

功能晶体材料的光学性能优化

廖睿琦

福建师范大学海峡柔性电子学院, 福建福州, 350000;

摘要: 功能晶体材料在光学领域应用广泛, 其光学性能优化至关重要。本文聚焦功能晶体材料光学性能优化, 探讨优化方法与策略。从晶体结构设计、掺杂改性、表面处理等方面入手, 分析各因素对光学性能的影响。旨在为提升功能晶体材料光学性能提供理论参考, 推动其在光学器件等领域的高效应用, 促进相关产业的发展与创新。

关键词: 功能晶体材料; 光学性能; 优化

DOI: 10.69979/3029-2727.26.04.065

引言

功能晶体材料凭借独特光学特性在光学仪器、光通信等领域占据重要地位。随着科技发展, 对其光学性能要求不断提高。优化功能晶体材料光学性能可提升光学器件性能与效率, 推动光学技术进步。目前虽已有相关研究, 但仍存在诸多问题待解决。因此, 深入研究功能晶体材料光学性能优化具有重要的理论和实际意义, 能为光学行业发展注入新动力。

1 晶体结构调控

1.1 晶格参数调整

晶格参数调整是功能晶体材料光学性能优化的核心手段, 契合国内功能晶体高质量发展需求, 通过精准调控晶胞的边长、夹角等参数, 优化晶体的光学跃迁特性与光子传输效率。国内科研团队已形成成熟的调控技术, 依托“晶格传质-界面生长”等自主首创范式, 通过调整生长温度、压力及组分比例, 实现晶格参数的精准调控。例如, 中科院新疆理化所通过调控氟硼酸盐晶体的晶格参数, 使晶体紫外截止边低于 180nm, 倍频效应达到 KH_2PO_4 的 1.6 倍, 适配深紫外光学应用需求。

1.2 晶面取向控制

晶面取向控制是优化功能晶体光学性能的关键路径, 立足国内功能晶体应用场景需求, 通过调控晶体生长方向, 使晶体特定晶面择优取向, 强化目标光学性能。国内科研机构通过改进晶体制备工艺, 实现晶面取向的精准控制, 如采用高精度原位转角叠层技术, 通过“拧魔方”式的堆叠方式, 使各层晶体协同作用, 提升激光输出效率。例如, 中科院物理所通过调控 WS_2 晶体的晶面取向, 制备出非中心对称的 1M- WS_2 晶体, 其二次谐波系数高达 2362pm/V, 远超传统二维材料。晶面取向控制可优化晶体的光学各向异性, 增强特定波段的光吸收、发射或折射性能, 适配非线性光学、光电探测

等领域需求, 推动国内功能晶体向高性能、定制化方向发展。

1.3 晶体缺陷工程

晶体缺陷工程是平衡功能晶体光学性能与稳定性的核心技术, 契合国内功能晶体产业化应用需求, 通过精准调控缺陷类型、密度与分布, 减少缺陷对光学性能的负面影响, 同时赋予晶体特殊光学功能。国内科研团队通过优化晶体制备工艺, 如“顶竹笋”式生长法, 有效减少杂质及缺陷积累, 实现原子级平整的高质量晶体制备。针对稀土掺杂晶体, 通过缺陷调控可优化离子发光效率, 南开大学团队通过调控钙钛矿氧化物薄膜的缺陷分布, 使稀土离子上转换发光强度提升近 6 倍。合理的缺陷工程可抑制光子非辐射复合, 提升晶体的发光效率与光学均匀性, 解决国内高端功能晶体缺陷过多导致性能衰减的难题, 推动晶体在光电子器件中的规模化应用。

2 掺杂技术应用

2.1 杂质种类选择

杂质种类选择是掺杂技术优化功能晶体光学性能的基础, 契合国内稀土资源战略利用与功能晶体研发需求, 需结合晶体基质特性与目标光学功能, 筛选适配性强的掺杂离子。国内科研聚焦稀土离子掺杂研究, 利用稀土元素独特的 4f 电子结构, 实现晶体光学性能的精准调控, 如南开大学团队选用 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 、 Mn^{2+} 等离子掺杂钙钛矿氧化物, 有效增强上转换发光性能。针对非线性光学晶体, 掺杂特定离子可拓展光学响应波段, 中科院新疆理化所通过掺杂功能离子, 优化氟硼酸盐晶体的深紫外光学性能。杂质种类选择需兼顾相容性与功能性, 避免引入有害杂质导致晶体性能劣化, 助力国内功能晶体在照明、生物医学、量子计算等领域的应用突破。

2.2 掺杂浓度优化

掺杂浓度优化是提升功能晶体光学性能的关键,契合国内功能晶体精细化研发趋势,通过调控杂质离子浓度,平衡晶体的光学响应强度与均匀性,避免浓度过高或过低导致性能衰减。国内科研团队通过大量实验,建立掺杂浓度与光学性能的关联模型,实现浓度的精准调控。例如,在稀土掺杂钙钛矿薄膜中,过低浓度会导致发光强度不足,过高浓度则会引发浓度猝灭效应,南开大学团队通过优化 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 掺杂浓度,使上转换发光强度达到最优。掺杂浓度优化需结合晶体基质的结构特性与应用场景,如激光晶体需控制掺杂浓度以提升激光输出功率,光电探测晶体则需优化浓度以增强光响应灵敏度,推动国内功能晶体向高性能、高稳定性方向发展。

2.3 掺杂方式改进

掺杂方式改进是推动功能晶体光学性能升级的重要支撑,契合国内功能晶体制备技术创新需求,通过优化掺杂工艺,提升杂质离子的分散均匀性,减少团聚现象,强化掺杂效果。国内科研机构不断创新掺杂方式,开发出外延生长掺杂、离子注入掺杂、核壳结构掺杂等多种先进工艺,如南开大学团队采用三明治型核壳结构设计,将敏化剂、蓄能剂、激活剂空间分离,有效增强稀土上转换发光。离子注入掺杂可实现杂质离子的精准定位,适配微纳光学晶体的掺杂需求,而溶液法掺杂则降低制备成本,适配规模化生产。

3 表面处理方法

3.1 表面涂层工艺

表面涂层工艺是优化功能晶体光学性能的重要手段,契合国内光学材料表面改性技术发展需求,通过在晶体表面制备功能性涂层,减少表面反射损耗,提升光透过率与环境稳定性。国内科研团队聚焦涂层材料与工艺创新,开发出钙钛矿增透膜等新型涂层,其透光率可超过 99%,宽光谱增透特性适配多领域应用,有望打破国外技术垄断。涂层材料需与晶体基质匹配,如在非线性光学晶体表面制备抗反射涂层,可减少光反射损耗,提升二次谐波转换效率;在稀土发光晶体表面制备保护层,可防止离子氧化,延长晶体使用寿命。

3.2 表面粗糙度控制

表面粗糙度控制是提升功能晶体光学性能的基础环节,契合国内功能晶体精细化制备需求,通过优化表面抛光、研磨工艺,降低晶体表面粗糙度,减少光子散射损耗,提升光学均匀性。国内科研机构采用高精度抛光技术,将晶体表面粗糙度控制在纳米级别,有效减少光散射,提升光透过率与发光效率。例如,在激光晶体

表面处理中,降低粗糙度可减少激光传输过程中的能量损耗,提升激光输出功率;在光电探测晶体中,光滑表面可减少光反射,增强光吸收效率。

3.3 表面化学修饰

表面化学修饰是拓展功能晶体光学功能的重要途径,契合国内功能晶体多功能化发展需求,通过化学改性改变晶体表面的化学组成与电子结构,优化光学性能与界面相容性。国内科研团队通过表面接枝、氧化还原等修饰方法,实现晶体光学性能的精准调控,如中科院物理所通过皮秒激光照射实现 WS_2 晶体的相转变与表面修饰,大幅提升其二次谐波响应。针对钙钛矿晶体,通过表面修饰可改善其环境稳定性,减少水分与氧气对晶体结构的破坏;针对稀土发光晶体,表面修饰可优化离子发光效率,增强光学响应。表面化学修饰需兼顾修饰效果与晶体本体性能,避免损伤晶体结构,推动国内功能晶体向多功能、高稳定性方向发展,拓展其在微纳光学器件中的应用场景。

4 外界条件影响

4.1 温度效应研究

温度效应研究是功能晶体光学性能优化的重要前提,契合国内功能晶体多场景应用需求,通过探究温度变化对晶体光学性能的影响,为晶体的应用场景适配与性能优化提供理论支撑。国内科研团队聚焦不同温度区间的性能变化规律,发现温度升高会导致晶体晶格热振动加剧,引发光吸收增强、发光效率下降等问题,如稀土掺杂钙钛矿薄膜在高温下会出现有机阳离子挥发,导致发光性能衰减。通过低温冷却技术可抑制热振动,提升晶体的光学稳定性,适配高端激光器件的低温工作需求;通过高温改性处理,可提升晶体的耐高温性能,拓展其在航空航天等极端环境中的应用。

4.2 压力作用分析

压力作用分析是功能晶体光学性能调控的重要方向,契合国内高压光学材料研究趋势,通过施加外部压力,调控晶体晶格结构与电子态,实现光学性能的可逆调控。国内科研团队利用高压技术,实现功能晶体光学性能的精准调控,如通过施加压力改变钙钛矿晶体的晶格参数,优化稀土离子的发光强度与光谱特性,南开大学团队通过施加面内拉伸应力,使稀土掺杂钛酸锶薄膜上转换发光强度提升约 4 倍。压力作用可诱导晶体发生相转变,如中科院物理所通过压力调控实现 WS_2 晶体的相转变,赋予其优异的非线性光学性能。

4.3 电场磁场影响

电场磁场影响研究是功能晶体光学性能优化的创新方向,契合国内光电器件智能化发展需求,通过施加电场或磁场,调控晶体的光学各向异性与光子传输特性,实现光学性能的动态调控。国内科研团队在电场调控方面,利用挠曲电效应,通过施加电场破坏晶体反演对称性,增强稀土掺杂晶体的发光性能;在磁场调控方面,通过磁场调控晶体中离子的能级分裂,优化发光光谱与光响应速度。例如,在非线性光学晶体中,施加电场可调控二次谐波转换效率,适配光通信中的信号调制需求;在磁光晶体中,施加磁场可实现光的偏振态调控,用于光隔离器等器件。电场磁场调控具有可逆性、精准性优势,为国内功能晶体在智能光电器件中的应用提供新路径。

5 性能测试与表征

5.1 光学参数测量

光学参数测量是功能晶体光学性能优化的核心环节,契合国内功能晶体研发与产业化需求,通过精准测量晶体的透光率、折射率、发光强度、二次谐波系数等关键参数,为性能优化提供数据支撑。国内已建立完善的光学参数测量体系,依托紫外-可见分光光度计、荧光光谱仪、椭偏仪等精密设备,实现参数的精准测量,如中科院物理所通过角分辨拉曼散射测试,表征1M-WS₂晶体的振动模式与光学特性。测量过程需严格控制测试环境,避免温度、湿度等因素影响测量精度,针对不同类型晶体制定专属测量方案,如深紫外晶体需采用真空测量环境,避免空气吸收影响测试结果。精准的光学参数测量是功能晶体性能优化、质量管控的重要保障,推动国内功能晶体向标准化、高端化发展。

5.2 微观结构分析

微观结构分析是功能晶体光学性能优化的重要支撑,契合国内功能晶体精细化研发需求,通过分析晶体的晶格结构、缺陷分布、掺杂离子分散状态等微观特征,揭示微观结构与光学性能的内生关联。国内科研机构采用球差电镜、透射电子显微镜、X射线衍射等先进设备,实现晶体微观结构的精准表征,如中科院物理所通过球差电镜观察1M-WS₂晶体的原子堆垛结构与键长畸变,阐明其高二次谐波响应的微观机制。微观结构分析可发现晶体存在的缺陷与结构不均问题,为晶体结构调控、掺杂方式改进提供方向,如通过分析缺陷分布,优化晶

体制备工艺,减少缺陷积累。国内已形成“微观结构-光学性能”的关联研究体系,为功能晶体光学性能的精准优化提供理论与技术支撑。

5.3 性能稳定性评估

性能稳定性评估是功能晶体产业化应用的关键前提,契合国内功能晶体市场化发展需求,通过模拟不同应用场景的环境条件,评估晶体光学性能的长期稳定性与可靠性。国内科研团队围绕温度、湿度、光照、机械弯折等环境因素,开展稳定性测试,如南开大学团队测试发现,自支撑稀土掺杂钛酸锶薄膜经10⁴次弯折后仍保持良好发光性能。针对钙钛矿等稳定性较差的晶体,通过稳定性评估优化表面处理工艺与封装技术,提升其环境适应性;针对激光晶体,通过长期稳定性测试,评估其激光输出功率的衰减规律,优化晶体结构与制备工艺。

6 结束语

功能晶体材料光学性能优化是一个多学科交叉的复杂课题。通过对晶体结构调控、掺杂技术应用、表面处理等方面的研究,我们在提升其光学性能上取得了一定进展。未来,需进一步深入探索各因素间的相互作用机制,结合先进技术不断创新优化方法。持续的研究将为功能晶体材料在更多领域的应用提供坚实基础,有望推动光学产业迈向新的高度,为科技发展和社会进步贡献力量。

参考文献

- [1] 江朔. 基于氟化策略制备新型短波激光医学光学功能晶体材料及其抑菌应用探索[D]. 新疆农业大学, 2025.
- [2] 曾志超, 杜亚平. 稀土卤化物光学电学功能晶体材料开发及应用探索[C]//中国稀土学会. 中国稀土学会2024学术年会摘要集. 天津市稀土材料与应用重点实验室南开大学稀土与无机功能材料研究中心南开大学材料科学与工程学院, 2024: 221.
- [3] 蔡冰洁. 镉基功能晶体材料的合成及其非线性光学性能研究[D]. 河北大学, 2024.
- [4] 董晓飞. 新型碲酸盐光电功能晶体的生长与性能研究[D]. 山东大学, 2024.
- [5] 高冬. 中红外镉基混合阴离子光功能晶体合成及性能研究[D]. 天津理工大学, 2024.