

荧光光谱技术在多维光数据存储材料开发中的应用

供稿：王志刚 编辑：Iris

2023年春节，科幻电影《流浪地球2》为人类的未来提供了一条新的思路：上传人类的记忆到超级计算机，从而使人类脱离肉体束缚，以数据的形式实现永生。



图片来源：流浪地球2电影官方海报

将一头大象塞入冰箱只需要三步，将一个人的“灵魂”以数据的形式永生也只需要三步：1）存储记忆；2）上传记忆到计算机；3）灵魂以数据的形式在计算机中“迭代”出新的记忆。如何将一个人一生的记忆存储到一个实体中，是第一个困扰着研究者的问题。

一个人一生的记忆，该有多大？

我们不得而知。但是只要打开手机，看一下仅用了几年的微信占据的内存，你或许能有一些概念。人类要想以数据的形式永生，首先需要一个拥有巨大存储空间的设备来让我们一生的记忆得以安放。

幸运的是，多维光数据存储（ODS）有望担此重任。它可以突破常规存储技术的极限，具有容量高、成本低等独特优势，或能成为“未来的”存储技术。目前，科学家把多维ODS的研发热情投入到能携带多个维度信息的介质材料的开发上（比如携带波长信息的光致发光材料），希望以此来实现单位空间信息存储容量的大幅提升。

这样，在有限的体积的存储介质上，容纳人一生的记忆的才能成为可能。

只需要激光器发射出一束激光，这束激光在“触碰”到存储材料时会使其发生物理或化学性质的改变，被改变的位点我们视为二进制数中的“1”，而未经改变的位点我们视为二进制数中的“0”。完成记录后，光盘上就会留下一串串二进制数，如0111010001，成功完成了数据的“刻录”。这个过程叫光数据存储。

备受关注的光释光（OSL）材料和热激励（TSL）材料就是这样的介质材料。近日，西安建筑科技大学纳米材料实验室高当丽课题组制备出 $\text{ZGO}:\text{Mn}^{2+}, \text{Cr}^{3+}$ 荧光粉（以下简称 ZGO 荧光粉），验证了其具备 OSL / TSL 双特性，该特性可大大提高单位体积大小存储介质的数据存储量。

此外，该研究将 ZGO 作为存储介质设计出多层 ODS，证实其具备利用通用光源随时随地重复的写入和读取多维数据的能力，可见其作为数据存储介质的便捷性与可行性，相关研究发表在 Advanced Optical Materials 上。

理论先行：ZGO 荧光粉的双波长发光

传统的 ODS 介质材料只能在单一波长光刺激下读出一对一的信号，而理想的多维 ODS 介质不仅可以被不同的波长的光写入，还可被不同波长的光刺激或热刺激产生多峰发光信号，从而摆脱材料的物理面积的限制，提高信息的存储量。因此，具有超灵敏光响应或热响应的双波长发射介质材料是构建多维 ODS 的关键。

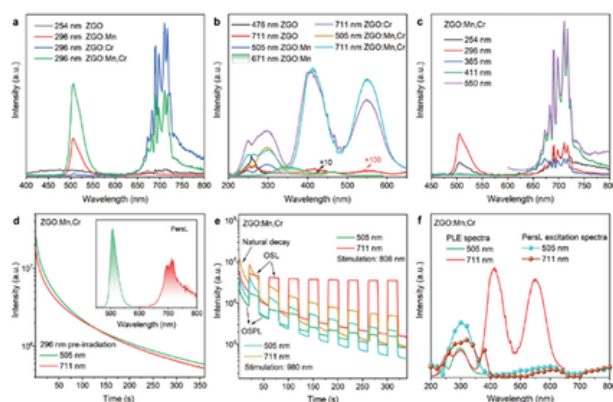
荧光光谱技术是验证 ZGO 荧光粉是否具有构建 ODS 潜质的核心手段。

OSL 双波长发光

研究使用荧光激发光谱和发射光谱分析了 ZGO 荧光粉的缺陷和跃迁状态，证实了 ZGO 荧光粉可以在紫外-可见-近红外光下带电，并表现出四种双波长发光模式。在紫外-可见-近红外光区带电意味着在生活中任意光源环境下，ZGO 荧光粉都可以实现数据的写入和读取。独特的双波长发光特性则提示着 ZGO 荧光粉具备多维信息读写的潜质。

TSL 双波长发光

研究使用时间分辨的荧光光谱分析 ZGO 荧光粉的热响应双峰发光和热释光特性，结果同样提示着 ZGO 荧光粉可以在不同温度热刺激下表现出双波长发光（详见原文）。这意味着在不同温度的热刺激下，ZGO 荧光粉同样具备多维信息读写的潜力。



ZGO荧光粉的多模发光(PL, PersL, OSL和OSPL)。a) PL谱, b) PLE谱, c)选择性激发ZGO的位相关PL谱。d) 296 nm紫外光预照射3 min后505和711 nm发射的PersL衰减曲线。附图为衰减10 s时获得的PersL光谱。e) 980/808 nm激光(功率密度 0.3 W cm^{-2})在脉冲模式下(开/关间隔设为20/20 s)在衰减曲线(监测波长 $\lambda_m = 505$ 和 711 nm)上获得的OSL信号。f) 505和711 nm处的PLE光谱和PersL激发光谱检测

同时具备 OSL 和 TSL 双波长发光特性，为 ZGO 荧光粉作为 ODS 介质提供了理论保障。

实践验证：ZGO荧光粉可作多维ODS介质

在验证了其理论可行性后，高当丽课题组随即使使用所制备的 ZGO 荧光粉作为介质设计出 ODS 器件，实验验证其多维信息写入和读出的能力。

一个理想的多维 ODS 是如何实现信息读写呢？这需要三个基本过程：1) 光/热辐射

空阱（擦除）；2) 老化后再充电(写入)；3) 信号提取(读出)。

01. 擦除

充电温度相关 TL 曲线表明，当温度升高到 110°C 时，陷阱可以被完全擦除。这意味着以 ZGO 为介质的 ODS 可以实现信息的重复擦除-写入。

02. 写入

完成“擦除”过程后，在不同波长的光源刺激下，这个 ODS 将会记录不同颜色的牵牛花图案。它将不同颜色的光储存在不同的介质陷阱中，这就完成了“写入”过程。

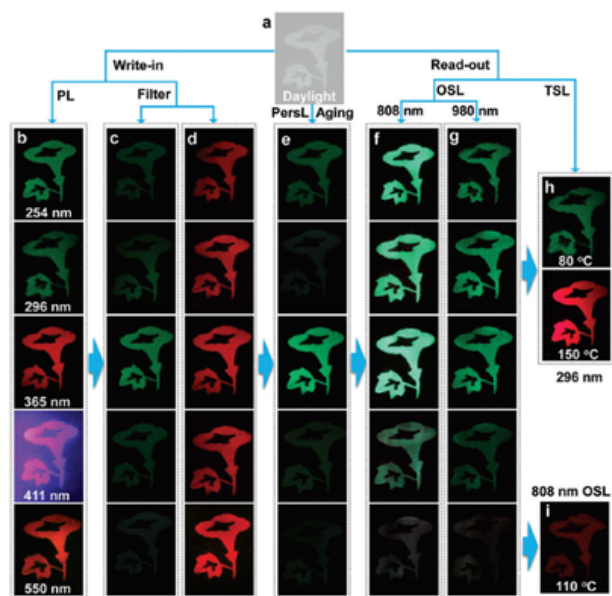
03. 读出

仅需要适当的光刺激（下图f,g,i）和热刺激（下图h）即可实现写入的数据的可视化，即“读出”过程。ZGO 荧光粉构建的 ODS 器件可以在不同波长的光刺激下“读出”不同颜色的牵牛花。比如，在 $254 \sim 411 \text{ nm}$ 短波长范围内充电后， $808/980 \text{ nm}$ 光刺激下的强绿色牵牛花（如图f、g），而当充电波长移至 550 nm 时，可获得白色牵牛花标志。

除了光刺激，热刺激也可以实现信息的读出，如在 808 nm 的光刺激下写入了红色牵

牛花图案，红色和绿色的牵牛花也可以通过不同温度的加热来读出（下图h）。

这个实验的成功意味着，我们可以利用光在介质材料上写入信息，这些写入的信息可以被不同光刺激或热刺激读出，进而实现多维信息的读写。



ZGO:Mn,Cr 荧光粉为介质的多维 ODS。a)消耗臭氧层物质示意图(顶板); b-d)红绿双信息写入; e)老化; f,g,i) 用光学刺激法读出所存储的两能级图案(绿色和红色); H) 用热刺激法读出保存的两层模式(绿色和红色)

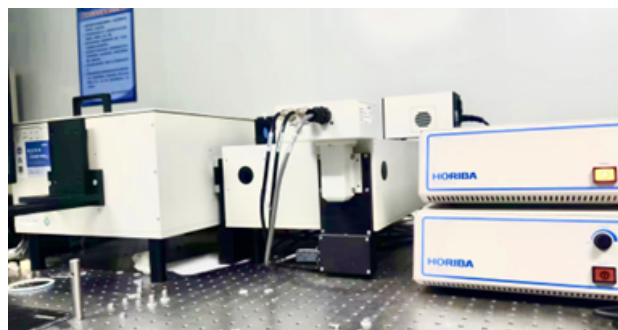
工具相助：QuantaMaster 8000

不仅仅是制备出适合作为 ODS 介质材料的荧光粉，本研究的另一项重要工作是通过对该荧光粉自身光学性质的分析来揭示其发

光机理，以期对 ODS 领域有更深的指导意义。

在 ZGO 荧光粉的荧光性质分析中，缺乏合适的表征手段是这项工作的难点之一，HORIBA QuantaMaster 8000为这项研究提供了帮助。王志刚（高当丽课题组成员）表示：“在表征我们的材料的光学性能时，这台仪器数据精确，操作简单，为实验的顺利进行提供保障。”

HORIBA QuantaMaster 8000具有超高灵敏度，可以实现痕量和微量样品测试。它配置专利的 DeltaRAM X™ 单色仪，获得超快激发波长扫描，实现快速比率测试，特别适用于动态扫描、膜流动性测量以及耦合荧光显微镜。现已更新为 Fluorolog-QM 系列模块化稳瞬态荧光光谱仪。



高当丽课题组的HORIBA PTI Quanta Master 8000



获取样册



技术支持

当然，人类距离“电子永生”还很远很远，存储技术、量子计算机、能源等等多个领域的叠加式爆炸性发展或许才能实现这一梦想。尽管我们的灵魂何年何月才能数据化还未可知，但能够确定的是，在未来那个集成了人类记忆的庞大设备中，科学的一步步前行一定是其中浓墨重彩的一笔。

高当丽课题组

西安建筑科技大学理学院，纳米材料实验课题组负责人高当丽教授，硕士生导师，陕西省优秀青年科技新星，西安建筑科技大学首届雁塔学者、光功能材料团队带头人，主要从事稀土微纳米材料和余晖材料及其潜在应用等方面的研究。

主持完成国家自然科学基金青年项目、中国博士后面上基金（一等资助）、陕西省青年科技新星计划等科研项目10余项。

在Advanced Optical Materials, ACS Applied Materials & Interfaces, Journal of Materials Chemistry C, Applied Physics Letters, Optics Letters等刊物发表高水平论文60余篇，相关结果已被引用700余篇次，以第一完成人荣获陕西高等学校科学技术二等奖和陕西省科学技术三等奖各1次。

联系作者：

王志刚

wangzhigang@xauat.edu.cn