

一种新型茈类衍生物的光谱及光限幅性能分析

陈玉霞^{1,2} 刘军辉¹ 黄明举¹

(¹ 河南大学物理与电子工程学院河南省光电信息材料与器件重点学科开放实验室, 河南 开封 475001)

² 商水县第一高级中学, 河南 周口 466000

摘要 利用 Heck 反应合成了一种新型的共轭长链的茈类衍生物, 研究了它的线性和非线性光学特性。测试了它在石油醚、二氯甲烷、乙酸乙酯和二甲基甲酰胺(DMF)四种不同极性溶剂中的紫外吸收和荧光光谱特性, 结果表明溶剂极性对新物质紫外吸收光谱和荧光光谱有一定程度的影响, 随着溶剂极性的增加, 吸收光谱和荧光光谱均红移。在激发波长为 1064 nm 皮秒激光器作用下, 测试了新物质的光学非线性——光限幅效应, 结果显示其透射率随入射光强的变化呈现非线性降低, 限幅效应明显。根据分析得出, 此光限幅效应是由三光子吸收引起。通过数据拟合, 得出了新物质的三光子吸收系数 γ 为 $5.4 \times 10^{-21} \text{ cm}^3/\text{W}^2$ 及相应的三光子吸收截面 σ'_3 为 $7.3 \times 10^{-77} \text{ cm}^6 \cdot \text{s}^2$ 。

关键词 非线性光学; 三光子吸收; 光限幅; 茈衍生物

中图分类号 O482.31

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201232.0216002

Study on the Spectral Properties and Optical Limiting Performance of a New Fluorene Derivative

Chen Yuxia^{1,2} Liu Junhui¹ Huang Mingju¹

(¹ Opening laboratory of Informational Materials and Devices of Henan University, School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng, He'nan 475001, China)
² The First Senior High School of Shangshui, Zhoukou, He'nan 466000, China

Abstract A new fluorene-based derivative with long conjugated structure is synthesized by the Heck reaction. The ultraviolet absorption and fluorescence spectrum are measured in four different polar solvents (petroleum ether, methylene chloride, ethyl acetate, DMF). The results show that the solvent polarity has certain effect on the UV absorption and fluorescence spectrum of the new compound, in certain details, the UV absorption and fluorescence spectrum red shift occurs with the increase of solvent polarity. Picosecond pulse laser whose excitation wavelength is 1064 nm is used to investigate the optical limiting of the new material. The experimental results show that the new material has a large three-photon absorption coefficient ($\gamma = 5.4 \times 10^{-21} \text{ cm}^3/\text{W}^2$) and the three-photon absorption cross section $\sigma'_3 = 7.3 \times 10^{-77} \text{ cm}^6 \cdot \text{s}^2$.

Key words nonlinear optics; three-photon absorption; optical limiting; fluorene-based derivatives

OCIS codes 160.4330; 190.4710; 190.4400; 190.4180

1 引言

有机非线性材料与无机材料相比最突出的优点是它能在分子水平上进行结构设计, 其独特的 π 键化学结构可在非共振区产生大的光学非线性, 响应时间极短, 其低的直流介电常数使器件的驱动电压

变小, 并且有机和聚合物材料来源十分广泛, 采用现代化的有机化学方法和合成技术, 使精确的设计和修饰分子结构成为可能。具有较大三光子吸收截面的材料在诸如荧光成像^[1~3]、上转换荧光激励^[4,5]、三维光存储^[6,7]、光限幅^[8~11]及光动力疗法^[12,13]等

收稿日期: 2011-08-22; 收到修改稿日期: 2011-09-16

基金项目: 国家青年科学基金项目(11004048)资助课题。

作者简介: 陈玉霞(1981—), 女, 硕士研究生, 主要从事有机大分子的合成及光带非线性等方面的研究。

E-mail: 04071322@163.com

导师简介: 黄明举(1956—), 男, 博士, 教授, 主要从事光全息存储及光学非线性等方面的研究。E-mail: hmingju@163.com

领域的应用潜力引起了人们的极大关注。因此研发具有较大三光子吸收系数和三光子吸收截面并有相当稳定性能的有机材料成为目前该领域研究的热点。苝类衍生物,由于具有大的刚性共轭平面及较高的热稳定性和光化学稳定性,近年来,成为三光子吸收材料的重要研究对象^[13~15]。本课题组合成了一种新型的共轭长链的苝类衍生物,9,9-二辛基-2,7-二[2-(4-吡啶基)乙烯基]苝,本文报道了该新物质的合成、表征及在四种不同极性溶剂中的紫外吸收光谱、荧光发射光谱,研究了溶剂极性对新物质光谱的影响。测试了新物质的三光子吸收光限幅效应,并得到了新物质三光子吸收系数和三光子吸收截面。

2 实 验

2.1 实验试剂与仪器

合成所用试剂 9,9-二辛基-2,7-二溴基苝购于百灵威化学技术有限公司,4-乙烯基吡啶、醋酸钡、三-O-甲基磷购买于上海晶纯实业有限公司,其他试剂均为国产分析纯。所用试剂使用前均按标准方法重结晶或干燥。

测试核磁共振光谱利用德国 Bruker 公司生产的 AVANCE 400 型核磁共振谱仪测得,红外光谱利用美国 Nicolet 公司生产的 AVATAR360 型傅里叶变换红外光谱仪测得,紫外可见光谱及荧光光谱分别用英国 GILDEN photonics 公司生产的 Lambda35 紫外可见光谱仪、美国 Perkin Elmer 公司生产的 FluoroSENS 荧光光谱仪测得,光限幅测试在 PY61-10 型 Nd:YAG 皮秒激光器上进行。

2.2 新物质 9,9-二辛基-2,7-二[2-(4-吡啶基)乙烯基]苝的合成

在 250 mL 三口瓶中加入 9,9-二辛基-2,7-二溴基苝 1.358 g、三-O-甲基磷 0.302 g、醋酸钡 0.0285 g,用充氮气和减压抽真空三次循环的方法排掉瓶中的空气,用恒压滴液漏斗缓慢滴加 4-乙烯基吡啶 0.83 mL、三乙胺 6 mL、二甲基甲酰胺 12 mL,氮气保护下于 100 °C 下回流反应 48 h。反应结束后冷却至室温,萃取分离、洗涤、浓缩、干燥,粗产物经硅胶柱层析分离,正己烷重结晶,得到淡黄色针状固体 0.89 g,产率 60%。

产物经核磁共振谱、红外光谱进行结构表征。¹H NMR(400 MHz,CDCl₃): δ 8.590-8.576 (d, 4H, pyridine-H), 7.715-7.695 (d, 2H, -C=CH), 7.549-7.505 (m, 4H, pyridine-H), 7.421-

7.381 (m, 6H, ArH), 7.10-7.059 (d, 2H, -C=CH), 2.05-1.056 (m, 28H, CH₂), 0.813-0.764 (m, 6H, CH₃)。IR (KBr, cm⁻¹) ν : 3031, 2924, 2854, 1633, 1592, 1584, 990, 972, 818。

3 结果与讨论

3.1 合 成

Heck 反应是一个有效的 C=C 偶联反应,构建拥挤的季碳中心极为方便,反应条件温和,收率较高,反应选择性也较易控制^[16]。此化合物的合成就是氯代芳烃 9,9-二辛基-2,7-二溴基苝与烯炔 4-乙烯基吡啶在醋酸钡、三-O-甲基磷的催化作用下,由二甲基甲酰胺作溶剂,三乙胺提供碱性环境下发生的 Heck 芳基化反应,反应温度为 100 °C,反应路线如图 1 所示。苝中心环上的二辛基烷基是为了提高化合物的溶解度,两端的吡啶基团是为了增加共轭系统的电子转移能力。

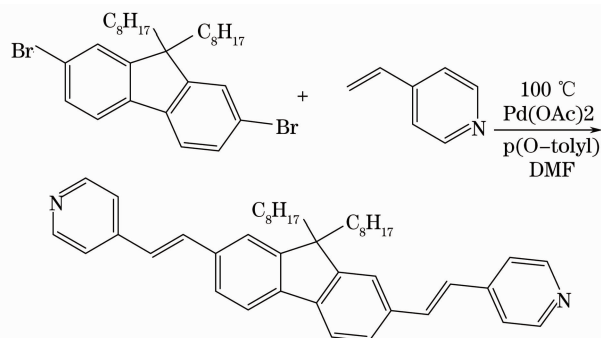


图 1 新物质 9,9-二辛基-2,7-二[2-(4-吡啶基)乙烯基]苝的合成路线图

Fig. 1 Synthesis of 4,4'-(1E,1'E)-2,2'-(9,9-dioctyl-9H-fluorene-2,7-diyl) bis(ethene-2,1-diyl) dipyridine

3.2 新物质的紫外吸收光谱

将新化合物配成物质的量浓度为 1.0×10^{-6} mol/L,测试了它在四种不同极性溶剂石油醚、二氯甲烷、乙酸乙酯和 DMF 中的紫外吸收光谱,如图 2 所示,最大吸收峰、最大摩尔吸收系数(ϵ_{\max})如表 1 所示。

摩尔吸收系数是吸收物质在特定波长和溶剂中的一个特征常数,在稀溶液时,根据 Lambert-Beer 定律^[17]公式得出:

$$A = \lg \frac{I_0}{I} = \epsilon lc, \quad (1)$$

式中 A 和 $\lg \frac{I_0}{I}$ 是吸收度或者光密度,可以在吸收谱上直接读出, l 是产生吸收溶液的长度, c 是溶液的浓度, ϵ 是摩尔吸收系数。当 A 读取最大值时, ϵ 便是最大摩尔吸收系数 ϵ_{\max} 。

表 1 新化合物的物质的量浓度为 1×10^{-6} mol/L, 在四种极性溶剂中的吸收峰及摩尔吸收系数值Table 1 Absorption peaks and molar absorption coefficients of the new compound in four different polar solvents when its amount of substance concentration is 1×10^{-6} mol/L

Solvent	Solvent polarity	Main absorption peak /nm	The second absorption peak /nm
		$[\epsilon_{\max}/10^4 \text{ L}/(\text{mol}\cdot\text{cm})]$	$[\epsilon_{\max}/10^4 \text{ L}/(\text{mol}\cdot\text{cm})]$
Petroleum ether	0.01	370 (5.00)	388 (3.88)
Dichloromethane	3.40	375 (4.89)	393 (3.82)
Ethyl acetate	4.30	371 (4.85)	389 (3.89)
DMF	6.40	376 (4.68)	395 (3.81)

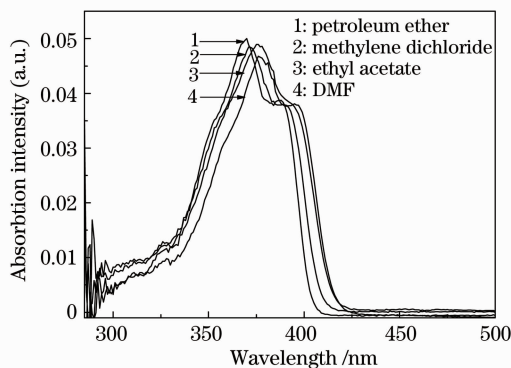


图 2 新物质在四种不同极性溶剂中的紫外吸收光谱
Fig. 2 UV absorption spectra of the new compound in four different polar solvents

由图 2 可以看出,新物质的紫外吸收带位于 $300 \sim 430$ nm,在不同的溶剂中稍有偏移,但偏移不大。且每个吸收谱都有两个吸收峰,这两个吸收峰都是长共轭发色基团的特征吸收峰,峰值分别位于 $370 \sim 380$ nm 和 $388 \sim 395$ nm 之间,且两吸收峰强度较大,摩尔吸光系数均大于 10^4 ,所以都归属为新物质的 K 吸收带,K 带的吸收归属于苯型和乙烯型分子的共轭双键 $\pi \rightarrow \pi^*$ 的跃迁吸收^[18]。由表 2 可以看出,溶剂极性对新物质紫外吸收光谱有一定的影响,随着溶剂极性的增大,吸收峰红移,极性较大的溶剂 DMF 相比于非极性溶剂在油醚,两个吸收峰都红移了 6 nm。这是因为在紫外光照射下,发生相应的电子跃迁后,化合物激发态的极性比基态大,而极性溶剂对电荷分散体系的稳定能力使化合物激发态和基态的能量都有所降低,但程度不同,前者大于后者,也就是分子的基态和激发态的能差减小,这就导致发生跃迁的电子吸收能量随溶剂极性的增大而减小,故吸收带红移^[19]。

3.3 新物质的荧光发射光谱

由于新物质具有大 π 共轭体系、荧光基团以及较好的分子平面性,根据文献^[19]分析可知,其应具有很好的荧光效应,因此我们测试了新物质在四种不同极性溶剂中的荧光发射情况,实验结果和理论

相符,新物质在紫外光照射下发出很强的蓝色荧光,荧光发射带位于 $350 \sim 500$ nm。

由于跃迁到激发态高振动能级的激发态分子,以更快的速率发生振动弛豫,到达零振动能级,散失部分能量;其次激发态形成后,其分子构型将很快进一步调整,以达到激发态的稳定构型,这又损失了部分能量。能量损失导致发射的荧光量子的能量低于被吸收光子的能量,也就是与激发光谱相比,荧光光谱将发生向长波方向移动,即产生斯托克斯位移 (Stokes shift)^[20]。

由于溶剂效应,同一种物质在不同的极性溶剂中,最大激发波长往往是不同的,所对应的荧光发射光谱也会因溶剂极性的不同而发生红移。图 3 显示了新物质摩尔浓度为 1.0×10^{-6} mol/L 时,在四种不同极性溶剂中的荧光发射谱图,最大激发波长、最大发射峰位置及 Stokes shift 列于表 2 中。

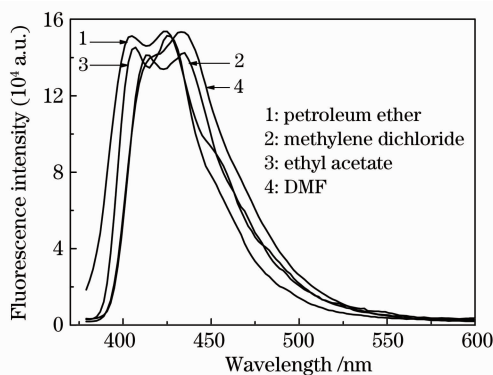


图 3 新化合物的物质的量浓度为 1×10^{-6} mol/L 时,在四种不同的极性溶剂中的荧光发射光谱
Fig. 3 Fluorescence spectra of the new compound in four different polar solvents when its amount of substance concentration is 1×10^{-6} mol/L

由图 3 可以看出,新物质在四种不同溶剂中都有两个发射峰,表现为双荧光行为^[18],溶剂效应对光谱形状影响不大。但由表 2 可以看出,溶剂的极性对荧光峰的位置有一定程度的影响,同在非极性溶剂石油醚相比,新物质在极性溶剂中的最大激发

波长、发射峰位置分别红移 8~10 nm。并且,溶剂效应对新物质在四种不同极性溶剂中的斯托克斯位

移影响较小,这是由于新物质为对称性分子,处于激发态时分子偶极矩只发生微小的变化。

表 2 新化合物在四种不同极性溶剂中的最大激发波长、发射峰位置及 Stokes shift

Table 2 Maximum excitation wavelengths, emission peak positions and Stokes shift of the new compound in four different polar solvents

Solvent	Solvent polarity	Max excitation wavelength /nm	Emission peak position /nm	Stokes shift /nm
Petroleum ether	0.01	369	405 (425)	36 (56)
Dichloromethane	3.40	375	413 (435)	38 (60)
Ethyl acetate	4.30	369	407 (425)	38 (56)
DMF	6.40	376	416 (433)	40 (57)

3.4 新物质的非线性光学特性——光限幅特性的测试

将新化合物溶解在 DMF 溶剂中,配成物质的量浓度为 2×10^{-3} mol/L 的溶液,用 1064 nm 的皮秒激光器测试了新物质的透过光强随入射光强的变化,即光限幅特性。其结果如图 4 所示,图中黑色点代表测量数据,实线代表最佳拟合曲线,虚线为纯的 DMF 溶剂的测量数据。由图 4 可以看出,随着入射光强的增加,透过光强呈现非线性降低,呈现出明显的光限幅效应。

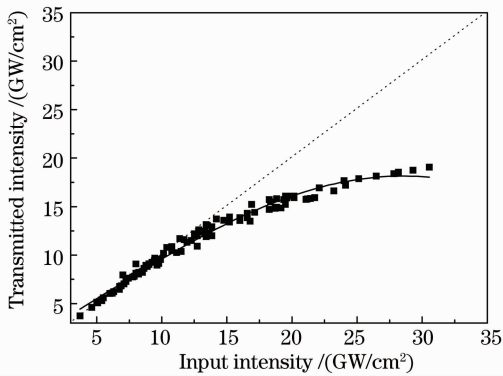


图 4 新化合物在 DMF 溶剂中(物质的量浓度为 2.0×10^{-3} mol/L)输入-透过强度曲线

Fig. 4 Transmitted intensity versus incident intensity of the new compound in DMF at 2.0×10^{-3} mol/L

图 5 显示的是非线性透射率随入射光强的变化曲线。由图 5 可以看出透射率随入射光强的变化呈现非线性降低:当入射光强较小时,透射率几乎为 1,基本无限幅效应,当入射光强继续增大,限幅效应逐渐明显,当入射光强达到 30 GW/cm^2 时,透射率只有 60%,限幅效应明显。

不管是单光子吸收还是三光子吸收,电子总是从基态吸收能量向最终的激发态跃迁,故若所有单光子吸收较强,则其对应的三光子吸收也应该较强^[21]。由于新物质在 300~420 nm 的范围内有很

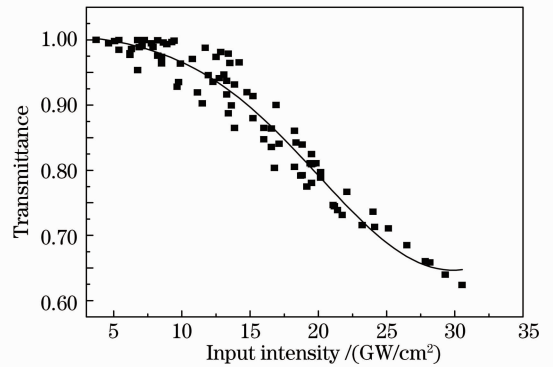


图 5 新化合物在 DMF 溶剂中的非线性透射率随入射光强的变化曲线

Fig. 5 Transmission versus input intensity of the new compound in DMF solvent

强的紫外可见吸收,而在激光发出的 1064 nm 单光子能量处和双光子能量处均没有线性吸收,三光子能量恰好落在这个区间内,故此种光限幅效应是由三光子吸收引起的。

根据三光子吸收的理论,沿入射方向(z 轴)激发光束强度的改变可以表示为

$$dI(z)/dz = -(\alpha + \beta I + \gamma I^2 + \dots)I, \quad (2)$$

式中 α 为材料的线性吸收系数, β 为双光子吸收系数, γ 为三光子吸收系数。其中 γ 与五阶极化率的虚部有关, z 是光在样品中的传播距离,根据上述分析可知,不存在单光子和双光子吸收,因此方程可以近似为

$$dI(z)/dz = -\gamma I^3(z), \quad (3)$$

解此方程可得

$$I(z) = \frac{I_0}{\sqrt{1 + 2\gamma z I_0^2}}, \quad (4)$$

式中 I_0 是入射光强度,而此式适用于在垂直于传播方向的平面为矩形波面的连续光或脉冲光,本实验所用的光束成高斯分布,因此试验中将高斯光束近似等同于矩形脉冲。

利用(4)式对数据进行拟合,便可得出三光子吸收系数为 $\gamma=5.4 \times 10^{-21} \text{ cm}^3/\text{W}^2$ 。

在确定浓度下,三光子吸收系数的值也可以表示为^[22]

$$\gamma = \sigma_3 N_A d_0 \times 10^{-3}, \quad (5)$$

式中 σ_3 表示为分子的三光子吸收截面, N_A 为阿伏伽德罗常数。另外,分子的三光子吸收截面也可以表示为^[23]

$$\sigma'_3 = \sigma'_3 (h\nu)^2, \quad (6)$$

式中 $h\nu$ 是激发光单个光子的能量,根据已知的 γ 值,代入(6)式,便可得出化合物在 DMF 中的三光子吸收截面为 $\sigma'_3 = 7.3 \times 10^{-77} \text{ cm}^6 \cdot \text{s}^2$ 。新物质的三光子吸收截面较大,有望在光限幅领域得到应用。

4 结 论

合成了新型对称共轭茈类衍生物{9,9-二辛基-2,7-二[2-(4-吡啶基)乙烯基]茈},采用核磁共振、红外光谱对其结构进行表征,并研究了它在四种不同极性溶剂中的紫外吸收、荧光光谱。结果发现,新物质在不同极性溶剂中有很强的吸收,溶剂极性对新物质的光谱有一定程度的影响,吸收峰和荧光峰随溶剂极性的增加都有所红移。由于新物质的共轭结构,溶剂极性对 Stokes shift 影响较小。新物质在皮秒激光器作用下表现出明显的三光子吸收光限幅效应,通过拟合得出了新物质的三光子吸收系数为 $\gamma=5.4 \times 10^{-21} \text{ cm}^3/\text{W}^2$,对应的三光子吸收截面为 $\sigma'_3 = 7.3 \times 10^{-77} \text{ cm}^6 \cdot \text{s}^2$ 。

致谢 作者衷心感谢湖北大学的杨军、傅辉对本实验的合成提供的技术指导,并感谢河南大学特种功能材料实验室的张后俊对实验提供的帮助。

参 考 文 献

- Min Gu. Resolution in three-photon fluorescence scanning microscopy [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(13): 988~990
- S. Maiti, J. B. Shear, R. M. Williams *et al.*. Measuring serotonin distribution in live cells with three-photon excitation [J]. *Science*, 1997, **275**(5299): 530~532
- Florencio E. Hernandez, Kevin D. Belfield, Ion Cohanoschi *et al.*. Three- and four-photon absorption of a multiphoton absorbing fluorescent probe [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(28): 5394~5398
- Liu Junhui, MaoYanli, Ma Wenbo *et al.*. Three-photon-absorption induced fluorescence and optical limiting properties of a new organic compound[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(11): 5173~5177
- 刘军辉, 毛艳丽, 马文波等. 一种新的茈类衍生物的光谱诱导荧光和光限幅效应研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(11): 5173~5177
- D. R. Larson, W. R. Zipfel, R. M. Williams *et al.*. Water-soluble quantum dots for multiphoton fluorescence imaging *in vivo* [J]. *Science*, 2003, **300**(5624): 1434~1436
- G. S. He, P. P. Markowicz, T. C. Lin *et al.*. Observation of stimulated emission by direct three-photon excitation [J]. *Nature*, 2002, **415**: 767~770
- Tang Huohong, Zhou Yongjun, Jiang Zhongwei *et al.*. Experimental study on photochromic three-dimensional optical storage under two-photon absorption [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 92~96
- 唐火红, 周拥军, 蒋中伟等. 双光子吸收光致变色三维光存储实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 92~96
- Hu Kaiming, Qian Ying, Huang Wei *et al.*. Three-photon absorption and optical power limiting of triphenylamine-pyridine derivatives[J]. *Acta Chim. Sinica*, 2010, **68**(1): 1~6
- 胡凯明, 钱鹰, 黄维等. 三苯胺-吡啶衍生物的三光子吸收及光限幅特性[J]. *化学学报*, 2010, **68**(1): 1~6
- Liu Junhui, MaoYanli, Gu Yuzong *et al.*. Large irradiance limiting induced by three-photon absorption of a symmetrical fluorine based molecule [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(7): 4739~4746
- Qingdong Zheng, Guang S. He, Alexander Baev *et al.*. Experimental and quantum chemical studies of cooperative enhancement of three-photon absorption, optical limiting, and stabilization behaviors in multibranched and dendritic structures [J]. *J. Phys. Chem.*, 2006, **110**(30): 14604~14610
- Gao Lili, Chen Yu, He Nan *et al.*. Studies on the nonlinear optical and optical limiting properties of perfluorinated titanium (IV) phthalocyanines [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1122~1129
- 高丽丽, 陈彧, 何楠等. 全氟取代的钛酞菁衍生物的非线性光学和光限幅性能研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1122~1129
- P. N. Prasad. Emerging opportunities at the interface of photonics, nanotechnology and biotechnology [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2004, **415**: 1~7
- T. D. Poulsen, P. K. Frederiksen, M. Jorgensen *et al.*. Two-photon singlet oxygen sensitizers: quantifying, modeling, and optimizing the two-photon absorption cross section [J]. *J. Phys. Chem.*, 2001, **105**(51): 11488~11495
- Richard L. Sutherland, Mark C. Brant, Jim Heinrichs *et al.*. Excited-state characterization and effective three-photon absorption model of two-photon-induced excited-state absorption in organic push-pull charge-transfer chromospheres [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(9): 1939~1948
- Ion Cohanoschi, Kevin D. Belfield, Carlos Toro *et al.*. The impact of the π -electron conjugation length on the three-photon absorption cross-section of fluorine derivatives [J]. *J. Chem. Phys.*, 2006, **124**: 1~4
- Cai Chun, Lü Chunxu. Synthesis of 1-Hydroxy-4-(3-pyridyl) butan-2-one using Heck reaction [J]. *Chinese J. Organic Chemistry*, 2004, **24**(6): 673~674
- 蔡春, 吕春绪. 用 Heck 反应合成 1-羟基-4-(3-吡啶基)丁-2-酮 [J]. *有机化学*, 2004, **24**(6): 673~674
- D. H. Willeams, I. Fleming. *Spectroscopic Methods in Organic Chemistry* [M]. Beijing: Beijing University Press, 2001
- Sun Xiaochen, Zhu Tuo, Chen Guoqing *et al.*. Spectral characteristics of a new iridium (III) organic complex [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1420~1423
- 孙晓晨, 朱拓, 陈国庆等. 一种新型金属铱(III)有机配合物的光谱特性研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1420~1423
- Ma Wenbo, Wu Yiqun, Gu Donghong *et al.*. Study on the spectral properties of a new fluorene derivative [J]. *Spectrosc. & Spectral Anal.*, 2005, **25**(8): 1297~1300
- 马文波, 吴谊群, 顾冬红等. 一种新型茈类衍生物的光谱性质研

- 究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, **25**(8): 1297~1300
- 20 Zhang Jiancheng, Wang Duoyuan. Modern Photochemistry [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006
张建成, 王夺元. 现代光化学化学 [M]. 北京: 工业出版社, 2006
- 21 P. Cronstrand, Y. Luo, P. Norman *et al.*. Ab-initio calculations of three-photon absorption [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2003, **375**: 233~239
- 22 Ma Wenbo, Wu Yiqun, Han Junhe *et al.*. Experimental studies on optical power limiting of two three-photon absorption dyes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1380~1384
马文波, 吴宜群, 韩俊鹤等. 两种三光子吸收染料光限幅性能的实验研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(10): 1380~1384
- 23 Ma Wenbo, Wu Yiqun, Han Junhe *et al.*. Three-photon absorption properties of two novel fluorene-based derivatives [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **8**(54): 3698~3702
马文波, 吴宜群, 韩俊鹤等. 两种新型茱类衍生物的三光子吸收特性研究 [J]. 物理学报, 2005, **8**(54): 3698~3702

栏目编辑: 韩 峰