

准波导结构染料薄膜中荧光和放大自发辐射的 泄漏模特性

林 豪 周 骏

(宁波大学理学院光学与光电子技术研究所, 浙江 宁波 315211)

摘要 通过理论分析和实验测量, 研究准波导结构染料薄膜中荧光和放大自发辐射 (ASE) 的泄漏模特性。理论上, 考虑薄膜传输损耗及染料吸收损耗对准波导结构中泄漏模特性的影响, 通过计算准波导结构中泄漏模的光强分布, 给出了相应的物理机制分析; 实验上, 以棱镜为衬底制备染料薄膜, 根据棱镜耦合法测量不同出射角对应的泄漏模的荧光与 ASE 光谱, 验证理论的正确性。此外, 采用光束分析仪探测各泄漏模式对应的荧光及 ASE 的光强分布, 研究了准波导结构中 ASE 的激励特性。结果证明, 荧光峰及 ASE 峰的红移以及泄漏模的激发是界面反射率、薄膜传输损耗及染料吸收损耗等共同作用的结果, 而界面反射率对 ASE 泄漏模激发特性有重要影响, 染料的自吸收是荧光峰及 ASE 峰产生红移的主要因素。

关键词 薄膜; 准波导; 泄漏模; 荧光; 放大自发辐射

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1231001

Properties of Leaky-Modes of Fluorescence and Amplified Spontaneous Emission in Dye Film with Quasi-Waveguide Structure

Lin Hao Zhou Jun

(Institute of Optics and Photoelectronics, Faculty of Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract The properties of leaky modes of the fluorescence and the amplified spontaneous emission (ASE) in the dye film with quasi-waveguide structure are theoretically and experimentally investigated. Theoretically, considering the propagation loss and dye absorption loss, the physical mechanism of leaky-modes characteristics of the fluorescence and ASE are analyzed by calculating the field intensity distributions of the leaky-modes in the dye film with quasi-waveguide structure. Experimentally, the dye films are spin coated on the prism substrate, and the spectra of fluorescence and ASE of leaky modes of the dye films with quasi-waveguide structure are measured by the prism coupling method at different wavelengths and different output angles. The results show the consistence of theoretic analysis and experimental measurement. In addition, a beam analyzer is used to obtain the intensity distribution of fluorescence and ASE of leaky modes to understand the ASE exciting characteristic in the dye film with quasi-waveguide structure. It shows the redshifts of the fluorescence peaks and the ASE peak as well as the exciting leaky modes come from the interaction of the interface reflectivity, the propagation loss and the dye absorption loss, while the interface reflectivity is the dominate factor for exciting the leaky-modes, and the dye self-absorption is the dominate factor for the redshift of fluorescence peaks and the ASE peaks.

Key words thin films; quasi-waveguide; leaky-mode; fluorescence; amplified spontaneous emission

OCIS codes 140.2050; 140.3600; 310.6860; 160.5470; 120.2230

收稿日期: 2012-06-04; 收到修改稿日期: 2012-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(60977048)、宁波市国际科技合作计划(2010D10018)、浙江省自然科学基金(LY12A04002)和重中之重学科开放基金(XK109068)资助课题。

作者简介: 林 豪(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电子器件方面的研究。E-mail: a329988689@163.com

导师简介: 周 骏(1958—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电子材料与器件制备等方面的研究。

E-mail: ejzhou@yahoo.com.cn(通信联系人)

1 引 言

掺杂染料薄膜的放大自发辐射(ASE)特性,特别是波导结构下的 ASE 可调谐性,引起了学者的广泛关注^[1~4]。对于波导结构的染料薄膜,ASE 峰值波长的改变可以通过调控染料薄膜的厚度改变其导模的截止波长来实现^[5~8]。波导结构中激发 ASE 峰值波长的改变不仅与导模的截止波长有关,还同时受到其他因素的影响,Penzkofer 等^[9]通过研究理想薄膜波导结构中的泄漏模特性,发现 ASE 的激发特性受泄漏模影响,Hélène Goudket 等^[10]研究了波导结构下染料吸收损耗以及薄膜传输损耗对 ASE 特性的影响。对于波导结构染料薄膜而言,其 ASE 通常由导模激励,虽然激发阈值较低,但是为实现 ASE 波长的可调,膜厚一般在几十到几百纳米,成膜条件要求很高,而且难以激发强的 ASE。对于准波导(泄漏波导)结构薄膜的研究,大多是测量薄膜参数,如膜厚和薄膜折射率^[11]。然而 Cerdán 等^[12,13]研究准波导结构染料薄膜的 ASE 特性时发现,准波导结构相比于波导结构,虽然其 ASE 的激发阈值较高,但是随着光抽运能量的提高,其 ASE 的增益系数和稳定性都优于波导结构的情况,体现了准波导结构的优越性。本课题组也研究了准波导结构染料薄膜的 ASE 特性,理论推证出准波导结构中染料的吸收损耗是造成 ASE 峰移的重要因素,并在实验中获得证实,得到了最大 40 nm 的 ASE 峰移^[14]。以上研究主要是对整体荧光(PL)及 ASE 光谱的测量及分析,实际上,光在准波导结构薄膜中传输时形成多阶泄漏模,通过对荧光和 ASE 的各阶泄漏模特性开展研究,才能更好地分析膜厚以及薄膜传输损耗等因素对荧光及 ASE 特性的影响。

本文通过与法布里-珀罗(F-P)谐振腔模型作类比,分别推导出准波导结构的理想薄膜和有损耗薄膜中泄漏模的光强公式,并模拟获得与传输角和波长对应的泄漏模光强分布,讨论了薄膜传输损耗和染料吸收损耗对各阶泄漏模特性的影响。利用棱镜耦合方法获得与出射角对应的各阶泄漏模荧光及 ASE 光谱,验证理论模型的正确性;利用光束分析仪探测荧光及 ASE 光的空间光强分布,观察准波导结构下 ASE 的激励特性;最后,对 ASE 的 TE 光及 TM 光的空间光强分布及光谱特性进行了比较分析。

2 理论模型与分析

2.1 理想薄膜准波导结构中的光传输特性

一般地,对于如图 1 所示的空气-薄膜-衬底结

构,当薄膜的折射率 n_1 大于衬底的折射率 n_2 和空气的折射率 n_0 ,为理想的波导结构;而如果薄膜的折射率 n_1 小于衬底的折射率 n_2 ,即为理想的准波导结构;图中 θ_1 为传输角, θ_2 为透射角。对于波导结构,波长为 λ 的光在波导芯层中的传输满足导模传输条件,即

$$2\kappa h + \phi_{10} + \phi_{12} = 2m\pi. \quad (1)$$

式中 $\kappa = (2\pi/\lambda)n_1 \cos \theta_1$ 为波矢的垂直分量, h 为膜厚, $2\kappa h$ 为光波横穿薄膜来回一次的相移, ϕ_{10} 和 ϕ_{12} 分别为薄膜-空气和薄膜-衬底界面上反射光的相移^[11,15]。对于准波导结构,光在波导芯层中传输时,由于薄膜-衬底界面的反射率 $R < 1$,在薄膜-衬底界面会有部分传输光泄漏进衬底(如图 1 所示)。此时,波导芯层中的反射光强减弱,无法像波导结构那样使反射前的传输光与经界面反射后的光完全相干形成导模,而是类似于 F-P 谐振腔的多光束干涉,在薄膜中形成具有一定锐度的衰减模和在衬底中形成泄漏模。

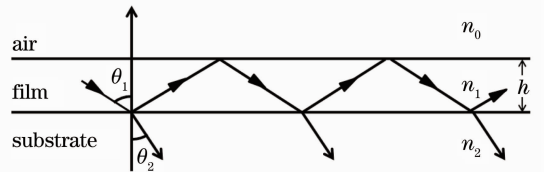


图 1 空气-薄膜-衬底中的光传输模型

Fig. 1 Light transmission model in air-film-substrate structure

与 F-P 谐振腔的多光束干涉类比^[16],可推导出准波导结构中泄漏模光场的复振幅表达式^[9]:

$$E = \frac{t_{12}}{1 - \exp[i(2\kappa h + \phi_{10} + \phi_{12})]} |r_{10}| |r_{12}| A, \quad (2)$$

式中 t_{12} 为薄膜-衬底界面的复振幅透射比, A 为未产生干涉前的初始光的振幅, r_{10} 与 r_{12} 分别为薄膜-空气界面及薄膜-衬底界面的复振幅反射比,而 $2\kappa h + \phi_{10} + \phi_{12}$ 即为光在薄膜上下表面来回一次的相位变化。当传输角大于薄膜-空气界面的全反射角和薄膜-衬底界面的布儒斯特(Brewster)角时, $\phi_{12} = -\pi$, $\phi_{10} = -2\arctan[(n_1/n_0)^2 p_0/\kappa]$ [TE 模: $\rho = 0$; TM 模: $\rho = 2$; $p_0 = (2\pi/\lambda) \sqrt{(n_1 \sin \theta_1)^2 - n_0^2}$]。从(2)式可以看出,薄膜中的光传输满足(1)式时,泄漏模光场的复振幅为极大值,即透射光干涉增强。由(2)式可得,衬底中泄漏模的光强为

$$I = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} EE^* = \frac{1 - |r_{12}|^2}{(1 - |r_{12}|)^2 + 4 |r_{12}| \sin^2 [(2\kappa h + \phi_{10} + \phi_{12})/2]} I_0, \quad (3)$$

式中 I_0 是干涉前的初始光强。

根据(3)式, 并设 $I_0 = 1, \lambda = 0.61 \mu\text{m}, n_2 = 1.8, n_1 = 1.493, h = 4.0 \mu\text{m}$, 得到准波导结构中泄漏模光强 I 随传输角的变化如图2所示, 图中也给出了薄膜-衬底界面的反射率 $R_{12} = |r_{12}|^2$ 随传输角的变化。从图中可以看出, 各阶泄漏模峰值强度均大于1, 这是薄膜中的传输光与界面反射后的光相互干涉, 导致不同角度的传输光能量重新分布的结果。而且同 F-P 谐振腔的特性相似, 薄膜-衬底界面的反射率越高, 多光束反射光或多光束透射光的相干性越好, 干涉条纹就越锐利, 其泄漏模峰值强度就越高。此外, TE 模的反射率比 TM 模的大, 对应的同阶泄漏模峰值强度就高; 而对于不同阶的泄漏模, 具有较高反射率的低阶模比具有较低反射率的高阶模的泄漏模峰值强度大, 而且更锐利。这是由于低阶模式对应的传输角大, 界面反射率就大, 光能够被很好地约束在薄膜中进行传输。如果是在染料掺杂薄膜中, 对应低阶模的 ASE 增益系数就大, 低阶泄漏模更容易激发产生 ASE, 所以, 界面反射率对 ASE 泄漏模的激发特性有重要影响。

2.2 薄膜传输损耗及染料吸收损耗对光传输特性的影响

当准波导中的光传输满足(1)式时, 即薄膜-衬

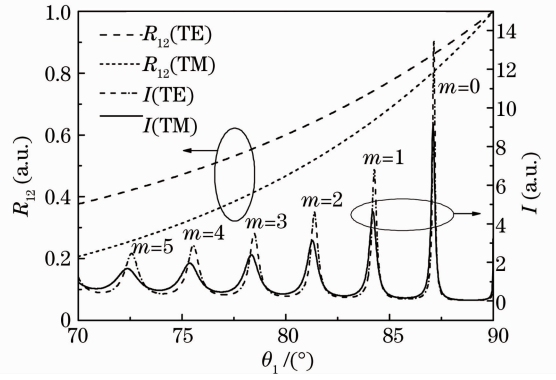


图2 理想薄膜准波导中泄漏模光强 I 和界面反射率 R_{12} 随传输角 θ_1 的变化

Fig. 2 Light intensity I of leaky-modes and interface reflectivity R_{12} versus transmission angle θ_1 in the idealized film with quasi-waveguide structure

底界面的透射光干涉增强, 则(3)式中分母的第二项为零, 可得泄漏模峰值强度:

$$I_{\text{peak}} = \frac{1 - |r_{12}|^2}{(1 - |r_{12}|)^2} = \frac{1 + |r_{12}|}{1 - |r_{12}|}. \quad (4)$$

从图2可以看到, 传输角 θ_1 越大, 界面反射率 R_{12} 随之增加直至为1, 则 $|r_{12}|$ 也随之增加直至为1 ($R_{12} = |r_{12}|^2$), 则由(4)式得到泄漏模峰值强度将无限增大, 而实际上, 由于薄膜损耗, 这不会发生。因此, 考虑薄膜损耗, 则(3)式变为

$$I = \frac{1 - |r_{12}|^2}{\left[1 - |r_{12} \exp\left(-\frac{\alpha L}{2}\right)|\right]^2 + 4 |r_{12} \exp\left(-\frac{\alpha L}{2}\right)| \sin^2[(2\kappa h + \phi_{10} + \phi_{12})/2]} I_0. \quad (5)$$

式中 α 为薄膜的损耗系数, 传输光在薄膜中上下表面来回传输一次所走过的距离 $L = 2h/\cos \theta_1$ 。

对于非染料掺杂的薄膜而言, 薄膜的损耗系数即为薄膜的传输损耗系数 α_0 , 通常可以看成是一个不随波长变化的常数。为了研究薄膜的传输损耗对泄漏模的影响, 根据(5)式, 设传输损耗系数 α_0 分别为0和 5 cm^{-1} 计算得到图3。薄膜的传输损耗对泄漏模峰值强度有显著影响, 且对应传输角 θ_1 大的低阶泄漏模, 下降更明显, 甚至零阶模的峰值强度比高阶模的低。

然而, 对于染料掺杂薄膜而言, 薄膜的损耗还应包括染料的自吸收损耗, 即

$$\alpha(\lambda) = \alpha_0 + \sigma_a(\lambda)N, \quad (6)$$

式中 $\sigma_a(\lambda)$ 为染料的吸收截面, N 为薄膜中染料的掺杂分子浓度。此时, 染料产生的初始荧光光强为

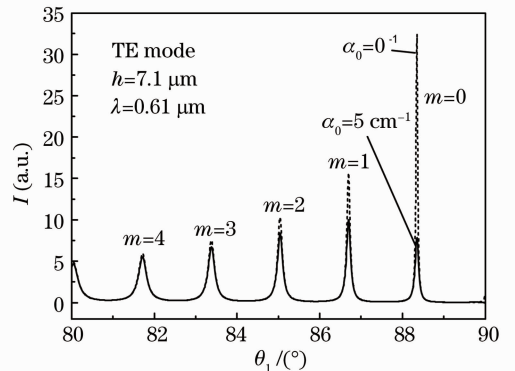


图3 有传输损耗薄膜准波导中泄漏模光强 I 随传输角 θ_1 变化

Fig. 3 Light intensity I of leaky-modes versus transmission angle θ_1 in quasi-waveguide structure with transmission loss

$$I_0(\lambda) = I_{P0}(\lambda) \times \{1 - \exp[-\sigma_a(\lambda)N_0L]\} / [\sigma_a(\lambda)N_0L], \quad (7)$$

式中 $I_{P0}(\lambda)$ 为染料自吸收前荧光强度的归一化分布函数, N_0 为薄膜中处于基态的染料分子浓度^[14]。根据(5)式可得染料薄膜的泄漏模峰值强度为

$$I_{\text{peak}}(\lambda) = \frac{1 - |r_{12}|^2}{\left\{1 - \left|r_{12} \exp\left[-\frac{\alpha(\lambda)L}{2}\right]\right|\right\}^2} I_0(\lambda). \quad (8)$$

为更好地分析准波导结构薄膜中的光传输特性,特别是染料自吸收对各阶泄漏模光谱特性的影响,测量染料罗丹明 B(RhB)的吸收截面及发射截面^[17],由(5)式模拟得到与传输角和波长对应的泄漏模光强分布如图 4 所示。图 4(a)为理想薄膜准波导结构中泄漏模的光强分布,图 4(b)为罗丹明 B 掺杂薄膜准波导结构在无损耗情况下的荧光泄漏模的光强分布,图 4(c)和(d)分别为不同厚度的 RhB 掺杂薄膜准波导结构,在考虑薄膜传输损耗及染料自吸收损耗时的泄漏模光强分布。从图 4(a)看出,

对任一波长的传输光,存在与传输角对应的各阶泄漏模,低阶模比高阶模明锐,这与图 2 相同,而对于任一传输角,只有特定波长的泄漏模存在,低阶泄漏模对应较大的传输角;在图 4(b)中,各阶泄漏模的荧光峰对应的波长均为 580 nm(对应图中虚线);在图 4(c)中,各阶泄漏模的荧光峰对应不同的波长,发生明显红移(对应图中虚线),这是染料的自吸收损耗的影响所致,且低阶泄漏模受到的影响最大,红移量也最大;对比图 4(c)和(d)看出,随着膜厚的增加,各阶泄漏模更为密集且对应的传输角变大,染料自吸收损耗的影响也增大,红移量也更大,如 4 μm 厚度薄膜的零阶泄漏模的荧光峰为 620 nm,而 7.1 μm 厚度薄膜的零阶泄漏模的荧光峰为 635 nm。由此可见,染料的自吸收损耗是引起各阶泄漏模的荧光光谱峰值波长发生红移的主要因素,而改变薄膜厚度可以很好地调控峰值波长,从而调控染料掺杂薄膜准波导结构中的 ASE 的峰值波长。

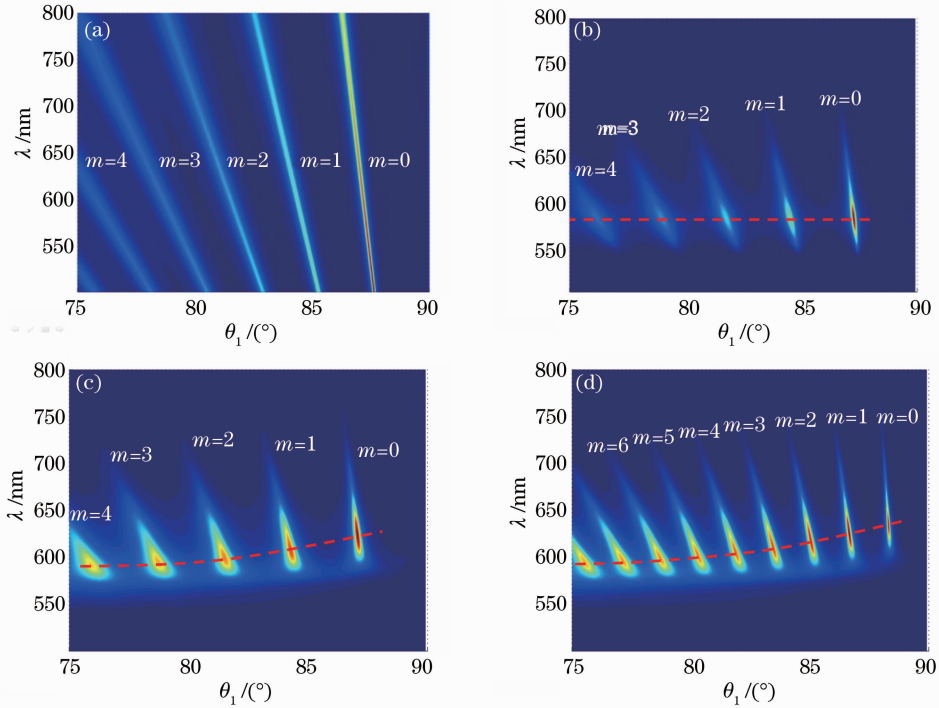


图 4 与传输角和波长对应的泄漏模光强分布。(a)理想薄膜准波导结构, $h = 4.0 \mu\text{m}$; (b)无损耗的 RhB 掺杂薄膜准波导结构, $h = 4.0 \mu\text{m}$; (c) RhB 掺杂薄膜准波导结构, 薄膜损耗系数 $\alpha_1 = 2 \text{ cm}^{-1}$, 掺杂质量分数为 0.5%, $h = 4.0 \mu\text{m}$; (d) $h = 7.1 \mu\text{m}$, 其他同(c)

Fig. 4 Distribution of leaky-modes light intensity corresponding to transmission angle and wavelength. (a) Idealized film quasi-waveguide structure, $h = 4.0 \mu\text{m}$; (b) RhB dyes-doped film quasi-waveguide structure without loss, $h = 4.0 \mu\text{m}$; (c) RhB dyes-doped film quasi-waveguide structure with transmission loss $\alpha_1 = 2 \text{ cm}^{-1}$, dyes-doped mass fraction 0.5%, $h = 4.0 \mu\text{m}$; (d) $h = 7.1 \mu\text{m}$, other like (c)

3 实验结果与讨论

3.1 样品制备

采用碱性荧光染料 RhB 作为客体材料,掺杂到主体材料聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 中制备染料掺杂聚合物薄膜。将 RhB 和 PMMA 称重后溶解到有机溶剂氯仿 (CHCl_3) 中,配制质量比为 1:200 的 RhB/PMMA 溶液,将配置的溶液旋涂覆到折射率为 1.8 的棱镜衬底上制备成膜。在旋涂过程中,采用不同转速和甩膜时间,分别获得膜厚为 2.3、4.0、7.1 μm 的 RhB/PMMA 聚合物薄膜。将制备好的薄膜放在电热板上,50 $^\circ\text{C}$ 下烘烤 8 h,以去除薄膜中残留的溶剂,即得到实验所用的薄膜准波导结构的样品。

3.2 实验测量装置

实验测量装置如图 5 所示,其中光源部分包括半

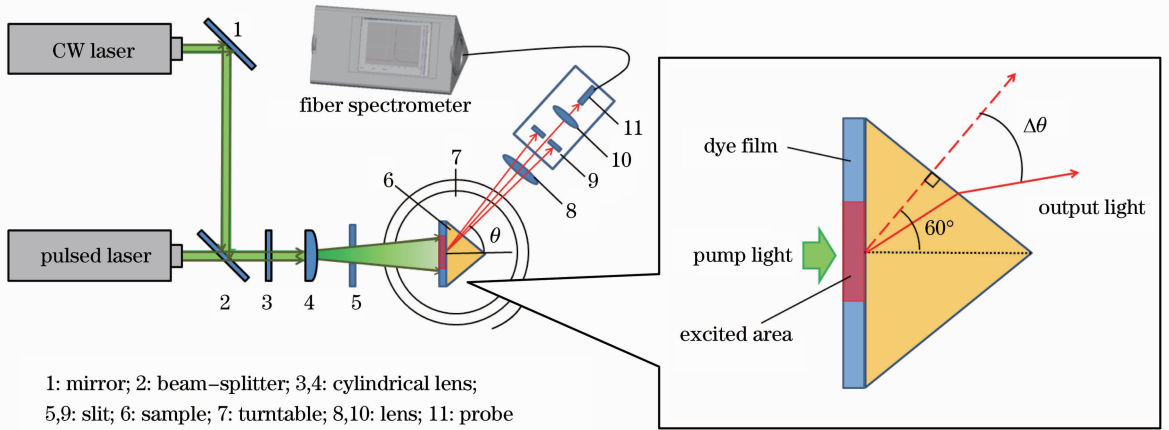


图 5 实验测量装置

Fig. 5 Experimental setup for measurement

3.3 荧光光谱和 ASE 光谱的测量与分析

图 6 是膜厚为 4.0 μm 的样品对应不同出射角 θ 测量的荧光光谱 ($\theta = 60^\circ - \Delta\theta$, 如图 5 所示)。不同出射角对应的荧光峰位置和强度不同,所有荧光峰的包络线为零阶泄漏模的荧光光谱。为了清晰地表示测量结果,图 7 给出了两种膜厚的样品在不同出射角下与波长对应的低阶泄漏模的光强分布,各阶泄漏模的荧光峰位置如表 1 所示。同时,将图 7 与图 4(c)和图 4(d)对比,发现理论计算与实验测量的泄漏模的光强分布随角度的变化趋势基本相同,然而,由于棱镜的色散使长波长的泄漏模的出射角度变大,图 7 中泄漏模的光强分布随出射角的变化比图 4(c)和图 4(d)中随传输角的变化有更大的偏转。此外,零阶模的荧光峰光强比一阶模的低,这正是由于薄膜传输损耗的影响,与 2.2 节中考虑薄膜传输

导体激光器(激光波长为 535 nm)和 Q 开关 Nd:YAG 脉冲激光器 (Dawa-100, 激光波长为 532 nm, 脉宽为 7 ns) 以及由柱面镜和狭缝组成的光束整形系统; 电动旋转样品台由计算机控制; 探测部分包括凸透镜、狭缝和光纤光谱仪 (Newport OSM2-400DUV)。采用该实验装置, 可以测量不同旋转角对应的样品的出射光谱, 从而得到染料掺杂薄膜准波导结构的泄漏模经棱镜色散后的荧光光谱或 ASE 光谱。在凸透镜 8 的焦平面 (狭缝 9 的位置) 置放光束分析仪 (Newport LBP-4-USB), 即可检测染料薄膜的荧光光强和 ASE 光强的空间分布。实验中, 设定 Nd:YAG 脉冲激光器的重复频率为 10 Hz, 入射到样品上的光斑大小为 1 mm \times 4 mm, 抽运脉冲光的能量由能量计 (HEM-1a-2) 测定。

损耗的结果一致, 证明了理论分析的正确性。

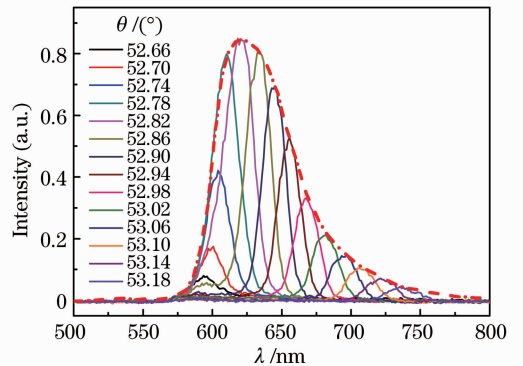


图 6 对应不同出射角测量的荧光光谱
Fig. 6 Fluorescence spectra of different emergence angles

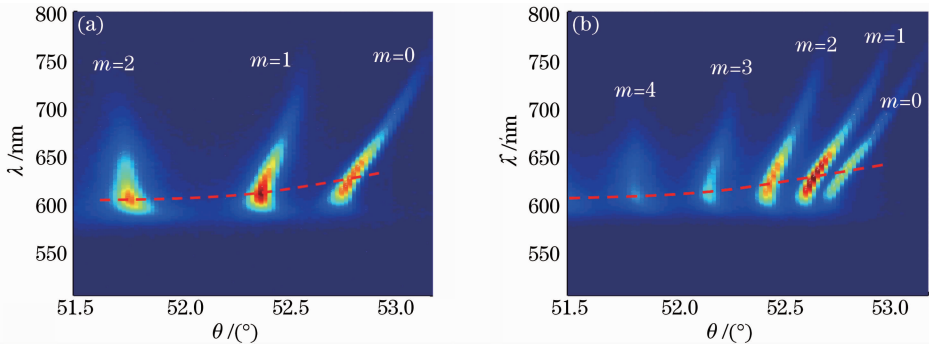


图 7 与出射角和波长对应的泄漏模光强分布。(a) $h=4.0 \mu\text{m}$; (b) $h=7.1 \mu\text{m}$

Fig. 7 Distributions of leaky-modes light intensity corresponding emergence angle and wavelength. (a) $h=4.0 \mu\text{m}$; (b) $h=7.1 \mu\text{m}$

表 1 不同膜厚不同模式下荧光峰及 ASE 峰的峰值位置
Table 1 Wavelength of fluorescence peaks and ASE peaks under different thicknesses and modes

Thickness / μm	Mode m	PL peak /nm	ASE peak /nm
2.3	0	608	600
	1	601	—
4.0	0	618	606
	1	608	—
	2	603	—
7.1	0	632	628
	1	624	609
	2	620	607
	3	605	—

为研究准波导结构下染料薄膜的 ASE 光谱特性,采用脉冲激光抽运薄膜样品,产生的各阶泄漏模的 ASE 光谱如图 8 所示。表 1 列出了由图 7 和图 8 得到的各阶泄漏模的荧光峰和 ASE 峰位置对应的波长。

正如 2.2 节讨论的,表 1 中不同厚度的染料薄膜对应的荧光峰和 ASE 峰的波长不同,相同模式

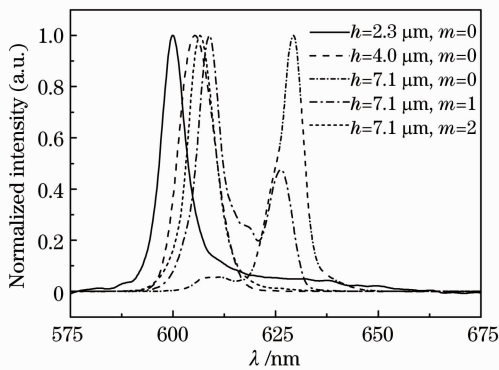


图 8 不同膜厚不同模式下的 ASE 光谱,抽运能量密度为 $0.5 \text{ mJ}/\text{cm}^2$

Fig. 8 ASE spectra with different thicknesses and modes with pump energy density of $0.5 \text{ mJ}/\text{cm}^2$

下,荧光峰和 ASE 峰的位置随着膜厚的增加向长波段移动,而且,在厚度较小的薄膜中,仅有零阶泄露模对应的 ASE 存在,较厚的薄膜中有多个泄露模可以激发 ASE,高阶模对应的荧光峰和 ASE 峰均偏向短波段。此外,比较同一样品同一模式中的荧光峰和 ASE 峰的位置发现,ASE 峰较荧光峰更偏向于短波段,这是因为激励 ASE 时,有更多的染料粒子处于激发态,处于基态的粒子数减少^[14,17],染料的自吸收损耗减弱,从而由染料自吸收造成的光谱红移也就减弱。

为考察染料薄膜 ASE 的泄漏模激发特性,图 9 给出了不同厚度样品在连续激光及脉冲激光激励下产生荧光及 ASE 泄漏模光强的空间分布。从图 9 可以看到,对于荧光泄漏模,其零阶模比一阶模的光强小(这与 2.2 节中的分析一致),而 ASE 光的低阶泄漏模的光强均比高阶泄漏模的大,且 ASE 光的单色性好、条纹可见度高,说明低阶泄漏模具有更大的增益系数,更容易被激励产生 ASE,这一点与前述理论分析一致。对比图 9(a)和图 9(b),发现在较厚的染料薄膜中可以有多个低阶模式的 ASE 光被激发,这是由于厚膜的低阶泄漏模的间隔更小,具有相近的增益以及模式间的串扰所致。

为了研究染料薄膜中激发的 ASE 的偏振特性,在图 5 的凸透镜 8 与棱镜间加装偏振片,分别检测 ASE 的 TE 光谱和 TM 光谱,如图 10 所示,其中插图是测量的 TE 模和 TM 模光强的空间分布。从图 10 可见,TE 光谱中 ASE 峰的位置比 TM 光谱中 ASE 峰的位置偏向于长波段,分别对应 607 nm 和 605 nm,而且 TE 模的光强略大于 TM 模的光强。实际上,根据 2.1 节的分析可知,TE 模的界面反射率比 TM 模的大,薄膜中的 TE 模具有更好的约束性,更容易激发产生 ASE;而且,TE 模受染料自吸收

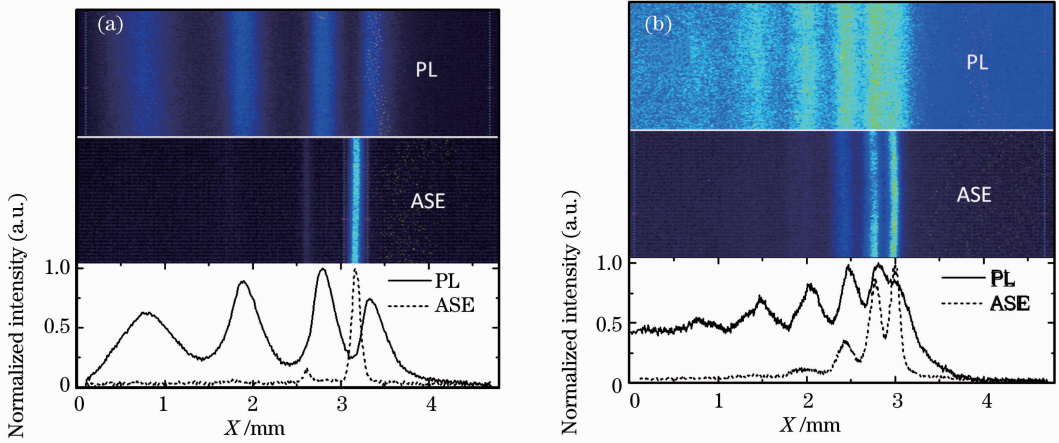


图 9 荧光及 ASE 光泄漏模的空间光强分布。(a) $h=4.0 \mu\text{m}$; (b) $h=7.1 \mu\text{m}$

Fig. 9 Spatial intensity distributions of leaky-modes of fluorescence and ASE. (a) $h=4.0 \mu\text{m}$; (b) $h=7.1 \mu\text{m}$

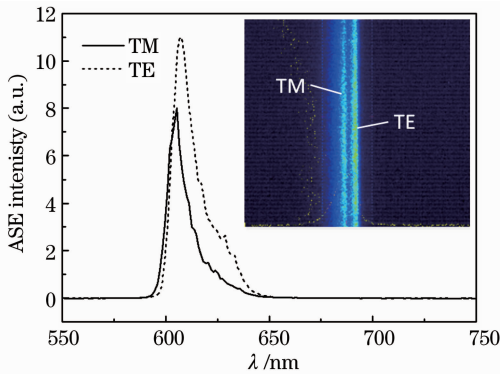


图 10 ASE 光的 TE 光及 TM 光的光谱及空间光强分布($h=4.0 \mu\text{m}$)

Fig. 10 Spectrum and spatial intensity distribution of TE and TM modes of ASE ($h=4.0 \mu\text{m}$)

的影响比 TM 模的大,TE 模产生的 ASE 峰的位置比 TM 模 ASE 峰的位置更偏向长波段方向。

4 结 论

通过研究空气-薄膜-衬底组成的准波导结构,考虑薄膜界面反射率、传输损耗及掺杂染料的吸收损耗的影响,给出了准波导结构中泄漏模光强的计算公式,并对随传输角和波长变化的泄漏模光强分布进行了数值模拟,可以很好地描述准波导结构下染料薄膜的泄漏模传输特性,以及界面反射率、染料吸收、薄膜传输损耗等因素对各阶泄漏模传输光谱的影响。

实验上,在棱镜衬底上旋涂制备染料薄膜样品,并测量样品中各阶泄漏模式的荧光光谱和 ASE 光谱以及荧光光强和 ASE 光强的空间分布。结果表明,染料的自吸收是各阶泄漏模荧光峰红移的主要原因,同时也是 ASE 峰随膜厚的增加产生红移的主

要原因。实验结果还表明,ASE 的低阶泄漏模相比高阶泄漏模具有更大的增益系数,低阶模式更容易产生 ASE,而且薄膜传输损耗对低阶泄漏模的影响大。此外,在准波导结构中,同阶泄漏模式下的荧光峰较 ASE 峰更偏向于长波段,TE 模的 ASE 峰比 TM 模的 ASE 峰更偏向于长波段。

以上实验结果很好地验证了理论分析的正确性,有助于更好地认识准波导结构下染料薄膜的 ASE 特性以及开展对准波导结构下可调谐激光的研究。

参 考 文 献

- 1 M. A. Reilly, C. Marinelli, C. N. Morgan *et al.*. Rib waveguide dye-doped polymer amplifier with up to 26 dB optical gain at 625 nm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85** (22): 5137~5139
- 2 Han Likun, Jiang Yadong, Li Wei *et al.*. Study on spectral properties of a new tricyanofuran derivative [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 928~931
韩莉坤, 蒋亚东, 李 伟 等. 新型三腈基呋喃衍生物光谱特性的研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 928~931
- 3 E. V. Calzado, J. M. Villalvilla, P. G. Boj *et al.*. Amplified spontaneous emission in polymer films doped with a peryleneimide derivative [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46** (18): 3836~3842
- 4 Ding Haifang, Zhang Feiyan, Lin Hao *et al.*. Amplified spontaneous emission of fluorescent dye-doped DNA-CTMA thin films [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0506001
丁海芳, 张飞雁, 林 豪 等. 荧光染料掺杂 DNA-CTMA 薄膜的放大 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0506001
- 5 Xiang Peng, Liying Liu, Jianfeng Wu. Wide-range amplified spontaneous emission wavelength tuning in a solid-state dye waveguide [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(5): 314~316
- 6 G. Heliotis, D. D. C. Bradley. Light amplification and gain in polyfluorene waveguides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(3): 415~417
- 7 E. M. Calzado, J. M. Villalvilla. Tuneability of amplified spontaneous emission through control of the thickness in organic-based waveguides [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**(9): 093103
- 8 K. Geetha, M. Rajesh, V. P. N. Nampoora *et al.*. Propagation

- characteristics and wavelength tuning of amplified spontaneous emission from dye-doped polymer [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(4): 764~769
- 9 A. Penzkofer, W. Holzer, H. Tillmann *et al.*. Leaky-mode emission of luminescent thin films on transparent substrates [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**(1): 279~290
- 10 H. Goudket, T. H. Nhung, B. Ea-Kim *et al.*. Importance of dye host on absorption, propagation losses, and amplified spontaneous emission for dye-doped polymer thin films [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(29): 7736~7741
- 11 T. N. Ding, E. Garmire. Measuring refractive index and thickness of thin films; a new technique [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(20): 3177~3181
- 12 A. Costela, O. García, L. Cerdán *et al.*. Amplified spontaneous emission and optical gain measurements from pyrromethene 567-doped polymer waveguides and quasi-waveguides [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(10): 7023~7036
- 13 L. Cerdán, A. Costela, I. Garcia-Moreno *et al.*. Waveguides and quasi-waveguides based on pyrromethene 597-doped poly (methyl methacrylate) [J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **97**(1): 73~83
- 14 Lin Hao, Zhou Jun, Yan Cheng'en *et al.*. Properties of amplified spontaneous emission of the dye-doped film based on quasi-waveguide structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0631003
林 豪, 周 骏, 颜承恩等. 准波导结构下染料薄膜的荧光光谱和放大自发辐射光谱特性[J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0631003
- 15 Cao Zhuangqi. Waveguide Optics [M]. Beijing: Science Press, 2007. 12~19
曹庄琪. 导波光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007. 12~19
- 16 You Pu, Yu Guoping. Optics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. 88~90
游 璞, 于国萍. 光学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 88~90
- 17 F. P. Schafer. Dye Lasers [M]. Chen Changmin, Sun Mengjia, Su Dachun Transl.. Beijing: Science Press, 1987. 36~38, 91~96
舍费尔. 染料激光器 [M]. 陈昌民, 孙孟嘉, 苏大春译. 北京: 科学出版社, 1987. 36~38, 91~96

栏目编辑: 韩 峰