

InGaP 光学微盘的显微荧光图像观测及分析*

辛永春 章 蓓 徐万劲

(北京大学物理系, 人工微结构和介观物理国家重点实验室, 北京 100871)

摘要 利用一套 CCD 显微荧光图像观测和采集分析系统, 分别在室温和液氮温度下对半径为 $5\mu\text{m}$ 发射波长 $0.65\mu\text{m}$ 的 InGaP 半导体光学微盘的荧光图像进行了观测. 在绿光激发下, 观测到沿 InGaP 微盘边缘内侧有一明亮的红色荧光光环和某些特征, 表明 InGaP 光学微盘中存在以回音壁模式为主导的多种模式混合的模式结构.

关键词 光学微腔, 光学微盘, InGaP, 回音壁模式(W-G Mode), 荧光图像

1 引 言

光学微盘是光学微腔典型结构之一. 它以一个折射率高于周围介质的光波长尺度的微型圆盘为光学谐振腔. 通常认为光学微盘中占主导地位的光学模式是回音壁模式 (Whispering-gallery Mode-W G mode). 半导体光学微盘以其相对简单的制造工艺, 高品质因子 Q 成为微腔物理和微腔器件很好的研究对象^[1-5]. 利用 CCD 显微荧光图像观测和采集分析系统观测 InGaP 光学微盘的显微荧光图像并对微盘模式作初步分析.

2 实验方法及结果

实验中, InGaP 光学微盘是以 GaAs 为衬底用液相外延技术生长的 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ ($0.2\mu\text{m}$)/AlGaAs ($1\sim 2\mu\text{m}$)/GaAs 外延片上制备的. 样品的荧光发射波长为 $0.65\mu\text{m}$. 采用普通光刻, 离子束干法刻蚀和选择性湿法腐蚀等工艺制成了半径约 $5\mu\text{m}$ 形如一只高脚圆桌的光学微盘^[6], 微盘下由一约 $1.2\mu\text{m} \times 1.2\mu\text{m}$ 的方形支柱支撑. 分别在室温和液氮温度下利用一套 CCD 显微荧光图像观测和采集分析系统 (Olympus BX60) 对 InGaP 光学微盘的荧光图像进行了观测^[7]. 由于 InGaP 光学微盘发射波长在可见波段的 $0.65\mu\text{m}$, 利用荧光显微镜的 100W 汞灯中 $510\sim 550\text{nm}$ 的绿色光作泵浦光源, 垂直入射激发微盘, 从垂直方向直接观察和收集 InGaP 微盘顶部表面的荧光图像, 获得微盘表面的荧光强度分布. 图 1(a) 和 (b) 分别为同一个 InGaP 微盘在室温和液氮温度下用 50 倍物镜采集的典型的荧光图像. 图 2(a) 和 (b) 分别为由图 1(a) 和 (b) 得到的荧光强度沿微盘径向的分布曲线. 由图可见, 在靠近微盘边缘处有一明亮而狭窄的红色光环, 并在微盘表面显现为一定强度的红色荧光背景, 在微盘的中央位置还有一个明亮的光斑, 而在紧邻 InGaP 微盘边缘的亮环之内离中心约 $3/5$ 半径处还依稀可见一强度较弱的光环. 实验发现, 随着 InGaP 微盘温度由室温降至液氮温度, InGaP 微盘边缘红色荧光光环的强度明显增强, 表面背景光强同时增强, 光环与 InGaP 盘内背景荧光的相对强度发生改变: 室

* 国家自然科学基金资助项目 (No. 69687007, 19774008 和 69896260)

** 联系和负责人

1998年5月30日收到

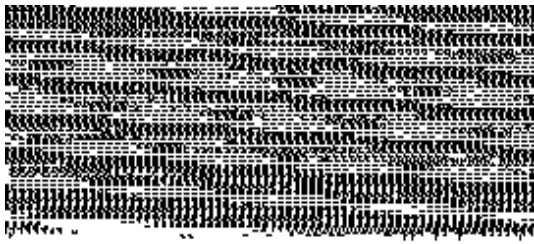


图1 半径为 $5\mu\text{m}$ 的 InGaP 光学微盘的显微荧光图像 (a)室温 (b)液氮温度

Fig. 1 Fluorescence images of InGaP microdisk with radius of $5\mu\text{m}$. (a) room temperature (b) temperature of liquid nitrogen

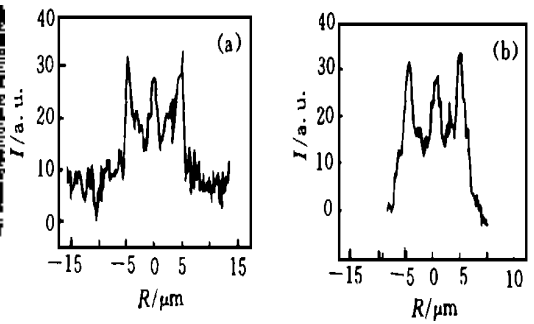


图2 半径为 $5\mu\text{m}$ 的 InGaP 光学微盘的显微荧光图像的荧光强度分布曲线 (a), (b) 分别与图1中的(a)和(b)相对应.

Fig. 2 Radial fluorescence profiles of images on InGaP microdisk with radius of $5\mu\text{m}$. (a) and (b) are corresponding to fig. 1(a) and fig. 1(b), respectively

温下, 光场中光环强度的峰值与 InGaP 微盘

中背景强度之比略大于3; 在液氮温度下两者的比值近似为2. 我们认为, 上述通过 CCD 显微荧光图像观测和采集分析系统采集的图像, 是一种远场的显微图像. 虽然这种远场荧光图像与微盘内的光场模式之间的联系仍是一个值得研究的课题, 但它确应是 InGaP 微盘内的光场模式的反映^[8]. 下面的讨论表明, 显微荧光图像中紧邻 InGaP 微盘边缘的亮环证实了回音壁模式(W-G Mode)的主导地位, 同时显微荧光图像还反映出 InGaP 光学微盘中存在面发射等多模式光场.

3 结果分析与讨论

考虑光学微盘的理想模型, 可简化为一具有光增益的介质圆盘, 圆盘内部的光场分布可以用 Helmholtz 方程来求解^[2, 9-12]. 考虑到微盘的柱对称性, 在柱坐标 (r, θ, z) 下利用分离变量方法求解 Helmholtz 方程, 光场形式应为 $u(r, \theta, z) = J_{MN}(kr)e^{iM\theta}Z(z)$, 其中 $k = n_{\text{eff}}k_0$, k_0 是真空中波数, n_{eff} 是 InGaP 微盘的有效折射率. $Z(z)$ 表明 z 方向存在的光学模式. 如果光学微盘很薄, 可以认为在 z 方向只存在基模, 在解方程时可以不考虑变量 z 的影响, 光场分布的径向分布函数 $J_{MN}(kr)$ 即为整数阶 Bessel 函数^[2], 光场模式可以用回音壁模式(W-G mode)来近似. 即 $N = 1, M \gg 1$ 的 $J_{MN}(kr)$, 这是一种靠盘内全反射沿圆盘周边连续传播的光学模式, 表现为在靠近微盘边缘处有一强度很高的狭窄圆环, 在微盘的中央 $r = 0$ 处光场的强度为0. InGaP 微盘荧光图像中靠近微盘边缘的明亮红色光环正是 InGaP 微盘中回音壁模式的特征. J_{M1} 型的 Bessel 函数的根与其一阶微分的根之比为它的一个特征值 g , g 仅与 J_{M1} 型 Bessel 函数的阶数有关, 可以通过测量回音壁模式的光环的光强最大值位置和微盘半径确定 g , 从而确定 W-G 模式的阶数^[8]. 初步估算得到半径 $5\mu\text{m}$ 的 InGaP 微盘中回音壁模式阶数为110阶以上. 实验结果与理论计算比较表明, InGaP 微盘荧光图像中红色光环反映了 InGaP 微盘中的回音壁模式, 但光环较宽, 不能以单一阶数的回音壁模式来拟合.

从理论计算和分析看, $M = 0, \pm 1$ 的模式的光场集中分布在微盘的中心, 是一种可能的面发射模式^[9]. 当微盘比较大的时候, 则可能存在 $N > 1$ 的光场模式, 这种模式在沿着微盘的半径方向有 $N - 1$ 个节点, 表现为由中心向外的一系列的同心光环. 如果光学微盘的厚度较大(与 $N/2n$ 比), 还可能存在着类似于垂直腔面发射的模式. 实验用半径 $5\mu\text{m}$ 、厚度 $0.15 \sim 0.2\mu\text{m}$ 的微盘尺度与 $N/2n_{\text{eff}}$ 相比偏大, 所以在我们的 InGaP 微盘中除占主导地位的 W-G 模式外应存在其他模式. 我们认为, 图1观测到的在微盘中心的较强的亮斑是 $M = 0$ 或 $M = \pm 1$ 模式的反映; 在半径 $3/5$ 处的较弱的亮环则是有 $N > 1$ 的径向模式存在的表现; 而 InGaP 微盘的表面的红色荧光背景是垂直腔面发射的结果. InGaP 微盘边缘光环的展宽很可能是由回音壁模式与这些模式共同作用的结果.

总之, 通过对 InGaP 光学微盘显微荧光图像的观测和分析发现, 在 InGaP 光学微盘中除了占主导地位的回音壁模式外, 还存在着包括面发射模式, 径向模式在内的其他模式, 微盘内的光场是这些模式混合的结果. 虽然利用 CCD 显微荧光图像观测采集系统观测 InGaP 光学微盘中的显微荧光图像要受到 Abbe 分辨率以及物镜数值孔径等空间分辨率的限制, 更准确地测定光学微盘内的光场分布需要用近场光学扫描显微镜测量. 而且为了更好地分析 InGaP 光学微盘中的光学模式还需要测量微盘发射光谱、建立与实际微盘更吻合的理论模型. 但显微荧光图像这种方法可以迅速方便和直观地提供 InGaP 光学微盘中的光场分布的信息, 这是一种非常有用的研究微盘光学模式的实验方法.

参 考 文 献

- [1] McCall S L, Levi A F J, Slusher R E *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1992, **60**: 289.
- [2] Fratechi N C, Levi A F J. J. Appl. Phys., 1996, **80**: 644.
- [3] Zhang Bei, Wang Roupeng *et al.*, Chinese J. Infrared and Millimeter Wave (Oversea's Edition), 1995, 14: 285.
- [4] Zhang Bei, Wang Roupeng *et al.*, Solid State Commun. 1994, **91**: 699.
- [5] Mair R A, Zeng K C, Lin J Y *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1997, **71**: 2898.
- [6] Zhu Xing, Zhang Yu, Xin Yongchun *et al.*, SPIE, 1998, **3467**.
- [7] Guo Chaohua, Lin Yong, Xin Yongchun *et al.*, Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1999, **35**: 60.
- [8] Lin Yong, Zhang Bei, Xing Yongchun *et al.*, Solid State Commun, 1998, **105**: 445.
- [9] Wang R P, Dumitrescu M M. J. Appl. Phys. 1997, **81**: 3391.
- [10] Lee T D, Cheng P H, Pan J S *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1998, **72**: 1530.
- [11] Levi A F J, Slusher R E *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1993, **62**: 561.
- [12] Guo C Z, Chen S L. Acta Physica Sinica, 1996, **5**: 185.

OBSERVATION AND ANALYSIS OF MICROSCOPIC FLUORESCENT IMAGE OF InGaP OPTICAL MICRODISKS

Xin Yongchun Zhang Bei Xu Wanjin

(Department of Physics, State Key Laboratory of Mesoscopic Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

The fluorescence image of the semiconductor InGaP microdisk is observed and analyzed by a CCD fluorescence microscope system. Under green light excitation, a bright red ring of fluorescence near the edge of microdisk together with some features is observed. As a result, the images reveal the optical disk mode pattern in our InGaP microdisks dominated by Whispering-Gallery modes mixed with other modes.

Key words microcavity, microdisk, InGaP, Whispering-gallery mode, fluorescence image