

引文格式：

骆志军, 陆家友, 郭欣怡, 等. 聚集诱导发光分子在双光束超分辨光存储中的潜在应用 [J]. 集成技术, 2023, 12(6): 25-32.

Luo ZJ, Lu JY, Guo XY, et al. Potential applications of aggregation-induced emission molecules in dual-beam super-resolution optical data storage [J]. Journal of Integration Technology, 2023, 12(6): 25-32.

聚集诱导发光分子在双光束超分辨光存储中的 潜在应用

骆志军^{1,2} 陆家友³ 郭欣怡³ 钟 东³ 薛 丽³ 翁天锋^{4,5} 甘棕松^{1,2*}

¹(华中科技大学 武汉光电国家研究中心 武汉 430074)

²(华中科技大学 信息存储系统教育部重点实验室 武汉 430074)

³(湖北科技学院电子与信息工程学院 咸宁 437100)

⁴(上海理工大学 光子芯片研究院 上海 200093)

⁵(上海理工大学光电信息与计算机工程学院 人工智能纳米光子学中心 上海 200093)

摘 要 聚集诱导发光分子因其高效的发光性质而被广泛应用于生物成像、光波导和电致发光等领域，但在光信息存储领域还鲜有研究。与其他光存储材料相比，聚集诱导发光分子的局域密度变化会引发荧光强度的变化，这在光存储领域是一个显著优点。该文针对聚集诱导发光分子的特性，讨论了该类分子在超分辨光存储领域的可能应用方式，以及需要解决的关键问题。

关键词 聚集诱导发光；双光束超分辨光存储；超分辨写入；超分辨读出

中图分类号 TN 249 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20221021001

收稿日期：2022-10-21 修回日期：2023-05-04

基金项目：国家重点研发计划专项(2021YFB2802000)；华中科技大学学术前沿青年团队项目；武汉市东湖高新区人才经费

作者简介：骆志军，博士，研究方向为光学信息存储；陆家友，本科，研究方向为光学信息存储；郭欣怡，本科，研究方向为光学信息存储；钟东，教授，研究方向为新型光电材料；薛丽，副教授，研究方向为新型光电材料；翁天锋，博士研究生，研究方向为光学信息存储；甘棕松(通讯作者)，教授，研究方向为双光束超分辨光学技术，E-mail: ganzongsong@hust.edu.cn。

Potential Applications of Aggregation-Induced Emission Molecules in Dual-Beam Super-Resolution Optical Data Storage

LUO Zhijun^{1,2} LU Jiayou³ GUO Xinyi³ ZHONG Dong³ XUE Li³

WENG Tianfeng^{4,5} GAN Zongsong^{1,2*}

¹(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

²(Key Laboratory of Information Storage System Ministry of Education of China, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

³(School of Electronic and Information Engineering, Hubei University of Science and Technology, Xianning 437100, China)

⁴(Institute of Photonic Chips, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

⁵(Centre for Artificial-Intelligence Nanophotonics, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

*Corresponding Author: ganzongsong@hust.edu.cn

Abstract Aggregation-induced emission molecules have been widely used in the fields of biological imaging, optical waveguide and electroluminescence due to their high luminescence efficiency, but are rarely reported in the field of optical data storage. Compared with other optical storage materials, aggregation-induced emission molecules own significant developmental advantages for super-resolution optical data storage. In this study, the possible applications in super-resolution optical data storage of the aggregation-induced molecules are discussed.

Keywords aggregation-induced emission; dual-beam super-resolution optical data storage; super-resolution record; super-resolution read

Funding This work is supported by National Key Research and Development Program of China (2021YFB2802000), Huazhong University of Science and Technology Academic Frontier Youth Team Project and Talent Fund of Wuhan East Lake High-tech Zone

1 引 言

基于光盘的传统存储技术诞生至今已有 50 余年, 根据存储介质和光源波长, 主要分为 CD(compact disc)、DVD(digital video disc)和 BD(blue-ray disc)3 种, 单面单层存储容量范围为 700 M~25 GB。自 BD 存储之后, 光盘存储技术已有 20 年没有实质性进展, 光盘的存储密度受限于光学衍射极限 $\delta=0.61\lambda/NA$ 。在蓝光系统中, 物镜的数值孔径(NA)已提升至 0.8, 光源波长缩短至 405 nm, 所能实现的点位宽度为 150 nm, 道间距为 320 nm, 逼近蓝光系统的光学衍射极

限。基于蓝光存储进一步提升物镜数值孔径, 使其接近 1, 或进一步缩短光源波长, 能够提升的存储容量有限, 性价比不高。因此, 基于光盘的传统存储技术遭遇发展瓶颈, 使得光存储在面向大数据存储应用需求方面存在显著的应用短板。

在蓝光存储技术中, 存储介质染料分子以固体形式存在, 吸收激光能量后因“强激子耦合”物理机制, 分子吸收的能量会就近传递给周围分子, 能量逐渐扩散导致聚集荧光猝灭, 吸收的能量最终转化为热, 导致激光辐照区域的染料分子热分解。与常见的聚集荧光猝灭分子不同, 有

些荧光分子在聚集状态或固体薄膜状态下, 其发光反而得到增强, 该类分子被称为聚集诱导发光 (aggregation-induced emission, AIE) 分子。荧光分子在吸收外部激发能量后, 会将能量以自发辐射荧光和分子振动等无辐射损耗等形式消耗。在不同条件下, 自发辐射荧光和无辐射损耗所消耗的吸收能量占比不同。聚集诱导发光分子普遍具有较为对称的空间结构, 在溶液等自由体系内会发生振动、旋转和分子异构等行为^[1-2]。在分子浓度较低的情况下, 分子振动等无辐射损耗导致的吸收能量损失占比较高, 分子自发辐射荧光所消耗的能量占比较低; 在分子浓度提高后, 分子之间相互影响, 其自身振动和转动都受到限制, 因此, 以无辐射损耗形式消耗的能量比例降低, 自发辐射荧光所消耗的能量比例提高。大量研究表明: 掺杂有 AIE 分子的薄膜在发生形变等“聚集态”改变的情况下, 其荧光强度会发生明显改变。如果将“聚集态”发生改变的尺寸缩小到纳米尺度, 则可等效为光存储数据写入的过程; 进一步局域“聚集态”发生改变, 从而导致荧光强度发生变化, 可以将读出的不同荧光强度的过程等效为光存储数据读取时读出不同信号的过程。因此, 聚集诱导发光材料在应用于光学数据存储时, 具有与其他光存储介质材料显著不同的机理。

双光束超分辨直写光刻技术可以在材料中改变其局域的物质聚集度。目前, 双光束超分辨直写光刻技术可实现的单点尺寸 $< 40 \text{ nm}$ ^[3-5], 单线宽度为 9 nm ^[6]。双光束超分辨成像技术利用受激辐射损耗 (stimulated emission depletion, STED) 原理, 成像分辨率可达 10 nm 以下^[7-8]。若能将在 AIE 分子、双光束超分辨光直写光刻技术、双光束超分辨成像技术三者结合起来, 则有望实现超分辨光存储领域的显著突破。针对这三者的结合, 本文提出一些具有可行性的方案, 使 AIE 分子能应用于超分辨光存储技术, 并分析一些可能存在的键问题。

2 国内外研究现状

传统的荧光分子包括光盘中使用的染料花菁 (cyanine)、酞菁 (phthalocyanine) 及偶氮 (azo) 等, 通常具有较大的平面刚性芳香环结构^[9-10], 其中, 芳香环结构的大 π 键是主要的发光单元。当分子游离存在时, 分子吸收的能量主要通过自发辐射荧光进行消耗。但是这些分子聚集后, 分子之间会发生 π 键共轭, 生成二聚体或多聚体, 分子吸收能量生成的激子会将能量传递给相邻分子, 激发相邻分子再产生激子, 逐级传递之后导致能量耗散, 最终变成热。

大多数 AIE 分子的发光中心具有芳香环共轭结构^[2], 但与聚集荧光猝灭分子不同的是, AIE 分子内或分子间具有可以运动的自由度。这使得 AIE 分子能通过分子基团旋转、分子内电荷转移、激发态分子内质子转移、J-聚集等过程消耗分子所吸收的能量, 降低单分子的荧光量子效率。当 AIE 分子的聚集度增加后, 上述受激分子的各种运动受到限制, 受激所吸收的能量主要通过自发辐射进行导出, 提高了分子荧光量子效率。

经过 20 年的发展, AIE 分子的荧光增强机理得到阐明, 其应用范围也得到广泛拓展。目前已在中医药^[11]、食品检测^[12-13]、环境检测^[14-15]、化学传感^[16-17]、生物成像^[18-19]及发光器件^[20]等领域得到研究和应用。

在光存储领域, 部分研究就 AIE 分子对聚集态或化学敏感的响应进行了光存储实验。例如: Han 等^[21]通过机械力在基板上编码, 并可以熏蒸处理擦除, 使光存储分别对应二进制数据中的 0 和 1 两种状态; Gundu 等^[22]通过研磨绿色发光晶体可使其转化为橙黄色发光的粉末, 而研磨后的粉末通过二氯甲烷熏蒸可恢复绿色发光; Hou 等^[23]发现机械诱导的状态可通过重结晶过程轻松恢复, 重结晶过程可通过溶剂熏蒸或溶剂浸泡来激活。此外, Yuan 等^[24]通过激光直写掺杂

AIE 分子薄膜实现数据记录和荧光读取。但这些数据写入尺寸都在毫米到微米尺度,无法提升现有的光存储密度。

3 聚集诱导发光分子用于双光束超分辨光存储

AIE 分子用于光存储的优势主要有两点:第一, AIE 分子有较高的荧光量子效率,荧光的读取可采用目前已有的多种超分辨成像技术,即能够实现 200 nm 以下的数据读取分辨率;第二, AIE 分子对聚集态的改变响应灵敏,聚集态的改变可在体系中引入光敏树脂来实现,光敏树脂的凝固程度较高,并在聚合前后存在一定体积的收缩,这都有利于提高 AIE 分子的荧光效率。分辨率在 200 nm 以下的树脂聚集态改变可通过已有的超分辨激光制造过程实现。在已有的超分辨光学技术中,目前仅有双光束超衍射技术能够兼顾超分辨写入、读取方式和效率。

双光束超分辨光存储技术是一种能够有效突破光学衍射极限的新型光存储技术,将 AIE 分子应用于双光束超分辨光存储,需先将 AIE 分子溶解,并均匀分布于适合的光存储介质中。最开始时,溶解有 AIE 分子的存储介质可以是液体状态,通过紫外光辐照固化形成固体薄膜,从而使得该材料可以通过 DVD 工艺制作空白光盘。在制备好的固体薄膜中实施双光束超分辨数据读写,可实现基于 AIE 分子的双光束超分辨数据存储。本文就 AIE 分子应用于双光束超分辨数据写入和读取进行了可行性及可能存在的问题分析,具体内容如下。

3.1 聚集诱导发光分子的双光束超分辨数据写入

光学数据写入是一个激光辐照材料改变其物性的过程。激光作用材料的改性尺寸与激光光斑尺寸相关,而光斑尺寸受衍射极限限制。飞秒激光利用非线性的双光子吸收机理,可将点间距分

辨率提高 $\sqrt{2}$ 倍,对于光存储的存储密度提升较小。双光束超分辨激光直写光刻技术能够有效提高直写写入的分辨率。其中心光束正常聚焦,第二束光经 $0\sim 2\pi$ 偏振相位调制后形成一个中心光强为零的圆圈光,两束光的光斑在空间上调整为对称重合。其中,第二束光用于抑制第一束光对材料的改性作用效果,达到仅中心区域发生物性改变的结果。理论上,第二束光的光强越大,对第一束光的抑制作用越大,最终材料发生物性改变的尺寸越小,即在光存储中等效写入数据点的尺寸越小。

目前,双光束超分辨直写的适用材料主要是光敏树脂。光敏树脂中掺入光引发剂或抑制剂等,配合双光束超分辨直写产生第二束光抑制的效果。其抑制的机理一般为光物理或光化学过程^[25]。在光物理过程中,双光束中的中心光束激发光引发剂,使其受激后弛豫为三线态,三线态分子随后裂解出自由基,自由基引发树脂聚合,第二束光以受激辐射方式作用光引发剂基态——三线态之间的分子态,使受激分子回到基态,降低三线态分子比例,达到超分辨写入的目的;在光化学过程中,双光束中的中心光束同样用于引发光聚合,但第二束光作用于光抑制剂,使抑制剂分解出自由基。由于抑制剂分子的自由基能够阻断树脂聚合,因此可达到超分辨写入的目的。

AIE 作为分子材料,可被掺入光敏树脂等体系中,形成均匀的混合介质材料。将掺杂有 AIE 分子的光敏树脂进行紫外光辐照,进一步形成固体薄膜形态的空白光存储介质材料。但 AIE 分子在光敏树脂中的比例较低,光聚合以光敏树脂为主, AIE 分子一般不含有可以参与聚合的丙烯酸酯基团,或经修饰后可以参与光聚合的反应。如图 1 所示,在对存储介质材料实施双光束写入过程中,光斑中心区域的介质材料聚合度提高。聚合度的提高可能使光致硫化等强光导致的材料物性发生改变。在光致硫化过程中,局域强光辐照

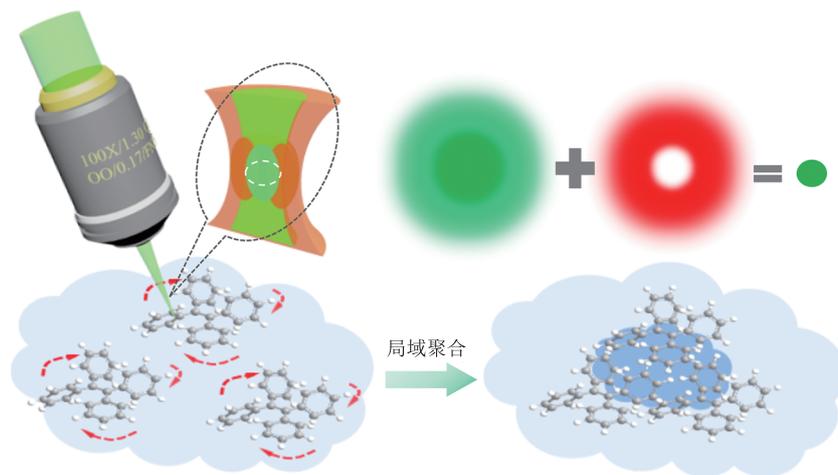


图 1 双光束结构及在 AIE 薄膜中的可能写入效果

Fig. 1 Dual-beam structure and possible writing effect in AIE film

下, 在光敏树脂的聚合物骨架中生产额外的 C—S 键, 从而使紫外光辐照后的固态树脂材料局域交联密度提高。聚合度提高后, AIE 分子中关于无辐射弛豫的分子振动进一步降低, AIE 分子因局域体积轻微缩小而使局域密度提高, 最终写入点的 AIE 分子的荧光效率会提高。

3.2 聚集诱导发光分子的双光束超分辨数据读出

在实现信息数据的超分辨写入后, 需对信息点进行超分辨读取, 如图 2 所示。在双光束超分辨数据写入后, 局域点的 AIE 分子的荧光量子效率提高, 可以采集数据点的荧光信号作为数据读取。其中, 信息点的中心荧光强度最大; 存储介质中的非写入点也有荧光, 但是相对较弱; 普通的树脂材料的荧光可以忽略不计。荧光的读取若仅采用单光束激发成像, 则其分辨率将受到光学衍射的极限限制。STED 成像是荧光成像领域中能够突破衍射极限的技术, 可用于 AIE 数据点的荧光超分辨读取^[26]。其双光束结构与图 1 中相同, 但其激光波长需要依据 AIE 分子的激发波长和荧光波长进行匹配。在双光束激发荧光过程中, 第二束光以 STED 的方式将第一束光激发的上能级电子弛豫回一个较低的能级, 使中心目标波长的荧光尺寸有效缩小, 达到超分辨成像的目

的。理论上, 第二束光的光强越强, 能够得到的成像分辨率越高。目前, STED 成像技术已能够实现 10 nm 以下的成像分辨率。如此, 结合双光束超分辨写入, 理论上可实现 50 nm 以下轨道间距的光信息读写。

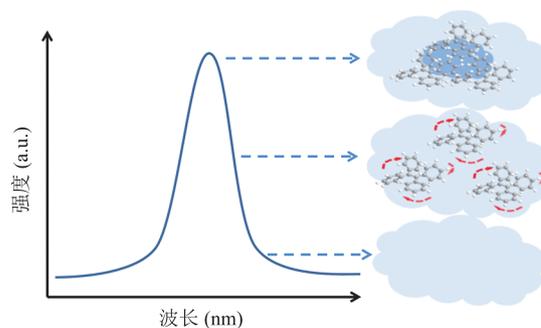


图 2 数据写入后的荧光强度变化

Fig. 2 Change in fluorescence intensity after data is written

3.3 聚集诱导发光分子在双光束光存储中存在的问题

在设想中, AIE 分子需要先溶于光存储介质材料体系, 再进行双光束超分辨光信息读写。这会存在一些实际问题, 主要包括 AIE 分子在存储介质中的溶解度、写入时的“微相分离”、写入后的荧光对比度、写入后数据能保持的时间等方面。

AIE 分子在存储介质中的溶解度: AIE 分子

一般是具备空间对称运动自由度的芳香环衍射物，其中的芳香环是其高荧光量子效率的关键，但在这些 AIE 分子的支链上，一般是饱和或不饱和烃。光刻树脂一般是丙烯酸酯的衍生物，其分子结构包含丰富的丙烯酸酯基团，这是其能够在光聚合后形成稳定空间网状的关键。以常见的二季戊四醇五丙烯酸酯(SR399)为例，其单分子结构中含有 5 个丙烯酸酯基团、1 个醚基和 1 个羟基，与通常的 AIE 分子基团差异很大。AIE 分子在树脂中的溶解度普遍较差，可能的解决办法是对树脂或 AIE 分子进行改性，使两者的相容性提高。AIE 分子一般含有芳香环，树脂可通过改性衔接上芳香环基团，此外，AIE 分子可以改性衔接上丙烯酸酯基团，使两者相溶。

写入时的“微相分离”：在理想情况下，双光束写入点位上 AIE 分子的荧光量子效率会提高。但由于激光写入过程是一个动态光物理化学反应过程，因此必然存在“微相分离”的情况。激光写入后可能出现的“微相分离”现象如图 3 所示。“微相分离”是纳米复合材料中一种常见的现象，在纳米颗粒掺杂和嵌段共聚物的研究中有较多的报道^[27-29]，指两种相溶在一起的物质，因热力学体系不稳定，在发生物理或化学变化后，两者会发生相分离。例如：在光固化树脂中掺入纳米颗粒，当树脂缓慢固化时，纳米颗粒会被“挤出”，而不是液态中的均匀分散。这种“微相分离”导致通过在存储介质中掺杂纳米颗粒实现光学数据存储存在一些问题。但如果光固化树脂的固化速度极快，则能抑制纳米颗粒被分离。另外，若要实现基于 AIE 分子的超分辨光存储，则其数据点尺寸越小，AIE 分子在聚合物提高的物性改变过程中被“挤出”的时间也越短。因此，在研究激光直写过程中，聚合物的物性改变速度对相分离的影响具有重要意义。本课题组的双光束超分辨直写光刻技术研究发现，对 AIE 分子进行丙烯酸酯基团修饰，然后将其溶解到丙

烯酸酯树脂中，可较大程度地改善激光直写过程中相分离导致的“挤出”。这是因为丙烯酸酯基团修饰后的 AIE 分子上的丙烯酸酯基团能够与丙烯酸酯树脂上的丙烯酸酯基团发生光聚合作用。对 AIE 分子进行改性，使其参与到激光直写导致的介质材料物性改变光化学过程中，是一个可以有效降低相分离速度的可行方案。

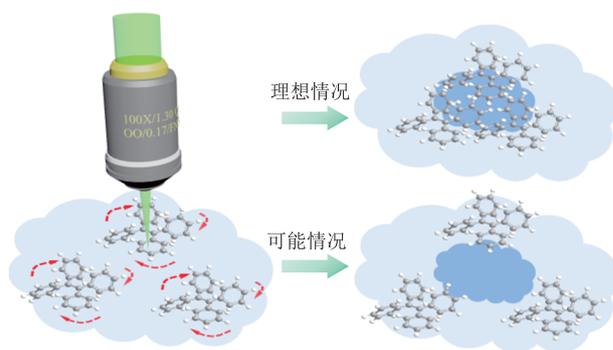


图 3 激光写入后可能出现的“微相分离”现象

Fig. 3 Possible “microphase separation” phenomenon after laser writing

写入后的荧光对比度：数据写入成功后，其读取过程的关键是要分辨数据点的荧光。虽然掺杂有 AIE 分子的整个薄膜都是有荧光的，但是写入有数据点位置处的荧光与没有写入数据点处的荧光存在强度差异。只有这个荧光强度差异足够大，且写入有数据点位置处的荧光强度足够强，才能被探测器探测到，并与周围没有写入数据点处的荧光区分开来。AIE 分子的荧光强度随聚合度变化会发生明显变化，这在溶液中已得到广泛证明。但关于 AIE 分子在固体介质中的荧光强度随聚合度变化的研究还较少。

4 总结与展望

目前，我国的数据存储安全面临严峻威胁，国外对中国半导体存储器的发展实行了全方位的限制，国外半导体设备商与国内厂家的正常贸易已被严格限制，近期又限制了光刻胶的对华出

口。就数据存储安全而言, 光存储受国外限制有限, 是发展冷数据存储和保障数据安全的一个可靠选择。本文简要介绍了 AIE 分子的荧光特性, 其特性有助于实现双光束超分辨光存储, 极大提升存储密度。本文描述了 AIE 分子在双光束超分辨光存储中应该如何进行读写, 但 AIE 分子的双光束超分辨光存储还面临一些实际问题。本文对这些实际问题做出了相应的分析, 并提出了可能的解决办法。这些方法可能会推动 AIE 分子与双光束超分辨光存储的结合, 并最终实现基于 AIE 分子的双光束超分辨光存储。

随着 AIE 分子在双光束超分辨光存储中的应用推广, 势必促进适用于光存储的 AIE 分子的发展, 以及对应双光束超分辨光驱系统的研究。其中, 为适应发展, AIE 分子可能具备以下两种特征。第一, AIE 分子的荧光主要分布在红光波段, 主要原因是方便双光束读取, 以及长波段下的介质稳定性较高。第二, AIE 分子的结构简单、化学性质稳定, 具备较多的丙烯酸酯支链。读写的分辨率提高必然要求对应的光驱系统有对应的解决方案, 其发展方向在之前进行过分析^[26], 主要有以下 3 个方面。第一, 存储介质运动方式会继承现有光驱的主要结构, 因为双光束超分辨系统只是在传统光路中多出了一束光。第二, 基于超分辨荧光机理, 发展出横向与纵向的超分辨定位技术。第三, 基于荧光的信号处理技术会成为重要研究方向。

参 考 文 献

- [1] Hong YN, Lam JWY, Tang BZ. Aggregation-induced emission [J]. *Chemical Society Reviews*, 2011, 40(11): 5361-5388.
- [2] Hong YN, Lam JWY, Tang BZ. Aggregation-induced emission: phenomenon, mechanism and applications [J]. *Chemical Communications*, 2009, (29): 4332-4353.
- [3] Gu M, Li XP, Cao YY. Optical storage arrays: a perspective for future big data storage [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(5): e177.
- [4] Li XP, Cao YY, Tian N, et al. Multifocal optical nanoscopy for big data recording at 30 TB capacity and gigabits/second data rate [J]. *Optica*, 2015, 2(6): 567-570.
- [5] Cao YY, Gan ZS, Jia BH, et al. High-photosensitive resin for super-resolution direct-laser-writing based on photoinhibited polymerization [J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19486-19494.
- [6] Gan ZS, Cao YY, Evans RA, et al. Three-dimensional deep sub-diffraction optical beam lithography with 9 nm feature size [J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 2061.
- [7] Göttfert F, Wurm CA, Mueller V, et al. Coaligned dual-channel STED nanoscopy and molecular diffusion analysis at 20 nm resolution [J]. *Biophysical Journal*, 2013, 105(1): L01-L03.
- [8] Rittweger E, Han KY, Irvine SE, et al. STED microscopy reveals crystal colour centres with nanometric resolution [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(3): 144-147.
- [9] Mustroph H, Stollenwerk M, Bressau V. Current developments in optical data storage with organic dyes [J]. *Angewandte Chemie*, 2006, 45(13): 2016-2035.
- [10] Birkett D. The chemistry of optical discs [J]. *Journal of Chemical Education*, 2002, 79(9): 1081.
- [11] 刘丹, 赵征, 唐本忠. 聚集诱导发光天然产物: 从发现到其多功能应用 [J]. *中国科学: 化学*, 2022, 52(9): 1524-1546.
Liu D, Zhao Z, Tang BZ. Natural products with aggregation-induced emission properties: from discovery to their multifunctional applications [J]. *Scientia Sinica Chimica*, 2022, 52(9): 1524-1546.
- [12] 吕妍婷, 王琪, 朱为宏. 聚集诱导发光材料在食品安全检测中的应用 [J]. *发光学报*, 2021, 42(3): 319-335.
Lv YT, Wang Q, Zhu WH. Food safety detection using aggregation-induced emission materials [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(3): 319-335.
- [13] Hou M, Liu YC, Zhou W, et al. Water-soluble AIE-

- active fluorescent organic nanoparticles: design, preparation and application for specific detection of cyanide in water and food samples [J]. *Chemistry: An Asian Journal*, 2021, 16(15): 2014-2017.
- [14] Liu JZ, Zhong YC, Lam JWY, et al. Hyperbranched conjugated polysiloles: synthesis, structure, aggregation-enhanced emission, multicolor fluorescent photopatterning, and superamplified detection of explosives [J]. *Macromolecules*, 2010, 43(11): 4921-4936.
- [15] Hu Z, Li Y, Kang MM, et al. Aggregation-induced emission luminogen: a new perspective in the photo-degradation of organic pollutants [J]. *EcoMat*, 2020, 2(2): e12024.
- [16] Su XX, Liu JB. pH-guided self-assembly of copper nanoclusters with aggregation-induced emission [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(4): 3902-3910.
- [17] Zhao XJ, Chen Y, Niu GY, et al. Photostable pH-sensitive near-infrared aggregation-induced emission luminogen for long-term mitochondrial tracking [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(14): 13134-13139.
- [18] Gao M, Su HF, Lin YH, et al. Photoactivatable aggregation-induced emission probes for lipid droplets-specific live cell imaging [J]. *Chemical Science*, 2017, 8(3): 1763-1768.
- [19] Yuan YY, Xu SD, Cheng XM, et al. Bioorthogonal turn-on probe based on aggregation-induced emission characteristics for cancer cell imaging and ablation [J]. *Angewandte Chemie (International Edition)*, 2016, 55(22): 6457-6461.
- [20] Biswas S, Jana D, Kumar GS, et al. Supramolecular aggregates of tetraphenylethene-cored AIEgen toward mechanoluminescent and electroluminescent devices [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(20): 17409-17418.
- [21] Han JQ, Sun JY, Li YP, et al. One-pot synthesis of a mechanochromic AIE luminogen: implication for rewritable optical data storage [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4(39): 9287-9293.
- [22] Gundu S, Kim M, Mergu N, et al. AIE-active and reversible mechanochromic tetraphenylethene-tetradiphenylacrylonitrile hybrid luminogens with re-writable optical data storage application [J]. *Dyes and Pigments*, 2017, 146: 7-13.
- [23] Hou Y, Du JR, Hou JD, et al. Rewritable optical data storage based on mechanochromic fluorescence materials with aggregation-induced emission [J]. *Dyes and Pigments*, 2019, 160: 830-838.
- [24] Yuan XP, Zhao M, Guo XJ, et al. Ultra-high capacity for three-dimensional optical data storage inside transparent fluorescent tape [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(6): 1535-1538.
- [25] Gu M, Cao YY, Li XP, et al. SPIN-based optical data storage [M]. Singapore: Jenny Stanford Publishing, 2015.
- [26] 骆志军, 刘亚男, 陈梦林, 等. 面向产业化应用的双光束超分辨数据存储技术 [J]. *光电工程*, 2019, 46(3): 180559.
- Luo ZJ, Liu YN, Chen ML, et al. Industrialization oriented technology of dual-beam super-resolution data storage [J]. *Opto-electronic Engineering*, 2019, 46(3): 180559.
- [27] Seo M, Hillmyer MA. Reticulated nanoporous polymers by controlled polymerization-induced microphase separation [J]. *Science*, 2012, 336(6087): 1422-1425.
- [28] Leibler L. Theory of microphase separation in block copolymers [J]. *Macromolecules*, 1980, 13(6): 1602-1617.
- [29] Ito T, Ghimire G. Electrochemical applications of microphase-separated block copolymer thin films [J]. *ChemElectroChem*, 2018, 5(20): 2937-2953.