

Research and Application Progress of Photochromic Materials

Yue Sun

College of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan
Email: 841434453@qq.com

Received: Aug. 5th, 2018; accepted: Aug. 18th, 2018; published: Aug. 27th, 2018

Abstract

Photochromic materials, as an important subject in the field of high technology, have wide application value and development prospect. According to different types, this paper summarizes the research progress and related applications of organic photochromic materials, inorganic photochromic materials and inorganic-organic hybrid photochromic materials, and briefly discusses the future development trend.

Keywords

Photochromatism, Research Progress, Application, Development Trend

光致变色材料的研究及应用进展

孙悦

西南石油大学化学化工学院, 四川 成都
Email: 841434453@qq.com

收稿日期: 2018年8月5日; 录用日期: 2018年8月18日; 发布日期: 2018年8月27日

摘要

光致变色材料作为当前高科技领域研究的重要课题, 具有广阔的应用价值和发展前景。根据类型不同, 本文分别综述了有机光致变色材料、无机光致变色材料以及无机-有机杂化光致变色材料的研究进展及相关应用, 并对光致变色材料未来的发展趋势作了简要探讨。

关键词

光致变色, 研究进展, 应用, 发展趋势



1. 引言

光致变色现象, 即材料在受到一定波长和强度的光照射时, 可发生特定的化学反应而从状态 1 变为状态 2, 此时由于结构发生变化使材料的颜色或对光的吸收峰值改变, 但在热或另一波长光的作用下又可从状态 2 恢复到原来的分子结构和表观颜色。整个过程呈现可逆性质。这种在光的作用下能发生可逆颜色变化的材料称为光致变色材料, 自十九世纪六十年代发展至今, 已有一百五十多年的历史。光致变色材料处于不同状态时通常有着不同物理和化学性能, 通过光对两种状态进行调节, 就可以实现对材料性能的调控, 具有广阔的发展和应用前景。

2. 光致变色材料的发展史

1867~1881 年间, Fritsche、Meer [1]、Phipson 先后分别观察到黄色并四苯、二硝基甲烷的钾盐及一种锌颜料在光作用下的变色和褪色现象。然而这期间光致变色并未受到人们的重视, 直到二十世纪四十年代, 人们才对光致变色机理、中间体的形成、产生降解原因以及产物结构等问题进行了大量研究。1952 年, 螺吡喃类化合物的光致变色现象被发现。1956 年, Hirshberg 首次提出了光致变色的科学意义, 并指出光漂白和光成色循环可以构成化学记忆模型, 使得光致变色材料有应用于光学信息存储的可能[2]。同年, National Cash Register Company 就研发出了一种用光致变色材料作为记录元件的计算机模型。此后, 光致变色材料因其较好的应用前景而引起了人们的广泛关注。1978 年, Heller 等说明了热稳定性和耐疲劳性较好的光致变色材料的光学信息存储应用价值[3]。1988 年, 日本科学家 Irie 设计合成了新型光致变色分子二芳基乙烯[4]。1989 年, Rentzepis 等在 Science 杂志上报道了题为“三维光学记忆存储”的文章, 指出光致变色分子可以用来制备三维光学记忆存储器件, 这引起了科学家们的广泛关注[5]。十九世纪后期, 出版了一些光致变色相关书籍。比如, 美国科学家 Brown 编著的《Photochromism》, McArdle 编著的《Applied Photochromic Polymer Systems》, Guglielmetti 和 Crano 合著的《Organic Photochromic and Thermochromic Compounds》, 以及法国科学家 Bouas-Laurent 和德国科学家 Dürr 合著的《Photochromism: Molecules and Systems》。通过这些书籍, 总结了光致变色物质的发展历程、理论研究和相关应用研究等。1993 年, 首届有机光致变色和材料科学国际学术会议在法国召开, 会上宣告了新学科“光致变色和材料科学”的诞生[6]。此后, 在美国、日本、中国等国家均召开了光致变色材料学术研讨会。现如今, 光致变色材料因其优异的物理和化学性能, 已经成为人们的研究热点并处于蓬勃发展的时代。

3. 不同类型光致变色材料的研究

3.1. 有机光致变色材料

有机光致变色材料具有可修饰性高、颜色丰富、光响应速度快等优点, 大多数能被 200~400 nm 范围内的紫外光激活, 对于某些有机物范围可延长至 430 nm, 但很少的有机物能被可见光激活。其变色机理主要有双键的断裂和组合(键的均裂、键的异裂)、异构体生成(质子转移互变异构、顺反异构)、酸致变色、周环反应和氧化还原反应等。有机光致变色材料种类繁多, 并且可通过引入特定功能官能团修饰来实现不同的研究目的。目前, 人们研究较多的主要是二芳基乙烯类、俘精酸酐类、螺吡喃类、螺噁嗪类、偶氮苯类、席夫碱类。二芳基乙烯和俘精酸酐衍生物都呈现热不可逆光致变色性质, 可用于光学存储器、

光学开关设备及显示器[7]; 而由光照产生的螺吡喃、茛苳吡喃、螺噁嗪以及偶氮苯的异构体则呈现热力学不稳定性。针对不同类型, 下面选择二芳基乙烯类和螺吡喃类有机光致变色材料做具体介绍。

3.1.1. 二芳基乙烯类

二芳基乙烯(1,1-二芳基取代的乙烯衍生物)通过周环反应产生开环和闭环两种不同形态, 其原理图如图 1 所示, 这两种形态可在不同波长的光作用下相互转化, 转化期间其吸收频谱、折射率、介电常数、氧化还原等物理和化学性质也同时发生变化。对比其他光致变色材料, 其具有热稳定性好, 抗疲劳, 化学反应谱段大, 光敏感性高, 化学反应速率快等特点。

关于二芳基乙烯的研究起始于 1988 年, 日本科学家 M. Irie 在光致变色化合物二苯乙烯的基础上, 首次设计合成了二芳基乙烯化合物分子, 此后其因自身优异的性能而被人们广泛研究。其中, 关于二芳基乙烯分子荧光开关实现分子水平的光信息存储的研究较多。比如, 刘学东等合成了用于多阶光存储的二芳基乙烯化合物, 利用此存储膜片, 可以实现八阶光信息存储[8]。齐国生等研究了二芳基乙烯材料多波长的存储, 利用三波长光致变色存储实验装置, 进行了三波长光致变色存储的实验[9]。徐海兵等较为系统地介绍了二芳基乙烯作为分子开关的相关研究[10]。

3.1.2. 螺吡喃类

螺吡喃是最早被人们深入、广泛研究的一类有机光致变色材料, 其可逆光致变色现象于 1952 年被 Fischer 和 Hirshberg 发现, 它通过“开环生色, 闭环失色”来实现变色。如图 2 所示, 无色螺吡喃结构中的 C-O 键在紫外光照射下发生断裂开环, 分子局部旋转并与吲哚形成一个共平面的部花青结构而显色, 另在可见光或热的作用下, 开环体又能恢复到原来的螺环结构。螺吡喃具有较好的光致变色特性, 但抗疲劳性较差。

近来, 人们开展了一些将螺吡喃与大分子结合, 进而制备含螺吡喃的单元响应性聚合物的研究。Keum 等通过开环易位聚合, 合成出基于吲哚啉苯并螺吡喃的新型光响应性均聚物, 经过性能研究发现, 该聚合物保留了与其单体一致的光致变色性能[11]。Marquez 等通过酯化反应将含有氨基的聚 N-异丙基丙烯酰胺和含有羟基的螺吡喃连接起来制成了末端含有螺吡喃的光敏性微凝胶, 光敏性微凝胶在智能药物的输运和可控释放领域具有极好的应用前景[12]。

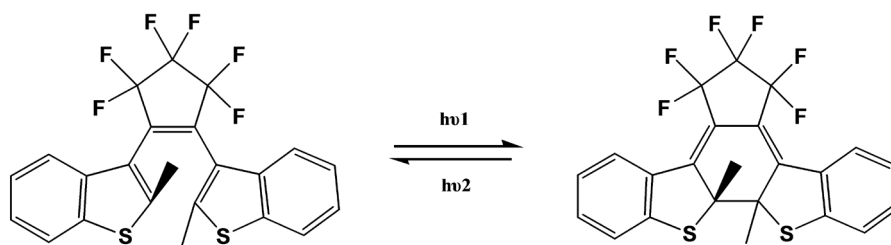


Figure 1. Photochromic mechanism of diarylethene
图 1. 二芳基乙烯的光致变色机理

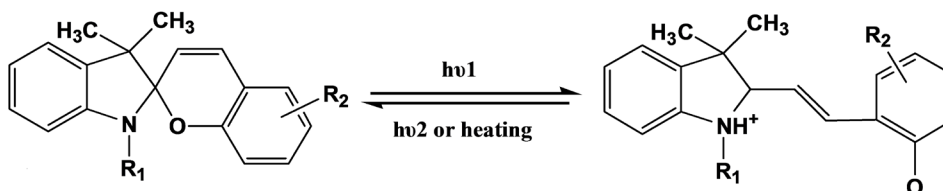


Figure 2. Photochromic mechanism of spiropyran
图 2. 螺吡喃的光致变色机理

3.2. 无机光致变色材料

无机光致变色材料主要包括稀土配合物、过渡金属氧化物、多金属氧酸盐类和金属卤化物等。相比有机光致变色材料,无机光致变色材料的数量较少且发展较为缓慢,但其具有许多优于有机光致变色材料的特点,比如变色速率快、变色持续时间长、热稳定性高、耐疲劳性好、机械强度高、宏观可控易成型等,可应用于信息存储、智能窗、太阳镜、传感器、智能开关、国防等诸多领域。无机材料的光致变色现象主要是通过离子和电子的双注入提取、电子跃迁、晶格中电子转移而实现,大多数能被紫外光诱导,某些无机光致变色材料也可被其他波长的光激活(红外到 X-射线或 γ -射线)。

关于无机光致变色材料的研究,主要集中在无机光致变色玻璃材料和无机光致变色晶体材料这两类。到后来,为增强材料的光致变色敏感性,一些无机复合光致变色薄膜材料逐渐成为研究热点。无机光致变色玻璃材料是通过在玻璃基质中添加感光材料,再经过熔制和热处理制成。David L Morse 制备了掺杂 CuCl 的光致变色硅酸盐玻璃材料,其变色机理是 Cu^+ 的价态变化[13]。S L Kraevskii 研究了添加 AgCl、AgBr、CuCl 的硅玻璃及硅-硼玻璃材料,发现玻璃体存在的色心和表面存在的卤族点缺陷引起了材料的光致变色[14]。Gael Poirier [15]及 N I Fernandes [16]分别制备了 $\text{NaPO}_3\text{-BaF}_2\text{-WO}_3$ 及 $\text{Na}_2\text{O-WO}_3\text{-SbPO}_4$ 三元玻璃材料,并对变色条件进行了研究。无机变色晶体材料的变色主要是因为体系中存在缺陷。Tao He 等的研究表明,晶格缺陷有利于钨离子的不等价转换,对提高 WO_3 材料光致变色性能具有重要作用[17]。H Marquet 研究 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 晶体时,发现 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 晶体受热激发作用会产生大量的电子陷阱,这对它出现光致变色现象具有重要意义[18]。对于无机复合光致变色薄膜材料, M A Quevdo-Lopez 等利用化学气相沉积法,在 MoO_3 薄膜上沉积 CdS,制备了 CdS/ MoO_3 薄膜材料,因 CdS/ MoO_3 薄膜上产生的大量色心,使该材料对波长 $\lambda = 850 \text{ nm}$ 的光产生较强吸收,呈现出光致变色特性[19]。A I Gavriluk 制备了 AgCl- WO_3 双层结构薄膜材料,其受光照后产生的氢原子促进了 AgCl 光解,使得 AgCl 薄膜材料的光致变色性能得到增强[20]。

近年来,人们开始关注粉体形态的无机光致变色材料。Akiyama 等研究出 $\text{BaMgSiO}_4\text{:Eu}^{2+}$ 的光致变色特性[21]。Kamimura 等研究出掺杂层状钙软矿结构 $\text{Sr}_2\text{SnO}_4\text{:Eu}^{3+}$ 的光致变色特性[22]。Ueda 等研究出 $\text{CaAl}_2\text{O}_4\text{:Eu}^{2+}$, Nd^{3+} 陶瓷的光致变色性能[23]。胡义华等研究出 $\text{Ba}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl:Eu}^{2+}$, R^{3+} 光致变色材料[24]。但目前对于无机粉体光致变色材料研究较少,且大多研究仅停留在变色性能的一般表征和描述上,缺乏对变色机理的深入认识,这对于后续开发新型优质的无机光致变色材料是一大难题。

3.3. 无机-有机杂化光致变色材料

无机-有机杂化光致变色材料是在前两种类型的光致变色材料基础上研究并发展起来的,其很好地综合了有机光致变色材料和无机光致变色材料的优点,并避免了二者的不足,在改善光致变色材料的稳定性、耐疲劳性的同时,实现了光致变色对其他物理化学特性的多功能调制。其优越的性能、丰富的组成和多种多样的加工技术,为无机-有机杂化材料构筑具有特定功能的光致变色材料提供了广泛的可能性。无机-有机杂化光致变色材料按照键合方式不同可分为:配位共价键结合型、离子键结合型及键合较弱的插层、介孔型,其变色机理包括:氧化还原电子转移、插层空间结构、光致变色分子 π -电子共轭特性发生可逆改变。

有机-无机杂化光致变色材料的研究兴起于 Decurtinset 等人首次发现光致激发自旋态捕获效应之后[25]。其中,以有机组分为设计和调制对象吸引了更多的目光,对于通过调制无机组分来调控无机-有机杂化光致变色材料性能的研究则相对较少。配位共价结合型是通过配位金属离子、光致变色配体和其他功能配体而得到的大分子结构材料,配位后材料的稳定性和抗疲劳性得到加强,但变色单元的变色能力被减弱或抑制,因此提高原有变色组分的性能是关键。Kopelman 等通过配位杂化邻二氮杂菲螺噻嗪和 Mn, Fe, Co, Ni, Zn 和 Cu 等二价金属离子,较大程度地提升了螺噻嗪的光致变色性能[26]。Motoyama

等研究了共价连接有机金属-二噻吩乙烯杂化体系,基于二噻吩乙烯的可逆开、闭环反应,整个体系表现出明显的开关特性[27]。插层、介孔型是把光致变色分子或离子封装在具有周期性结构的无机材料空隙之中。封装后,材料稳定性能得到提高,但其性能调控机制有待于进一步研究。相关研究如 Haneda 等通过分子交换法将亚水杨基苯胺填充于 Zn 介孔中,得到了具有固态光致变色行为的杂化光致变色材料[28]。此外,华南理工大学李敏通过对不同金属中心、金属卤盐单元和给受体结构排布模式的研究,探讨了无机组分的结构和组成对杂化型材料光敏性能的影响,这对于丰富无机-有机杂化光致变色材料的结构设计及性质调控具有较好意义[29]。

就目前来看,无机-有机杂化光致变色材料处于初步研究探讨阶段,相关文献在报导的光致变色的研究中只占比不到 10% [29]。尽管如此,鉴于现在继续开发单纯的新型有机或无机光致变色材料比较困难,所以结合二者的优点来研发功能和性能更为优异的新型无机-有机杂化光致变色材料仍是当前光致变色材料的一个重要发展趋势。

4. 光致变色材料的应用

光致变色材料因其特殊的物理和化学性能,被广泛应用于光学信息存储、防伪、装饰和防护、荧光开关等不同领域。

第一,光学信息存储。利用光致变色材料的可逆颜色变化特性,将变色前后的两种稳定状态分别对应于二进制中的 0 和 1,由此可制备可擦写的信息存储元件,且该元件具有读、写、擦速度快及存储密度大等优点。研究表明,有机光致变色材料中的二芳烯类、俘精酸酐类及偶氮类均可用于信息存储领域。其中,俘精酸酐因具有耐疲劳度高、热稳定性好等特点,是光信息存储材料的研究热点之一[30],樊美公等对此做了许多研究[31][32][33][34]。二芳烯类热稳定性好、对可见光波段敏感、化学反应谱段大、化学反应速率快,也具有较好的光信息存储应用前景。齐国生等研究了二芳基乙烯的多波长光存储,结果表明,多波长存储读出信号对比度较高且各记录信号之间几乎无串扰,记录信息经 50 次低速读出后仍保持较高对比度[9]。对于偶氮类,其具有明显的光偏振效应,用一束偏振光就可通过双折射将信息写入、读出、擦除、重写,是很有发展前途的光学记录介质。

第二,防伪领域。早期,主要是通过光致变色材料的单独作用来达到防伪目的,比如将其制成防伪油墨或防伪纸张等[35]。后来,为进一步提高防伪材料的耐性并避免出现被模仿而达不到防伪目的的情况,逐渐兴起了光致变色材料同其他防伪手段联用的防伪方式[36],实现了防伪技术性能的提升。

第三,装饰和防护。把光致变色材料应用到日常生活领域,起到装饰或防护作用。比如,将其加入衣服[37]或建筑涂料[38],使衣服或建筑墙面在光照射下发生颜色改变,这在提升美观程度和给人们生活带来乐趣的同时,也有力地提高了产品的市场竞争力。在眼镜镜片中添加光致变色物质,通过材料的光敏特性进行智能调控,使眼镜在强光照射下发生颜色改变,可避免眼睛受到直接伤害,并且目前光致变色眼镜技术已经相当成熟[39][40]。另外,智能窗(光致变色玻璃)可以根据入射光的强弱来智能地改变颜色,进而调节光线透过率和其携带热量,起到了调节室内光线并节约能源的作用[41]。

第四,荧光开关。光致变色材料应用于荧光开关是近年来备受关注的一类新型多功能材料,其研究主要集中于二芳基乙烯。复旦大学邹莹通过改性二芳基乙烯基团的荧光功能和水溶性,合成了系列二芳基乙烯荧光开关材料,开拓了此类材料在生物成像和光控释放方面的应用[42]。陈红云等对光致变色荧光开关材料的研究进展做了综述[43]。

此外,光致变色材料在生物样品检测[44]、光控超分子材料[45]、染料工业[46]、可视化检测[47]、分子催化剂[48]、生物活性光调控[49]等诸多领域也有较好应用。

表 1 简要总结了不同类型光致变色材料的应用情况。

Table 1. Applications of photochromic materials**表 1.** 光致变色材料的应用领域

类型	应用领域
无机光致变色材料	信息存储、生物样品检测、太阳镜、智能节能玻璃、传感器、智能开关、军事国防等
有机光致变色材料	光信息存储、防护包装、服装纺织、全息记录照相、生物科技、智能药物、光能量限制物质、光计算、光能测定、国防、防伪、荧光开关、染料工业、可视化检测等
无机-有机杂化光致变色材料	光存储和光开关、光信息转换器、光控超分子、防护装饰、防伪、太阳镜、膜片材料、生物技术、医药、催化剂、传感器、调光器件等

5. 结语和展望

随着社会进步和科技发展,越来越多的光致变色材料被研究出来并广泛应用于分子开关、信息存储、生命科学、分子催化、装饰防护、防伪材料等各大领域,其作为高科技研究的重要课题,正焕发出蓬勃生机。就当前来看,人们对有机光致变色材料研究较多,而无机光致变色材料研究较少,无机-有机杂化光致变色材料正处于发展初期阶段。

当然,目前的研究仍存在一些不足。比如,光致变色材料的热力学稳定性、抗疲劳性、快速的反应性、灵敏性等仍需进一步提高;许多研究仅停留在变色性能方面的考量,缺乏对于变色机理的深入探讨;此外,无机光致变色材料的数量较少,这极大地限制了它的发展应用空间。

综上所述,深入探究光致变色机理,科学地阐明光致变色材料的变色过程,然后在此基础上开发性能更加优异、成本更加低廉、应用效果更加突出的新型光致变色材料是未来光致变色材料的一大发展趋势。相信通过科研工作者的努力,光致变色材料也必将在未来社会发挥越来越重要的作用。

基金项目

西南石油大学“助力飞翔”课外素质能力拓展重点项目(2018-2019)。

参考文献

- [1] 游效曾. 分子材料: 光电功能化合物[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2001.
- [2] Hirshberg, Y. (1956) Reversible Formation and Eradication of Colors by Irradiation at Low Temperatures. A Photochemical Memory Model. *Journal of the American Chemical Society*, **78**, 2304-2312. <https://doi.org/10.1021/ja01591a075>
- [3] Darcy, P.J., Hart, R.J. and Heller, H.G. (1978) 1-Methylpropylidene (Diphenylmethylene)-Succinic and (E)-3, 5-Dimethoxybenzylidene (Alkyl-Substituted Methylene) Succinic Anhydrides. *Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 1*, 571-576. <https://doi.org/10.1039/p19780000571>
- [4] Irie, M. and Mohri, M. (1988) Thermally Irreversible Photochromic Systems. Reversible Photocyclization of Diarylethene Derivatives. *Journal of Organic Chemistry*, **53**, 803-808. <https://doi.org/10.1021/jo00239a022>
- [5] Parthenopoulos, D.A. and Rentzepis, P.M. (1989) Three-Dimensional Optical Storage Memory. *Science*, **245**, 843-845. <https://doi.org/10.1126/science.245.4920.843>
- [6] Irie, M. (2000) Diarylethenes for Memories and Switches. *Chemical Reviews*, **100**, 1685-1716. <https://doi.org/10.1021/cr980069d>
- [7] Minkin, V.I. (2004) Photo-, Thermo-, Solvato-, and Electrochromic Spiroheterocyclic Compounds. *Chemical Reviews*, **35**, 2751-2776. <https://doi.org/10.1021/cr020088u>
- [8] 刘学东, 石明, 张复实. 有机光致变色材料的合成与多阶存储实验研究[J]. 功能材料与器件学报, 2006, 12(2): 117-119.
- [9] 齐国生, 肖家曦, 刘嵘, 等. 光致变色二芳基乙烯多波长光存储研究[J]. 物理学报, 2004, 53(4): 1076-1080.
- [10] 徐海兵, 何亨, 唐明静, 等. 光致变色金属(Ru,Pt,Ln)-二芳基乙烯分子开关[J]. 科学通报, 2014(30): 2900-2917.
- [11] Keum, S.R., Ahn, S.M. and Roh, S.J. (2010) The Synthesis and Spectroscopic Properties of Novel, Photochromic In-

- dolinobenzospiropyran-Based Homopolymers Prepared via Ring-Opening Metathesis Polymerization. *Dyes and Pigments*, **86**, 74-80. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2009.12.002>
- [12] Garcia, A., Marquez, M. and Cai, T. (2007) Photo-, Thermally, and pH-Responsive Microgels. *Langmuir the ACS Journal of Surfaces & Colloids*, **23**, 224-229. <https://doi.org/10.1021/la061632n>
- [13] Morse, D.L. (1981) Copper Halide-Containing Photochromic Glasses. *Inorganic Chemistry*, **20**, 777-780. <https://doi.org/10.1021/ic50217a028>
- [14] Kraevskii, S.L. (2001) An Alternative Model for Photochromism of Glasses: Reversible Injection of Carriers from a Microcrystal and Its Surface States into Point Defects of Glass. *Glass Physics & Chemistry*, **27**, 315-330. <https://doi.org/10.1023/A:1011312109403>
- [15] Poirier, G., Nalin, M. and Cescato, L. (2006) Bulk Photochromism in a Tungstate-Phosphate Glass: A New Optical Memory Material. *Journal of Chemical Physics*, **125**, Article ID: 161101. <https://doi.org/10.1063/1.2364476>
- [16] Fernandes, N.I., Poirier, G. and Nalin, M. (2010) Thermo and Photochromic Properties of Na₂O-WO₃-SbPO₄ Glasses. *Solid State Ionics*, **181**, 1125-1130. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2010.06.011>
- [17] He, T. and Yao, J. (2007) Photochromic Materials Based on Tungsten Oxide. *Journal of Materials Chemistry*, **17**, 4547-4557. <https://doi.org/10.1039/b709380b>
- [18] Marquet, H., Merle, J.C. and Gies, J.G. (2000) Charge Transfer Mechanisms between Some Shallow-Trap Centres Involved in the Photochromism of Bi₁₂GeO₂₀. *Optical Materials*, **14**, 277-285. [https://doi.org/10.1016/S0925-3467\(00\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0925-3467(00)00005-7)
- [19] Quevedo-Lopez, M.A., Ramirez-Bon, R. and Orozco-Teran, R.A. (1999) Effect of a CdS Interlayer in Thermochromism and Photochromism of MoO Thin Films. *Thin Solid Films*, **343-344**, 202-205. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)01680-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)01680-0)
- [20] Gavriluk, A.I. (2009) Application of WO₃ Thin Films for Enhancement of Photolysis in AgCl. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **93**, 1885-1895. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.07.003>
- [21] Akiyama, M. (2010) Blue-Green Light Photochromism in Europium Doped BaMgSiO₄. *Applied Physics Letters*, **97**, 3730. <https://doi.org/10.1063/1.3509417>
- [22] Kamimura, S., Yamada, H. and Xu, C.N. (2013) Purple Photochromism in Sr₂SnO₄:Eu³⁺, with Layered Perovskite-Related Structure. *Applied Physics Letters*, **102**, Article ID: 031110. <https://doi.org/10.1063/1.4788752>
- [23] Ueda, J., Tanabe, S. and Shinoda, T. (2013) Photochromism and Near-Infrared Persistent Luminescence in Eu²⁺-Nd³⁺-Co-Doped CaAl₂O₄ Ceramics. *Optical Materials Express*, **3**, 787-793. <https://doi.org/10.1364/OME.3.000787>
- [24] Ju, G., Hu, Y. and Chen, L. (2013) Photochromism of Rare Earth Doped Barium Haloapatite. *Journal of Photochemistry & Photobiology A Chemistry*, **251**, 100-105. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2012.10.021>
- [25] Decurtins, S., Gülich, P. and Köhler, C.P. (1984) Light-Induced Excited Spin State Trapping in a Transition-Metal Complex: The Hexa-1-Propyltetrazole-Iron (II) Tetrafluoroborate Spin-Crossover System. *Chemical Physics Letters*, **105**, 1-4. [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(84\)80403-0](https://doi.org/10.1016/0009-2614(84)80403-0)
- [26] Kopelman, R., Paquette, M. and Frank, N. (2008) Photoprocesses and Magnetic Behavior of Photochromic Transition Metal Indoline[phenanthroline]spirooxazine Complexes: Tunable Photochromic Materials. *Inorganica Chimica Acta*, **361**, 3570-3576. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2008.03.079>
- [27] Motoyama, K., Koike, T. and Akita, M. (2008) Remarkable Switching Behavior of Bimodally Stimuli-Responsive Photochromic Dithienylethenes with Redox-Active Organometallic Attachments. *Chemical Communications*, **44**, 5812. <https://doi.org/10.1039/b809318k>
- [28] Haneda, T., Kawano, M. and Kojima, T. (2007) Thermo-to-Photo-Switching of the Chromic Behavior of Salicylideneanilines by Inclusion in a Porous Coordination Network. *Angewandte Chemie*, **46**, 6643-6645. <https://doi.org/10.1002/anie.200700999>
- [29] 李敏. 基于金属卤化物体系的给受体型光敏晶体材料的设计合成及性能表征[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [30] 陈利菊, 刘巍, 张卫岗. 有机光致变色材料及其在光信息处理中的应用[J]. 现代物理知识, 2007(1): 41-42.
- [31] 门克内木乐, 姚保利, 陈懿, 等. 双色俘精酸酐薄膜的双波长图像光存储[J]. 光学学报, 2005, 25(2): 220-223.
- [32] 王英利, 姚保利, 郑媛, 等. 光致变色俘精酸酐用于可擦写全息图像存储的研究[J]. 中国激光, 2004, 31(4): 457-460.
- [33] 门克内木乐, 姚保利, 王英利, 等. 可擦写俘精酸酐/PMMA 薄膜的全息记录特性研究[J]. 光子学报, 2003, 32(7): 819-822.

- [34] 于联合, 于泓涛. 光致变色俘精酸酐的制备及其在光信息存储中的应用[J]. 中国科学: 化学生命科学地学, 1995(8): 799-803.
- [35] 马先铎. 光致变色防伪材料及其应用[J]. 广东科技, 2010, 19(14): 69-70.
- [36] 邢颖, 郭林, 张阳, 等. 光致变色防伪应用的研究进展[J]. 染料与染色, 2018, 55(1): 34-37.
- [37] 潘静. 光致变色材料在现代童装图案中的应用[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津科技大学, 2015.
- [38] 孙宾宾. 光致变色现象及其在建筑装饰材料领域的应用[J]. 价值工程, 2011, 30(29): 101-102.
- [39] 叶佳意, 欧阳鏊, 黄鸿亮, 等. 光致变色镜片技术介绍[J]. 中国眼镜科技杂志, 2017(17): 131-133.
- [40] 黄锦胜. 变色眼镜的镜片变色技术以及相关国内专利介绍[J]. 科技经济导刊, 2016(7): 105-106.
- [41] 刘玮, 郝雨楠. 智能窗发展现状研究[J]. 门窗, 2017(8): 12-14.
- [42] 邹莹. 二芳乙烯荧光开关及其生物应用[D]: [博士学位论文]. 上海: 复旦大学, 2011.
- [43] 陈红云, 章洛汗, 胡仲禹. 光致变色荧光开关材料的研究进展[J]. 化工新型材料, 2013, 41(10): 28-30.
- [44] 张远. 功能化纳米金的制备及在生物样品检测中的应用[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛科技大学, 2014.
- [45] Lee, S. and Flood, A.H. (2013) Photoresponsive Receptors for Binding and Releasing Anions. *Journal of Physical Organic Chemistry*, **26**, 79-86. <https://doi.org/10.1002/poc.2973>
- [46] 杨军浩, 李洪启, 钱伟. 光致变色化合物及其在染料颜料中的应用[J]. 染料与染色, 2017(4): 10-12.
- [47] 霍志铭, 李攻科, 肖小华. 有机光致变色材料在快速可视化检测中的应用[J]. 化学进展, 2017(2): 252-261.
- [48] Neilson, B.M. and Bielawski, C.W. (2013) Illuminating Photoswitchable Catalysis. *ACS Catalysis*, **3**, 1874-1885. <https://doi.org/10.1021/cs4003673>
- [49] Sakata, T., Yan, Y. and Marriott, G. (2005) Family of Site-Selective Molecular Optical Switches. *Journal of Organic Chemistry*, **70**, 2009-2013. <https://doi.org/10.1021/jo048207o>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2168-6122, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: japc@hanspub.org