

引文格式:

骆志军,翁天锋, 陆家友, 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, ? (?): ?-?.

Luo ZJ, Weng TF, Lu JY,et.al. Potential applications of aggregation-induced emission molecules in dual-beam super-resolution optical data storage[J]. Journal of Integration Technology,2023, ?(?): ?-?.

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}, 翁天锋, 陆家友³, 郭欣怡³, 钟东³, 薛丽³, 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)

摘要: 聚集诱导发光分子因其高效的发光性质, 在生物成像、光波导和电致发光等领域被广泛应用, 但是在光信息存储领域还鲜有研究。相比于其他光存储材料, 聚集诱导发光分子由于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。本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应用可能的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: doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20221021001

Potential applications of aggregation-induced emission molecules in dual-beam super-resolution optical data storage

Zhijun Luo^{1,2}, Tianfeng Weng, Jiayou Lu³, Xinyi Guo³, Le Zhong³, Li Xue³, Zongsong Gan^{1,2*}

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

²(Key Laboratory of Education Ministry for Information Storage Systems, 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)

*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 project is supported by the National Key R&D Program (No. 2021YFB2802000).

1 引言

基于光盘的传统存储技术诞生至今已有 50 余年，因为存储所用的存储介质种类和光源波长不同，主要分为 CD (Compact Disc)、DVD (Digital Video Disc) 和 BD (Blu-ray Disc) 三种，单面单层存储容量从 700 M 到 25GB 不等。但是自 BD 存储之后，光盘存储技术已经有 20 年没有实质进展，光盘的存储密度受限于光学衍射极限 $\delta = 0.61\lambda / NA$ 。蓝光系统中物镜的数值孔径 (NA) 已经提升到了 0.8，光源波长缩短到了 405 纳米，所能实现的点位宽度 150 纳米，道间距 320 纳米，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接近 1 或者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，基于光盘的传统光盘存储技术遭遇发展瓶颈，使得光存储技术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，存储介质染料分子成固体形式存在，吸收激光能量后因为“强激子耦合”的物理机制，分子吸收的能量会就近传递给周围分子，能量逐渐扩散导致荧光淬灭 (aggregation-caused quenching, ACQ), 吸收的能量最终转化为热，导致激光辐照区域染料分子热分解。与常见的聚集荧光淬灭 (ACQ) 分子不同，有的荧光分子在聚集状态或固体薄膜的情况下，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。在不同的条件下，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，所以能量以无辐射损耗形式消耗的比例降低，自发辐射荧光的比例提高。大量的研究也表明了掺杂有 AIE 分子的薄膜在发生形变等“聚集态”发生改变的情况下，其荧光强度会发生明显的改变。如果将“聚集态”发生改变的尺寸缩小到

纳米尺度，即可等效为光存储数据写入的过程；进一步局域“聚集态”发生改变导致荧光强度发生变化，可以将读出的不同荧光强度等效为光存储数据读取时读出不同信号的过程。因此，聚集诱导发光材料应用于光学数据存储，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能够实现的单点尺寸已经小于 40 纳米^[3-5]，单线宽度 9 纳米^[6]。双光束超分辨成像技术通过受激辐射损耗（stimulated emission depletion, STED）原理，成像分辨率能够达到 10 纳米以下^[7,8]。如果能够将 AIE 分子、双光束超分辨光刻和双光束超分辨成像三者结合起来，将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，本文将提出一些可行性的方案，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 key 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，往往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。在分子游离存在时，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，分子之间也会发生 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，最终变成了热。

大部分 AIE 分子的发光中心也具有芳香环共轭结构^[2]，但是与 ACQ 分子不同之处是 AIE 分子内或分子间具有可以运动的自由度。这使得 AIE 分子能够通过分子基团旋转、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以自发辐射进行导出，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不仅得到阐明，其应用范围也得到广泛拓展。目前在中医药^[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]以及发光器件^[20]等得到研究和应用。

在光存储领域，部分研究就 AIE 分子对聚集态或化学敏感的光学响应，进行了光存储的实验。例如，Han 等人通过机械力在基板上编码，并可以熏蒸处理擦除，对应二进制数据中的 0 和 1 两种状态^[21]。Gundu 等人通过研磨绿色发光晶体可以使其转化为发出橙黄色的粉末，而研磨后的粉末通过二氯甲烷熏蒸，可以恢复绿色发光^[22]。Hou 等人发现机械诱导的状态可以通过再结晶过程轻松恢复，重结晶过程可以通过溶剂熏蒸或溶剂浸泡来激活^[23]。

此外，通过激光直写掺杂 AIE 分子薄膜实现数据记录和荧光读取^[24]。但是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 AIE 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 纳米以下的数据读取分辨率；第二，AIE 分子对聚集态的改变有灵敏的响应，聚集态的改变可以在体系中引入光敏树脂来实现，光敏树脂在聚合前后存在一定的体积收缩和极高的凝固程度，都有利于提高 AIE 的荧光效率。200 纳米以下分辨率的树脂聚集态改变，也可以通过已有的超分辨激光制造过程实现。已有的超分辨光学技术中，能够兼顾超分辨写入、读取方式和效率的，目前只有双光束超衍射技术能够达到要求。

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，首先需要将 AIE 分子溶解并均匀分布与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，就可以实现基于 AIE 分子的双光束超分辨数据存储。下面就 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问题的分析。

3.1 AIE 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，而光斑尺寸受到衍射极限限制。飞秒激光通过非线性的双光子吸收机理，能将点间距分辨率提高 $\sqrt{2}$ 倍，这对光存储的密度提升非常有限。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，在光存储中即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，但是第二束光作用光抑制剂，使抑制剂分解出自由基，抑制剂分子的自由基能够阻断树脂聚合，达到超分辨写入的目的。

AIE 作为分子材料，其尺寸较小，可以将其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。但是 AIE 分子在光敏树脂中比例较低，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。在这里，聚合度的提高可以是光致硫化等强光导致的材料物性改变过程。在光致硫化过程中，局域强光辐照下在光敏树脂的聚合物骨架中生产额外的 C-S，从而使得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，同时聚合度提高，局域体积会轻微缩小，提高了 AIE 分子的局域密度，最终写入点的 AIE 荧光效率会提高。在较好的条件下，最终写入点的 AIE 荧光效率会显著提高。

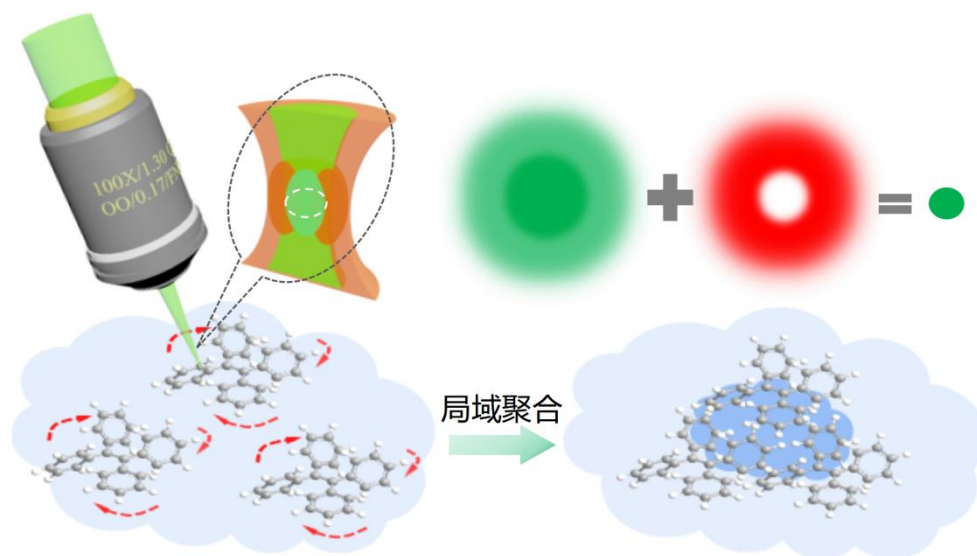


图 1 双光束结构及在 AIE 薄膜中的可能写入效果

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

3.2 AIE 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，就要对信息点进行超分辨读取，如图 2 中所示，在双光束超分辨数据写入之后，局域点的 AIE 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，普通的树脂材料本身荧光可以忽略不计。荧光的读取如果只采用单光束激发成像，其分辨率也受到光学衍射极限限制。STED 成像是荧光成像领域能够突破衍射极限的技术，

可以用于 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，但是其激光波长需要依据 AIE 分子的激发波长和荧光波长匹配。在双光束激发荧光过程中，其中第二束光以受激辐射损耗的方式，将第一束光激发的上能级电子驰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 成像技术已经能够实现 10 纳米以下的成像分辨率。如此，结合上述的双光束超分辨写入，理论上可以实现 50 纳米以下轨道间距的光信息读写。

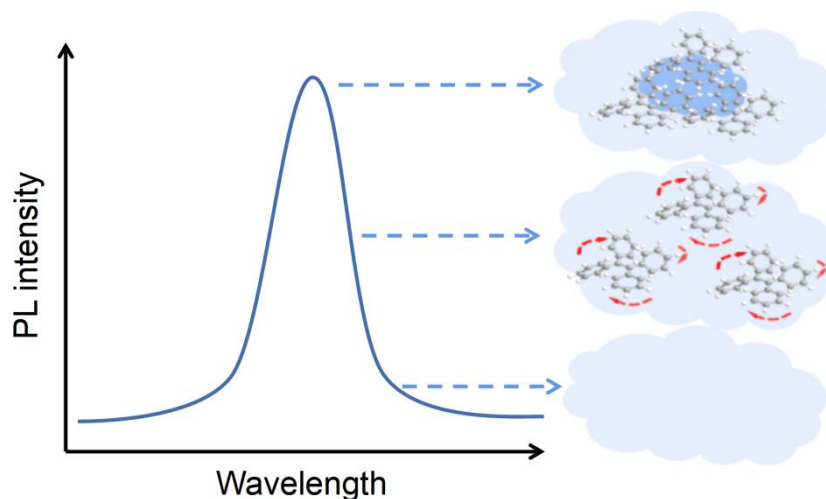


图 2 数据写入后的荧光强度变化
Fig. 2 Change in fluorescence intensity after data is written

3.3 AIE 分子在双光束光存储中存在的问题

因为在设想中 AIE 分子需要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几个方面。

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，但是这些 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 分子基团差距很大。AIE 分子在树脂中的溶解度普遍都很差，可能解决的办法是对树脂或 AIE 分子进行改性，使两者的相溶性提高。因为 AIE 一般含有芳香环，树脂可通过改性衔接上芳香环基团，另外 AIE 分子也可以改性衔接上丙烯酸酯基团，使两者相容。

写入时的“微相分离”：在理想情况下，双光束写入点位上 AIE 分子荧光量子效率会提高。但是激光写入过程是一个动态光物理化学反应过程，必然存在“微相分离”的情况。

“微相分离”是在纳米复合材料中常见的一种现象，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]，指的是两种相溶在一起的物质，因为热力学体系不稳定，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，树脂缓慢固化中，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”使得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。但是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。另外如果要实现基于 AIE 分子的超分辨光存储，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。在本课题组的双光束超分辨直写光刻技术研究中，发现对 AIE 分子进行丙烯酸酯基团的修饰，然后将其溶解到丙烯酸酯树脂中，可以极大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，可以有效降低相分离的速度是一个可行的方案。

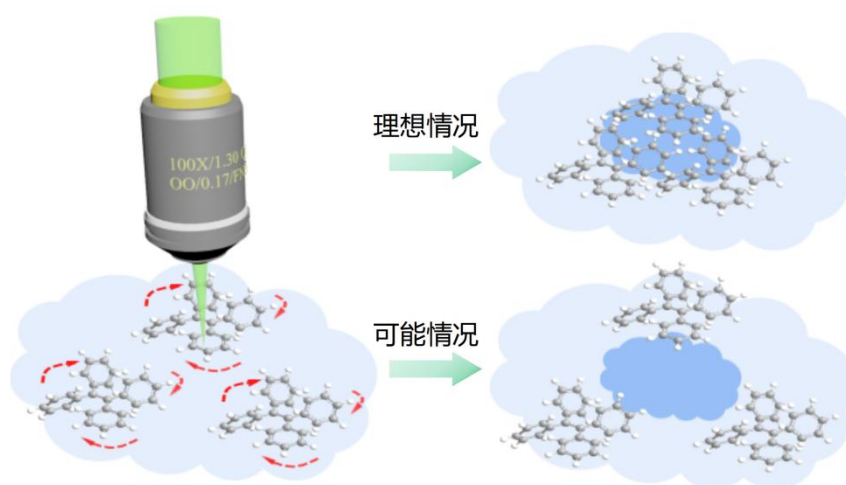


图 3 激光写入后可能的“微相分离”现象

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。但是掺杂有 AIE 分子的整个薄膜都是有荧光的，写入有数据点位置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，并且写入有数据点位置处的荧光强度足够强，才能够被探测器探测到并与周围没有写入数据点处区分开来。AIE 分子荧光强度随聚集度会发生明显变化，这在溶液中已经得到广泛证明。但是关于 AIE 分子在固体介质中荧光强度随聚合度变化的研究还比较少。

4 总结与展望

我国的数据存储安全目前面临了严峻的威胁，国外对中国半导体存储器的发展实行了全方位的限制，已经严格限制了国外半导体设备商与国内厂家的正常贸易，近期又限制了光刻胶的对华出口。从数据存储安全考虑，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，但是 AIE 分子的双光束超分辨光存储还面临一些实际的问题，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，必然会促进适用于光存储 AIE 分子的发展，还有对应双光束超分辨光驱系统的研究。其中对应适用于 AIE 分子的发展类型可能会偏向具备的以下特征。第一，AIE 的分子荧光主要分布在红光波段，主要是方便双光束读取，及长波段下介质具备较高稳定性。第二，AIE 的主要发光结构化学性质稳定，结构简单，同时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]。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，基于超分辨荧光的机理，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也会成为重要研究方向。

致谢

作者感谢国家重点研发计划专项（批准号 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等的支持。

参考文献

- [1] Hong Y, Lam J W, Tang B Z. Aggregation-induced emission[J]. Chemical Society Reviews, 2011, 40(11): 5361-5388.
- [2] Hong Y, Lam J W, Tang B Z. Aggregation-induced emission: phenomenon, mechanism and applications[J]. Chem Communications, 2009, 7(29): 4332-4353.
- [3] Gu M, Li X, Cao Y. Optical storage arrays: a perspective for future big data storage. Light: Science & Applications[J], 2014, 3(5): e177-e177.
- [4] Li X, Cao Y, 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.
- [5] Cao Y, Gan Z, Jia B R, 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 Z, Cao Y, Evans R A, et al. Three-dimensional deep sub-diffraction optical beam lithography with 9 nm feature size[J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 2061.
- [7] Gottfert F, Wurm C A, Mueller V, et al. Coaligned dual-channel STED nanoscopy and molecular diffusion analysis at 20 nm resolution[J]. *Biophys Journal*, 2013, 105(1): L01-L03.
- [8] Rittweger E, Han K Y, Irvine S E, et al. STED microscopy reveals crystal colour centres with nanometric resolution[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(3): 144.
- [9] Mustroph H, Stollenwerk M, Bressau V. Current developments in optical data storage with organic dyes[J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, 2006, 45(13): 2016-2035.
- [10] Birkett D. The chemistry of optical discs[J]. *Journal of Chemical Education*, 2002, 79(9): 1081.
- [11] Liu D, Zhao Z, Tang B Z. 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(03): 319-335.
Lv Y T, Wang Q, Zhu W H. Application of aggregation-induced luminescent materials in food safety detection[J]. *Journal of Luminescence*, 2021, 42(03): 319-335.
- [13] Hou M, Liu Y, 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 J, Zhong Y, Lam J W Y, 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 M, et al. Aggregation - induced emission luminogen: A new perspective in the photo - degradation of organic pollutants[J]. *EcoMat*, 2020, 2(2): e12024.
- [16] Su X, Liu J. pH-guided self-assembly of copper nanoclusters with aggregation-induced emission[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2017, 9(4): 3902-3910.
- [17] Zhao X, Chen Y, Niu G, 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 H, Lin Y, et al. Photoactivatable aggregation-induced emission probes for lipid droplets-specific live cell imaging[J]. *Chemical Science*, 2017, 8(3): 1763-1768.
- [19] Yuan Y, Xu S, Cheng X, 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 G S, 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 J, Sun J, Li Y, 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 J, Hou J, 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 X, Zhao M, Guo X, et al. Ultra-high capacity for three-dimensional optical data storage inside transparent fluorescent tape[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(6): 1535-1538.
- [25] Min G, Cao Y, Li X, et al. SPIN-based optical data storage[M]. 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 Z J, Liu Y N, Chen M L, et al. Dual-beam super-resolution data storage technology for industrial applications[J]. *Optoelectronic 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.