

文章编号: 1000-7032(2023)07-1123-08

室温全息光谱烧孔: 实现路径与研究展望

付申成, 刘益春*

(东北师范大学 紫外光发射材料与技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130024)

摘要: 光谱烧孔型全息存储因高密度、抗干扰、低能耗的特点而具备了海量“冷数据”存储潜力。本文结合作者的科研经历, 首先简要回顾了光谱烧孔的发展历程和存在瓶颈; 随后基于等离子体光谱烧孔的基本原理, 阐述了过渡金属氧化物/贵金属功能基元室温全息光谱烧孔的新思想; 继而展示了作者在大面积全息盘片研制和小型化全息存储器开发方面的最新成果; 最后对未来利用功能基元空间序构实现高密度频域全息光谱烧孔进行了展望。作者所在团队的系列工作开辟了高密度光存储的新方向, 同时为发展过渡金属氧化物基高集成光电器件提供了有益的思路。

关键词: 光谱烧孔; 过渡金属氧化物; 等离子体; 全息存储

中图分类号: O438.1 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20230086

Room-temperature Holographic Spectral Hole-burning: Implementation Path and Research Prospect

FU Shencheng, LIU Yichun*

(Key Laboratory of UV-Emitting Materials and Technology (Northeast Normal University), Ministry of Education, Changchun 130024, China)

* Corresponding Author, E-mail: ycliu@nenu.edu.cn

Abstract: Spectral hole-burning holographic storage has the characteristics of high-density, anti-interference and low-energy-consumption, and has potential ability of storing massive “cold data”. Based on our own research experience, we briefly review the development process and existing bottlenecks of spectral hole-burning. We propose a new idea to achieve room-temperature holographic spectral hole-burning in a functional unit of transition-metal-oxide/noble-metal, which is based on the principle of plasmonic spectral hole-burning. Then we present the latest achievements in large-area holographic discs and compact-type holographic memory devices. We also have a prospect for future work on high-density holographic spectral hole-burning in frequency domain *via* orderly arrangement of functional units. A series of work of the author's group open up a new direction for high-density optical storage, and provide a useful idea for the development of transition-metal-oxide-based optoelectronic devices with high-integration.

Key words: spectral hole-burning; transition-metal-oxide; plasmon; holographic storage

1 引 言

人类已进入信息爆炸式增长的大数据时代, 其显著特征为数据体量巨大且类型繁多^[1]。如今全球每年产生的数据总量已达到 ZB 量级, 预计

2025 年将超过 163 ZB (1 630 亿 TB)^[2]。面对复杂环境, 访问频次低但容量占比高的“冷数据”丢失风险愈来愈大, 信息存储与处理面临巨大挑战。在这样的背景下, 发展大容量、长寿命、低能耗的冷数据存储迫在眉睫。光谱烧孔是频率选择的

收稿日期: 2023-04-17; 修订日期: 2023-05-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11974073); 吉林省自然科学基金(20220101006JC); 吉林省教育厅项目(JJKH20231290KJ) Supported by National Natural Science Foundation of China (11974073); Natural Science Foundation of Jilin Province (20220101006JC); Education Department of Jilin Province (JJKH20231290KJ)

光存储,是一种高密度数据存储技术。在稀土离子掺杂的晶体、有机分子或金属纳米团簇中,格位环境完全相同的激活中心(或吸收中心)光谱宽度被称为“均匀线宽”,是很窄的谱带线型;当离子、分子或纳米团簇所处环境不同时,各激活中心的频率会有微小移动,整体叠加出的包络线宽度被称为“非均匀线宽”。在使用带宽小于非均匀线宽的激光激发时,只有对应共振频率的吸收中心发生光物理或光化学变化,再通过可调谐激光扫描整个吸收谱带,共振的激活中心吸收出现饱和,而非共振的激活中心仍有正常的吸收,这样就会在原来的吸收线型上出现凹陷,也就是光谱线型上的“孔”,整个过程被定义为“光谱烧孔”。其存储密度的理论极限值 $T=\Gamma_{\text{inh}}/\Gamma_{\text{h}}$,其中, Γ_{inh} 为光谱非均匀线宽, Γ_{h} 是光谱均匀线宽。光谱烧孔现象由前苏联科学家彼尔索诺夫在1974年研究激光辐照有机分子吸收光谱时首次发现^[3],随后IBM论证了其高密度光存储的可行性^[4]。传统光谱烧孔技术是采用不同频率的单束激光来存储数据;而全息技术作为新一代光学记录手段,以双光束干涉条纹形式存储光学振幅、相位、偏振、轨道角动量等维度信息,可以实现单点(尺寸大小约在 μm 量级)KB级以上的“立体画面式”存储^[5]。将光谱烧孔技术与全息技术相结合,在单一点位改变记录光频率,实现多重全息图存储,在吸收谱带上仍可观测到吸收线型上的“孔”,这样的记录过程可被称为“全息光谱烧孔”。基于该技术,在相同物理条件下,存储容量可提升3~6个数量级,完全满足海量信息存储需求。1993年,瑞士联邦理工学院Wild研究组在 $\text{Y}_2\text{SiO}_5:\text{Pr}^{3+}$ 晶体中探讨了“全息光谱烧孔”存储的可行性^[6];在有机二氢卟啉材料中低温光谱烧孔存储了12 000幅全息图^[7]。2000年,美国国家天文台开发了波长高度敏感的图像探测器,在液氮温度下存储太阳3D图像并对其读取再现^[8]。然而,传统光谱烧孔存储会随着环境温度的升高而出现光谱均匀线宽超线性增长问题,信息存储密度急剧降低^[9]。1988年,中国科学院长春物理研究所虞家琪研究团队提出在 BaFCl 中引入 Br^- 离子、增加非均匀线宽从而提高烧孔温度的新思想;在1989年成功制备出 $\text{BaFCl}_{0.5}\text{Br}_{0.5}:\text{Sm}^{2+}$ 混晶材料,将光谱烧孔温度从液氮(4.2 K)提高到液氮(77 K)^[10]。1991年,虞家琪研究团队进一步在 $\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{FCl}_{0.5}-$

$\text{Br}_{0.5}:\text{Sm}^{2+}$ 中进行光谱烧孔测试,部分信息在环境温度320 K时仍可保存,这一工作对高密度频域光存储应用起到了推动作用^[11]。然而,如何进一步突破低温工作局限、实现室温稳定的高密度光谱烧孔存储仍然是该领域公认的科学难题。

自2008年以来,本研究团队设计并构建了“ $\text{ZnO}(\text{TiO}_2, \text{Ta}_2\text{O}_5, \dots):\text{Ag}(\text{Au})$ ”系列微观结构单元(即功能基元),探究了该体系室温光谱烧孔和高密度全息存储的可行性;提出利用叠层氧化物空间序构拓展等离激元光谱非均匀线宽的新思想;分析了过渡金属氧化物的功函数、半导体类型对光谱烧孔的影响。特别在近期利用“过渡金属氧化物/贵金属”功能基元实现了多维高密度全息存储,构筑了抗射线破坏的全息盘片,研制了小型全息存储器,为过渡金属氧化物的高密度光存储从基础走向应用提供了有效途径。

2 局域等离激元光谱烧孔原理与实验

贵金属纳米粒子可展示出非常艳丽的颜色,当金属颗粒尺寸比环境介质中的光波长小很多时,光场电矢量激发金属颗粒自由电子产生相对于金属离子晶格的空间位移,同时表面正负电荷在颗粒体内形成局域恢复电场,由此出现自由电子的集体振荡,振荡频率通常由颗粒形状、周围介电环境和金属种类所决定^[12]。所处环境相同的全同金属颗粒可被看作是一个吸收中心,形成等离激元均匀线宽 Γ_{h} ;当不同尺寸和形状的金属颗粒集合在一起时,由于等离激元吸收线型中心位置随着颗粒尺寸、形状和环境折射率变化而移动,整体亦会叠加出新的包络线型,可称为等离激元非均匀线宽 Γ_{inh} 。若选用某一频率的激光辐照该金属颗粒混合物,则只有对应共振频率的金属颗粒自由电子产生集体振荡。当共振频率激光诱导金属颗粒发生光物理或光化学变化,使其固有的吸收中心减弱甚至消失,则整个吸收谱带在共振频率处会出现一凹陷,可称为“等离激元光谱孔”(Plasmonic spectral hole),如图1所示。这里提到的光物理变化可利用高能脉冲激光的光热效应,使贵金属颗粒熔化、形变;而光化学变化则需要考虑纳米异质界面的光氧化还原反应。过渡金属氧化物(简称 MO_x ,如 ZnO 、 TiO_2 、 Ta_2O_5 、 Nb_2O_5 等)通常具有较宽的带隙,在近紫外至可见

区透明,是可见光激励贵金属氧化还原反应的优异载体。当金属功函数大于半导体功函数时,即 $\Phi_m > \Phi_s$, 贵金属颗粒与过渡金属氧化物半导体结合形成纳尺度“肖特基界面”,并产生耗尽层(即空间电荷区)。若可见光激发等离激元热电子的跳跃能量大于或接近肖特基势垒能量高度 $q\Phi_{B0} = q(\Phi_m - X)$, 其中 X 为半导体的电子亲和势, q 为单位电荷电量,自由电子会在内建电场力

(方向从金属指向半导体)作用下漂移至氧化物导带,实现金属离子化,并完成光氧化过程;若功函数 $\Phi_m < \Phi_s$, 内建电场力方向与前者相反,同时在异质界面处形成电子陷阱,即使有可见光场激励也很难发生等离激元热电子转移和金属离子化过程。以上两种情况的能带结构如图 2 所示,由于金属离子化会使等离激元吸收中心减弱甚至消失,故选择合适功函数材料后,“过

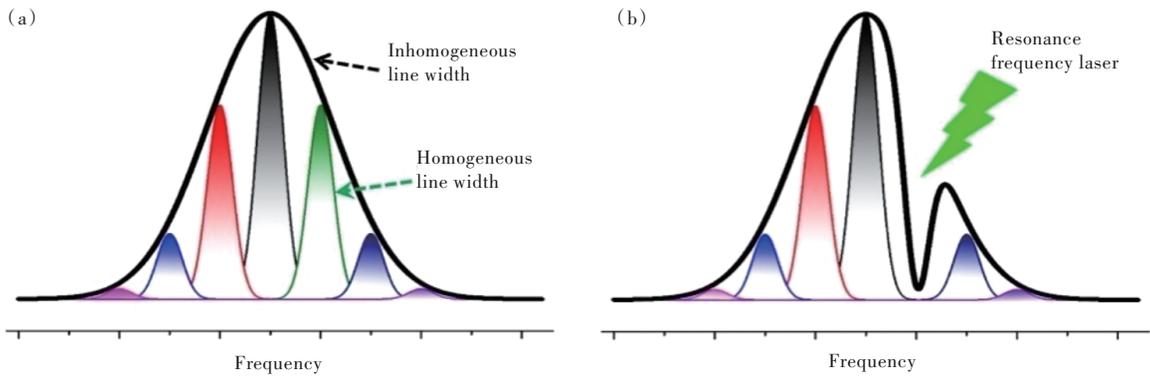


图 1 局域等离激元光谱烧孔示意图。(a)均匀加宽与非均匀加宽线型;(b)吸收中心消失引起的光谱烧孔。

Fig.1 Schematic of localized plasmon spectral hole-burning. (a) Homogeneous and inhomogeneous line width. (b) Spectral hole-burning caused by the disappearance of absorption centers.

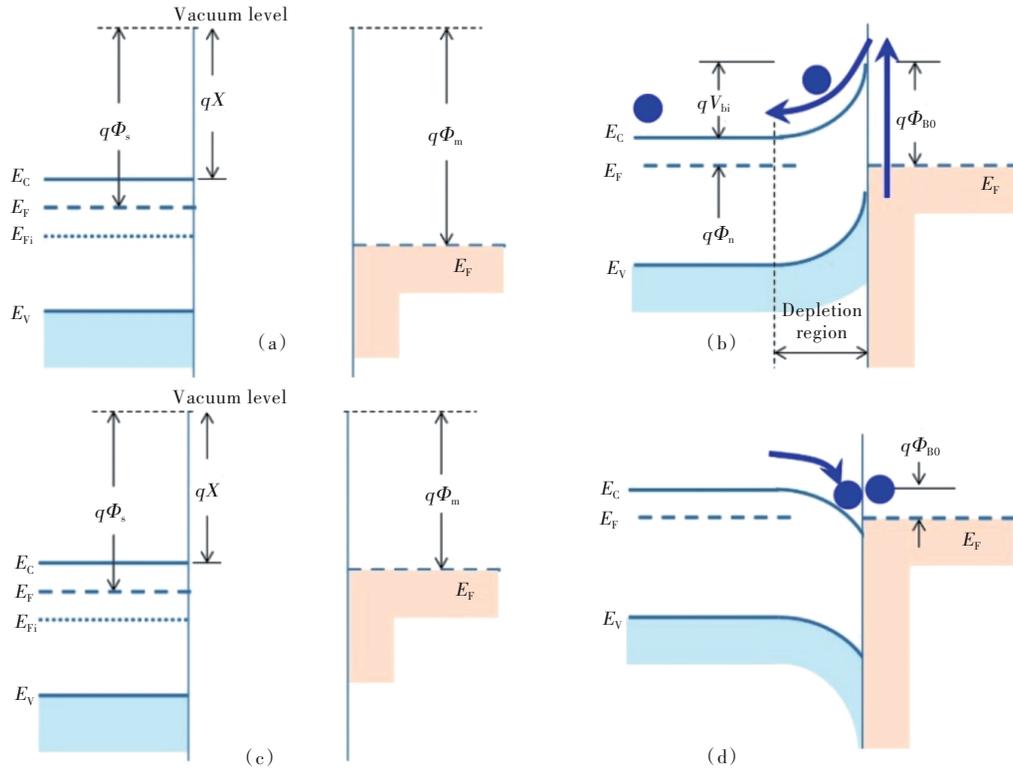


图 2 功函数 $\Phi_m > \Phi_s$ 时,接触前(a)和接触后(b)的“过渡金属氧化物/贵金属”能带图;功函数 $\Phi_m < \Phi_s$ 时,接触前(c)和接触后(d)的“过渡金属氧化物/贵金属”能带图。

Fig.2 When $\Phi_m > \Phi_s$, diagram of energy band for transition-metal-oxide/noble-metal before (a) and after (b) contacting with each other. When $\Phi_m < \Phi_s$, diagram of energy band for transition-metal-oxide/noble-metal before (c) and after (d) contacting with each other.

渡金属氧化物/贵金属”可作为理想的光谱烧孔功能基元。

我们基于以上原理进行了实验验证。选定样品测试点,确定激光辐照位置与吸收谱仪探测位置相重合。使用Perkin-Elmer Lambda 900分光光度计在350~1 200 nm范围内测量 $\text{MO}_x:\text{Ag}(\text{Au})$ 的紫外-可见吸收光谱,并监测光谱形状随激发时间的变化,如图3(a)所示。以初始时刻的吸收谱带为参照曲线,获得差分吸收光谱。全息记录的光学设置如图3(b)所示,写入光源采用可见区单纵模激光器(如403.4,473,532,589 nm等),利用分束器获得两束功率密度近乎相同($\sim 70 \text{ mW}/\text{cm}^2$,

线/圆偏振)的写入光,光束夹角 θ 固定为 5.5° 。选择红色激光器(671 nm , $7 \text{ mW}/\text{cm}^2$, s偏振)作为读出光源,垂直入射于样品表面,监测全息光栅一阶衍射信号的实时动力学过程。考虑菲涅耳损耗,全息光栅衍射效率定义为一阶衍射光强与透过样品的探测光强之比。此外,将其中一束写入光通过空间滤波器和扩束器进行准直,并利用掩模版调制形成物光,最终聚焦在 $\text{MO}_x:\text{Ag}(\text{Au})$ 纳米复合膜上,与参考光束汇聚至同一点。通过CMOS摄像机收集自衍射图像数据,以此监测全息重构过程。实验中的温度为300 K,相对湿度为25%。

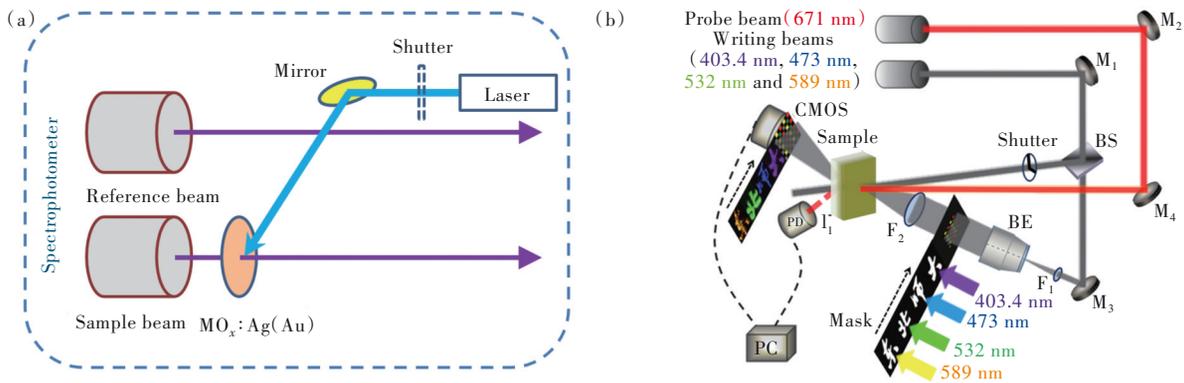


图3 (a)等离激元光谱烧孔测试示意图;(b)全息存储与再现光路。

Fig.3 (a)Schematic of plasmonic spectral hole-burning test. (b)Optical setup for holographic data storage and reconstruction.

进一步分析 $\text{MO}_x:\text{Ag}(\text{Au})$ 功能单元的光谱烧孔性能,利用物理溅射法或化学热还原法在氧化物基质中获得 $\text{Ag}(\text{Au})$ 纳米粒子,颗粒尺寸分布一般在1~50 nm之间,光谱非均匀线宽可覆盖近紫外-可见-近红外区域(约400~900 nm)^[13]。以 $\text{ZnO}:\text{Ag}$ 为例,因 ZnO 基质的光吸收范围恰与 Ag 等离激元共振吸收范围相分离,当可见-近红外区的窄线宽激光辐照 $\text{ZnO}:\text{Ag}$ 复合薄膜时,只有特定尺寸和形状的 Ag 纳米颗粒受到光激励作用而产生等离激元热电子。如图4(a)所示,由于 ZnO 天然的N型导电特性,其与纳米 Ag 接触后易形成纳尺度“肖特基界面”,且界面电场力对热电子的作用方向是从金属指向半导体,在光场、等离激元、肖特基界面的协同作用下,热电子向氧化物转移,与环境中的 O_2 结合形成氧离子;同时纳米 Ag 离子化,生成 Ag_2O ,使得共振频率处的吸光度降低,形成等离激元光谱烧孔,如图4(b)所示。通过高分辨电镜可以清晰地观测到纳米银颗粒与过渡金属氧化物

半导体的异质界面,如图4(c)、(d)所示。值得注意的是,贵金属等离激元的谐振能量(eV量级)远高于室温热激活能($K_{\text{BT}} \approx 0.026 \text{ eV}$);同时, ZnO 导带电子由于肖特基势垒作用不能还原金属离子,因而环境温度对 $\text{ZnO}:\text{Ag}$ 光学性质不产生明显影响,这一特性使得 $\text{ZnO}:\text{Ag}$ 具有优异的室温光谱烧孔能力。此外,我们对氧化物(MO_x)半导体类型在等离激元光谱烧孔中的作用也进行了比对分析。当选用 TiO_2 、 Nb_2O_5 、 WO_3 等N型衬底时,可以观测到与 ZnO 基质调制过程类似的光谱烧孔现象;而当换成P型衬底 NiO 时,光谱烧孔被完全抑制,此时的金属/半导体界面形成了电子陷阱,氧化物半导体的电子传输过程受限,无法实现贵金属纳米颗粒的光氧化反应;选用 SiO_2 衬底同样无法实现光谱烧孔,这与氧化物带隙过大有关。这一系列实验证实了改变过渡金属氧化物的功函数和禁带宽度能够有效调节贵金属等离激元光谱烧孔过程^[14]。

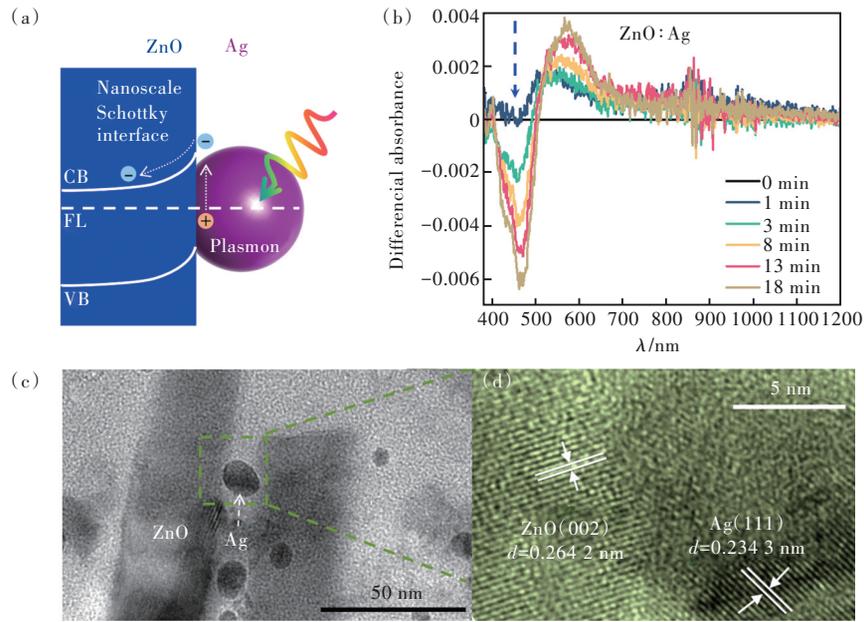


图 4 (a)ZnO:Ag 纳尺度肖特基界面电子转移; (b)ZnO:Ag 纳米复合膜的光谱烧孔动力学曲线^[14]; ZnO:Ag 纳尺度异质界面 TEM 图 (c) 及高分辨 TEM 图 (d)^[15]。

Fig.4 (a)Electron transfer at nanoscale Schottky interface of ZnO:Ag. (b)Spectral hole-burning dynamics of ZnO:Ag nanocomposite films^[14]. TEM (c) and high-resolution TEM (d) images of ZnO:Ag nanoscale heterogeneous interfaces^[15].

3 讨论与展望

光谱烧孔的孔宽、孔深、不同孔间的相互串扰直接影响全息存储密度和存储效率。对于 MO_x :Ag(Au) 纳米复合体系, 可从氧化物半导体物性调控、局域表面等离子共振角度出发, 增强光谱烧孔存储性能。在信息存储密度方面, 考虑氧化物介电环境对纳米 Ag 局域态电子振荡频率的调制作用, 设计“过渡金属氧化物/贵金属”功能基元的空间序构, 如构建“ $\cdots Ag/MO_x/SiO_2/Ag/MO_x \cdots$ ”或“ $\cdots Ag/MO_x/SiO_2/Au/MO_x \cdots$ ”叠层结构, 氧化物的

物理空间间隔以及 Ag、Au 颗粒的交错排布能够有效屏蔽 Ag 纳米颗粒的相互融合, 从而抑制不同共振频率处的光谱烧孔串扰。此外, 还可形成 Ag 包裹 Au 的核壳结构, 利用 Ag 纳米颗粒在可见区、Au 纳米棒在红外区的光学特性拓展等离子共振可见-近红外全谱带的共振吸收能力; 利用 MO_x 与 SiO_2 介电常数的差异性, 进一步拓展光谱非均匀线宽。基于以上考虑, 单一空间点位烧孔数量会明显增加, 存储密度将提高 1~2 个数量级 (图 5)。此外, Ag 纳米颗粒具有尺寸依赖的费米能级 (氧化-还原电位), 这会影响 Ag 纳米颗粒光化学溶解的热

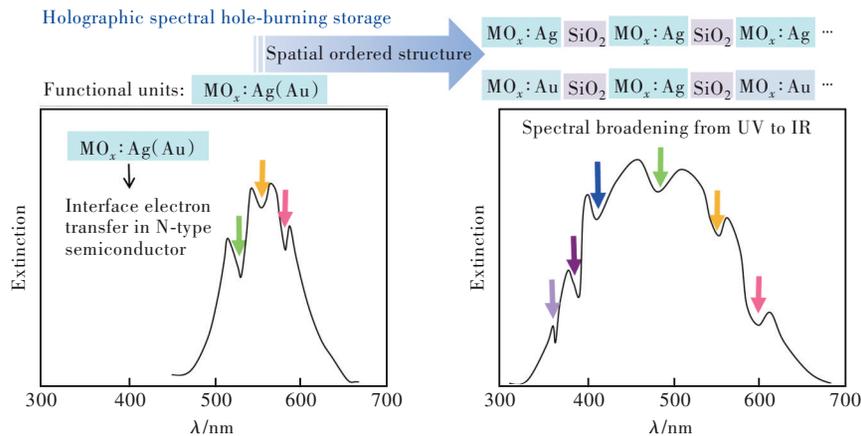


图 5 基于 MO_x :Ag(Au) 功能基元空间序构的光谱烧孔存储密度提升策略

Fig.5 Strategy for improving the density of spectral hole-burning storage based on orderly arrangement of functional units of MO_x :Ag(Au)

力学与动力学过程,表现为光谱烧孔速度的变化。肖特基界面势垒高度随着颗粒尺寸的减小呈现出非线性下降的趋势,几个纳米尺寸的Ag颗粒会被更快地氧化,表现为电子供体特性;而超过10 nm的大尺寸Ag颗粒接收电子能力逐渐增强,烧孔和存储速度变慢。为此,我们发展了氧化物衬底原位化学热还原法,获得了尺寸小于5 nm、分布均一的Ag颗粒,为快速全息存储提供了新途径^[16]。

同时,我们也发现,TiO₂作为间接带隙半导体具有更为优异的等离子体热电子传递能力,故氧化物半导体的能带结构及相关电子-空穴复合过程也会对光谱烧孔效率产生影响。针对紫外线辐照下MO_x:Ag体系的光信息擦除问题,我们设计并构筑了“MO_x/受主分子/Ag”多界面复合膜,成功阻断了贵金属离子的还原路径,发展出抗紫外线、抗X射线擦除的新型高密度永久全息存储体系^[17]。进一步地,基于等离子体对光场电矢量和波长的依赖特性,实现了波长、偏振和轨道角动量

调制的多维复用高密度全息存储^[13,18-19]。为了推进光谱烧孔型全息存储的实用化,我们通过优化丝网印刷技术和退火工艺,制备了外径8 cm的等离子体全息存储光盘(图6(a)),其数据读取速度可达1 GB/s,存储密度达到50 GB/cm²,单片存储容量5 TB,是普通DVD的1 000倍,最高容量接近PB量级。通过活化等离子体记录层和功能化修饰,存储效率和全息图读取稳定性得到了大幅提升,全息信号的空间波动率降低至3%以下,实现了良好的空间点位寻址和全息存取^[20]。在此基础上,我们开发了与光谱烧孔型全息光盘适配的小型化全息存储器^[21]。在50 cm×40 cm×10 cm空间内,建立了可见区(400~720 nm)多频同轴全息记录模块、X-Y平移/旋转可调谐的电控机械寻址模块和全息图实时采集模块(图6(b)、(c))。该系统与国外同类产品相比,具有更为优异的多波长全息存储和读取能力,为真三维、全彩色全息数据处理提供了优异平台。

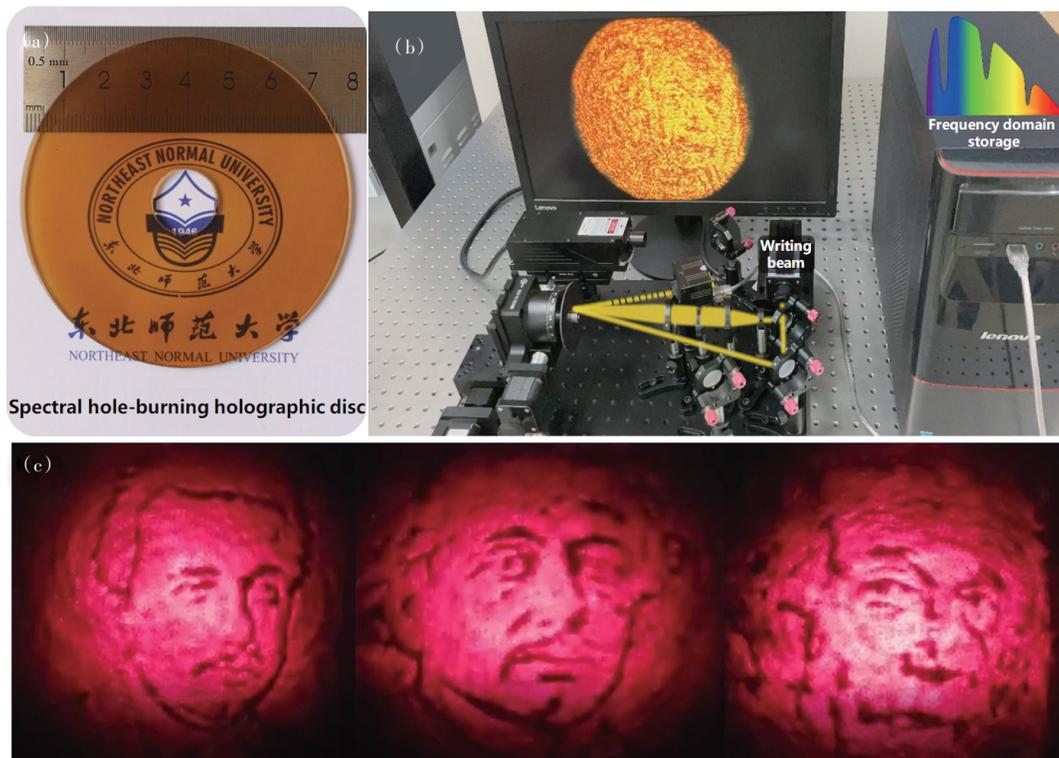


图6 (a)光谱烧孔型全息光盘原型;(b)小型化全息存储器;(c)红光读取下的全息图再现。

Fig.6 (a) Prototype of spectral hole-burning holographic disc. (b) Compact-type holographic memory device. (c) Hologram reconstruction read by a red laser light.

4 结 论

本文针对传统光谱烧孔中的低温工作局限,

提出并实现了“过渡金属氧化物/贵金属”功能基元的室温稳定光谱烧孔。系统阐述了局域等离子体光谱烧孔的形成原理和影响因素,特别提出

通过构建“ $\text{MO}_x:\text{Ag}(\text{Au})$ ”功能基元序构拓展光谱非均匀线宽、提高存储密度的新思想。同时也介绍了我们近期在大面积光谱烧孔型全息光盘和小型化全息存储器方面的工作进展。本文回顾并展示的系列工作拓展了过渡金属氧化物功能薄膜的应用领域,为宽禁带半导体的光发射——

光存储集成微纳器件研制提供了工作基础和发展思路。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230086>.

参 考 文 献:

- [1] LYNCH C. How do your data grow? [J]. *Nature*, 2008, 455(7209): 28-29.
- [2] PASTORIZA-SANTOS I, KINNEAR C, PÉREZ-JUSTE J, *et al.* Plasmonic polymer nanocomposites [J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2018, 3(10): 375-391.
- [3] KHARLAMOV B M, PERSONOV R I, BYKOVSKAYA L A. Stable ‘gap’ in absorption spectra of solid solutions of organic molecules by laser irradiation [J]. *Opt. Commun.*, 1974, 12(2): 191-193.
- [4] CASTRO G, HAARER D, MACFARLANE R M, *et al.* Frequency selective optical data storage system: US, 04101976 (A) [P]. 1978-07-18.
- [5] BRUDER F K, HAGEN R, RÖLLE T, *et al.* From the surface to volume: concepts for the next generation of optical-holographic data-storage materials [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2011, 50(20): 4552-4573.
- [6] HOLLIDAY K, CROCI M, VAUTHEY E, *et al.* Spectral hole burning and holography in an $\text{Y}_2\text{SiO}_5:\text{Pr}^{3+}$ crystal [J]. *Phys. Rev. B*, 1993, 47(22): 14741-14752.
- [7] PLAGEMANN B, GRAF F R, ALTNER S B, *et al.* Exploring the limits of optical storage using persistent spectral hole-burning: holographic recording of 12 000 images [J]. *Appl. Phys. B*, 1998, 66(1): 67-74.
- [8] KELLER C U. 5 000 by 5 000 spatial by 15 000 spectral resolution elements: first astronomical observations with a novel 3-D detector [C]. *Imaging the Universe in Three Dimensions: Astrophysics with Advanced Multi-wavelength Imaging Devices, Walnut Creek*, 1999: 495-500.
- [9] FUJITA K, OHASHI Y, HIRAO K. Room-temperature grating-based morphological hole burning in Sm^{2+} -doped glass powders [J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28(7): 567-569.
- [10] WEI C J, HUANG S H, YU J Q. Two-photon hole burning and fluorescence-line-narrowing studies on $\text{BaFCl}_{0.5}\text{Br}_{0.5}:\text{Sm}^{2+}$ at 77 K [J]. *J. Lumin.*, 1989, 43(3): 161-166.
- [11] 张家骅,黄世华,虞家琪. 室温下的永久性光谱烧孔 [J]. *发光学报*, 1991, 12(2): 181-182.
ZHANG J H, HUANG S H, YU J Q. Persistent hole burning at room temperature [J]. *Chin. J. Lumin.*, 1991, 12(2): 181-182. (in Chinese)
- [12] KELLY K L, CORONADO E, ZHAO L L, *et al.* The optical properties of metal nanoparticles: the influence of size, shape, and dielectric environment [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2003, 107(3): 668-677.
- [13] HAN X X, FU S C, ZHANG X T, *et al.* Selective photo-oxidation induced bi-periodic plasmonic structures for high-density data storage [J]. *Appl. Opt.*, 2017, 56(28): 7892-7897.
- [14] FU S C, SUN S Y, ZHANG X T, *et al.* Environment-dependent photochromism of silver nanoparticles interfaced with metal-oxide films [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2015, 357: 2048-2054.
- [15] LI N, LI X, ZHANG M Y, *et al.* Emerging of Ag particles on ZnO nanowire arrays for blue-ray hologram storage [J]. *Chin. Phys. B*, 2022, 31(3): 036101-1-6.
- [16] FU S C, ZHANG X T, HAN Q, *et al.* Blu-ray-sensitive localized surface plasmon resonance for high-density optical memory [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6(1): 36701-1-8.
- [17] LIU S Y, FU S C, ZHANG X T, *et al.* UV-resistant holographic data storage in noble-metal/semiconductor nanocomposite films with electron-acceptors [J]. *Opt. Mater. Express*, 2018, 8(5): 1143-1153.
- [18] WANG X N, FU S C, ZHANG X T, *et al.* Visible laser-assisted reduction of plasmonic Ag nanoparticles with narrow-band optical absorption for colored holographic reconstruction [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(25): 31253-31262.
- [19] MIAO J Y, FU S C, LI X, *et al.* Polarization-vortex holographic encryption based on photo-oxidation of a plasmonic disk

- [J]. *Opt. Lett.*, 2022, 47(16): 4127-4130.
- [20] WANG Y Q, LI X, FU S C, *et al.* Nondestructive readout of holographic memory in Ag/TiO₂ heterojunction *via* carbon-dots and hydrogel co-modification [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2021, 118(14): 141601-1-5.
- [21] 刘益春, 李鑫, 苗景迎, 等. 一种室温光谱烧孔型全息存储器: 中国, 202221513591.9 [P]. 2022-10-04.
LIU Y C, LI X, MIAO J Y, *et al.* A holographic memory device with room-temperature spectral hole burning capability: CN, 202221513591.9 [P]. 2022-10-04. (in Chinese)



付申成(1979-),男,吉林省吉林市人,博士,教授,博士生导师,2010年于长春理工大学获得博士学位,主要从事光全息技术、光致变色功能材料与器件的研究。

E-mail: fusc515@nenu.edu.cn



刘益春(1962-),男,吉林辉南人,博士,教授,博士生导师,中国科学院院士,1995年于中国科学院长春物理研究所与意大利都灵工业大学联合培养获得博士学位,主要从事氧化物半导体光电功能材料与器件的研究。

E-mail: ycliu@nenu.edu.cn

副主编简介:

刘益春,《发光学报》副主编,教授/博士生导师,中国科学院院士。第七届教育部科技委数理学部委员,国务院学位委员会第八届学科评议组成员,国际发光会议(ICL)程委会委员(2020大会主席),国际II-VI族化合物材料会议顾委会委员,中国科学院BR计划,国家杰出青年科学基金获得者,教育部跨世纪优秀人才。1985年7月毕业于东北师范大学物理学院(原物理系),获理学学士学位;1988年6月毕业于中国科学院长春物理研究所凝聚态物理专业,获理学硕士学位;1995年12月于中国科学院长春物理研究所与意大利都灵工业大学联合培养凝聚态物理专业博士研究生毕业,获理学博士学位;曾在吉林大学化学系、日本九州大学先端科学技术研究中心做博士后。主要从事氧化物半导体光电功能材料与器件研究。