实 验

样品由气相传输法制备而得,将相同批次高纯度氧化锌、石墨粉末混合物,盛放于氧化铝蒸发皿并置于水平管式反应炉中石英管的蒸发区,蒸发温度设为 1100  $^{\circ}\text{C}$ ;以(100)界面硅片作为衬底,将之置于

石英管另一端的反应区,反应温度分别控制为 600  $^{\circ}\text{C}$  和 750  $^{\circ}\text{C}$ ,反应时间设定为 30 min;反应结束后,取出硅片置于超净空间中自由冷却,在衬底上分别获得可分离的纳米线和具有六方对称截面的纳米棒。对所生成的样品,分别用 JEOL JSM5910LV 型扫描电子显微镜(SEM)和 Simens D5005 型 X 射线衍射仪(XRD)(Cu  $\text{K}\alpha_1$ , 40 kV)进行样品结构与物相表征。结果表明,线状样品直径约 80 nm,长度 60  $\mu\text{m}$  左右;纳米棒具有典型的六方对称的横向截面结构,对角线约 6  $\mu\text{m}$ ,长约 1 mm; $a=0.325$  nm, $c=0.521$  nm,与数据库中的 ZnO(JCPDS Card File, No. 89-511)晶胞参数一致;未见锌、碳等杂质衍射峰,样品沿  $c$  轴生长、结晶性良好,说明生成了具有较高纯度的氧化锌晶体。两种样品在结构与物相上无其他明显差异。

对上述纳米线、纳米棒样品,分别以 Nd:YAG 激光器三倍频光激励并测量其 PL 谱:光束直径约 0.5 mm,激光器输出波长 355 nm,脉宽 8 ns,重复频率 10 Hz,输出功率可调;辐射光由多通道光谱分析仪(OMA)中的 CCD 阵列采集;对于纳米棒,样品轴向、激励光与光谱分析仪采集信号的方向,三者相互垂直。

## 3 结果与讨论

激励光功率密度增加到 50  $\text{W}/\text{cm}^2$  时,从线状样品中可以观察到明显的紫外辐射,棒状样品出现紫外辐射对应激励功率相对小些。随着激励光增强,两种样品 PL 谱间出现显著差异。图 1 为 260  $\text{W}/\text{cm}^2$  激励条件下纳米线、纳米棒 PL 谱的测量结果。

如图 1(a)所示,线状样品 PL 谱由两条带状光谱组成:谱宽较窄、中心波长 382 nm 的紫光峰和谱宽相对较宽、中心波长 510 nm 的绿光峰;两者的半峰全宽(FWHM)分别为 10 nm 和 40 nm 左右。图 1(b)为棒状样品 PL 谱。相对于线状样品,棒状样品 PL 谱中有着强度更高、谱线明显展宽、中心波长相对于线状样品有着约 10 nm 红移的紫光峰,FWHM 约 25 nm。从图 1(b)中未见明显的绿光峰。

利用 Origin 软件包中频谱分析工具,对纳米棒 PL 中的紫光峰进行高斯多峰拟合后发现,其由中心波长分布在 380~410 nm 范围内 5 个峰组成。

### 3.1 WGMRs 中激励光强密度增强与模式选择

图 1 两种样品 PL 谱的差别,与棒状样品中基于六方截面形成的 WGMRs 的自发辐射增强效应有关。谐振腔内自发辐射增强源于腔内激励光强密

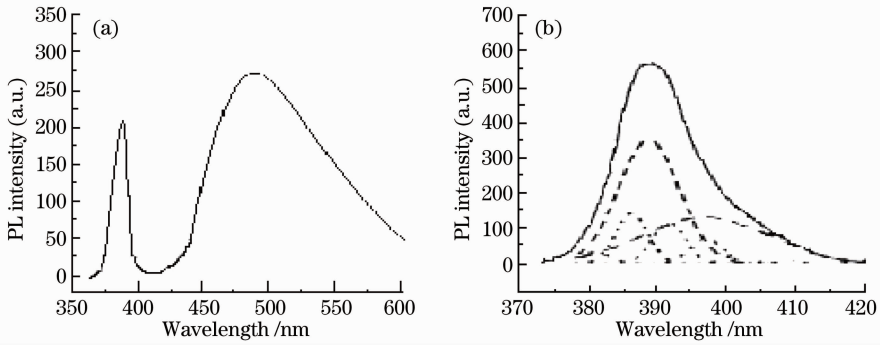

 图1 260 W/cm<sup>2</sup> 光强激励下微纳结构氧化锌样品 PL 谱。(a)纳米线;(b)纳米棒

 Fig.1 PL of ZnO samples with 260 W/cm<sup>2</sup> excitation power density. (a) Nano fiber; (b) nano rod

度倍增和光场模式密度对不同能级间跃迁概率的选择性增强<sup>[2~4]</sup>。

根据激励光与样品取向关系,棒状样品六方对称截面中自组织生长形成界面的优良反射性、氧化锌材料紫光波段 2.5 左右的折射率,构成基于内全反射的六方对称 WGMRs;内全反射的临界角条件决定,WGMRs 中的光场只能存在于图 2(a)中虚线与样品物边界之间区域。这可等效为图 2(b)所示的六方平板波导构成的谐振腔。基于射线跟踪法,平板波导厚度  $d$  可表示为<sup>[9]</sup>

$$d = \sqrt{3}a/8 + \lambda/2, \quad (1)$$

式中  $a$  为六边形的边长, $\lambda$  为波长。

基于 Schubert 等<sup>[2,3,9]</sup>提出的数值处理方法,利用 Rsoft 软件对棒状样品横截面中场分布进行数值模拟发现,腔中的场分布如图 3 所示:腔中以低阶的准横电(TE)模、横磁(TM)模为主,约 80% 的光强集中分布于厚度由(1)式决定、面积占总截面积 1/3 左右的 WGMR 内。这表明,在相同的名义激励功率下,腔内激励光强密度将是无腔时的 4 倍以上。

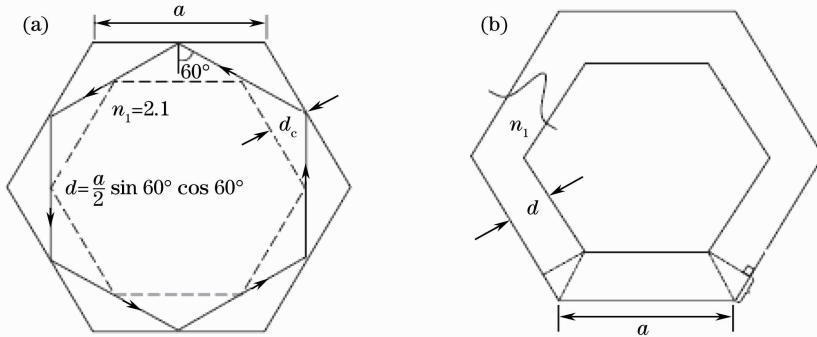


图2 基于氧化锌纳米棒截面的 WGMR 示意图。(a)内全反射示意图;(b)等效六方波导谐振腔

Fig.2 Schematic diagrams of WGMRs based on hexagonal cross-section of ZnO microrods.

(a) Innertial total reflection in WGMRs; (b) effective slab waveguide oscillator

根据六方对称腔结构腔谐振相位条件,腔中可能存在的 TE 模纵模应满足<sup>[15,16]</sup>

$$nL = \lambda \left( N + \frac{6}{\pi} \arctan \beta \sqrt{4n^2 - 3} \right), \quad (2)$$

式中  $L$  为腔长; $N$  为纵模模式数; $\beta$  为相位常数,对于 TM 模取  $1/n$ 。

激励光能量单位取 eV,氧化锌折射率为

$$n_{TE} = 1.9384 + 1.1775 \times 10^{-2} (h\nu)^2 + 1.5237 \times 10^{-3} (h\nu)^4. \quad (3)$$

将(2)、(3)式与纳米棒样品结构参数和腔内激励光强的估算值结合,在实测 PL 谱对应波长范围内,解得谐振腔内模式数为 84~88,对应的波长与

图 1(b)所示高斯多峰拟合结果基本吻合。

### 3.2 WGMRs 中的自发辐射增强

根据费米黄金定则,自发辐射跃迁速率  $\omega_{\text{spont}}$  决定于<sup>[2,3]</sup>

$$\omega_{\text{spont}} = \tau_{\text{spont}}^{-1} = \int_0^{\infty} W_{\text{spont}}^{(l)} p(\nu_l) d\nu_l, \quad (4)$$

式中  $W_{\text{spont}}^{(l)}$ ,  $p(\nu_l)$  分别为光学模  $l$  对应的自发辐射跃迁速率和光学模式密度。在折射率为  $n$ , 体积为  $V$  的自由空间中,光学模式密度连续,且有

$$p(\nu_l) = 8\pi\nu_l^2 n^3 V / c^3, \quad (5)$$

式中  $c$  为真空中光速。根据以上分析可知,不同能

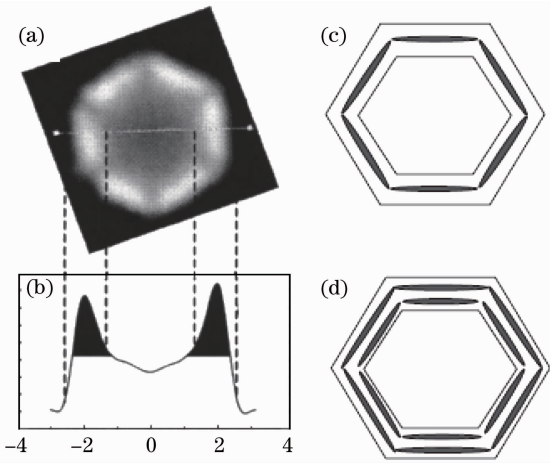


图3 棒状样品横截面构成 WGMRs 中光场的数值计算结果。(a)腔内场分布;(b)腔内场强分布;(c)基模模场;(d)一阶模场

Fig. 3 Numerical investigation results for optical field in cross-section of ZnO micro-rod. (a) Optical field distribution in cross-section; (b) profile of optical in cross-section; (c) envelop of fundamental mode; (d) envelop of first order

级间跃迁概率,将因光子模式密度不同而被增强或抑制。

线状样品中不能形成谐振腔,类似于自由空间情形,光学模密度均匀、连续分布;各能级间自发辐射概率及相应辐射光强、谱宽,决定于各能级寿命。

大量理论与实验表明<sup>[16,17]</sup>,氧化锌 PL 谱中的紫(外)光辐射主要来自近带跃迁,包括自由激子复合、中性施主束缚激子复合、双激子复合、施主受主对复合等;缺陷态则是绿光峰的主要成因;此外,缺陷态还将在导带底和价带顶产生相应的带尾定域态,使得氧化锌实际禁带宽度,相对于 3.36 eV 的禁带宽度理论值有着数十微电子伏特的收窄<sup>[17,18]</sup>;室温下以较低光强激励时,自由激子复合占主导;随着激励光强提高,自由激子密度提高时,双激子复合占主导地位。双激子复合是通过两个激子间非弹性碰撞实现。碰撞将一个自由激子激励到激发态,另一自由激子失去部分能量后被散射回基态,同时发出一个光子。光子能量  $E_q$  ( $q = 2, 3, 4, \dots$ )可表示为<sup>[19]</sup>

$$E_q = E_{ex} - E_b^{ex}(1 - 1/q^2) - 3kT/2. \quad (6)$$

式中  $E_{ex}$  为自由激子能量;  $E_b^{ex}$  为激子束缚能,室温下取值为 60 meV;  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为开氏温度。由(6)式可知,室温下当一个激子被碰撞到  $q=2$  的状态时,另一激子发射的光子的能量比自由激子辐射光子能量低 70 meV。此外,强激励还将导致半

导体材料的能带重整。综合上述因素,强激励将使氧化锌 PL 谱中紫光峰红移。强激励还将引起材料等离子化,导致缺陷态浓度减少和缺陷态间跃迁中的猝灭效应,使得绿光峰将被明显减弱直至消失<sup>[15,18]</sup>。

气相传输法制备氧化锌样品中,缺陷态以锌空位与氧空位为主。共价半径 0.971 的氧原子,相对于共价半径 1.755 锌原子,形成氧空位的概率远大于锌空位形成概率,部分  $Zn^{2+}$  在被还原成单离子氧空位的同时形成锌空位。单离子氧空位距价带顶 3.288 eV 形成施主能级,距价带顶约 0.84 eV 锌空位为受主能级,受主能级与施主能级之间跃迁,构成缺陷态自发辐射的主体,对应中心波长为 510 nm (2.448 eV) 的绿光峰<sup>[12,13,16]</sup>。

线状样品绿光峰反映样品内缺陷态密度。由图 1(a)可知,绿光峰的强度与谱宽表明,样品具有较高浓度缺陷态;低激励功率下带边辐射以自由激子复合辐射为主。由于线状样品不具备形成谐振腔结构的条件,类似于自由空间情形,光学模密度均匀连续分布;各能级间自发辐射概率及相应辐射光强、谱宽,决定于能级寿命。考虑缺陷态引致的带边带尾定域态,结合 60 meV 的激子束缚能,线状样品具有以自由激子复合辐射为主,对应中心波长 382 nm (3.25 eV) 较窄的紫光峰。

对于棒状样品,由于如图 2、3 所示的基于六方对称截面构成的 WGMRs 腔内激励光强的倍增效应,样品中发光区域的实际激励光强约 4 倍于名义激励光强;强激励下半导体材料的能带组重整将使之禁带宽度收窄;强激励下自由激子密度提高后的双激子辐射占优等,导致了紫(外)光峰的红移,而强激励引致的缺陷态密度下降和猝灭效应的提高,使得绿光峰被显著削弱;再由(2)式可知,谐振腔的模式选择作用,腔内的模式密度对紫(外)光波段相应能级对应的自发辐射,通过(4)式得到不同程度的增强,形成图 1(b)所示 PL 谱:紫光峰发光强度增强、谱线展宽,中心波长红移,绿光峰强度被削弱至几乎不可见。

为进一步验证上述分析结果,再分别将两种样品的激励光强提高至 1100 W/cm<sup>2</sup> 和 330 kW/cm<sup>2</sup>, 得到如图 4 所示 PL 谱。

对比图 1(a)和图 4(a)可知,紫光峰中心波长红移至 393 nm 附近,红移量与双激子非弹性碰撞情形一致,绿光峰被显著抑制。紫光峰红移量及绿光峰被抑制与图 1(b)所示情形一致。这表明名义低

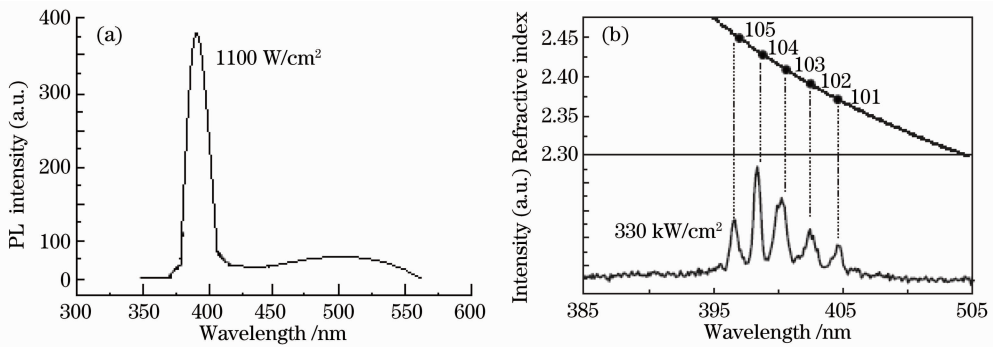


图4 不同激励光强下微纳结构氧化锌样品 PL 谱。(a)纳米线;(b)纳米棒

Fig.4 PL of ZnO samples with different excitation power densities. (a) Nano fiber; (b) nano rod

激励条件下,纳米棒由于形成 WGMRs,腔内实际激励光强倍增,因而表现出强激励条件下才具有的自发辐射紫外峰红移、绿光峰消失。纳米线中未观测到分立峰,原因是线状样品中难以实现谐振腔结构。如图4(b)所示,是更高激励条件下棒状样品受激辐射情形下对应 PL 谱,谱中可见明显离散峰。虽然由于能带重整化与等离子化后的库仑屏蔽效应,使得紫光峰具有更大的红移量,但腔内模式数与自发辐射情形一致,绿光峰完全消失。这进一步验证了强激励电离化对缺陷态发光的影响和腔内模式密度的选择作用,是对图1所示两种样品 PL 谱差别理论解释的实验验证。

## 4 结 论

基于气相传输法制备具有相同晶体结构氧化锌纳米线与纳米棒样品,以相同激励光强激发,从棒状样品中观察到增强的紫光辐射和几不可见绿光峰;基于纳米棒样品六方对称结构形成的 WGMRs,分析了腔内光强倍增效应与模式选择特性,结合半导体材料能带结构理论、激子复合辐射理论等,研究了棒状样品中基于 WGMRs 自发辐射增强效应:在相同名义激励光强激发下,棒状样品基于 WGMRs,腔实际激励光强为名义激励光强 4 倍以上,强激励条件下能级重整、双激子复合辐射占优是紫光峰红移的主要原因;腔的模式选择性和激励光强增加,是紫光峰强度增加、频谱展宽的主要原因;激励光强倍增,还导致缺陷态密度下降和绿光峰削弱。最后,通过分别提高线状样品和棒状样品激励光强后实测 PL 谱,对理论分析进行验证,强激励下纳米线表现出相似的紫光峰红移和绿光峰削弱,棒状样品观测到的受激辐射峰情形也与自发辐射峰拟合结果较好吻合。

## 参 考 文 献

- 1 E. M. Purcell, H. C. Torrey, R. V. Pound. Resonance absorption by nuclear magnetic moments in solid [J]. *Phys. Rev.*, 1946, **69**(1-2): 37~38
- 2 E. F. Schubert, A. M. Vredenberg, N. E. J. Hunt *et al.*. Giant enhancement of luminescence intensity in Er-doped Si/SiO<sub>2</sub> resonant cavities [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(12): 1381~1383
- 3 E. F. Schubert, N. E. J. Hunt, A. M. Vredenberg *et al.*. Enhanced photoluminescence by resonant absorption in Er-doped SiO<sub>2</sub>/Si microcavities [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(19): 2603~2605
- 4 Y. G. Li, R. M. Almeida. Simultaneous broadening and enhancement of the 1.5 μm photoluminescence peak of Er<sup>3+</sup> ions embedded in a 1-D photonic crystal microcavity [J]. *Appl. Phys. B*, 2010, **98**: 809~814
- 5 Wang Hong, Ouyang Zhengbiao, Han Yanling *et al.*. Amplification of one-dimensional photonic crystals defect-mode laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **36**(11): 1691~1697  
王宏, 欧阳征标, 韩艳玲等. 一维光子晶体缺陷模激光器的放大特性 [J]. *光学学报*, 2006, **36**(11): 1691~1697
- 6 G. P. Zhu, C. X. Xu, J. Zhu *et al.*. Growth mechanism and multiphoton-induced photoluminescence of crownlike zinc oxide [J]. *J. Mater. Sci.*, 2011, **46**(6): 1877~1883
- 7 Zhao Weifang, Hou Wei, Li Gang *et al.*. Single-frequency Nd:YAG ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2810~2812  
赵伟芳, 侯玮, 李港等. Nd:YAG 环行腔单频激光器 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2810~2812
- 8 Yan Yingzhan, Ji Zhe, Wang Baohua *et al.*. Evanescent wave excitation of microsphere high Q model using tapered fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1789~1793  
严英占, 吉哲, 王宝花等. 锥形光纤倏逝场激发微球腔高 Q 模式 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1789~1793
- 9 C. Yuen, S. F. Yu, X. W. Sun *et al.*. Ultraviolet lasing phenomenon of zinc oxide hexagonal microtubes [J]. *Japan. J. Appl. Phys.*, 2004, **43**(8): 5273~5278
- 10 Wang Ju, Yu Jinlong, Luo Jun *et al.*. Investigation of 40 Gb/s all-optical serial to parallel conversion to 8-channel 5 Gb/s [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0506001  
王菊, 于晋龙, 罗俊等. 40 Gb/s 至 8 路 5 Gb/s 全光串并转换实验研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0506001
- 11 Liang Lingliang, Yan Xiaona, Han Feng *et al.*. Study on instantaneous diffraction and group time delay characteristics of a transmission volume holographic grating under ultra-short laser pulsed readout [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0505001  
梁玲亮, 阎晓娜, 韩峰等. 透射型体光栅对超短脉冲的瞬时衍

- 射及其群时延的特性研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(5): 0505001
- 12 Yang Changhu, Ma Zhongquan, Yuan Jianhui. Influence of substrate temperature on properties of aluminum-doped zinc oxide films prepared by DC magnetron sputtering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0531001  
杨昌虎, 马忠权, 袁剑辉. 基底温度以直流磁控溅射制备掺铝氧化锌薄膜性能的影响[J]. 光学学报, 2011, **31**(5): 0531001
- 13 Lin Zhixian, Guo Tailiang, Zhang Yongai *et al.*. Study of the ZnO nanomaterial field-emission cathode array based on graphical growth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1739~1744  
林志贤, 郭台亮, 张永爱等. 基于花样生长氧化锌纳米材料场发射特性研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1739~1744
- 14 Wang Mahua, Zhu Hanqing, Zhu Guangping. Backward scattering characteristics of ZnO with microstructure similar to morpho butterfly wing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0516002  
王马华, 朱汉清, 朱光平. 类蝴蝶翅膀结构纳米氧化锌的背向散射特性[J]. 光学学报, 2011, **31**(5): 0516002
- 15 J. Dai, C. X. Xu, K. Zheng *et al.*. Whispering gallery-mode lasing in ZnO microrods at room temperature[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(24): 241110
- 16 J. Dai, C. X. Xu, P. Wu *et al.*. Exciton and electron-hole plasma lasing in ZnO dodecagonal whispering-gallery-mode microcavities at room temperature[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(1): 011101
- 17 Zhu Guangping, Wang Mahua, Xu Chunxiang *et al.*. UV spontaneous and stimulated emission of nanostructure ZnO[J]. *Chinese J. of Luminescence*, 2006, **27**(4): 602~606  
朱光平, 王马华, 徐春祥等. 纳米氧化锌的紫外自发辐射与受激辐射[J]. 发光学报, 2006, **27**(4): 602~606
- 18 Yuan Yanhong, Hou Xun, Bai Jintao. Photoluminescence properties of ZnO nanowires excited with ultraviolet light[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3): 373~375  
袁艳红, 侯 洵, 白晋涛. 紫外光激发下氧化锌纳米线的发光特性研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(3): 373~375
- 19 Jia Jikuo, Luo Li, Zhang Wei *et al.*. Room temperature ultraviolet stimulated emission of ZnO nanocrystals [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(9): 2525~2528  
贾继扩, 罗 莉, 张 伟等. ZnO 纳米晶的室温紫外受激发射特征[J]. 光谱与光谱分析, 2010, **30**(9): 2525~2528

栏目编辑: 韩 峰