

# BODIPY 类激光染料的合成及性能研究

杨 杨,高超颖,许 良,段莉梅,陈 静

(内蒙古民族大学化学化工学院,内蒙古 通辽 028000)

**摘要:** BODIPY 类染料以其光化学稳定性好、激光转换效率高、较大的激光发射和可调范围、溶解度好、激发态吸收截面小、三重态弛豫效率小等优点极大提升了光响应能力。在液体、固体聚合物介质中, BODIPY 染料在泵浦脉冲下可以产生稳定的激光信号。通过染料分子结构和光物理性质研究,可以筛选出产生最优激光性能的结构和基质。主要介绍了染料共掺及改性聚合物基质固体染料激光的研究进展,同时对新型 BODIPY 类激光染料的研究现状进行了综述。

**关键词:** 染料激光; 氟硼二吡咯甲川; 激光发射; 光稳定性; 激光效率

中图分类号: O621.22; O644.18

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2014)06-0046-06

## Syntheses and photophysical properties of BODIPY laser dyes

YANG Yang, GAO Chao-ying, XU Liang, DUAN Li-mei, CHEN Jing

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Inner Mongolia University for the Nationalities, Tongliao 028000, China)

**Abstract:** Boron dipyrromethenes (BODIPYs) has received great attention because of their versatility, chemical robustness, low triplet state population, thermal and photochemical stability, which enhance the photoresponse of these dyes. For instance, highly efficient lasing signals after multitude of pumping pulses can be achieved when the BODIPY dyes are incorporated in solvents and polymers matrices. The molecular structure and the photophysical properties of BODIPY dyes are studied to obtain the best structural and environmental conditions for the optimal laser performance. In this paper, the lasing properties of BODIPY dyes in solvents and polymers conditions are summarized. The development of new molecular structures based on the BODIPY chromophore is reviewed as well.

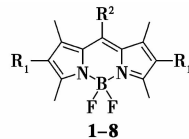
**Key words:** dye laser; BODIPY; laser emission; photostability; lasing efficiency

随着可调谐激光技术的发展,有机染料在可调谐激光器和光电器件应用方面得到了人们的普遍关注<sup>[1]</sup>。此外,有机染料在荧光探针、分子传感器、光纤通信和信息存储领域具有广阔的应用前景<sup>[2-3]</sup>。因此研究有机染料的分子结构和环境条件对光物理性质的影响是非常必要的,不仅可以拓展其潜在的应用价值,而且对设计具有特殊功能的新型染料也有重要的指导意义<sup>[4-5]</sup>。

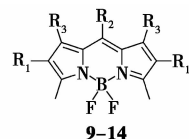
氟硼二吡咯甲川类化合物(BODIPY)是近年来发展起来并受广泛重视的一类荧光染料。该类染料具有较强的化学稳定性,通过化学反应引入特定的推-拉电子基团可以极大改变染料的光物理性质和激光特性<sup>[6]</sup>。激光染料具有可调谐区间宽、激光效率高、持续照射稳定性好、荧光量子产率高、系间跨越的速率常数低以及摩尔吸光效率高等优点,在液体、固体染料激光介质和制造光信息载体方面具有重要的价值<sup>[7]</sup>。本文中对近年来基于氟硼二吡咯甲川类化合物在共掺及改性聚合物基质中激光性能进行了概述,同时对新型 BODIPY 类激光染料的研究进展也进行了系统的综述。

## 1 商品化激光染料在聚合物中的激光性能

1988—1993年,Boyer和Pavlopoulos等合成了一系列不同取代的BODIPY化合物1~14,并将该类染料用于可调谐染料激光方面,同时高度评价了其在可调谐激光领域的应用价值<sup>[8]</sup>。自此,BODIPY类染料在染料激光的研究中得到极大的发展。



1.  $R_1 = H, R_2 = H$ ;
2.  $R_1 = CH_3, R_2 = C_2H_5$ ;
3.  $R_1 = R_2 = C_2H_5$ ;
4.  $R_1 = CH_3, R_2 = C(CH_3)_3$ ;
5.  $R_1 = CH_2OC(=O)CH_3, R_2 = C_2H_5$ ;
6.  $R_1 = CN, R_2 = CO_2C_2H_5$ ;
7.  $R_1 = R_2 = CH_3$ ;
8.  $R_1 = C_2H_5, R_2 = CO_2C_2H_5$



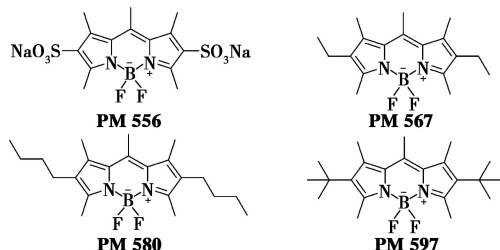
9.  $R_1 = H, R_2 = p-C_6H_4OCH_3, R_3 = CH_3$ ;
10.  $R_1 = R_2 = H, R_3 = C_6H_5$ ;
11.  $R_1 = C_6H_5, R_2 = R_3 = CH_3$ ;
12.  $R_1 = C_2H_5, R_2 = CH_3$ ;
13.  $R_1 = CO_2C_2H_5, R_2 = C_2H_5$ ;
14.  $R_1 = NO_2, R_2 = CH_3$

收稿日期:2014-01-10;修回日期:2014-04-04

基金项目:国家自然科学基金项目(81260682);内蒙古民族大学博士科研启动基金(BS311);内蒙古民族大学科学研究项目(NMD1311)

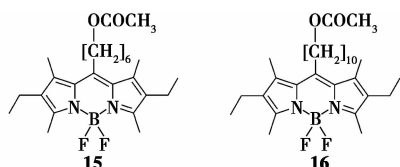
作者简介:杨杨(1981-),男,博士,讲师,研究方向为有机荧光染料和探针的设计合成,0475-8313570, yangyang-000@163.com。

人们对传统的激光染料激光性能进行改进的过程中,发现共掺染料和有机聚合物染料具有较强的抗损伤阈值和光稳定性。随着 BODIPY 激光染料被逐渐商品化,国内外许多研究组将商品化的 PM567、580 和 597 染料掺入常温下能够凝成固态的有机聚合物基质中,获得具有液体染料激光输出特性的固体工作物质,为系统研究其在不同掺杂条件下的激光输出性质与稳定性的关系提供了新的思路。



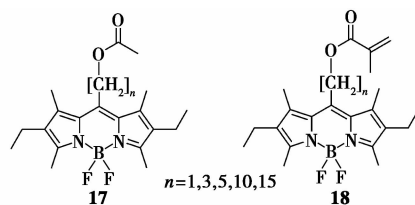
Arbeloa<sup>[9]</sup> 研究组于 1999 年首次将上述 4 种商品化的 BODIPY 染料在溶液中的光物理性质与激光性能进行了研究。染料的激光发射效率与分子吡咯环上的 2,6 位取代基有直接的关系,供电子取代基导致染料非辐射跃迁速率升高,母体杂环结构中碳正离子稳定性增强,染料分子平面性减弱,荧光强度和激光效率降低。

2001 年, Bergmann 等<sup>[10]</sup> 研究了染料 PM567 和 2 种新型 BODIPY 染料 15、16 在激光照射下的吸收和发射光谱性质,同时对比了其在含丙烯酸聚合物 10% 的乙酸乙酯溶液中的光谱性质,在这 2 种环境下,光谱性质类似,斯托克斯位移很小,且均具有很高的量子效率。皮秒激光泵浦下饱和吸收试验证实激发态的染料分子吸收光谱非常弱,这使染料在激发态时可以避免由于进一步的吸收能量而发生光降解。固态聚合物中染料的激光持续照射光降解实验表明,染料具有较好的激发态光稳定性,并且通过添加合适的辅助试剂可以有效地改善染料的光稳定性。

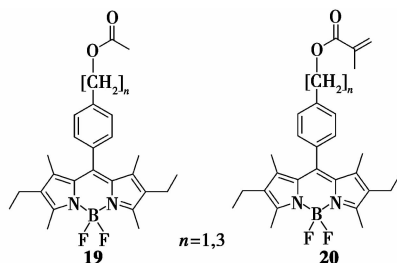


2003 年 Amat-Guerri 等<sup>[11]</sup> 和 Costela<sup>[12]</sup> 研究组将商品化的 PM567 的 8-位通过柔性亚甲基链修饰合成了一系列性能优异的 BODIPY 激光染料 17~18。分别从溶液中和固态共聚物研究了荧光量子产率、光稳定性、掺杂浓度聚合方式等因素对聚合物材料的激光性能的影响。在对材料分子测试过程中,

发现染料分子中位随着柔性链( $\text{CH}_2$ )的增长能使材料的光物理性质提升,激光的效率和光稳定增强。

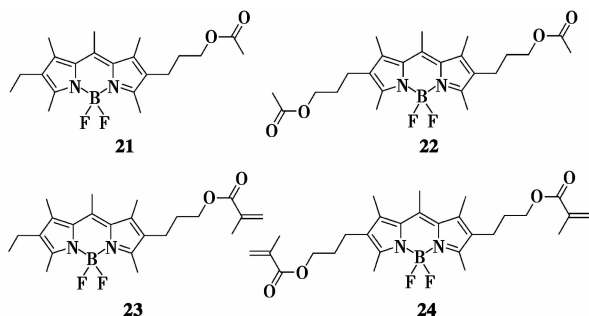


2004 年 García-Moreno 等<sup>[13]</sup> 报道了 2 个 8-位苯基和柔性亚甲基链修饰的 PM567 的类似物染料 19 和 20,并系统研究了染料在液体溶液和在甲基丙烯酸甲酯共聚物中的光物理和激光特性。稀溶液光物理性质和较浓溶液的激光特性之间具有良好的相关性。8-苯基取代的存在对发色团的光物理性质没有显著的影响。在 534 nm 激光泵浦条件下,溶液中激光效率达到 46%,在固体样品中激光效率达到 23%。染料在 10 Hz 的泵浦脉冲 10 万次后,激光效率仅损失 4%,显示出良好的光稳定性。

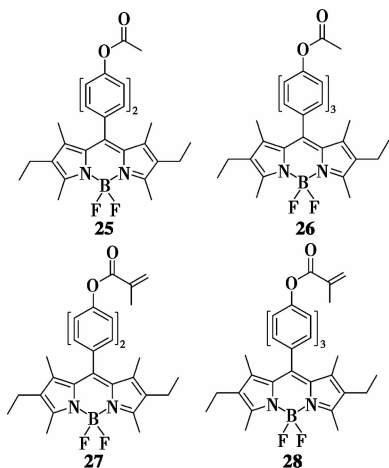


2006 年 García 等<sup>[14]</sup> 将 PM597 分别与甲基丙烯酸甲酯和甲基丙烯酸七氟代丁酯共掺杂聚合,发现 BODIPY 在氟代后的聚合物材料中具有较高的激光效率和光稳定性。染料在 10 Hz 的泵浦脉冲 50 万次后,激光效率仅损失 6%,显示出良好的光稳定性。

2007 年 García-Moreno<sup>[15]</sup> 研究组将染料 PM567 的 2 位和 6 位进行修饰,得到 4 种新型 BODIPY 激光染料分子 21~24。染料 23 和 24 与 PM567 相比,在溶液与聚合物基质中具有更高的激光发射特性,效率达到 37%。染料在 30 Hz 的泵浦脉冲 40 万次后,激光效率为初始值的 67%,这是目前聚合物基质中有机固态染料激光稳定性的最高值。

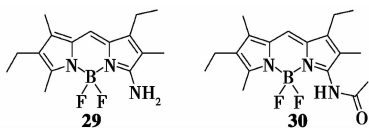


Alvarez 等<sup>[16]</sup>将对位碘苯取代的 PM567 通过偶联反应与对位乙酰氧基和甲基丙烯酰氧基苯基结合,得到了 4 种新型激光材料 25 ~ 28。在溶液和共掺基质中对染料的光物理性质和激光性能进行研究,发现在乙酸乙酯溶液中染料的光物理性质不受苯基数目影响,激光效率分别为 66% 和 80%;在 PMMA 聚合物基质中,染料的激光效率在 18% ~ 31%。



## 2 新型 BODIPY 激光染料的设计合成

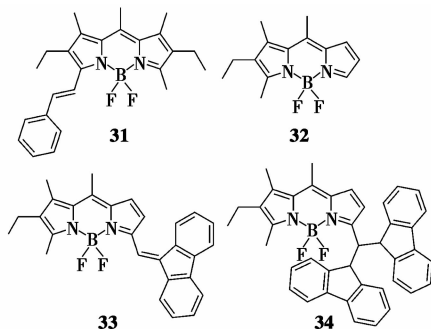
2007 年 Liras 等<sup>[17]</sup>合成了 2 个 3 位氨基取代的 BODIPY 化合物 29 和 30,并系统地研究了它们的光物理性质和激光行为。染料 29 和 30 的量子产率和荧光寿命都是相似的,但是染料 29 在激光泵浦下并没有激光发射现象,而化合物 30 相同条件下在 564 ~ 571 nm 处有激光发射,在乙醇溶液中激光效率达到 48%,高于参比染料 PM567 溶液的效率。



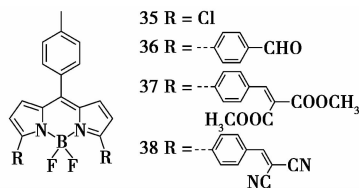
2008 年, García - Moreno<sup>[18]</sup> 研究组设计合成了一个 3-苯乙烯基取代的 PM567 类染料 31,该染料在乙醇中 584 nm 处有很强的荧光发射和吸光度,比 PM567 红移 50 nm。在溶液中具有很好的激光发射能力,激光发射波长在 602 ~ 610 nm,最大激光效率为 18%。在甲基丙烯酸三氟乙酯共掺聚合物基质中,染料在 10 Hz 的泵浦脉冲 10 万次后,激光效率损失 30%,显示出较强的光稳定性。

2010 年, Banuelos - Prieto 等<sup>[19]</sup>对激光染料 PM567 结构进行取代反应,通过 C=C 相连接合成了苾-吡咯和茛-吡咯结构的 BODIPY 染料,合成了 32 ~ 34 3 种染料分子。通过不同介质考察该类不对

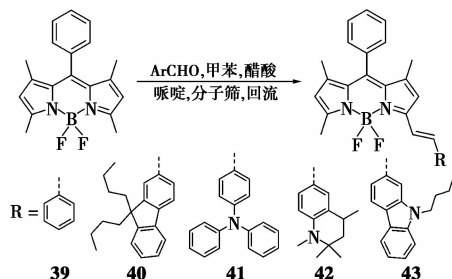
称染料的光物理性质和激光行为,染料 32 在 532 nm 处有很强的激光发射能力,效率达到 34%。在连续光泵浦脉冲下,激光效率衰减 10%。亚甲基连接 2 个苾的染料 34 具有很强的荧光性能,激光效率最大值为 43%,在 10 Hz 的脉冲下激光效率几乎没有衰减,表现了很强的光稳定性。在 PMMA 聚合物中掺杂染料 32 和 34 后,激光效率为 20% ~ 30%。与商品化染料 PM567 比较,发光性能有很大的改进。通过乙烯基连接苾的 BODIPY 染料 33,光谱区域为红光,荧光强度和激光效率非常低。



在传统的激光材料分子结构优化中,人们发现通过增大分子共轭面积,可以得到多种在红光区域具有较强发射能力的激光染料分子。Ortiz 等<sup>[20]</sup>合成了 4 种具有很好波长调谐能力的红光染料 35 ~ 38。3,5 位取代的 BODIPY 染料吸收和发射峰发生很大的红移,荧光量子产率和斯托克位移比取代前也高出很多。与激光发射区间相近的罗丹明 640 和 苾红相比,光稳定性显著提高。在 BODIPY 母体引入共轭取代基后,得到了具有发射带宽为 0.15 cm<sup>-1</sup> 的可调谐激光,调谐范围可达 50 nm。这 3 个染料覆盖的波长范围为 590 ~ 680 nm,实现了连续、稳定和小线宽的激光发射。

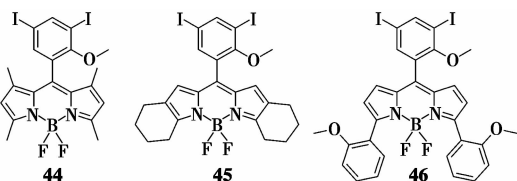


2011 年 Zhang 等<sup>[21]</sup>通过增加共轭体系和改变分子内电荷转移机制,拓展了红光激光染料的种类,

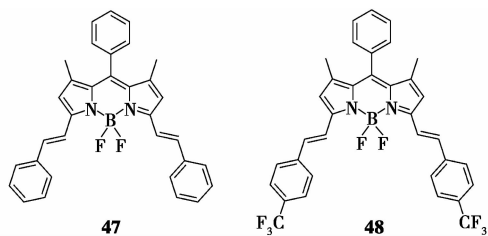


得到了5种 Knoevenagel 缩合产物 39~43。该类染料具有优良的光学性能:量子产率高、摩尔吸光大、红光发射峰窄、斯托克位移大等。在 532 nm 激光泵浦下,具有很强的激光可调谐能力,波长范围覆盖了绿光到近红外区间(570~725 nm)。

Pérez-Ojeda<sup>[22]</sup> 将邻甲氧基苯基取代的 BODIPY 染料进行二碘代,得到了3种具有高效激光发射和光稳定性的材料 44~46。采用最大吸收波长 515 和 523 nm 进行激光泵浦测试,此3种新型染料在溶液中和聚合物基质中都有很好的性能。激光发射波长为 530~625 nm,溶液效率为 55%, PMMA 中激光效率为 45%,在 10 万次激光泵浦脉冲下,激光效率几乎没有衰减现象。

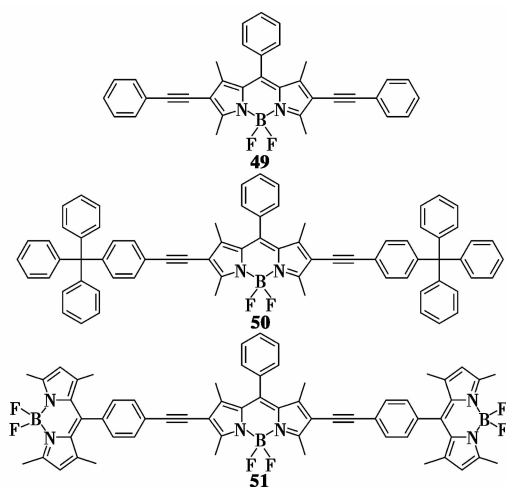


García-Moreno 等<sup>[23]</sup> 通过 BODIPY 的 3,5 位甲基和芳香醛的 Knoevenagel 缩合反应合成了红光染料 47 和 48,在 THF 溶液中激光效率最大分别为 19% 和 29%。通过 2,6 位的偶联反应得到了染料分子 49 和 50,溶液中激光效率最大分别为 23% 和 30%,红光发射带宽为  $0.15 \text{ cm}^{-1}$  的可调谐激光,光谱可调谐范围分别为 595~660 nm 和 670~735 nm。在 PMMA 聚合物掺杂后,固态染料激光效率为 26%,比商品染料 Rh640 和 Per-Red 的效率和光稳定性都要高。

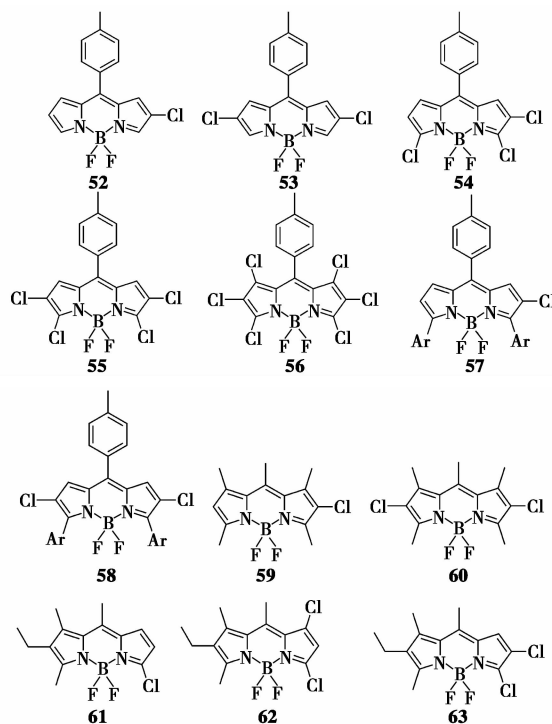


Xiao 等<sup>[24]</sup> 基于能量转移机理设计合成了天线型 BODIPY 化合物 50 和 51,对比研究二者激光发射性能和荧光光谱性质,证实了染料具有分子内能量转移过程。50 和 51 具有良好的光稳定性,在激光反复照射几十万次后,激光效率基本保持不变。

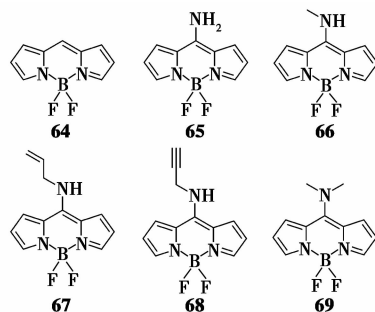
BODIPY 的卤代衍生物由于卤素的重原子效应,普遍认为会削弱染料的发光强度和激光性能。2012 年, Duran-Sampedro 等<sup>[25]</sup> 设计合成了一系列多氯取代的 BPDIPY 分子 52~63,发现其在不同溶液中光物理性质与激光行为呈正比关系,且随着氯原子取代基的增加,激光效率逐渐增强,最高值达到



60%。当氯原子取代后,染料分子的非辐射跃迁速率被大大减弱,激光寿命不断增强,3,4,6 氯取代的染料分子在泵浦脉冲作用下具有很高的光稳定性,激光发射效率几乎保持不变。

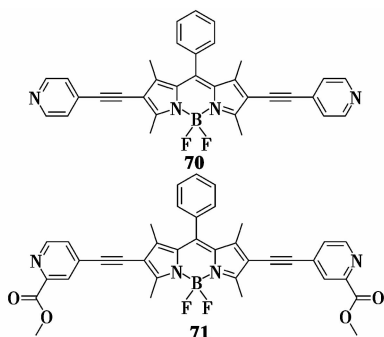


2012 年, Banuelos 等<sup>[26]</sup> 首次合成了一系列中位氨基取代的 BPDIPY 分子 64~69,直接与荧光基团连接供电子基,增强了分子的 LUMO 能级能量,导

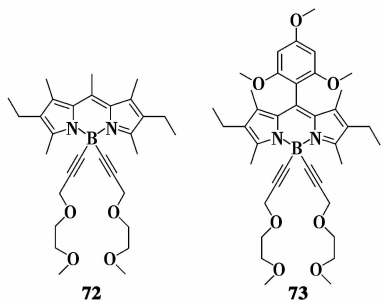


致光谱出现蓝移。当供电子取代基太强时,会出现分子内电荷转移,猝灭荧光。在乙酸乙酯中激光效率最高达 63%,而且具有较强光稳定性,这对蓝光激光染料的发展具有很好的促进作用。

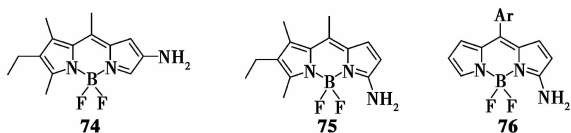
García-Moreno 等<sup>[27]</sup>通过将苯基的 BODIPY 卤代后得到单碘代和双碘代的产物,再通过钯催化剂偶联反应得到对称和不对称的端芳炔类 BODIPY 产物 70 和 71。该类化合物是很好的红色荧光染料,在乙酸乙酯溶液中机光泵浦效率很高,最高值达到 50%。



Jagtap 等<sup>[28]</sup>将 PM567 中硼原子相连的 2 个氟原子通过格氏试剂取代,得到了 2 个染料衍生物 72、73。有效改善了传统 BODIPY 染料与单线态氧作用荧光衰减的弊端,延长了激光寿命,提高了激光发射效率,光泵稳定性强,是一类具有优良性能的激光染料。

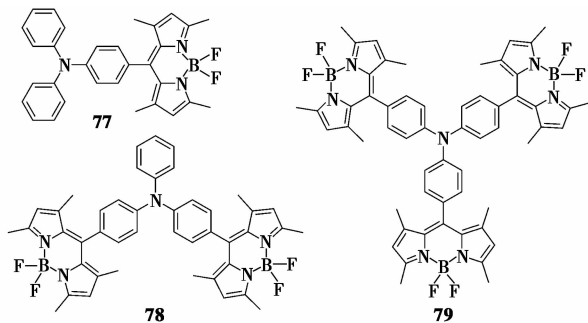


最近 Esnal 等<sup>[29]</sup>通过亲电取代反应得到了硝化后的 BODIPY 产物,后经过  $H_2$  还原得到 2 个氨基产物。对这 2 个产物进行激光泵浦实验发现,化合物 75 和 76 在不同溶剂中产生 ASE 效应,在乙酸乙酯溶液中激光效率分别为 29% 和 18%。BODIPY 母体中随取代基位置的不同,光物理性质差异较大。



李斌<sup>[30]</sup>研究组将不同数目的 BODIPY 荧光团构建至三苯胺母体中,得到了 3 个具有 D-A 结构的多枝染料分子 77~79。该类化合物的紫外-可见吸

收光谱和荧光量子产率随分子接枝数目的增多,强度逐渐增强,荧光发射光谱随着溶液极性的增加出现了从绿光到红光的变化。不仅保持了 BODIPY 类染料的优良性质,还有效地提高了染料的光子吸收能力。此类化合物在甲苯溶液中,355 nm 激光泵浦条件下产生了稳定的放大自发辐射现象,ASE 输出效率最高值达到 9%。所合成的染料分子具有较高的溶液泵浦激光发射和光稳定性,这与染料高的量子产率和低的非辐射跃迁有着密切的关系。



### 3 总结与展望

染料激光器的发展与作为激活介质的激光染料的发展密不可分,有实用价值的激光染料的要求是:容易泵浦、光化学稳定性好、激光转换效率高、较大的激光发射和可调范围、溶解度合适、激发态吸收截面小、三重态弛豫效率小等优点。因此寻找转换效率高、光稳定性好、调谐范围宽的新型激光材料引起合成工作者的极大兴趣。激光染料的发展呈现以下特点:设计开发新型激光染料,包括扩展近紫外及近红外波长的覆盖范围、增加染料的荧光量子效率及提高染料对高泵浦光的吸收、进一步提高染料的光化学稳定性。染料的光化学稳定性对其激光应用极为重要,对红外激光染料尤为突出。红外激光染料的研究是该领域的另一大热点,合成高荧光量子效率,结构高度刚性化的复杂化合物,在光化学稳定性高的罗丹明染料中引入使激光波长红移的取代基,开发多荧光团激光染料等。另外染料与聚合物基质共掺后,通过添加小分子改性剂的聚合物固体染料可以进一步拓宽调谐范围,降低染料分子的光降解,延长固体染料的使用寿命。

### 参考文献

- [1] Duarte F J. Tunable laser optics [M]. San Diego: Academic Press, 2003.
- [2] Samuel I D W, Turnbull G A. Organic semiconductor lasers [J]. Chemical Reviews, 2007, 107(4): 1272 - 1295.

- [3] Boens N, Leen V, Dehaen W. Fluorescent indicators based on BODIPY[J]. *Chemical Society Reviews*, 2012, 41: 1130 – 1172.
- [4] Loudet A, Burgess K. BODIPY dyes and their derivatives: Syntheses and spectroscopic properties [J]. *Chemical Reviews*, 2007, 107 (11): 4891 – 4932.
- [5] Ulrich G, Ziesel R, Harriman A. The chemistry of fluorescent bodipy dyes: Versatility unsurpassed [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2008, 47(7): 1184 – 1201.
- [6] Arbeloa F L, Banuelos J, Martínez V, *et al.* Structural, photophysical and lasing properties of pyromethene dyes [J]. *International Reviews in Physical Chemistry*, 2005, 24(2): 339 – 374.
- [7] Costela A, García-Moreno I. Tunable laser applications [M]. New York: CRC Press, 2009.
- [8] Forget S, Chenais S. Organic solid-state lasers [M]. Atlanta: Springer, 2013.
- [9] Arbeloa T L, Arbeloa F L, Arbeloa I L. Correlations between photophysics and lasing properties of dipyrromethene-BF<sub>2</sub> dyes in solution [J]. *Chemical Physics Letters*, 1999, 299(3/4): 315 – 321.
- [10] Bergmann A, Holzer V P, Stark R, *et al.* Photophysical characterization of pyromethene dyes in solid matrices of acrylic copolymers [J]. *Chemical Physics*, 2001, 271(1/2): 201 – 213.
- [11] Amat-Guerri F, Liras M, Carrascoso M L, *et al.* Methacrylate-tethered analogs of the laser dye PM567-synthesis, copolymerization with methyl methacrylate and photostability of the copolymers [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2003, 77(6): 577 – 584.
- [12] Costela A, García-Moreno I, Sastre R. Polymeric solid-state dye lasers: Recent developments [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2003, 5: 4745 – 4763.
- [13] García-Moreno I, Costela A, Campo L, *et al.* 8-Phenyl-Substituted dipyrromethene BF<sub>2</sub> complexes as highly efficient and photostable laser dyes [J]. *Journal of Physical Chemistry A*, 2004, 108(16): 3315 – 3323.
- [14] García O, Sastre R, del Agua D, *et al.* New fluorinated polymers doped with BODIPY chromophore as highly efficient and photostable optical materials [J]. *Chemistry of Materials*, 2006, 18(3): 601 – 602.
- [15] García-Moreno I, Amat-Guerri F, Liras M, *et al.* Structural changes in the BODIPY dye PM567 enhancing the laser action in liquid and solid media [J]. *Advanced Functional Materials*, 2007, 17(16): 3088 – 3098.
- [16] Alvarez M, Costela A, García-Moreno I, *et al.* Photophysical and laser emission studies of 8-polyphenylene-substituted BODIPY dyes in liquid solution and in solid polymeric matrices [J]. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2008, 7: 802 – 813.
- [17] Liras M, Prieto J B, Pintado-Sierra M, *et al.* Synthesis, photophysical properties, and laser behavior of 3-Amino and 3-Acetamido BODIPY dyes [J]. *Organic Letters*, 2007, 9(21): 4183 – 4186.
- [18] Costela A, García-Moreno I, Pintado-Sierra M, *et al.* New laser dye based on the 3-styryl analog of the BODIPY dye PM567 [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A*, 2008, 198(2/3): 192 – 199.
- [19] Banuelos-Prieto J, Agarrabeitia A R, García-Moreno I, *et al.* Controlling optical properties and function of BODIPY by using asymmetric substitution effects [J]. *Chemistry-A European Journal*, 2010, 16(47): 14094 – 14105.
- [20] Ortiz M J, García-Moreno I, Agarrabeitia A R, *et al.* Red-edge-wavelength finely-tunable laser action from new BODIPY dyes [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2010, 12: 7804 – 7811.
- [21] Zhang D, Martin V, García-Moreno I, *et al.* Development of excellent long-wavelength BODIPY laser dyes with a strategy that combines extending *p*-conjugation and tuning ICT effect [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2011, 13: 13026 – 13033.
- [22] Pérez-Ojeda M E, Thivierge C, Martin V, *et al.* Highly efficient and photostable photonic materials from diiodinated BODIPY laser dyes [J]. *Optical Materials Express*, 2011, 1(2): 244 – 251.
- [23] García-Moreno I, Zhang D, Costela A, *et al.* Red-edge laser action from borondipyrromethene dyes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(7): 0731051 – 0731057.
- [24] Xiao Y, Zhang D, Qian X, *et al.* Unprecedented laser action from energy transfer in multichromophoric BODIPY cassettes [J]. *Chemical Communications*, 2011, 47: 11513 – 11515.
- [25] Duran-Sampedro G, Agarrabeitia A R, García-Moreno I, *et al.* Chlorinated BODIPYs: Surprisingly efficient and highly photostable laser dyes [J]. *European Journal of Organic Chemistry*, 2012, 32: 6335 – 6350.
- [26] Banuelos J, Martin V, Gomez-Duran C F A, *et al.* New 8-amino-BODIPY derivatives: Surpassing laser dyes at blue-edge wavelengths [J]. *Chemistry-A European Journal*, 2011, 17(26): 7261 – 7270.
- [27] García-Moreno I, Wang L, Costela A, *et al.* Synthesis and optical and redox properties of symmetric and asymmetric BODIPYs [J]. *Chem Phys Chem*, 2012, 13(17): 3923 – 3931.
- [28] Jagtap K K, Shivran N, Mula S, *et al.* Change of boron substitution improves the lasing performance of bodipy dyes: A mechanistic rationalisation [J]. *Chemistry-A European Journal*, 2013, 19(2): 702 – 708.
- [29] Esnal I, Banuelos J, Arbeloa I L, *et al.* Nitro and amino BODIPYS: Crucial substituents to modulate their photonic behavior [J]. *RSC Advances*, 2013, 3: 1547 – 1556.
- [30] Yang Y, Zhang L, Li B, *et al.* Triphenylamine-cored tetramethyl-BODIPY dyes: Synthesis, photophysics and lasing properties in organic media [J]. *RSC Advances*, 2013, 3: 14993 – 14996. ■