

# 荧光染料掺杂 DNA-CTMA 薄膜的放大 自发辐射特性

丁海芳<sup>1</sup> 张飞雁<sup>1</sup> 林 豪<sup>1</sup> 周 骏<sup>1</sup> 谭瑞琴<sup>2</sup> 王能平<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>宁波大学理学院光电子技术研究所, 浙江 宁波 315211)  
(<sup>2</sup>宁波大学信息工程学院电子工程系, 浙江 宁波 315211)

**摘要** 采用旋涂法制备了若丹明 6G(Rh6G)和若丹明 B(RhB)两种染料掺杂的 DNA-CTMA 复合薄膜,并通过对薄膜的表面形貌、紫外/可见/红外吸收光谱、荧光光谱特性的测量,表征了薄膜的成膜质量及光谱特性。通过 Nd:YAG 脉冲激光器的倍频光激发,研究了不同比例荧光染料掺杂 DNA-CTMA 薄膜的放大自发辐射(ASE)现象并做了理论解释。实验结果表明,在波长为 532 nm 的脉冲激光抽运下,Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜的发射谱出现了明显的窄化现象,而且比单一染料掺杂 DNA-CTMA 薄膜的发射谱呈现出较大的光谱调谐范围,是一种较好的有机聚合物激光材料体系。

**关键词** 薄膜;若丹明 6G;若丹明 B;DNA-CTMA;放大自发辐射

中图分类号 O484.5 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0506001

## Amplified Spontaneous Emission of Fluorescent Dye-Doped DNA-CTMA Thin Films

Ding Haifang<sup>1</sup> Zhang Feiyan<sup>1</sup> Lin Hao<sup>1</sup> Zhou Jun<sup>1</sup> Tan Ruiqin<sup>2</sup> Wang Nengping<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>*Institute of Photonics, Faculty of Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China*)  
(<sup>2</sup>*Department of Electronic Engineering, School of Information Science and Engineering,  
Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China*)

**Abstract** The fluorescent dye Rhodamine-6G (Rh6G) and Rhodamine-B (RhB) doped DNA-CTMA thin films are prepared by spin-coating technology. The quality and optical spectra properties of Rh6G/RhB/DNA-CTMA thin films are characterized by the measurements of surface morphology, UV/vis/infrared absorption spectra and fluorescence spectra. The amplified spontaneous emission (ASE) of dye-doped DNA-CTMA thin films with different dye contents was researched experimentally by pumping of Nd:YAG pulse laser at wavelength of 532 nm, and is explained theoretically. The experimental results show that the narrowing phenomenon of emission spectra of Rh6G/RhB/DNA-CTMA thin films is very clear and strong. Compared with single dye doped DNA-CTMA thin films, the co-doped Rh6G/RhB/DNA-CTMA thin film is a potential candidate as an organic polymer laser material because it exhibits more wider tuning range of the ASE spectrum.

**Key words** thin films; Rhodamine 6G; Rhodamine B; DNA-CTMA; amplified spontaneous emission

**OCIS codes** 140.0140; 160.3380; 300.0300; 310.6188

## 1 引 言

随着计算机技术、光电技术和信息传输技术的

发展,新型光电子功能材料与器件制备技术研究,特别是有机聚合物材料光电子器件的研究越来越受到

收稿日期: 2010-12-29; 收到修改稿日期: 2011-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(60977048)、浙江省钱江人才计划(2009R10064)和宁波市国际科技合作计划(2010D10018)资助课题。

作者简介: 丁海芳(1986—),女,硕士研究生,主要从事生物光子材料的光电特性方面的研究。

E-mail: dinghaifang@yahoo.com.cn

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技术等方面的研究。

E-mail: ejzhou@yahoo.com.cn(通信联系人)

重视并逐步得以应用。2001年,日本的 Ogata 小组<sup>[1]</sup>从三文鱼的卵和精囊中提取出 DNA 材料,发现其具有独特的光电特性,揭开了应用 DNA 生物聚合物材料制备光电子器件的序幕,从而基于 DNA 复合薄膜材料的光电子器件制备受到了极大关注,开展了诸如生物传感器<sup>[2]</sup>、生物有机发光二极管<sup>[3]</sup>、发光材料 Pt(II)配合物基质<sup>[4]</sup>和有机场效应晶体管<sup>[5]</sup>等方面的研究工作。

另一方面,固体染料激光研究发展迅速,染料固化既能保持液态染料激光的宽调谐范围,又能减少液态染料激光器的复杂结构,满足小型化、实用化的要求。2000年,谢旭东等<sup>[6]</sup>研究了若丹明 B(RhB)和 PM-597 掺杂的两种聚甲基丙烯酸甲酯薄膜的光谱特性。2002年,Wang 等<sup>[7]</sup>利用稀土螯合物(Eu-FOD)掺杂 DNA-CTMA 制备薄膜并研究其荧光特性。2007年,Yu 等<sup>[8]</sup>研究了 Sulforhodamine-640 掺杂 DNA-CTMA 及 PMMA 薄膜结构的光致发光和激光特性。Kawabe 等<sup>[9,10]</sup>利用掺杂若丹明 6G(Rh6G)的 DNA-类脂复合物和掺杂 DMASDPB 的 DNA-HTMA 材料制备成膜并观察了放大自发辐射(ASE)现象。最近,Mysliwiec 等<sup>[11~13]</sup>分别制备了 SP 螺吡喃染料和 Rh6G 掺杂的 DNA-CTMA 薄膜,开展了 ASE 特性和发光效率方面的研究。然而,对于同时掺杂多种染料的聚合物材料的 ASE 特性的研究目前还不多见。作为染料固化的一种形式,研究多种染料掺杂的生物聚合物材料的自发辐射特性,对于扩展激光介质材料的应用范围具有重要意义。

本文采用 Rh6G、RhB、短链 DNA 分子和表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(CTMA)等材料,将 Rh6G、RhB 与 DNA-CTMA 复合物混合反应,形成掺杂型聚合物复合薄膜体系,通过对 Rh6G/RhB/DNA-

CTMA 掺杂薄膜的表面形貌、吸收光谱和荧光光谱等的测量,表征其成膜质量及光谱特性,并利用波长为 532 nm 的脉冲激光抽运,研究其 ASE 现象。

## 2 薄膜制备与表征

### 2.1 材 料

实验中所用的青鱼 DNA 购自 Sigma 公司,是一种双螺旋结构的水溶性高分子,平均分子量为  $M_w = 3.3 \times 10^4$  u,平均分子长度为 50 bp(碱基对),呈乳白色粉末。利用分光光度计(Ultrospec 500-1100 pro)测量该青鱼 DNA 的核酸纯度得到纯度值  $A_{260}/A_{280}$  为 1.713,核酸纯度较低,含有少量微蛋白质杂质,因此需要对 DNA 材料进行提纯。

纯的 DNA 分子可溶于水而不溶于任何有机溶剂,不易成膜。通过与带正电荷的表面活性剂相互作用,可以形成不溶于水的复合物,易于制备薄膜。实验中所用的阳离子表面活性剂是 CTMA,其分子式为  $C_{16}H_{33}(CH_3)_3NBr$ ,分子量为 319.75 g/mol,为白色结晶粉末,纯度为 99%。

DNA 的双螺旋结构中存在 A、T、G 和 C 4 种碱基,每个碱基对直径大小为 2 nm,每 10 个碱基对的螺距为 34 nm,碱基对的结构为  $\pi-\pi^*$  电子重叠。这样的结构使得 DNA 分子之间存在很多沟槽形空隙,染料分子插入其中。因此染料能充分地分散在 DNA-CTMA 聚合物中,可以很好地制备成膜。实验中所用的掺杂染料为碱性荧光染料 Rh6G 和 RhB。Rh6G 是一种暗红色粉末,RhB 为墨绿色粉末。Rh6G 和 RhB 的分子量均为 479 g/mol,极易溶于水及部分醇类等有机溶剂。与其他荧光染料相比,若丹明类染料具有光稳定性较好、寿命长和荧光范围较宽等优点。DNA、CTMA、Rh6G 和 RhB 的分子结构如图 1 所示。

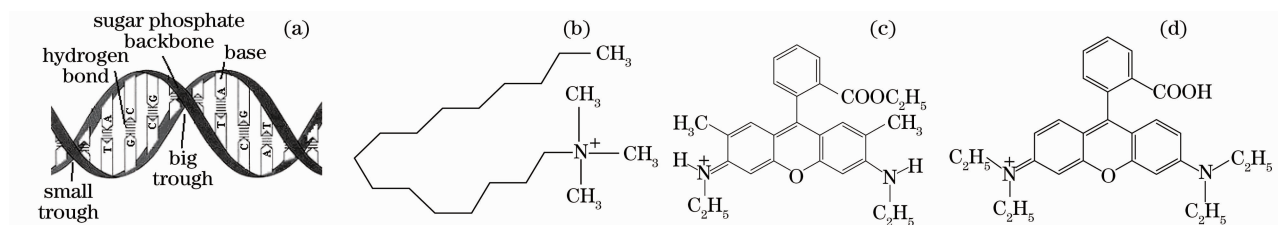


图 1 分子结构图。(a)DNA,(b)CTMA,(c)Rh6G,(d)RhB

Fig. 1 Molecular structures of (a) DNA, (b) CTMA, (c) Rh6G and (d) RhB

### 2.2 样品制备

对于文献<sup>[14]</sup>的方法进行改进,制备 DNA-CTMA 薄膜和掺杂的 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 复合薄膜。先将 0.8 g DNA 溶解于 200 mL 蒸馏水

中,用磁力搅拌器搅拌约 4 h。称取 0.8 g 的等量 CTMA 溶解于 200 mL 的蒸馏水中,用超声波作用 30 min。然后,将 DNA 水溶液缓慢滴入 CTMA 水溶液中,在室温下静置约 4 h,使两者反应完全,形

成乳白色絮状沉淀。接着用离心机分离沉淀物,再用小玻璃棒把沉淀小颗粒捣碎后置于烘箱中在 40 ℃下烘干,最后即形成了 DNA-CTMA 复合物。

将 DNA-CTMA 复合物溶解到有机溶剂丁醇中,制备 5 份掺杂有 Rh6G 和 RhB 的丁醇溶液(掺杂体积比分别为 7:0,5:2,3.5:3.5,2:5,0:7),然后分别与 DNA-CTMA 溶液混合,得到 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 溶液。最后通过旋涂法将 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 溶液制备到干净的石英片上,形成薄膜。薄膜的厚度可通过控制匀胶机的旋转速度

调节。

为了检查薄膜的成膜质量,利用原子力显微镜(AFM, Nano-scope III a)观察 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜的表面形貌,如图 2 所示。图 2 中,Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜的表面高度差为 10 nm,说明薄膜的均匀性较好,成膜质量较高。对于均匀大面积成膜而言,旋涂法制备得到的 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜表面均匀,形貌特性好。实验在温度 25 ℃和湿度 40% RH(相对湿度)的环境下进行。

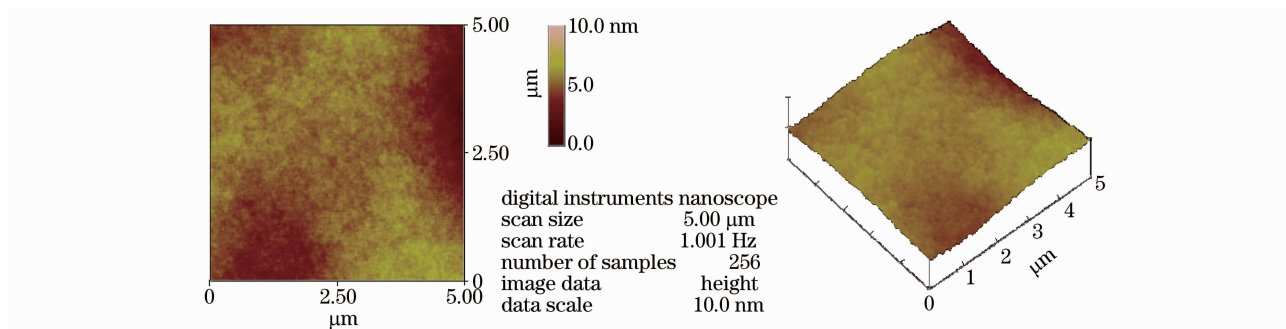


图 2 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜的 AFM 形貌图

Fig. 2 Surface morphology of the Rh6G/RhB/DNA-CTMA thin film

### 3 ASE 效应研究

#### 3.1 薄膜的吸收光谱和荧光光谱

利用紫外/可见分光光度计(TU-1901)和傅里叶红外光谱仪(Tensor 27)测得 Rh6G/RhB 掺杂体积比为 2:5 的 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜的紫外/可见吸收光谱和红外吸收光谱如图 3 所示。利用荧光分光光度计(F-4500)测得 Rh6G/RhB 掺杂比为 2:5 的 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜的激发谱和发射谱如图 4 所示。从图 3 可见,DNA-CTMA 在 230~350 nm 之间有明显吸收,260 nm 处有吸收峰,这是 DNA 双链结构中的碱基共轭双键所引起

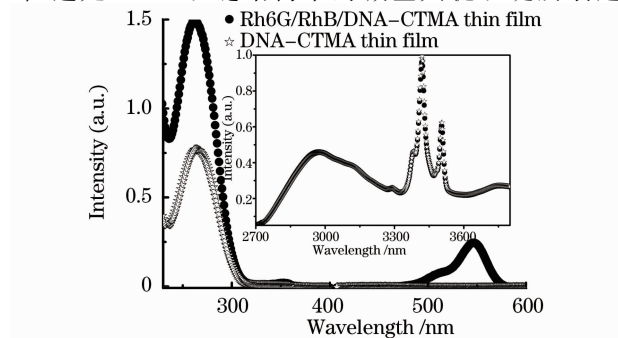


图 3 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜的吸收光谱

Fig. 3 Absorption spectra of the Rh6G/RhB/DNA-CTMA thin film

的。另外,Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜在 520~580 nm 之间也出现明显吸收,546 nm 处有吸收峰,这与若丹明染料分子的氧杂蒽环与乙胺、甲基和苯基 3 个基团之间的能级状态有关。由图 3 中的插图可见,DNA-CTMA 薄膜和 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜的红外吸收光谱相同,吸收范围均在波段 2700~3340 nm,在波长 3416 nm 和 3503 nm 处出现吸收峰,说明若丹明染料分子在红外波段无明显吸收。由图 4 可以看出,氙灯为激发源,Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜的激发光谱范围在 450~

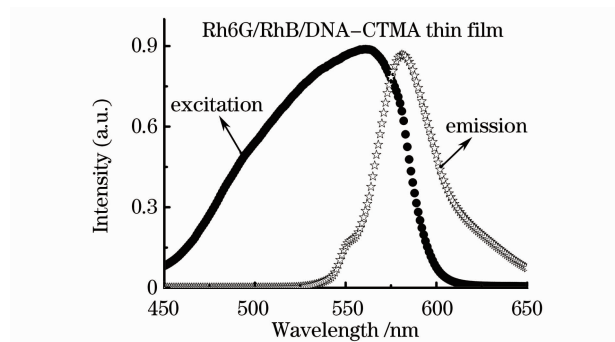


图 4 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜的激发光谱和发射光谱

Fig. 4 Excitation and emission spectra of the Rh6G/RhB/DNA-CTMA thin film

600 nm,并在 550 nm 的激发波长下获得发射谱的发光峰值位于 580 nm,谱线半峰全宽约为 38 nm。

### 3.2 实验

实验样品是以石英为衬底的 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜(厚约 10  $\mu\text{m}$ ),形成空气-染料掺杂聚合物薄膜-石英组成的非对称型波导结构。薄膜 ASE 特性测试光路如图 5 所示,用调 Q Nd:YAG 激光器(Dawa-100)的倍频光为抽运源,脉冲

宽度为 7 ns,重复频率为 10 Hz,波长为 532 nm。激光器的抽运能量由能量计(HEM-1a-2)测定。实验中利用平凸柱面镜和可调光阑控制入射光为 1 mm $\times$ 6 mm 的光斑。样品的输出光谱信号由聚焦透镜耦合到光纤光谱仪(Newport OSM 2-400)。实验要注意的是,染料掺杂薄膜样品平时应置于真空环境中保存,以避免光降解作用的影响。

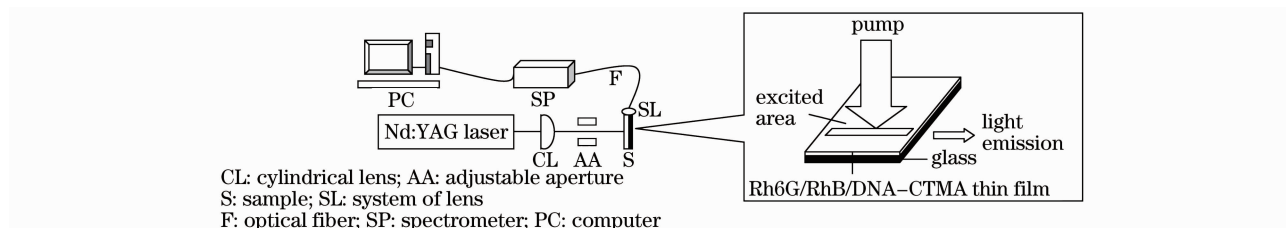


图 5 ASE 实验装置

Fig. 5 Experimental setup for the amplified spontaneous emission measurements

### 3.3 结果与分析

在不同激发能量下,测量的 Rh6G/RhB 掺杂体积比为 5:2 的 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜的发射谱如图 6 所示。从图中可以看出 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜 ASE 现象的出现过程。若丹明染料分子的能级主要决定于共轭双键  $\pi$  电子的状态。它的能级特征可用单重态-三重态 5 能级模型说明<sup>[15]</sup>。当抽运能量密度低于阈值时,由于激光的作用,染料分子从基态  $S_0$  吸收抽运能量跃迁到单重激发态  $S_1$  的某一振动能级,在与其它分子发生频繁碰撞的过程中迅速将能量传递给其他分子,并跃迁到  $S_1$  的最低振动能级。此时染料分子不稳定,以自发辐射和受激辐射的形式跃迁回到  $S_0$  的较高振动能级,通过无辐射跃迁过程返回到  $S_0$  的最低能级,这时的谱线仍为宽带的发射谱[图 6(a)],与事先测得的荧光谱相似。随着激发光抽运能量密度的增强,使得  $S_0$  的较高振动能级与  $S_1$  的最低振动能级之间具备形成粒子数反转的条件。同时,当单重态  $S_1 \rightarrow S_0$  的受激辐射增益大于分子的吸收损耗时,则会产生 ASE[图 6(b)]。当抽运能量密度高于阈值时,发射谱峰值波长处的激发强度迅速超过其他波长,光谱呈现明显窄化现象,此时的半峰全宽约为 10 nm[图 6(c)]。理论已经证明这种谱线窄化是由于自发辐射在薄膜内传输时在增益区内发生了受激放大,即出现 ASE 现象<sup>[16]</sup>。

在激光抽运能量密度大于阈值情况下,对应不同激发光能量下 Rh6G/RhB 掺杂体积比为 5:2 的 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜的 ASE 光谱如图 7

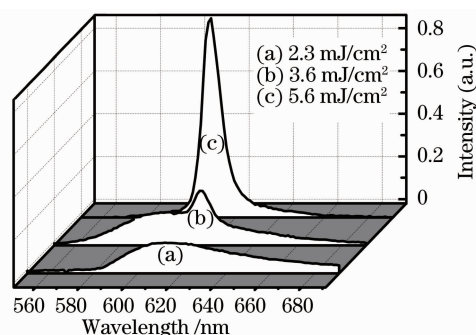


图 6 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜的 ASE 谱

Fig. 6 Emission spectra as a function of the pump energy density

所示。可以看出,随着抽运能量密度的增大,ASE 光谱强度也随之增强,其发射谱窄化更加明显。另一方面,从图 8 给出的 Rh6G/RhB 掺杂比为 5:2 的 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜 ASE 光谱峰值强度与激光器抽运能量密度的关系可知,在抽运能量密

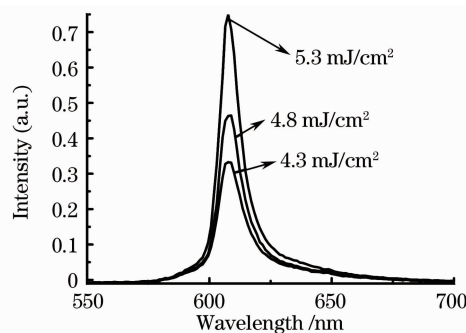


图 7 不同激发光抽运能量密度下的 ASE 光谱

Fig. 7 ASE spectra of different excitation pump energy densities

度低于阈值时, ASE 光谱峰值强度随着抽运能量密度的增加而缓慢增加, 当抽运能量密度超过阈值时, 曲线变陡, ASE 光谱峰值强度剧烈增加。

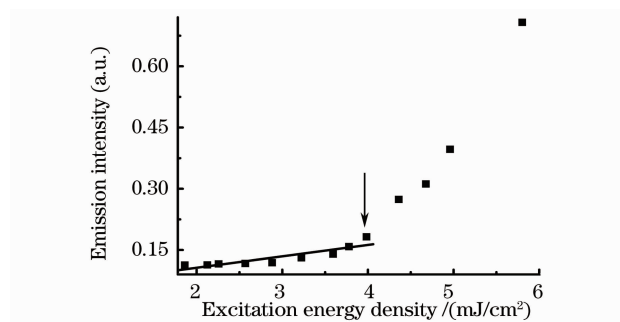


图 8 ASE 峰值强度与抽运能量密度的关系

Fig. 8 ASE peak intensities with different excitation pump energy densities

为了进一步研究染料掺杂聚合物薄膜的光谱特性, 对于相同厚度、不同掺杂比例下的薄膜样品, 分别测量了吸收峰值波长  $\lambda_{\text{abs}}$ 、ASE 峰值波长  $\lambda_{\text{ASE}}$ 、出现 ASE 的抽运能量密度阈值以及 ASE 谱线半峰全宽 (FWHM) 等参数并列于表 1 中。从表 1 可知, 单一掺杂的 Rh6G/DNA-CTMA 薄膜出现 ASE 的峰

表 1 不同掺杂比例染料薄膜的吸收峰值波长、ASE 峰值波长、ASE 能量密度阈值和谱线半峰全宽

Table 1 Absorption peak wavelength, ASE peak wavelength, ASE energy density threshold and FWHM of dye doped polymer thin films with different dye doped ratios

Dye doped polymer thin film	Rh6G:RhB doped ratio	$\lambda_{\text{abs}}/\text{nm}$	$\lambda_{\text{ASE}}/\text{nm}$	ASE energy density threshold / (mJ/cm <sup>2</sup> )	FWHM ( $\pm 1\text{nm}$ )
Rh6G/DNA-CTMA	7:0	540	600	5.6	9
Rh6G/RhB/DNA-CTMA	5:2	541	608	3.8	9
Rh6G/RhB/DNA-CTMA	3.5:3.5	544	613	4.3	10
Rh6G/RhB/DNA-CTMA	2:5	546	617	4.6	10
RhB/DNA-CTMA	0:7	563	623	4.8	11

需要指出, 为获得更低的激发 ASE 的阈值, 在 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜体系中, 各种物质 (染料和 DNA-CTMA 聚合物) 的混合比, 以及 DNA 的链长和溶剂种类等条件, 可以进一步优化。对于避免样品在激光脉冲抽运后的光漂白现象和延长薄膜样品的 ASE 激励时间等, 仍有待研究。

## 4 结 论

在 DNA-CTMA 聚合物中掺杂荧光染料 Rh6G 和 RhB, 应用旋涂法制备了不同掺杂比例的 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜, 通过实验测量和分析, 对它们的成膜质量及 ASE 现象进行了研究。结果表明, 利用 Nd:YAG 激光器的倍频光 (波长为 532 nm) 抽运染料掺杂的聚合物薄膜, 能够很明显地观察到 ASE 现象。对染料掺杂的聚合物薄膜

值波长最短为 600 nm, RhB/DNA-CTMA 薄膜 ASE 的峰值波长最长为 623 nm, 说明 RhB/DNA-CTMA 薄膜的单重激发态  $S_1$  的最低振动能级与基态  $S_0$  的最高振动能级的能级差  $\Delta E_{\text{RhB}}$  小于 Rh6G/DNA-CTMA 薄膜相应的能级差  $\Delta E_{\text{Rh6G}}$ 。而混合掺杂的 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜的 ASE 的峰值波长在两种单一掺杂的薄膜的  $\lambda_{\text{ASE}}$  之间, 且随着 RhB 掺杂量的增加向长波方向移动。同时可以看出, Rh6G/DNA-CTMA 薄膜的吸收峰值波长为 540 nm, RhB/DNA-CTMA 薄膜的吸收峰值波长为 563 nm, 而两种染料掺杂的 Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜的吸收峰值波长在两种单一掺杂的薄膜的  $\lambda_{\text{abs}}$  之间。此外, Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜的吸收峰和发射峰的峰值波长间距均大于单一掺杂薄膜的峰值波长间距 ( $\lambda_{\text{ASE}} - \lambda_{\text{abs}} = 60 \text{ nm}$ ), ASE 的峰值位置产生了红移。因此, Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜的吸收谱和发射谱与 Rh6G/DNA-CTMA 薄膜及 RhB/DNA-CTMA 薄膜的对应光谱不同, 是 Rh6G、RhB 和 DNA-CTMA 共同作用的结果。

ASE 谱的测量表明, Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜出现 ASE 峰值的位置相对于 Rh6G/DNA-CTMA 薄膜的 ASE 峰值的位置出现红移, 相对于 RhB/DNA-CTMA 薄膜的 ASE 峰值的位置出现蓝移, 改变了染料激光的调谐范围。因此, Rh6G/RhB/DNA-CTMA 薄膜具有良好的光谱特性, 作为一种固化染料, 有机聚合物薄膜激光材料具有重要的潜在应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Lili Wang, Jonichi Yoshida, Naoya Ogata. Self-assembled supramolecular films derived from marine deoxyribonucleic acid (DNA)-cationic surfactant complexes: large-scale preparation and optical and thermal properties[J]. *Chem. Mater.*, 2001, **13**(4): 1273~1281
- 2 P. Yaney, E. Heckman, D. Diggs *et al.*. Development of chemical sensors using polymer optical waveguides fabricated with

- DNA[C]. *SPIE*, 2005, **5724**: 224~233
- 3 J. A. Hagen, W. Li, A. J. Steckla *et al.*. Enhanced emission efficiency in organic light-emitting diodes using deoxyribonucleic acid complex as an electron blocking layer[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(17): 171109
- 4 F. Puntoriero, S. Campagna, M. L. Di Pietro *et al.*. Luminescence of a Pt(II) complex in the presence of DNA. Dependence of luminescence changes on the interaction binding mode[J]. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2007, **6**(4): 357~360
- 5 Philipp Stadler, Kerstin Oppelt, Thokchom Birendra Singh *et al.*. Organic field-effect transistors and memory elements using deoxyribonucleic acid (DNA) gate dielectric [J]. *Organic Electronics*, 2007, **8**(6): 648~654
- 6 Xie Xudong, Hu Lili, Huang Guosong *et al.*. Preparation and study of copolymer solid-state dye lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(4): 307  
谢旭东, 胡丽丽, 黄国松等. 高分子基体的固体染料激光器的制备和研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(4): 307
- 7 L. Wang, K. Ishihara, H. Izumi *et al.*. Strongly luminescent rare-earth ion-doped DNA-CTMA complex film and fiber materials[C]. *SPIE*, 2002, **4905**: 143~153
- 8 Z. Yu, W. Li, J. A. Hagen *et al.*. Photoluminescence and lasing from deoxyribonucleic acid (DNA) thin films doped with sulforhodamine[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(9): 1507~1513
- 9 Y. Kawabe, L. Wang, S. Horinouchi *et al.*. Amplified spontaneous emission from fluorescent-dye-doped DNA-surfactant complex films [J]. *Advan. Materials*, 2000, **12** (17): 1281~1283
- 10 Y. Kawabe, L. Wang, T. Nakamura *et al.*. Thin-film lasers based on dye-deoxyribonucleic acid-lipid complexes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(8): 1372~1374
- 11 J. Mysliwiec, L. Sznitko, B. Sahraoui *et al.*. Amplified spontaneous emission in the spiropyran-biopolymer based system [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(24): 241106
- 12 J. Mysliwiec, L. Sznitko, A. Miniewicz *et al.*. Study of the amplified spontaneous emission in a dye-doped biopolymer-based material[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2009, **42**(8): 085101
- 13 J. Mysliwiec, L. Sznitko, A. Sobolewska *et al.*. Lasing effect in a hybrid dye-doped biopolymer and photochromic polymer system [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(14): 141106
- 14 Emily M. Heckman, A. Joshua, Hagen *et al.*. Processing techniques for deoxyribonucleic acid: Biopolymer for photonics applications[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(21): 211115
- 15 F. P. Schafer. *Dye Lasers*[M]. Chen Changmin, Sun Mengjia, Su Dachun Transl.. Beijing: Science Press, 1987. 10~20  
F. P. 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. 10~20
- 16 S. V. Frolov, Z. V. Vardeny, K. Yoshino. Cooperative and stimulated emission in poly (p-phenylene-vinylene) thin films and solutions[J]. *Phys. Rev. B*, 1998, **57**(15): 9141~9147