

扫描近场光学显微术对 InGaP 微盘发光模式的研究*

TN304.26
0472.3

张宇 辛永春[✓] 朱星凌 勇尹彦 周赫田 章蓓 甘子钊

(北京大学物理系,人工微结构与介观物理国家重点实验室,北京,100871)

摘要 采用反射式扫描近场光学显微技术分别对直径为 $5\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$ 的钉式 InGaP 光学微盘进行了形貌和光致发光的近场图样测量和研究,并与由常规光学荧光显微镜测得的荧光图像相比较,结果表明 InGaP 微盘的近场发光图样不仅反映出荧光图像的回音壁模式特征,即沿微盘周界显示为一圈红色亮环,而且证实荧光图像中的红色亮环实际上与更精细的由分立的周期性亮点组成的近场光场分布相对应,结合微盘内部与外部的近场分布可以获得光学微盘中发光模式的重要信息。

关键词 扫描近场光学显微技术,微盘型光学微腔,回音壁模式,InGaP 光学微盘。

引言

近年来,微腔发光器件以其小尺寸、低阈值、高 Q 值等优点得到了广泛的重视。微加工技术的飞速发展促进了各种不同类型光学微腔的实现和研究^[1~3]。作为一种典型的微腔结构,由圆盘形谐振腔组成的微盘微腔器件具有结构简单和易于制备的优点,但其中的光学模式远比普通的法布里-珀罗(F-P)平行平面微腔复杂得多^[4~7]。由于微盘的圆形边缘本身就相当于腔镜面,光在微盘盘内壁连续反射的结果形成圆形谐振腔的光学模式,包括回音壁模式(WGM; Whispering-Gallery Mode)和径向模式(Radial Mode)^[6]。其中的回音壁模式是指光学微盘中沿着微盘周界发生全反射而导致极高 Q 值的一类特殊的光学模式。

测定和研究微盘微腔的发光模式的光谱和空间分布对研究微盘的光学性质和发展微盘发光器件都是非常重要的^[4,6]。通常利用常规的光学荧光显微镜,可以获得微盘的显微荧光图像^[8],即沿微盘垂直方向的远场荧光图像。然而,受到光学衍射极限和物镜孔径角的限制,这种远场观测只能得到微盘部分传播场或散射场的信息,而含有高空间分辨率的近场(或称稳态场,通常是指样品表面小于 1 个波长的范围)和孔径角以外的信息被丢掉了。近年发展起来的近场光学成像方法则根据非辐射场的探测原理,提供优于光学衍射极限的高分辨率^[9],不但可以对微盘内导波模式分布进行亚波长观察,还可以获得常规光学数值孔径角以外的光场分布信息。因此,远场和近场相结合是研究微盘发光模式极有用的手段。

近年来,我们研制成功国内第一台超声共振式近场光导显微镜^[10,11],在近场光学成像和近场光谱方面积累了一定的经验,为运用近场光学研究微腔模式创造了条件。本文报道我

* 国家自然科学基金(编号 19674004,69687007,19774008 和 69686260)资助项目
稿件收到日期 1998-10-12,修改稿收到日期 1999-01-19

们利用扫描近场光学显微技术,对那些显微荧光图像中显示回音壁光学模式为主的一类半导体 InGaP 微盘进行了近场表面形貌和近场光强扫描的初步结果.

1 样品和实验装置

1.1 InGaP 光学微盘

InGaP 光学微盘是在 GaAs(100) 衬底上以液相外延技术生长的 InGaP/AlGaAs/GaAs 外延片上研制的. 利用普通光刻、离子束干法刻蚀和选择性湿法腐蚀等微加工技术制备成直径约 $5\mu\text{m}$ 或 $10\mu\text{m}$ 、盘厚约 $0.15\sim 0.20\mu\text{m}$ 、支撑面积为 $1\sim 4\mu\text{m}^2$ 、形如图钉的光学微盘^[12]. 微盘的荧光波长为 $650\sim 670\text{nm}$. 图 1 为典型的 InGaP 微盘扫描电镜(SEM)形貌图, 图中 InGaP 微盘半径 $3\mu\text{m}$, 盘高 $2\mu\text{m}$.



图 1 扫描电镜下 InGaP 微盘的形貌
Fig. 1 SEM micrograph of an InGaP microdisk



图 2 常温下 InGaP 微盘的远场荧光像
Fig. 2 Far-field fluorescence image of InGaP microdisks

图 2 为室温下直径为 $10\mu\text{m}$ 的 InGaP 微盘的典型显微荧光图像. 测量时以 100W 汞灯光源中 $510\sim 550\text{nm}$ 波段的绿光为泵浦光. 由图 2 可见, 荧光图像的主要特点是在盘边缘出现一明显的红色亮环, 显示了以回音壁模式为主的发光模式.

1.2 扫描近场光学成像及近场光谱系统

图 3 为本实验采用的反射式的扫描近场光学成像及近场光谱系统(RHK-Nanonics NSOM-100)示意图. 在扫描管的 X - Y 方向加上锯齿波可以使样品在 X 或 Y 方向上发生惯性滑移, 步长可以从几个纳米到几个微米. 这种样品相对于探针平移的功能非常重要, 可以使我们方便地选择样品中感兴趣的区域进行扫描. 扫描过程中, 探针与样品可处于接触模式或非接触模式(敲击模式, 恒高模式). 一束波长为 670nm 的激光聚焦于探针的悬臂前端, 经反射进入四象限半导体探头, 四象限探头给出的信号进入扫描控制器作为反馈信号来控制探针尖端与样品表面的距离, 典型间距为 $10\sim 20\text{nm}$. 在样品的正上方用一长工作距离镜头配合 CCD 监视探针与样品的相对位置. 微盘的激发源为波长 532nm 、功率 30mW 的倍频固体激光器. 滤波片 1 用来防止少量未经倍频的 1064nm 光照射在样品上. 微盘受激光泵浦发射的荧光信号被探针逐点收集, 而后以扫描方式逐点数字成像. 由于泵浦源(倍频固体激光

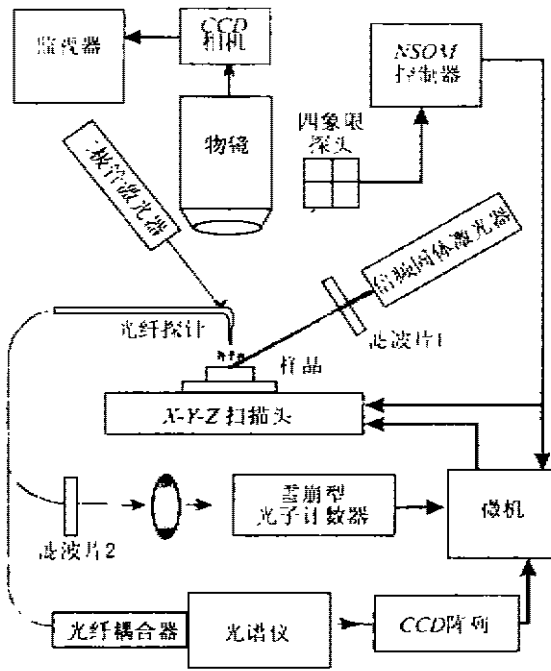


图 3 反射式扫描近场光学成像及
近场光谱系统

Fig. 3 Schematic of the scanning near-field optical
imaging and near-field spectroscopy experiment

扫描,往往会破坏盘的完整性;(2) 由于用来控制针尖与样品间距的激光波长与 InGaP 微盘的荧光波长(650~670nm)非常相近,为避免调控激光干扰接收信号,在微盘的近场荧光图像扫描时,只能采用非接触的恒高模式;(3) 微盘的荧光强度远远弱于样品的激发光(532nm)强度,加上非倍频的 1064nm 波长激光的可能引入,使得选择滤波片的问题显得格外重要,为此,我们进行了一系列对比实验,保证最终所得的近场光学像确实是微盘本身的近场荧光图像。

图 4 为在接触模式下用扫描近场光学显微镜得到的微盘形貌像。图 4(a)是直径为 5 μm 微盘的俯视图,图中显示的区域略大于整个微盘的 1/4,(b)是 5 μm 微盘的立体图。应注意的,扫描探针显微镜只能得到样品的顶面形貌,而无法得到微盘的侧面和下面的形貌。因此,图 4(b)中的微盘变成了“土丘”。由于探针尖端为圆锥形结构,且尖端与盘非严格垂直,导致在图 4(a)的盘边缘附近产生了若干“台阶”。总体上讲,图 4 给出微盘平坦的盘顶面和约 2 μm 的盘高度,与图 1 的 SEM 结果基本一致。

近场荧光像是在非接触的恒高模式下扫描得到的。为防止探针与盘边缘相撞,测量前先在接触模式下使探针与盘顶面相接触,即调控激光处于开状态,此时探针受反馈控制,但探针与盘面有力的作用使探针悬臂略微弯曲;然后,熄灭调控激光,关闭反馈控制,并在扫描管的 Z 方向加一反向偏移电压(15V, 60nm/V),将探针在微盘上方略加提起。考虑到探针悬臂的弯曲,针尖与盘面的间距估计小于荧光波长(650nm),这时探针处于微盘表面的近场范围。

器和接收器(探针)处于样品同侧,因此称之为反射式扫描近场光学显微镜。我们使用的探针是尖端镀金属铝膜的悬臂型光纤探针(Nanonics),其最前端有一直径优于 100nm 的小孔,其对应的光学分辨率优于 100nm^[12]。这种类型光纤探针的优点是能为常规光学观察提供足够的空间。探针采集的光信号既可以送至雪崩型光子计数器(APD),亦可送至光谱仪(EC&G 340)进行光谱分析。滤波片 2 用来防止 532nm 的激发光进入 APD,并通过选用合适的透镜使光纤的数值孔径与 APD 的接收区相匹配。整个系统的横向分辨率优于 60nm。

2 近场光学形貌和近场荧光的扫描成像

实验中,近场扫描观测存在如下几个困难:(1)由于微盘结构非常脆弱,用接触模式的扫描方式,很容易损坏微盘。对于直径 5 μm 的微盘,尚可用接触模式得到形貌像;而低于 10 μm 直径的微盘,若采用接触模式



图4 扫描近场光学显微镜得到的 InGaP 微盘的形貌

(a) 1/4 微盘, (b) 完整微盘

Fig. 4 Topographic images of the InGaP microdisk by SNOM

(a) A part of the disk, (b) A full disk

图5是在恒高模式下得到的 $10\mu\text{m}$ 直径微盘的近场荧光像, (a)和(b)分别为两次扫描图像, 盘半径为 $5\mu\text{m}$, 扫描范围为 $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$. 为便于比较, 在图中同时用白色圆圈标出了所测微盘的位置. 由图可见, 微盘的近场荧光强度分布也主要集中在微盘的边缘, 这与远场观测即显微荧光图像的特征是基本一致的. 结果表明, 对应于显微荧光图像中沿微盘边缘的亮环, 近场像给出了更精细的光强分布: 一方面, 在微盘内表现为沿边缘一圈分立的, 近似周期排列的亮斑; 另一方面, 在紧靠微盘外的区域内光强分布表现为一系列明暗相同的同心圆环.

3 讨论分析

如上所述, “回音壁”模式是圆形谐振腔中的一类特殊的光学模式, 本文所研究的 InGaP 光学薄微盘中“回音壁”模式占优势. 分析表明, 在微盘内, “回音壁”模式沿径向的光场分布与径向量子数 $n=1$ 、方位角量子数 $m \geq 1$ 的 Bessel 函数成正比; 对于 m 阶的 W-G 模式, 沿微盘的边缘有 $2m$ 个节点; 在微盘外, 则由盘面出发在较小的立体角范围内向外传播, 如图 6 所示^[4,7]. 微盘中可能存在的 m 最大值取决于微盘直径、荧光波长和有效折射率, 如果 m 很

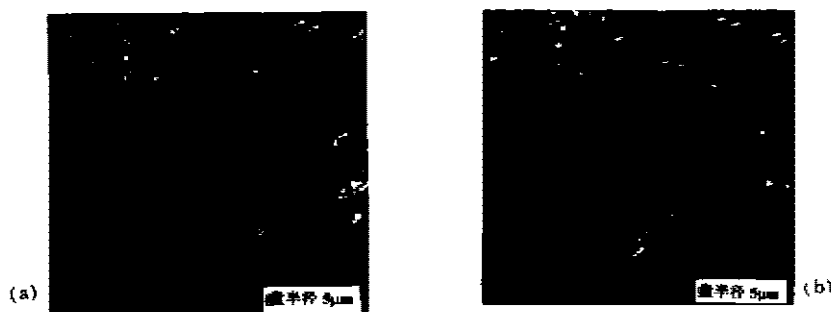


图5 InGaP 微盘的近场荧光像(a)和(b)为两次扫描图像

Fig. 5 Near-field fluorescent images of an InGaP microdisk

(a) and (b) are successive scanning image, respectively

大,在远场观测时,由于光学显微镜受分辨率以及物镜数值孔径的限制,不能分辨光强分布的细节,因而显微荧光图像中“回音壁”模式的特征表现为一个连续狭窄的亮环.

扫描近场光学显微技术是远场观测的重要补充,可提供关于微盘中光场的更详细的信息.采用扫描近场光学显微技术有如下几个优点:(1) 探针尖端相当于一个微型“转换器”,它可以将盘边缘附近的含有高空间分辨率信息的隐失场转化为传播场,以利于远距离探头接收,因此我们可以同时得到微盘的隐失场和传播场的信息;(2) 由于探针尖端金属波导管的截止效应,在盘边缘的近场范围内,杂散光(传播波)相对于隐失波得到了抑制;(3) 因为扫描过程中探针与盘表面间距很小($< \lambda$),所以可测量 10° 发射角附近的光场分布.因此,用扫描近场光

学显微镜得到了比常规显微镜更高分辨率的图像.一方面,从图 5 我们观察到在微盘周边分布着分立的周期排列的亮点,这些亮点应该是 W-G 模式的沿方位角光场节点的反映,但这些节点对应的模式阶数 m 与理论计算的可能最大值相差甚远.由于 m 较高模式的场强极大值更靠近边缘,而实际微盘圆形边缘绝不可能完善无缺,因此使 m 较高的模式在微盘边缘的场强容易被散射掉,导致其 Q 值降.测量所用的近场探测光纤尖端因多次测量而磨损,也可能降低分辨率,从而影响对较高 m 阶模式的探测.另一方面,近场图像在微盘外表现为与微盘同心的明暗相间的圆环形光强分布,与理论上对微盘外 Hankel 函数形式传播模式的分析基本相符^[7].具体分析和计算将另文发表.

4 结语

综上所述,我们运用反射式扫描近场光学显微技术,对直径为 $5\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$ 的 InGaP 光学微盘分别得到了表面形貌像和近场荧光扫描像.与常规光学荧光显微镜测得的荧光图像相比较,近场荧光像包含更多的细节信息.两者互为补充,反映了微盘中回音壁模式的主要特征.作为一种新型的纳米技术研究方法,扫描近场光学显微技术为光学微盘中发光模式的研究提供了重要信息.

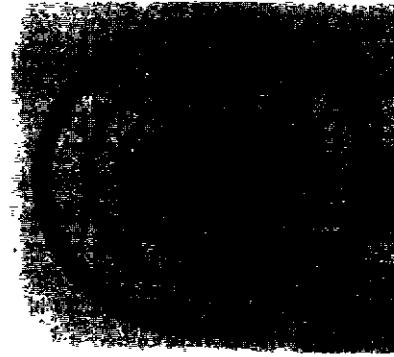


图 6 回音壁模式示意图
Fig. 6 Schematic diagram of a whispering gallery mode in a microdisk

REFERENCES

- 1 Yamamoto Y, Slusher R E. Optical processes in microcavities, *Physics Today*, 1993, **46**(6): 66
- 2 Slusher R E, Weisbuch C. Optical microcavities in condensed matter systems, *Solid State Commun.*, 1994, **92**(1-2): 149
- 3 ZHANG Bei. semiconductor optical microcavities-ideal examples for the exploration of cavity quantum electrodynamic effects. *Physics* (章蓓. 半导体光学微腔-研究腔量子电动力学效应的绝妙范围, *物理*), 1996, **25**(11): 652

- 4 McCall S, Levi A F J, Slusher R E, *et al.* Whispering-gallery mode microdisk lasers, *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(3): 289
- 5 ZHANG Bei, WANG Ruo-Peng, DING Xi, *et al.* The study on InGaAsP single quantum well semiconductor microdisk lasers, *Chinese J. Infrared & Millimeter Waves (Overseas Edition)*, 1995, **14**(4): 253
- 6 Mair R A, Zeng K C, Ling J Y, *et al.* Optical properties of GaN/AlGaIn multiple quantum well microdisks, *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(13): 1530
- 7 WANG Ruo-Peng, Maria-Manuela Dumitrescu. Theory of optical modes in semiconductor microdisk lasers, *J. Appl. Phys.*, 1997, **81**(8): 3391
- 8 LIN Yong, ZHANG Bei, XIN Yong-Chun, *et al.* Observation of disk mode pattern on organic microdisk, *Solid State Commun.*, 1998, **105**(7): 445
- 9 Betzig E, Trautman J K. Near-field optics: microscopy, spectroscopy, and surface modification beyond the diffraction limit, *Science*, 1992, **257**: 189
- 10 ZHU Xing, HUANG Gui-Song, ZHOU He-Tian, *et al.* A novel ultrasonic resonance sample tip distance regulation for near field optical microscopy and shear force microscopy, *Solid State Commun.*, 1996, **98**(7): 661
- 11 ZHU Xing, HUANG Gui-Song, ZHOU He-Tian, *et al.* Ultrasonic resonance regulated near-field scanning optical microscope and laser-induced near-field optical-force interaction, *Optical Review*, 1997, **4**(1B): 236
- 12 Buckland E L, Moyer P J, Paesler M A. Resolution in collection-mode scanning optical microscopy, *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**(3): 1018

STUDY OF LIGHT EMITTING MODES OF InGaP MICRODISKS BY USING SCANNING NEAR-FIELD OPTICAL MICROSCOPY*

ZHANG Yu XIN Yong-Chun ZHU Xing LING Yong YIN Yan
ZHOU He-Tian ZHANG Bei GAN Zi-Zhao

(Department of Physics and State Key Lab for Mesoscopic Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Using scanning near-field optical microscopy, the photoluminescence of InGaP microdisks with radius about $5\mu\text{m}$ and $10\mu\text{m}$, respectively, was acquired. Compared with far-field fluorescence images, which show a bright red emission of fluorescence around the circumference of the microdisks, the near-field fluorescent images contain much more details of the mode structure of the light distribution. The main characteristics were found to be whispering-gallery mode from both the near-field and far-field images. As a very rapidly grown new technology, scanning near-field optical microscopy provides us very important information for the study of the light emitting mode of the optical microdisks.

Key words scanning near-field optical microscopy, microcavity, whispering-gallery mode, InGaP microdisk.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China
Received 1998-10-12, revised 1999-01-19