

# 苯并噻唑偶氮苯化合物的双模式光致变色性能及其在光信息存储中的应用

李 达<sup>1,2</sup>, 郭鹏鹏<sup>2</sup>, 张 芳<sup>3</sup>, 周姝宇<sup>1</sup>

(1. 山西工程科技职业大学汽车工程学院, 晋中 030600;

2. 太原理工大学新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 太原 030024;

3. 山西能源学院能源化学与材料工程系, 晋中 030600)

**摘要** 通过重氮偶合反应合成了一种新型苯并噻唑偶氮苯类光致变色化合物(BTA), 并对其化学结构进行了表征. 利用吸收光谱、荧光光谱、红外光谱及理论模拟计算, 研究了BTA的光响应性能、作用机理及其应用前景. 结果表明, 基于顺反异构转变机制, BTA溶液在紫外光照射下可迅速由黄色变为无色, 并伴随青色荧光的发射, 而在白光照射与60 °C加热协同作用下, 其颜色和荧光可恢复至初始状态, 表现出优异的可逆双模式光致变色行为. 进一步将BTA与聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)掺杂, 制备的薄膜实现了可擦写光信息存储. 本研究为双模式光致变色材料的设计及其在智能光电器件中的应用提供了新的思路和实验依据.

**关键词** 光致变色; 偶氮苯; 苯并噻唑; 光信息存储; 顺反异构

中图分类号 O626; TB34

文献标志码 A

doi: 10.7503/cjcu20250116

## Dual-mode Photochromic Properties of a Benzothiazole-azobenzene Compound and Its Application in Optical Information Storage

LI Da<sup>1,2\*</sup>, GUO Kunpeng<sup>2</sup>, ZHANG Fang<sup>3</sup>, ZHOU Shuyu<sup>1</sup>

(1. School of Automotive Engineering, Shanxi Vocational University of Engineering Science and Technology, Jinzhong 030600, China;

2. Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

3. Department of Energy Chemistry and Materials Engineering, Shanxi Institute of Energy, Jinzhong 030600, China)

**Abstract** A novel benzothiazole azobenzene based photochromic compound (BTA) was synthesized through diazocoupling reaction. Its chemical structure was confirmed, and the photoresponsive properties, mechanism, and application prospects were studied by means of UV-Vis spectra, PL spectra, FTIR spectra, and theoretical calculations. The results indicated that based on the mechanism of *cis-trans* isomerization, BTA solution rapidly changed from yellow to colorless and emitted blue fluorescence under UV light irradiation and could be restored to its initial state by visible light irradiation under 60 °C heating, exhibiting reversible dual-mode photochromic phenomenon. The film prepared by doping BTA with polymethyl methacrylate (PMMA) successfully achieved erasable optical information storage. This study provides valuable insights and experimental evidence for the design of dual-mode photochromic materials and their applications in smart optoelectronic devices.

收稿日期: 2025-04-17. 网络首发日期: 2025-05-23.

联系人简介: 李 达, 女, 博士, 讲师, 主要从事有机光电功能材料方面的研究. E-mail: lida@sxgkd.edu.cn

基金项目: 山西工程科技职业大学校科研项目(批准号: KJ202416)和山西省科技厅基础研究计划青年项目(批准号: 202303021212290)资助.

Supported by the Scientific Research Fund Project of Shanxi Vocational University of Engineering Science and Technology, China(No.KJ202416) and the Youth Project of Basic Research Program of Shanxi Provincial Department of Science and Technology, China(No.202303021212290).

**Keywords** Photochromism; Azobenzene; Benzothiazole; Optical information storage; *Cis-trans* isomerization

光致变色化合物是指在不同波长光的激发下结构或构象发生可逆转变,从而引起宏观上颜色、荧光及其它物理性质变化的一类物质<sup>[1-4]</sup>,其具有可修饰性高、响应速度快、远程可控和颜色丰富等优点,被广泛应用于信息存储、加密防伪、光开关和光编码等新型智能领域<sup>[5-8]</sup>.

随着对光致变色材料的深入研究,已开发了多种化合物体系用于该类材料的设计中,包括二芳基乙烯类<sup>[9,10]</sup>、螺吡喃类<sup>[11-13]</sup>、俘精酸酐类<sup>[14,15]</sup>和偶氮苯类<sup>[16-20]</sup>等.其中,偶氮苯类光致变色材料凭借着高光学活性、变色过程可逆及合成简单等显著特点,得到了长足发展.偶氮苯化合物是指含有氮氮双键的一类光致变色分子,具有典型的顺反几何异构体.一般情况下,偶氮苯类物质以相对稳定的反式结构存在,而在受到外界刺激(如光照)后会发生反式到顺式的转变,由于顺式构象的偶氮化合物处于亚稳态,在加热或光照条件下又可以恢复到反式构象<sup>[21-23]</sup>.近年来,研究人员就偶氮苯衍生物的光致变色性能及应用开展了广泛的研究.Fan等<sup>[24]</sup>合成了一系列含邻苯二酚基团的对称偶氮苯衍生物,在紫外光照射下,这些化合物的吸收峰显著下降,可迅速达到光稳态,且其光致变色行为表现出良好的可逆性.Hu等<sup>[25]</sup>将偶氮苯类基团引入到聚氨酯中,使聚合物大分子兼具偶氮苯的优良性能,在紫外光和阳光交替照射下表现出可逆的光致变色现象.然而,大多数已报道的偶氮苯类光致变色材料通常仅可实现日光灯下颜色的可逆转变,这种单一响应模式极大地限制了其在多维功能材料设计中的应用.相比之下,具有日光灯下颜色响应和紫外灯下荧光响应的双模式变色材料因其响应信号的多样性和可分辨性,在防伪加密等高端安全领域展现出显著优势.因此,开发这种具有双模式光学响应的智能变色材料具有重要的科学意义和应用价值.

苯并噻唑及其相关衍生物是一类非常重要的芳香杂环化合物,凭借强的吸电子能力、刚性的共轭体系和稳定的光学性质被广泛用于荧光化合物和荧光染料等荧光材料的设计中<sup>[26,27]</sup>.基于此,本文通过简单的重氮偶合反应合成了一种苯并噻唑类偶氮苯化合物(BTA),并利用核磁共振波谱(NMR)、元素分析等方法对其结构进行了表征.此外,利用吸收光谱、荧光光谱和红外光谱等手段对其光化学性质进行了分析,探究了其光致变色和光致荧光变色的性能及机理.最后,将BTA与高分子材料PMMA结合,进一步拓展了其在光信息存储中的应用.

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

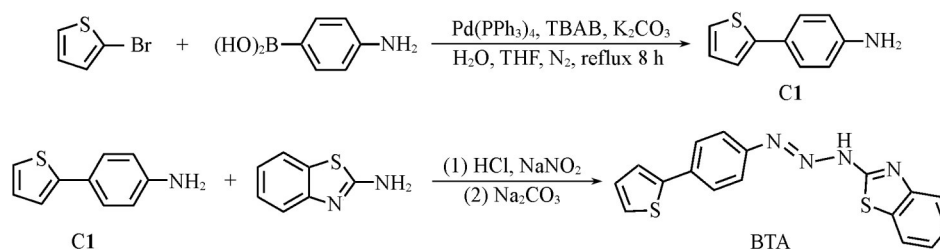
2-溴噻吩、(4-氨基苯基)硼酸、四丁基溴化铵(TBAB)、四(三苯基膦)钨、2-氨基苯并噻唑、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、氘代二甲基亚砷(DMSO- $d_6$ )和氘代氯仿( $CDCl_3$ ),分析纯,萨恩化学技术(上海)有限公司;碳酸钾、硝酸钠、碳酸钠、氯化钠、无水硫酸镁、丙酮和稀盐酸,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;四氢呋喃(THF)、石油醚、乙酸乙酯和二氯甲烷,分析纯,天津市大茂化学试剂厂.实验用水为自制去离子水.

600spectrometer型核磁共振波谱仪(NMR),德国Bruker公司;U-3900型紫外-可见分光光度计(UV-Vis)和F-4700型荧光分光光度计(PL),日本Hitachi公司;Tensor27型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR),德国Elementar公司.

### 1.2 实验过程

1.2.1 化合物BTA的合成 目标化合物的合成路线如Scheme 1所示.

首先,将2-溴噻吩(326 mg, 2 mmol)、(4-氨基苯基)硼酸(339 mg, 2.4 mmol)、碳酸钾(1.382 g, 10 mmol)、TBAB(5 mg)和四(三苯基膦)钨(116 mg, 0.1 mmol)加入双口圆底烧瓶(100 mL)中,以THF(20 mL)和去离子水(4 mL)作为溶剂,在氮气气氛下搅拌加热至回流.反应8 h后,冷却至室温,用饱和氯化钠溶液和二氯甲烷萃取反应液,用无水硫酸镁干燥有机相,利用旋转蒸发器浓缩得到粗产物,以石油醚/乙酸乙酯(体积比5:1)为洗脱剂进行硅胶柱层析分离,得到283 mg黄色粉末状中间产物C1,产率81%.  $^1H$  NMR(600 MHz,  $CDCl_3$ ),  $\delta$ : 7.63(dd,  $J=6.0, 1.8$  Hz, 1H), 7.59(dd,  $J=4.8, 1.8$  Hz,



Scheme 1 Synthetic route of product BTA

1H), 7.50 (s, 2H), 7.17 (m, 1H), 6.56 (d,  $J=7.8$  Hz, 2H), 4.16 (m, 2H);  $^{13}\text{C}$  NMR (150 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ),  $\delta$ : 149.95, 142.65, 128.95, 127.94, 127.21, 126.88, 124.73, 114.63; 元素分析(% ,  $\text{C}_{10}\text{H}_9\text{NS}$ 计算值): C 68.52(68.54), H 5.16(5.18), N 8.02(7.99), S 18.20(18.29).

在冰浴条件下, 将化合物 C1 (2 mmol, 350 mg) 加入稀盐酸(质量分数 3%, 25 mL) 与冰水(5 mL) 的混合溶液中并持续搅拌. 随后, 逐滴加入硝酸钠冷水溶液(0.2 mol/L, 10 mL) 并搅拌 20 min 后转至室温, 加入碳酸钠(2 mmol, 212 mg) 和 2-氨基苯并噻唑(2 mmol, 300 mg), 继续搅拌 20 min. 向反应溶液中加入过量的氯化钠后抽滤, 所得沉淀物用冰水多次冲洗并于真空干燥箱中烘干后, 以石油醚/乙酸乙酯(体积比 10:1) 作为洗脱剂, 对粗产物进行中性氧化铝层析柱分离提纯, 得到 465 mg 棕色固体目标产物 BTA, 产率 69.0%.  $^1\text{H}$  NMR (600 MHz,  $\text{DMSO}-d_6$ ),  $\delta$ : 13.93 (s, 1H), 7.96 (d,  $J=7.8$  Hz, 1H), 7.77 (d,  $J=8.4$  Hz, 3H), 7.52 (m, 5H), 7.35 (s, 1H), 7.16 (s, 1H);  $^{13}\text{C}$  NMR (150 MHz,  $\text{DMSO}-d_6$ ),  $\delta$ : 166.17, 150.15, 150.02, 143.22, 136.82, 130.47, 127.94, 126.88, 126.82, 126.03, 124.71, 122.28, 121.59, 121.06, 118.53; 元素分析(% ,  $\text{C}_{18}\text{H}_{13}\text{N}_3\text{S}_2$ 计算值): C 60.72(60.69), H 3.61(3.60), N 16.62(16.65), S 19.05(19.06); MALDI-TOF ( $\text{C}_{18}\text{H}_{13}\text{N}_3\text{S}_2$ 计算值),  $m/z$ : 337.054(336.051)  $[\text{M}]^+$ .

1.2.2 光照操作 选用波长为 365 nm、功率为 40 W 的紫外灯作为光照操作中的紫外光光源; 选用波长范围 400~750 nm、功率为 8 W 的日光灯作为光照操作中的可见光光源. 照射时, 光源与待照射物体之间的距离为 0.2 m.

1.2.3 BTA-PMMA 薄膜的制备 在避光条件下, 将 BTA 丙酮溶液(1 mmol/L) 与 PMMA 四氢呋喃溶液(质量分数 10%) 以体积比 1:2 的比例混合, 超声分散 30 min. 取 1 mL 混合溶液均匀涂布在光滑平整的规格为 3 cm×3 cm 的石英片上, 室温下静置 5 min 后, 转移至 40 °C 真空干燥箱(0.1 MPa) 中 2 h, 制得淡黄色、透明的 BTA-PMMA 薄膜, 将其置于黑暗处保存, 备用.

## 2 结果与讨论

### 2.1 化合物 BTA 的光致变色性能

首先, 在室温下分别测试了 BTA 丙酮溶液在紫外光照射前、照射后的吸收光谱和荧光光谱的变化. 如图 1(A) 所示, 自然光照射下, BTA 原始溶液主要有 2 个吸收带, 其中短波区 275 nm 处的吸收峰对应于芳香基团的  $\pi-\pi^*$  跃迁, 长波区 388 nm 处的吸收峰则归因于苯并噻唑及三氮部分的  $n-\pi^*$  跃迁<sup>[28]</sup>. 而经 365 nm 紫外灯照射后, 长波区的吸收峰大幅降低, 且溶液由淡黄色变成无色. 同时, 化合物 BTA 溶液的荧光光谱也发生了显著的变化. 如图 1(B) 所示, 溶液原本仅有非常微弱的荧光, 在紫外灯照射下, 475 nm 处的荧光强度急剧增强, 溶液发出明亮的青色荧光. 以上数据表明, 该化合物具有良好的光致变色和光致荧光变色性能, 这种双重模式的光响应特性可使其在多功能防伪、信息加密和存储领域展现出极大的优势.

考察了 BTA 溶液的荧光强度随紫外光照射时间的变化情况. 如图 2(A) 所示, 在 365 nm 紫外光照射下, 475 nm 处产生新的荧光峰, 并随照射时间的延长而逐渐增强. 在照射 120 s 后, 475 nm 处荧光强度不再增强, 达到了最大值. 进一步对该溶液的光致变色可逆条件进行探究发现, 单独的白光照射和加热条件无法实现荧光及颜色的逆向恢复[见本文支持信息图 S1(A) 和(B)]; 必须在白光(400~750

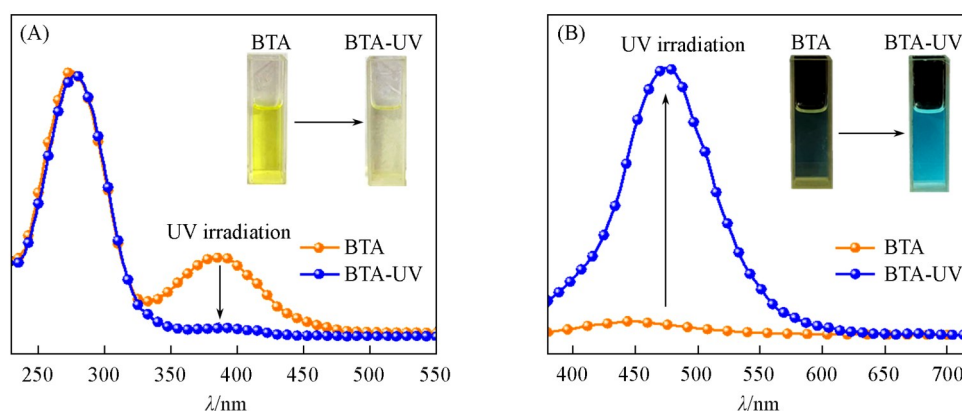


Fig. 1 Absorption(A) and fluorescence(B) spectra of BTA( $10^{-5}$  mol/L) before and after 365 nm UV light irradiation

Inset of (A) showing the solution under daylight; inset of (B) showing the solution under UV light.

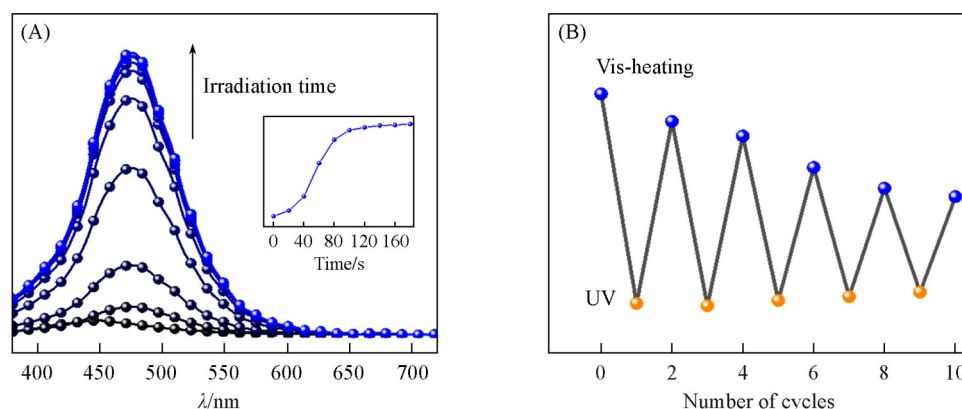


Fig. 2 Time-dependent PL spectra of BTA( $10^{-5}$  mol/L) under UV light irradiation(A) and repeatability tests of BTA( $10^{-5}$  mol/L) by alternating UV irradiation and visible light-heating dual stimulation(B)

Inset of (A): time-dependent peak intensity curve of BTA ( $10^{-5}$  mol/L) under UV light irradiation.

nm)与60 °C加热协同作用2 h后,通过提供足够能量克服逆向反应的能垒,BTA溶液方可完全漂白,恢复至初始无荧光状态[图S1(C)].这一光热协同机制可归因于白光激发与热能共同促进了分子从反式结构向顺式结构的转变.测试了该过程的重复性,如图2(B)所示,以475 nm处的荧光强度为参考标准,在紫外光照射和白光/热协同作用的交替下,可以实现荧光强度高达十余次的可逆变化,荧光强度虽表现出一定程度的衰减,但仍可实现对2种荧光状态的有效区分,证实其分子结构在光异构化过程中具有可观测的可逆性和抗疲劳特性.

## 2.2 化合物BTA的光致变色机理

对化合物BTA的光致变色机理进行了深入研究.首先,对比了紫外光照射前后的红外光谱.如图3(A)所示,在BTA的红外光谱图中 $1560\text{ cm}^{-1}$ 处具有典型的特征吸收峰,可归属于 $\text{—N= N—}$ 的伸缩振动.未经紫外光照射时, $988\text{ cm}^{-1}$ 处存在显著的吸收峰,代表了面内弯曲振动的特征,表明此时BTA处于反式结构;而经紫外光照射后,该吸收峰的强度明显减弱,同时在 $654\text{ cm}^{-1}$ 处出现一个新的吸收峰,表明顺式结构的特征性面外伸缩振动模式的出现<sup>[29-31]</sup>.以上结果表明,在紫外光照射下,BTA发生了空间构型从反式结构到顺式结构的转变[图3(C)].

借助高斯软件对 $\text{trans-BTA}$ 和 $\text{cis-BTA}$ 的基态结构及电子云分布进行了模拟计算.如图3(B)所示,与反式结构相比,顺式结构具有更为扭曲的空间构象,苯基与相邻的噻吩基和苯并噻唑基的二面角分别为 $26.7^\circ$ 和 $64.3^\circ$ ,远高于反式结构中的 $24.9^\circ$ 和 $0.3^\circ$ ,表现出较大的空间位阻效应.2种不同构型分子的最高占据分子轨道(HOMO)分布相似,均匀地分布在分子骨架上,而顺式结构中的最低未占

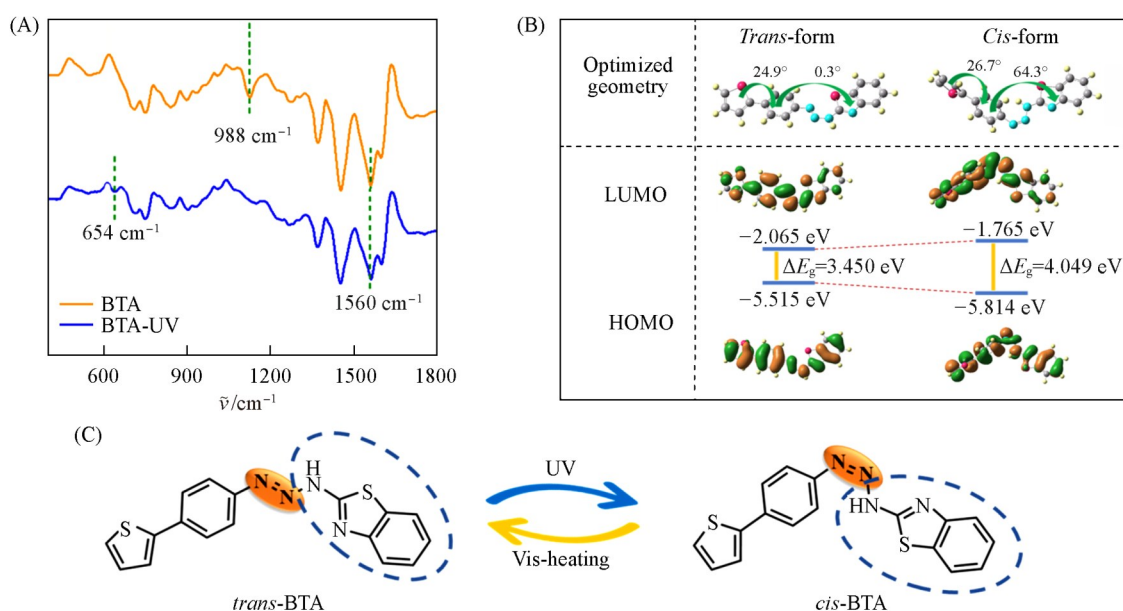


Fig. 3 FTIR spectra of BTA before and after UV light irradiation(A), optimized structures and frontier molecular orbitals of *cis*-BTA and *trans*-BTA(B) and photochromic mechanism of BTA(C)

分子轨道(LUMO)则更集中地分布在苯基及亚胺部分,比反式结构表现出更大的电子云分离.顺式结构的能级带隙为4.049 eV,显著大于反式结构的3.450 eV,这也进一步表明反式结构更为稳定,从反式结构转变成顺式结构需要额外的能量激发.综合以上数据,提出了BTA在紫外光照射和白光/热协同作用下的光致变色机理[图3(C)].

### 2.3 化合物BTA的信息存储应用

为实现光致变色材料的功能化,采用溶液成膜法制备了BTA掺杂PMMA复合薄膜(BTA-PMMA薄膜).PMMA作为一种长链高分子聚合物基质,能显著提高BTA分子在薄膜中的分散性,有效抑制分子聚集对其顺反异构行为的干扰,从而确保材料优异的光致变色性能<sup>[32,33]</sup>.首先,考察了BTA-PMMA薄膜在不同光照条件下的光响应行为.如图4(A)所示,在日光灯照射下,薄膜呈现淡黄色;经紫外光照射后,薄膜迅速褪色变为无色透明状态,同时可观察到明显的蓝色荧光发射.值得注意的是,薄膜态

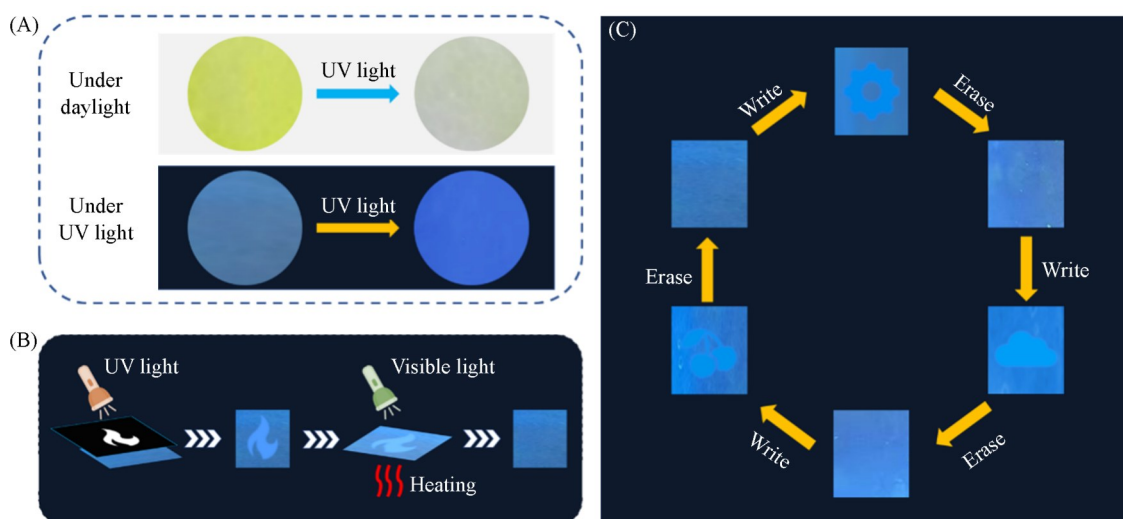


Fig. 4 Pictures of BTA-PMMA film under daylight(top) and UV light(bottom) before and after 365 nm UV light irradiation(A), schematic diagram of BTA-PMMA film in information storage(B) and example of application performance(C)

的光致变色行为与溶液体系表现出高度一致性。基于此光响应特性,进一步开发了BTA-PMMA薄膜在光信息存储领域的应用。如图4(B)所示,采用紫外光照射作为"写入"工具,通过图案化掩模实现了目标信息的记录;利用白光/热协同作用作为"擦除"手段,完成了信息的可逆消除。实际应用效果如图4(C)所示,在365 nm紫外光照射下,通过不同图案的掩模可在薄膜表面精准写入相应信息;随后在60 °C加热条件下,经白光照射2 h即可实现信息的完全擦除。通过实验发现,该薄膜材料可稳定实现"写入-擦除-再写入"的多次循环操作。上述结果表明,BTA-PMMA薄膜展现出优异的可擦写光学记录性能。

### 3 结 论

合成了一种苯并噻唑偶氮苯类光致变色化合物BTA。该化合物在紫外光照射下表现出颜色以及荧光特性上的显著变化,且可在白光/热协同作用下实现可逆,具有良好的重复性。红外光谱表征及模拟计算结果表明,BTA的光致变色行为是基于空间构型的顺反异构转变实现的。将其掺杂在PMMA中,制得的BTA-PMMA薄膜被用于可擦写信息存储,展现出良好的记录性能和抗疲劳性能。本研究提供了一种结构简单的光致变色材料,其独特的光致变色特性和光热协同响应的可逆调控机制,使其在高端防伪与信息安全领域展现出巨大的应用潜力,为开发新型光存储材料提供了有价值的参考。

支持信息见 <http://www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503/20250116>。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Goulet-Hanssens A., Eisenreich F., Hecht S., *Adv. Mater.*, **2020**, 32(20), 1905966
- [ 2 ] Smith A. T., Ding H., Gorski A., Zhang M., Gitman P. A., Park C., Hao Z. R., Jiang Y. J., Williams B. L., Zeng S. S., Kokkula A., Yu Q. K., Ding G. Q., Zeng H. D., Sun L. Y., *Matter*, **2020**, 2(3), 680—696
- [ 3 ] Hu J. X., Zhang Q., Xia B., Liu T., Pang J. D., Bu, X. H., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2021**, 38(1), 58—66
- [ 4 ] Wang Y. X., Chen Y. L., *Chem. Res. Chin. Univ.*, **2024**, 41(1), 33—39
- [ 5 ] Li J. T., Bisoyi H. K., Tian J. J., Guo J. B., Li Q., *Adv. Mater.*, **2019**, 31(10), 1807751
- [ 6 ] Luo M., Liu Y. Y., Zhao J., Jiang L., Chen X. J., Li W. L., Yang Z. Y., Yan Q., Wang S., Chi Z. G., *Dyes Pigments*, **2022**, 202, 110222
- [ 7 ] Guo H. J., Liu L. L., Wang L., Shi Q. F., Qiao J. W., Cui C. E., Huang P., Wang Y. H., *Laser Photonics Rev.*, **2025**, 2402308
- [ 8 ] Liu K. J., Wei R. Q., Zhou R. Y., Shen R. P., Han J., *Chem. J. Chinese Universities*, **2024**, 45(9), 20240201 (刘珂君, 魏瑞琪, 周睿远, 沈日佩, 韩杰. 高等学校化学学报, **2024**, 45(9), 20240201)
- [ 9 ] Li Y. Z., Chen X. Y., Weng T. Y., Yang J. F., Zhao C. R., Wu B., Zhang M., Zhu L. L., Zou Q., *RSC Adv.*, **2020**, 10(69), 42194—42199
- [ 10 ] Yang J. F., Zou Q., Chen, X. Y., Li Y. Z., Zhao C. R., Weng T. Y., Wu B., Zhu L. L., Wang D. L., Xin Z. L., *Dyes Pigments*, **2021**, 191, 109361
- [ 11 ] Khuzin A. A., Galimov D. I., Khuzina L. L., Tukhbatullin A. A., *Molecules*, **2024**, 29(2), 368
- [ 12 ] Wang X. H., Xu B., Tian W. J., *Light Sci. Appl.*, **2023**, 12(1), 140
- [ 13 ] Liu T. L., Huang C. S., Wang J. J., Liang Y., Xie Z. P., Zhuang H. Y., Li J. L., Zhu X. F., *Fine Chem.*, **2024**, 41(12), 2564—2579 (刘同力, 黄从树, 王晶晶, 梁宇, 谢志鹏, 庄海燕, 李九龙, 朱绪飞. 精细化工, **2024**, 41(12), 2564—2579)
- [ 14 ] Medhi B., Nath U., Sarma M., *J. Chem. Phys.*, **2024**, 160(15), 154308
- [ 15 ] Du Y., Huang C. R., Xu Z. K., Hu W., Li P. F., Xiong R. G., Wang Z. X., *JACS Au*, **2023**, 3(5), 1464—1471
- [ 16 ] Razeghi R., Kazemi F., Kaboudin B., Olyaei A., Yokomatsu T., *Can. J. Chem.*, **2021**, 99(4), 368—381
- [ 17 ] Archut A., Vögtle F., De Cola L., Azzellini G. C., Balzani V., Ramanujam P. S., Berg R. H., *Chem. Eur. J.*, **1998**, 4(4), 699—706
- [ 18 ] Dong M., Babalhavaji A., Collins C. V., Jarrah K., Sadvoski O., Dai Q. Y., Woolley G. A., *J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, 139(38), 13483—13486
- [ 19 ] Jerca F. A., Jerca V. V., Hoogenboom R., *Nat. Rev. Chem.*, **2022**, 6(1), 51—69
- [ 20 ] Li Y. R., Xue B., Yang J. H., Jiang J. L., Liu J., Zhou Y. Y., Zhang J. S., Wu M. J., Yuan Y., Zhu Z. S., Wang Z. J., Chen Y. L., Harabuchi Y., Nakajima T., Wang W., Maeda S., Gong J. P., Cao Y., *Nat. Chem.*, **2024**, 16(3), 446—455
- [ 21 ] Yan J. F., Men R. X., Chen X. X., Lin C. X., Nockemann P., Yuan Y. F., *New J. Chem.*, **2021**, 45(42), 19917—19927
- [ 22 ] Kamińska K., Iwan D., Iglesias-Reguant A., Spalek W., Daszkiewicz M., Sobolewska A., Zalesny R., Wojaczyńska E., Bartkiewicz S.,

- J. Mol. Liq.*, **2022**, *363*, 119869
- [23] Sato D., Goto H., Ishizaki Y., Narimatsu T., Kato T., *Organics*, **2022**, *3*(4), 415—429
- [24] Fan S. J., Lam Y., He L., Xin J. H., *R. Soc. Open Sci.*, **2022**, *9*(6), 211894
- [25] Hu X. H., Liu X., Liu M. L., Li G., Cheng C. L., *Polym. Bull.*, **2019**, *76*(7), 3437—3450
- [26] Li D., Liu A. L., Xing Y. F., Li Z. J., Luo Y., Zhao S. J., Dong L. L., Xie T. Y., Guo K. P., Li J., *Dyes Pigments*, **2023**, *213*, 111180
- [27] Salarvand Z., Amirmasr M., Talebian M., Raeissi K., Meghdadi S., *Corros. Sci.*, **2017**, *114*, 133—145
- [28] Deona M. M., Mitra K., Hartman M. C. T., *RSC Med. Chem.*, **2020**, *11*(9), 982—1002
- [29] Craig N. C., Hu Chao T. N., Cuellar E., Hendriksen D. E., Koepke J. W., *J. Phys. Chem.*, **1975**, *79*(21), 2270—2282
- [30] Gholami M. D., Manzhos S., Sonar P., Ayoko G. A., Izake E. L., *Analyst*, **2019**, *144*(16), 4908—4916
- [31] Li S. Y., Chai Y. D., Zhang J., Wang J., Yang C. Zhang J., Cheng S. X., *J. Saudi Chem. Soc.*, **2024**, *28*(4), 101880
- [32] Yin D. F., Cheng H. B., Huo X. L., Li H. N., Pang M. L., *Chem. J. Chinese Universities*, **2011**, *32*(10), 2301—2305 (殷德飞, 程红波, 霍晓莲, 李海宁, 庞美丽. 高等学校化学学报, **2011**, *32*(10), 2301—2305)
- [33] Luo Q. F., Cao F., Xiong C. C., Dou Q. Y., Qu D. H., *J. Org. Chem.*, **2017**, *82*(20), 10960—10967

(Ed.: L, V, K)