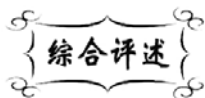


中图分类号: TN244  
文献标识码: A

文献编号: 1005-1198 (2020) 03-0121-13  
DOI: 10.16253/j.cnki.37-1226/tq.2020.03.001



## 智能化高能激光防护材料新进展

郑佳艺<sup>1,2</sup>, 马 壮<sup>1,2</sup>, 高丽红<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>北京理工大学 材料学院, 北京 100081

<sup>2</sup>冲击环境材料技术国家级重点实验室, 北京 100081

**摘要:** 激光技术的不断进步, 尤其是在军事领域的实战化应用, 使得针对高能激光的防护要求不断提高。本文首先介绍了高能激光武器在未来战争中的重要地位, 总结分析了激光隐身和高能激光防护材料的研究进展, 提出兼具激光隐身和防护功能的智能化激光隐身材料是未来激光防护材料的发展趋势和方向。之后, 详细阐述了智能化激光防护材料的防护思路, 并按防护机理梳理了现阶段具有智能化激光防护特征的材料体系和防护结构, 分别分析了其优缺点及发展方向。目前智能化激光防护材料的研究尚在起步阶段, 尚未能有一种已知材料体系可以满足激光隐身和高能激光防护兼容的需求, 针对新材料的开发刻不容缓。因此, 本文对智能化激光防护材料的发展趋势也进行了预测和探讨。

**关键词:** 激光防护; 智能化; 激光隐身

## Development of Intelligent Anti-High Power Laser Materials

ZHENG Jia-Yi<sup>1,2</sup>, MA Zhuang<sup>1,2</sup>, GAO Li-Hong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Material Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

<sup>2</sup>National Key Laboratory of Science and Technology on Materials under Shock and Impact, Beijing 100081, China

**Abstract:** With the rapid development of laser technology, especially its practical applications in the military, the requirements of high power laser protection should be improved. Based on a brief overview on the essential position of high power laser weapon in future warfare and the research progress of laser stealth materials as well as anti-high power laser materials, a new laser protection idea, called intelligent laser protection, which can both realize laser stealth and anti-laser functions, was proposed in this paper and this method is believed to be the developing trend and direction of anti-laser materials in the future. Then the protection idea of intelligent laser protection materials was elaborated and the material systems which have intelligent laser protection characteristics were combed according to their protection mechanisms. Their advantages and

收稿日期: 2020-03-21

第一作者: 郑佳艺 (1993 -), 女, 山东淄博人, 博士研究生。E-mail: 3120170581@bit.edu.cn。

通讯作者: 高丽红 (1984 -), 女, 吉林白山人, 副教授。E-mail: gaolihong@bit.edu.cn。

disadvantages are also analyzed respectively. It was pointed out that the research of intelligent laser protective materials is still in its infancy, and there is not a known material system that can meet the needs of laser stealth and anti-high-energy laser compatibility. So the exploration of new materials is urgent. Finally, the development trend of intelligent laser protective materials was predicted.

**Keywords:** Anti-laser; Intelligence; Laser stealth

激光是通过受激辐射产生的光放大, 是通过刺激原子导致电子跃迁释放辐射能量而产生的具有同调性的增强光子束, 是 20 世纪以来继核能、电脑、半导体之后人类的又一重大发明。激光表现出的高亮度、高相干性和低发散性, 使得激光束很容易在很长的距离上以极高功率聚焦到非常小的点上。因此, 早在第一台红宝石激光器问世时期<sup>[1]</sup>, 人们就设想将这种“精度高、光速杀伤、威力巨大、作战方式灵活”的“光弹”作为打击武器, 民用和军事应用的激光技术的升级和突破一直站在全世界科学研究的最前沿。随着军事技术的发展, 诸如导弹、高超声速飞行器等新型武器相继投入实战, 现有武器手段基本失去预警与拦截的响应时间, 而战术激光武器是应对这些威胁的有效手段、重要选项和发展方向。战术激光武器以万瓦以上的高能激光作为“光弹”, 直接安放在飞机、舰船和车辆等运输载体上, 直接打击数公里外的无人机、炮弹、导弹等军事目标。

目前世界各国都非常重视高能激光武器方面的研究, 美、俄等军事强国的激光武器已实现战略威慑能力<sup>[2,3]</sup>。日本、德国和英国等国家也陆续开展激光武器的相关研究, 并相继进入实战阶段。激光武器的实战应用对空天飞行器的安全构成了严重威胁<sup>[4-7]</sup>。

激光武器主要分为两大类:

(1) 以激光束作为信息载体的各种激光探测雷达。激光雷达是以向目标发射激光束, 然后将接收反射回来的信号与发射信号进行比较获得目标位置和运动状态等参数, 对目标进行探测、跟踪和识别。具有分辨率高、隐蔽性好、体积小、重量轻、抗干扰能力强和低空探测性能好的优势, 在西方发达国家已经投入使用;

(2) 以激光束为能量载体的各种激光武器。激光武器是利用高能的定向发射激光束对远距离目标进行精确打击直接毁伤目标或使之失效的定向能武器。在使用中具有光速杀伤、高精度大、转移火力快、抗电磁干扰弹仓和单发成本低等, 在未来的战场中将成为重要的空间攻防武器。

随着高能激光武器和激光雷达探测技术的日益成熟, 一些激光武器和探测系统已达到实战应用水平, 高能激光的安全与防护形势愈发紧迫, 如何有效规避和抵抗激光武器的威胁成为目前亟待解决的问题。针对激光武器的打击威胁, 目前可以从两方面考虑规避: 一是针对激光武器中装载的激光雷达和跟瞄装置, 开发激光隐身材料, 减少靶目标被探测的风险; 二是开发激光防护材料, 抵抗高能激光的打击。

本文首先分析了激光武器的发展现状, 并针对上述两方面需求分别分析了激光隐身和激光防护材料的发展现状, 同时指出能综合应对激光雷达探测和高能激光武器且兼具激光隐身和防护功能的智能化激光防护材料是未来激光防护领域的新挑战和发展方向, 并对其未来发展趋势进行了探讨。

## 1 高能激光武器系统和雷达系统的发展现状

### 1.1 高能激光武器系统的发展现状

有关激光武器方面的研究率先从美、俄展开。早在 20 世纪 60 年代, 前苏联就开展了地基激光反星实验, 并在 1975 年和 1981 年的两次试验中取得了极大的成功。美国海军的高能激光武器计划

开始于1971年,并于1978年成功摧毁了4枚“陶”式反坦克导弹。同年,开展实施“海石”舰载激光武器计划。1994年,该计划所设计的武器系统成功拦截掠海飞行的苏制“冥河”导弹。据分析,目前该系统已实现工程化并装备部队。1991年美国陆军启动“鸚鵡螺”项目,目的在于摧毁近程火箭弹、战术弹道导弹、巡航导弹以及飞机等各种目标。1996年2月在白沙导弹靶场,该系统成功击落两枚俄制BM-21“喀秋莎”火箭弹,并于2000年成功拦截一枚携带真弹头的火箭弹,成为世界上第一个能到拦截火箭弹的高能激光系统。

进入21世纪以来,由于激光武器耗资巨大且兆瓦级激光器难以在短时间内实现小型化、机动化等因素,激光武器的对抗目标从洲际导弹逐渐转变为火箭弹等近距离目标,同时研究重点也逐渐由超大功率、大体积的战略激光器转向较低功率、小体积的战术激光武器,并在各种运载平台上开展实验和应用研究。2011年4月,美国海上激光演示系统首次从海上移动平台发射激光束,最终摧毁了1.6 km外的小艇。2012年12月,美国洛马公司研制的车载“区域反弹药防御系统”(Area Defense Anti-Munitions, ADAM)成功摧毁一发从1.6 km外飞来的火箭弹,而这个过程仅仅用了3 s。2014年,美海军将装备了30 kW舰载激光武器系统(Laser Weapon System, LaWS)的庞塞号两栖运输舰部署在波斯湾海域,历时3个月完成了击落无人机、集群攻击艇及其它小型目标的演示验证任务。2017年,雷神公司在一架阿帕奇AH-64攻击直升机上,进行了高能激光武器实验,成功锁定并击中了一个无人目标。同年,美国空军和洛马公司签订一项价值2630万美元的合同,委托后者开发搭载在AC-130空中炮艇,F-15与F-16战机上的高能激光武器,计划于2018年上机安装并测试,最迟2021年进入实测阶段。但据披露,早在2009年美军就在C-130运输机上进行了测试,发出的激光束在一辆卡车的引擎盖上烧出了一个洞,击毁了车辆发动机。预计,机载激光武器将用来拦截地空和空空导弹。而洛马公司收获的另一份军品订单显示,美海军将在2020年为阿利·伯克级驱逐舰装备舰载激光武器系统。洛马公司在2018年年会上展示的用于竞标美国海军新一代导弹护卫舰FFG(X)的方案模型的二层建筑后方平台上,首次出现了激光武器发射装置,这似乎预示着激光武器将成为美军新一代导弹驱逐舰上的标配。

一些国家近年来在激光武器研制方面的标志性进展包括:

- (1) 2007年,日本推出了“激光军团”计划,投资110亿美元;
- (2) 2012年,俄罗斯的车载和舰载2000 J大功率激光器实现了对3 km~5 km地面目标的毁伤性打击,其硬杀伤能力可击穿150 mm钢柱,目前该激光器已经列装;
- (3) 2013年,德国采用30 kW光纤激光器将1 km外的82 mm炮弹击毁,分别研发出了装载在M113履带式装甲运输车上的5 kW系统、“家犬”多用途装甲车上的20 kW系统以及Tara卡车上的5 kW系统;
- (4) 2016年,俄罗斯研发出“死亡射线”激光武器,可以摧毁约1 km范围内的敌方无人机;同年改装了A-60战斗机用于搭载激光武器;
- (5) 2017年,英国推出“火龙”计划,预计2019年生产出激光武器演示版,2020年服役;
- (6) 2018年,印度计划采购20部最大射程超过15 km的战术高能激光系统。

## 1.2 激光雷达系统的发展现状

自1964年美国率先研制成功用于导弹靶场的激光跟踪测量雷达以来,美国、英国、法国、德国、日本等先后研制了多种军用激光雷达,分别用于导弹试验鉴定、战场侦察和预警探测等。它以微波雷达原理为基础,将激光束作为新的探测信号。其工作原理为:首先向被测目标发射一束激光,然后测量反射或散射信号到达发射机的时间、信号强弱程度和频率变化等参数,从而确定被测目标的距离、运动速度以及方位。充分发挥了激光亮度高,具有良好的方向性、单色性和相干性的特点。

美国自 20 世纪 80 年代后期开始研究机载动目标指示激光雷达,用以探测低飞飞机和巡航导弹。该雷达采用连续波 CO<sub>2</sub> 激光器和外差探测技术,有效作用距离可达 40 km。在美海军和弹道导弹防御组织 (Ballistic Missile Defense Operations, BMDO) 支持下,麻省理工大学林肯实验室研制的“火池”激光雷达经多次改进,于 1990 年首次在地面实现对 800 km 模拟导弹的远距离多普勒成像。1998 年,美国为“眼镜球蛇”预警机上装备了激光测距机,对导弹的测距能力为 400 km。美国雷西昂公司正在试验使用 GaAs 激光行扫描传感器制造 ILR100 成像激光雷达,此设备可以安装在高性能飞机和无人机上,在 120 m~460 m 的高空执行侦查任务。侦查的影像可实时地传送到飞机上的阴极射线管显示器上或通过数据链路直接发送至地面接收站。

综上所述可以看出,如果说 20 世纪是激光武器和激光雷达的孕育期和成长期,那么 21 世纪将是激光武器和激光雷达的成熟期。在此期间,有一批研制多年的样机通过了外场演示试验,转入工程研制并陆续定型生产、装备使用。这些激光设备和激光武器的使用对导弹、飞机等装备系统的作战和生存能力造成了极大的威胁。因此,针对激光武器的防护技术日益引起各国的重视,在新技术和新材料上的研究已取得显著进展。

## 2 激光防护及隐身材料的发展现状

### 2.1 高能激光防护材料发展现状

针对高能激光的防护形式主要有以下几种:

(1) **烧蚀型防护**: 主要是利用高烧蚀热焓材料在激光作用下发生裂解、气化等吸热反应,大量消耗激光能量,达到保护基体材料的目的;

(2) **反射型防护**: 主体思想是利用材料对光的高反射特性,将入射激光大部分能量以反射或散射形式耗散出去,减少材料对激光能量的吸收,降低激光与材料的热耦合效应,实现激光防护目的;

(3) **隔热型激光防护**: 主要利用材料的隔热效果,延缓激光热量的纵向传递,从而避免基体发生结构性破坏;

(4) **复合型防护**: 即防护体系由上述两种或三种防护方式综合作用。

目前,国内外对高能激光防护均开展了一定的研究,并取得了较大进展。美国海军将含有铝颜料的有机硅高温涂料应用于激光防护,优异的反射性能使材料在 650°C 高温条件下起到抗激光防护作用<sup>[8]</sup>。Milling 等人<sup>[9]</sup>利用金属铝在飞机蒙皮下方制备反射层,保护其免受激光破坏。美国通用公司开发了由多层石墨薄层组成的抗激光防护材料,实现了有效的激光防护。国内,Zhu<sup>[10,11]</sup>等人研究了高反射率陶瓷 La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>TiO<sub>3+δ</sub> 的激光损伤行为,结果表明该材料可用做抗激光损伤的有效保护层。李静等人<sup>[12]</sup>制备了由有机硅树脂等添加无机耐热填料组成的抗激光涂层,证实该材料可有效减少基体温升。Ma 等人研究了树脂材料在激光作用条件下的烧蚀机理,揭示了决定树脂材料抗激光烧蚀性能的关键因素,并在此基础上通过成分改性的方式设计制备了树脂基防护涂层,结果表明改性后的树脂涂层能够起到抵御高能激光烧蚀作用并降低基体材料背表面温度的作用。Yan 等人<sup>[13]</sup>利用金属 Cu 的高比热性与其物理状态变化时产生高能量耗散特性,通过在 ZrB<sub>2</sub> 中添加 Cu 的方法提高了材料抗激光烧蚀性能。受此启发,Li 等人<sup>[14]</sup>利用 Graphite/SiO<sub>2</sub> 复合材料在高温条件下发生吸热化学反应的特性,有效耗散高能激光能量。

### 2.2 激光隐身材料发展现状

随着激光技术越来越普遍地应用到战场中,目标因不能在激光下隐身而大大影响了其战斗力。因此,激光隐身技术受到国内外的高度重视,各国相继展开了针对激光隐身研究。

激光隐身技术主要是通过降低己方目标的可探测性信号来实现的。激光雷达测距方程为<sup>[15,16]</sup>:

$$R = \left[ \left( \frac{P_T}{P_R \Omega_T} \right) \rho A_r \left( \frac{A_c}{\Omega_r} \right) \tau^2 \right]^{1/4} \quad (1)$$

式中,  $R$  为激光雷达作用距离;  $P_T$  为发射的激光功率;  $P_R$  为接收的激光回波功率;  $\rho$  为目标的反射率;  $A_r$  为目标面积;  $A_c$  为接收机的有效孔径面积;  $\Omega_T$  为发射波束立体角;  $\Omega_r$  为目标散射波束立体角;  $\tau$  为单向传播路径透过率。由式 (1) 可以看出, 在大气传输条件一定时, 激光雷达作用距离主要与目标的漫反射率有关。若能将目标材料的漫反射率降低 1 个数量级, 其激光雷达的最大测程将减少 1/2 ~ 1/3<sup>[15]</sup>。因此, 激光隐身的核心在于减少目标的激光反射率, 其实现途径主要有外形方法和材料方法。外形方法的主体思想是通过改变目标的几何外形以减小其激光散射截面; 材料方法则是通过使用对激光有强烈吸收作用的材料, 以减少激光的反射信号或改变反射信号的频率来实现的。

目前, 各国主要采用半导体材料、纳米材料、有机吸收材料、光子晶体材料等激光吸收材料实现激光隐身。美、俄、法等国<sup>[17, 18]</sup>利用纳米材料具有尺寸小于激光波长、比表面积大和高度光学非线性的特点, 采用粘合剂和纳米微粉填料制备出宽频隐身涂层, 同时对雷达和红外波段具有良好的吸收性能<sup>[19]</sup>。国内, 何伟等人<sup>[20]</sup>和张静等人<sup>[21]</sup>分别采用溶胶-凝胶法和固相反应法制得了纳米  $\text{SmBO}_3$  和  $\text{SmFeO}_3$  粉体, 在 1.05  $\mu\text{m}$  ~ 1.15  $\mu\text{m}$  范围内具有良好的光吸收特性, 在 1.06  $\mu\text{m}$  处反射率分别约为 0.6% 和 0.31%。王春秀等人<sup>[22-24]</sup>制备了  $\text{La}_2\text{O}_3$  和  $\text{CeO}_2$  纳米晶, 在 1000 nm ~ 1700 nm 均具有较好的吸收性能, 有望成为激光隐身涂层的吸收剂。魏美玲等人<sup>[25]</sup>以  $\text{SnO}_2$  为主要组成, 通过掺杂  $\text{CuO}$ 、 $\text{ZnO}$  等过渡金属元素氧化物, 改变了掺杂半导体化合物的等离子波长, 使其在 1.06  $\mu\text{m}$  波段产生强吸收, 反射率仅为 3%。近来, 又有大量具有高近红外吸收的有机化合物不断涌现, 其主要利用含近红外吸收生色基团的有机染料如不对称菁染料、酞菁染料、偶氮染料和蒽类染料<sup>[26, 27]</sup>, 在 0.78  $\mu\text{m}$  ~ 1.06  $\mu\text{m}$  波段产生较强的吸收峰。然而, 这些有机化合物材料更适合作为激光隐身薄膜的功能性原料使用。随着光子晶体概念的提出, 大量研究人员通过对晶体结构设计, 不仅获得了具有良好激光隐身功能的材料, 同时实现了激光红外等多波段兼容的隐身效果。Wang 等人<sup>[28]</sup>和刘必鏊等人<sup>[29]</sup>分别通过  $\text{Ge}/\text{ZnSe}$  和  $\text{ZnSe}$  掺杂  $\text{CdSe}/\text{SiO}_2$  薄膜的交替设计, 实现了 10.6  $\mu\text{m}$   $\text{CO}_2$  激光和 1.06  $\mu\text{m}$  YAG 激光与 8  $\mu\text{m}$  ~ 14  $\mu\text{m}$  中远红外的兼容隐身。

### 3 智能化激光防护材料研究进展

如前所述, 虽然我国激光隐身和高能激光防护研究的起步略晚于西方国家, 但已经取得了较大进展。然而, 现阶段采用的防护均为静态、被动的防护方式, 存在防护效果单一的缺点, 特别是具有高反射率的激光防护手段必然会引起被防护目标隐蔽性降低的问题, 不利于装备的战场生存。因此, 急需开发具有多功能的, 兼具激光隐身和防护功能的激光防护材料。而具有自激活功能的智能化激光防护系统被认为是目前最具希望且极富挑战性的技术。

如图 1 所示, 当入射激光光强低于允许的最大光强时, 自激活系统未被激活, 对探测器波段而言, 此时材料处于的“关闭”状态 (即材料在此波段具有较低的反射率, 探测器难以接收返回的激光信号), 被防护目标具备激光隐身功能, 可规避激光雷达探测和追踪风险; 当入射激光光强高于允许的最大光强时, 自激活系统被激活, 此时材料的反射率升高, 处于“打开”状态, 入射激光能量被有效耗散, 实现高能激光防护。具有自激活功能的智能化激光响应技术, 将有望解决防护与隐身对反射率要求截然不同的这一矛盾问题。虽然下文中将提及的各类防护材料相关研究人员可能并没有提出“智能”的概念, 但作者认为这些防护手段初步实现了智能化防护。

### 3.1 基于非线性光学的激光防护材料

基于非线性光学原理的激光防护技术是上世纪 80 年代发展起来的新型防护技术, 它主要利用非线性光学效应, 包括反饱和吸收、非线性折射和非线性散射。反饱和吸收是目前研究最多, 性能最好的一种防护形式<sup>[30]</sup>, 其原理可归因于双光子吸收、自由载流子吸收、激发态吸收等。其特点是材料的吸收系数随入射光强的增加而增加, 即: 入射光强低时, 材料呈弱吸收、高透射状态; 入射光强高于临界值时, 材料分子系统处于激发态, 呈高吸收、低透过状态。

截至目前, 人们已发现多种有机、无机和杂合的材料在可见光和红外波段实现了有效的自激活激光防护, 包括有机金属化合物、酞菁、卟啉类化合物、无机纳米颗粒、基于碳的纳米材料、阴丹士林及其衍生物<sup>[31-35]</sup>等。然而, 不幸的是, 这些材料中的大多数通常只在液体悬浮液中表现出有效的非线性光学效应, 将它们的非线性光学性质从液体悬浮液中转移到固态薄膜甚至固体结构中是非常具有挑战性的, 这在很大程度上限制了它们的智能激光防护应用潜力。其次, 虽然这类材料的响应时间短、防护波段宽, 但它们主要变为透过率而非反射率变化, 且防护阈值有待提高, 在护目镜和光学元件等低功率密度防护领域展现出良好的应用前景。

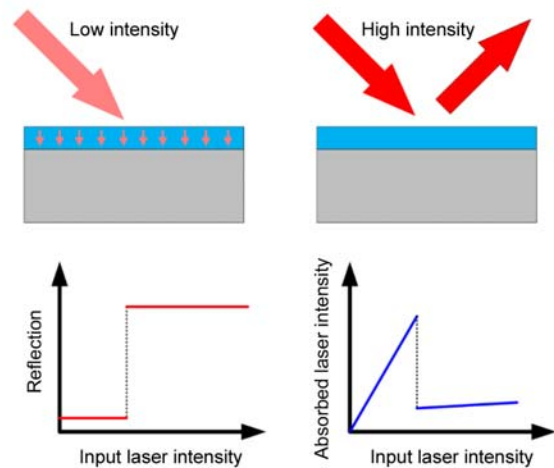


图 1 智能化激光防护技术  
Figure 1 Schematic diagram of intelligent laser protection technology

### 3.2 基于微纳结构的智能光学材料

光子晶体是由不同折射率的介质周期性排列而成的人工微结构<sup>[36,37]</sup>。它具有选择某个波段的光通过而阻止其它波长的光通过其中的功能, 使人们操纵和控制光子的梦想成为可能。智能响应光子晶体的设计思想是在光子晶体中填充液晶、半导体、铁电、铁磁、热电材料等, 以实现其对外界激励的智能响应。李军等人<sup>[38]</sup>和 Xing 等人<sup>[39]</sup>以光子晶体为模板与可聚合液晶单体复合得到可逆热响应光子晶体/液晶弹性体复合材料, 其表现出与温敏液晶一致的温度敏感性, 随着温度升高其反射峰发生蓝移, 就 540 nm 波长而言, 由 20°C 至 180°C 时其反射率由 60% 降低至 10%。Ke 等人<sup>[40]</sup>设计制备了二维 SiO<sub>2</sub>/VO<sub>2</sub> 光子晶体, 当温度由 20°C 升高至 90°C 时, 伴随着近红外波段透过率由 80% 变化至 10%。虽然目前已有少量关于热响应光子晶体的报道, 但其研究多集中于可见光波段且涉及的温度范围较窄, 尚有许多研究工作需要开展。

由于以光子晶体为代表的微纳结构对光的特殊调控作用, 使其通过合理的结构设计和材料选择即可实现材料光学性能的人工调控, 具有较好的前景。

### 3.3 基于化学反应变化的智能激光防护材料

该类材料主要是利用材料体系在激光辐照过程中发生化学反应进而引起的反射率变化实现激光防护的。Hansen 等人<sup>[41]</sup>采用 193 nm 和 248 nm 激光对聚碳硅烷样品辐照, 发现辐照 120 s 后样品吸收率由 58% 下降至 4%, 具有明显智能化防护特征。Li 等人<sup>[42]</sup>制备了石墨/二氧化硅/铜复合材料, 并在 1064 nm 连续激光条件下进行辐照实验, 发现辐照前后样品有明显反射率变化。

该类防护方法主要采用本身具有较低反射率的碳化物等材料, 依靠材料在激光辐照过程中的氧化反应实现反射率的变化。碳化物材料本身具有较高的熔点, 有利于实现强激光打击和激光隐身的

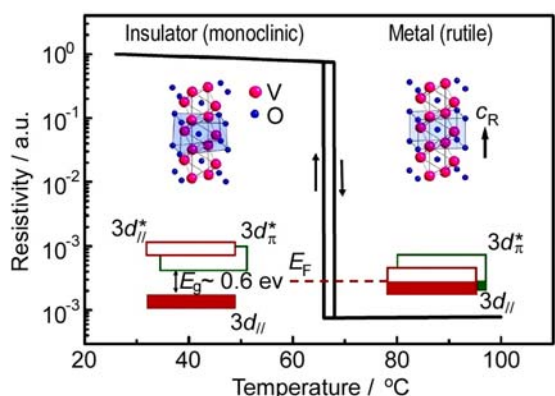


图 2 二氧化钒相变过程的晶型及能带结构变化<sup>[46]</sup>  
 Figure 2 Changes of crystal structures and band structures of VO<sub>2</sub> during phase transformation<sup>[46]</sup>

兼容防护。但这种防护方式十分依赖环境气氛，环境气氛的变化可能会使智能化打开过程失效。且碳化物材料热导率较高，防护过程中要注意防止基体温度上升过快导致的基体熔融损伤。

### 3.4 基于相变原理的激光软杀伤智能防护材料

该类防护方法主要是利用一些过渡金属氧化物具有的非线性相变特性，其主体思想是：室温下材料处于基态晶体结构，当受到激光热激励作用后，材料因温升而引起相变，晶体结构发生变化，伴随着其光电特性的显著变化。

目前研究最多的相变材料是 VO<sub>2</sub> 薄膜，它具有优异的热致色变性能<sup>[43-45]</sup>，当温度的上升

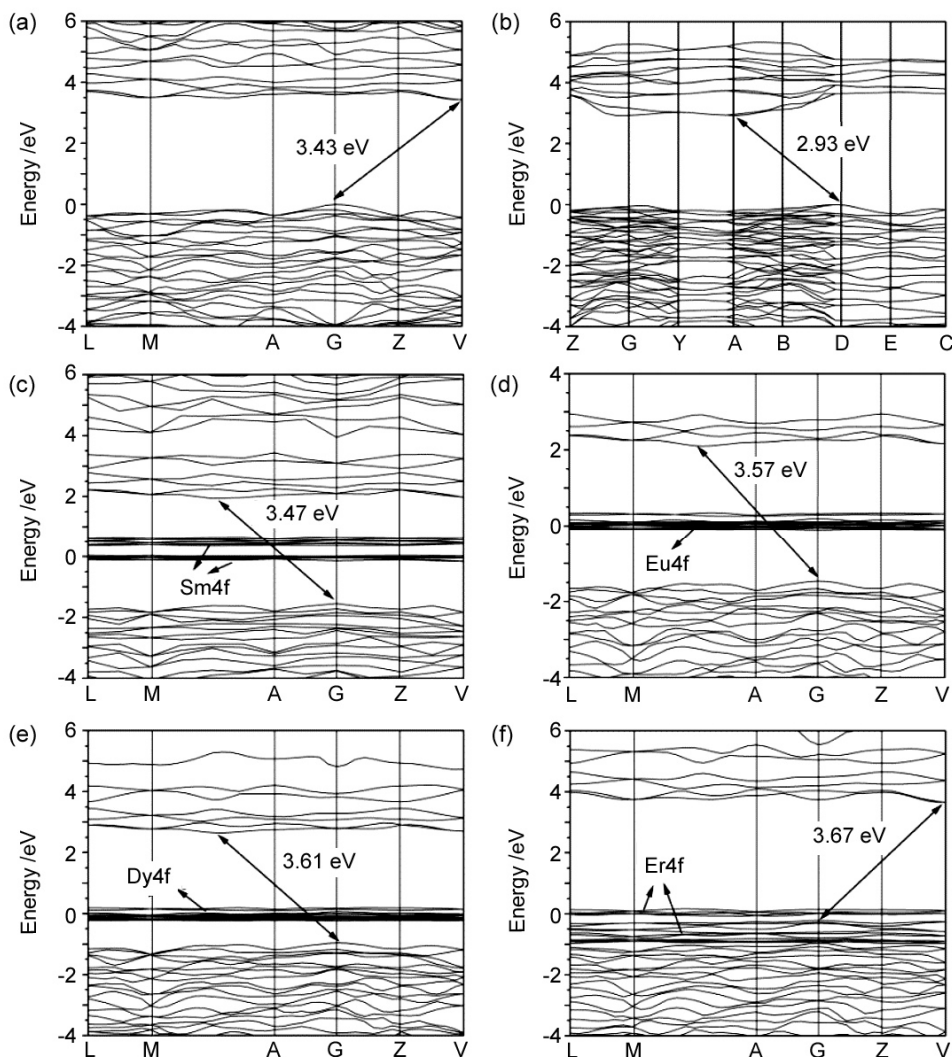


图 3 RETaO<sub>4</sub> 高温相能带结构 (a) YTaO<sub>4</sub>; (b) LaTaO<sub>4</sub>; (c) SmTaO<sub>4</sub>; (d) EuTaO<sub>4</sub>; (e) DyTaO<sub>4</sub>; (f) ErTaO<sub>4</sub>  
 Figure 3 The band structures of high temperature phase: (a) YTaO<sub>4</sub>; (b) LaTaO<sub>4</sub>; (c) SmTaO<sub>4</sub>; (d) EuTaO<sub>4</sub>; (e) DyTaO<sub>4</sub>; (f) ErTaO<sub>4</sub>

至 68°C 时, 它的晶体结构由单斜结构 (呈半导体态) 转变为正交结构 (呈金属态)。如图 2 所示, 伴随着其电学与光学性质的突变<sup>[46, 47]</sup>, 反射率可从相变前的 10% 左右升高到相变后的 80% 左右<sup>[48, 49]</sup>, 响应时间小于 50 ns。据报道<sup>[50]</sup>, 美国已成功研制出一种氧化钒薄膜用以保护卫星红外探测系统免受激光破坏, 其开关作用可保持 25 年之久。VO<sub>2</sub> 薄膜具有响应速度快、可重复使用的优点, 但其防护阈值极低, 制备工艺复杂, 主要针对致盲类软杀伤激光武器, 无法适用战场强激光防护。

### 3.5 基于相变原理的智能化高能激光防护材料

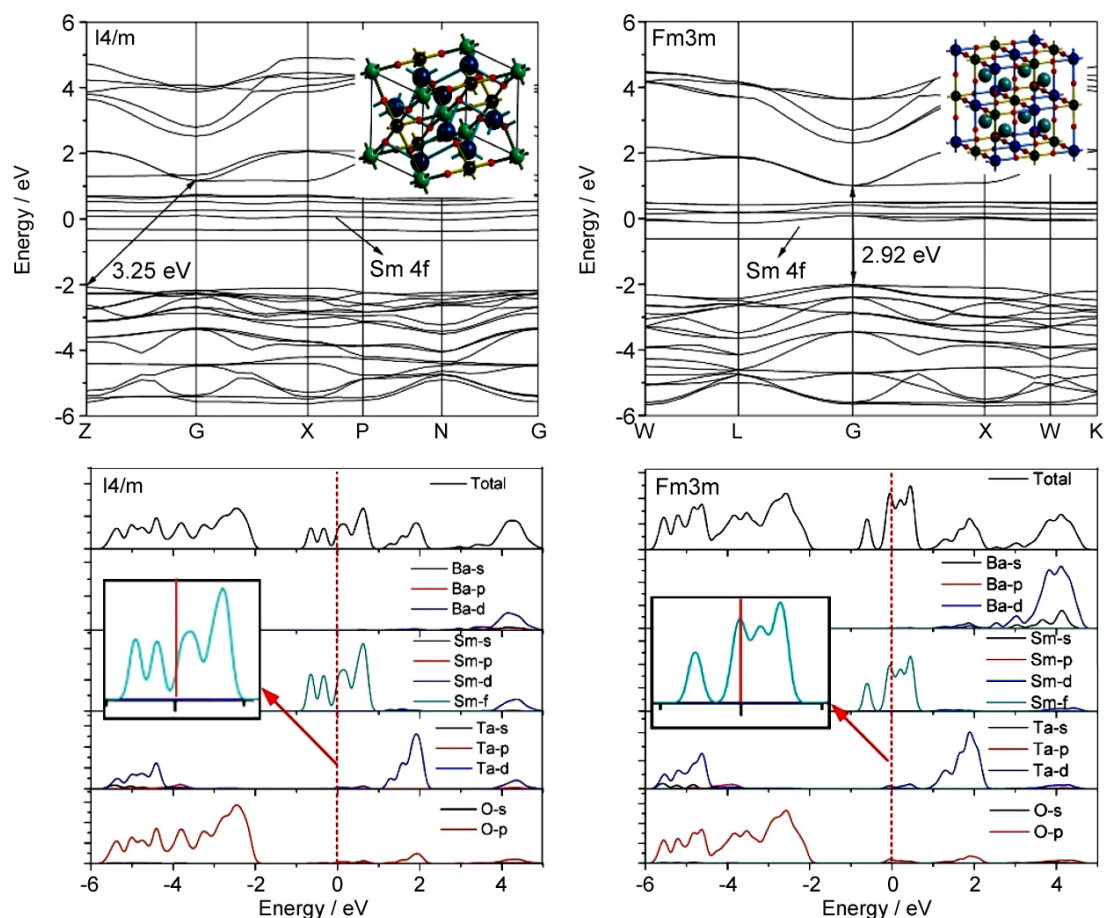
战略战术打击型激光武器能量极高, 它们依靠极高功率密度的激光束使靶材表面温度急剧升高, 进而迅速熔融甚至汽化蒸发。因此, 针对此类激光武器的防护提出如下要求: (1) 打击激光与靶材表面具有低的耦合系数, 即靶材表面的反射率应尽可能高, 以减少激光热量的沉积; (2) 防护材料具有较高的热沉和较低的热导率, 以增加材料的防护阈值, 降低防护目标温升。陶瓷材料具有较高的熔点和较低的热导率, 且随温度具有多晶型转变的特点<sup>[51]</sup>, 使其成为一种极具潜力的智能化高能激光防护材料。

但陶瓷材料往往具有较宽的禁带宽度, 导致其往往具有很低的反射性能。因此, 开发具有高反射率的陶瓷材料成为开发智能化高能激光防护材料的关键。北京理工大学基于“材料基因组”思想, 采用第一性原理从头计算的方法, 针对 RETaO<sub>4</sub> (RE = Y, Sm, Eu, Dy, Er) 稀土钽酸盐材料, 分别计算其高温和低温相结构的电子结构和光学性能<sup>[52]</sup>, 结果如图 3 和表 1 所示。研究发现稀土元素 4f 电子的出现对材料反射性能有积极贡献。随着原子序数的增大, RE 4f 电子态呈现出从高能量区间向低能量区间移动的趋势。RE 4f 电子态移动的本质在于 RE 的 4f 电子数量的变化, 随着 RE 4f 电子数量增加, 4f 轨道从未满 → 半满 → 全满, 4f 电子呈现出从导带底部 → 禁带中间 → 价带顶 → 价带内的变化规律。随着 4f 电子态向低能量方向移动, 反射率呈现出先增大后减小的变化规律。当 4f 电子态接近于禁带中间位置时对反射性能的贡献最大。EuTaO<sub>4</sub> 高温相在 1.06 μm 处反射率高达 93.47%。虽然该材料由低温相向高温相转变时晶体结构的变化对反射性能影响不大, 但该系列材料的研发为智能化激光防护材料奠定了理论基础。

表 1 RETaO<sub>4</sub> 高低温相光性能计算数值  
Table 1 The calculation results of low and high temperature phases of RETaO<sub>4</sub>

Compound	Space group	Static dielectric constant	Static refractive index	Reflectivity at 1.06 μm	Reflectivity at 10.6 μm
YTaO <sub>4</sub>	Low temperature phase	4.84	2.21	14.58%	14.06%
	High temperature phase	4.39	2.09	12.97%	12.43%
LaTaO <sub>4</sub>	Low temperature phase	4.04	2.01	11.92%	11.28%
	High temperature phase	4.52	2.13	13.78%	13.27%
SmTaO <sub>4</sub>	Low temperature phase	788.42	20.01	71.97%	89.07%
	High temperature phase	159.24	37.19	54.27%	85.17%
EuTaO <sub>4</sub>	Low temperature phase	342.48	18.55	88.94%	90.55%
	High temperature phase	227.55	15.56	93.47%	86.21%
DyTaO <sub>4</sub>	Low temperature phase	321.42	18.60	73.34%	77.89%
	High temperature phase	120.24	11.21	62.48%	71.12%
ErTaO <sub>4</sub>	Low temperature phase	136.07	26.28	52.39%	61.71%
	High temperature phase	129.76	11.81	57.66%	69.02%



图4 不同晶体结构的  $\text{Ba}_2\text{SmTaO}_6$  能带结构差别Figure 4 The band structures of low and high temperature phase of  $\text{Ba}_2\text{SmTaO}_6$ 

基于上述研究成果,北京理工大学开发了新型具有智能响应激光防护材料<sup>[53,54]</sup>。以  $\text{Ba}_2\text{RETaO}_6$  为例,通过计算发现晶体结构变化对  $\text{Ba}_2\text{SmTaO}_6$  的电子结构和光学性能的影响十分明显,从低温相变化至高温相,其费米面恰好从  $4f$  电子态谷底移动至峰顶(图4),从而导致光学性能发生明显变化。 $1.06\ \mu\text{m}$  和  $10.6\ \mu\text{m}$  处的反射率从低温相的 11.51% 和 12.82% 分别提升至高温相的 68.91% 和 75.87%,相变前后有 60% 的反射率提升,具有明显的反射突变特点。此外,由高价、大质量原子组成的  $\text{Ba}_2\text{SmTaO}_6$  具有较高的熔点,利于其激光防护性能的提升,极有潜力成为兼具激光隐身和防护功能的智能化高能激光防护材料。

### 3.6 基于光学频率变换特性的智能激光防护材料

此种激光防护方式虽与前文中作者提出的智能化激光防护的实现途径有所差别,但作者认为该防护方法亦提供了一种可行的智能化防护新思路。此类激光防护手段主要是通过吸收和频率变换两步方式进行。其中,吸收是指材料将入射激光能量通过单光子或多光子吸收过程吸收,吸收的能量激发电子跃迁至不稳定的激发态;而频率变换则是光子通过辐射或非辐射跃迁至基态的过程,释放出与入射光子频率不同的光子。若发射出光子能量高于激发光子能量则称为上转换,反之,为下转换。简言之,该方法可吸收入射激光能量,并辐射出偏离入射激光的波长,可同时实现对装备的隐身防护和打击防护,提高装备的生存和作战能力。该方法的实现则主要依赖于稀土离子的阶梯状能级<sup>[55]</sup>。刘芳超<sup>[56]</sup>以  $\text{Sm}^{3+}$  掺杂氟氧化物颗粒为研究对象,证实了该材料能够实现对特定波长的激光

隐身。Santos 等人<sup>[57]</sup>制备了  $\text{Pr}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{Ga}_2\text{O}_3-\text{La}_2\text{S}_3$  玻璃, 该材料能在室温下能将 1064 nm 激光上转换至 480 nm ~ 680 nm 区域。同时, 该类材料多为稀土氧化物陶瓷材料, 具有熔点高、热稳定性好的特点, 可作为新型智能激光防护材料。然而, 目前光学频率变换材料始终存在转换效率较低的问题, 在今后研究中, 提高转换效率将成为研究的焦点。

#### 4 智能化高能激光防护材料未来发展趋势

目前, 智能化高能激光防护属于作者提出的新概念, 国内外已有的部分研究可视为智能化防护, 但其研究尚停留于理论层面的开发和预测, 且涉及的材料模型和体系仍然较少, 后续开发研究工作中可采用高通量计算或机器学习方法开发更多具有更加优异性能、有潜力的材料体系。二是目前智能化激光防护机制尚显单薄, 要提出更多技术途径实现智能化, 引入多机制协同作用, 进一步提高智能防护材料的自激活响应能力。三是开发具有多频段隐身功能的智能高能激光防护材料, 实现多功能一体化。

#### 5 结束语

本文分别介绍了激光隐身和高能激光防护材料的发展现状, 并着重归纳了兼具激光隐身和防护功能的智能化高能激光防护材料的究进展, 指出智能化激光防护材料是未来激光防护的研究趋势。研究表明, 目前虽已有多种具有智能化性质的材料出现, 但相关研究目前尚在起步阶段, 其性能仍有待提高, 激光防护性能尚待考核。基于非线性原理和微结构变化的智能激光防护材料是目前研究较多的防护方法, 它们具有响应快、光学性质突变明显等优点, 但防护阈值低, 后续研究中需在防护阈值上有所突破。基于化学反应的智能化防护材料原理简单但较依赖外部环境条件, 当环境条件相对稳定时, 是实现智能化防护的有效手段。以  $\text{VO}_2$  为代表的相变材料是一种极具潜力的智能化激光防护材料, 但它同样具有熔点低, 防护阈值小的缺点, 限制了其在高能激光防护领域的应用。而基于第一性原理开发的具有高熔点的相变式高能激光防护材料则克服了这个缺点, 是未来实现智能化激光防护的一个极具潜力的发展方向。光学频率变换材料的防护思路十分新颖, 但仍需克服转换效率低的问题。

综上, 目前尚未能有一种已知材料体系可以满足激光隐身和高能激光防护兼容的需求, 未来还有许多相关研究工作需要开展。作者认为, 首先应通过理论方法预测筛选有潜力防护材料体系, 并适时引入多机制协同作用, 是最终实现智能化激光防护的有效手段, 同时多频段隐身和激光防护的兼容是未来的发展方向。

#### 参考文献

- [1] MAIMAN TH. Stimulated optical radiation in ruby [J]. Nature, 1960, 187 (4736): 493-494.
- [2] 李博, 陈健, 王伟国, 等. 防空反导高能激光武器[J]. 中国光学, 2012, 5 (04): 352-357.
- [3] 余辉, 谭胜. 高能激光武器的发展和应用前景[J]. 红外与激光工程, 2002, (03): 267-271.
- [4] 宗思光, 吴荣华, 曹静, 等. 高能激光武器技术与应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50 (08): 158-167.
- [5] 任国光, 黄裕年. 战术高能激光武器的发展现状和未来[J]. 激光与红外, 2002, (04): 211-217.
- [6] 任宁, 刘敬民, 秦凤英. 美国高能激光武器发展现状及远景规划[J]. 红外与激光工程, 2008, 37 (S3): 375-378.

- [7] FU C, YANG Y, HUANG Z, et al. Investigation on the laser ablation of SiC ceramics using micro-Raman mapping technique [J]. Journal of Advanced Ceramics, 2016, 5 (3): 253–261.
- [8] 朱锦鹏, 马壮, 高丽红, 等. 基于等离子喷涂的反射型激光防护涂层研究[J]. 中国光学, 2017, 10 (05): 578–587.
- [9] 郭亚林, 梁国正, 丘哲明, 等. 激光辐照下的材料破坏和防护研究进展[J]. 材料保护, 2003, (12): 8–10.
- [10] ZHU J, MA Z, GAO Y, et al. Ablation behavior of plasma-sprayed  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_{3+\delta}$  coating irradiated by high-intensity continuous laser [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9 (40): 35444–35452.
- [11] 孔静, 马壮, 高丽红, 等.  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_{3+\delta}$  陶瓷涂层抗激光烧蚀性能研究[J]. 现代技术陶瓷, 2018, 39 (02): 115–121.
- [12] 李静, 张金栋, 张玉忠, 等. 耐高温抗激光烧蚀涂层研制与性能表征[J]. 航空材料学报, 2014, 34 (01): 34–38.
- [13] YAN Z, MA Z, LIU L, et al. The ablation behavior of  $\text{ZrB}_2/\text{Cu}$  composite irradiated by high-intensity continuous laser [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2014, 34 (10): 2203–2209.
- [14] LI W, GAO L, MA Z, et al. Ablation behavior of graphite/ $\text{SiO}_2$  composite irradiated by high-intensity continuous laser [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2017, 37 (4): 1331–1338.
- [15] 张晶, 李会利, 张其土. 激光隐身技术的现状和发展趋势[J]. 材料导报, 2007, (S1): 316–318.
- [16] 福山. 激光雷达测距方程研究[J]. 激光与红外, 1973, (04): 92–106.
- [17] GOLNABI H, MAHDIEH MH. Trend of laser research developments in global level [J]. Optics and Laser Technology, 2006, 38 (2): 122–131.
- [18] 张永进, 赵石林, 许仲梓. 激光隐身涂料的应用研究进展[J]. 涂料工业, 2008, (09): 62–66.
- [19] 张振英, 孙红彦. 军用隐身涂料技术的研究进展[J]. 现代涂料与涂装, 2006, (02): 29–31.
- [20] 何伟, 韩朋德, 沐磊, 等. 溶胶-凝胶燃烧法制备  $\text{SmBO}_3$  粉体的工艺条件及其光吸收性能[J]. 过程工程学报, 2008, (05): 1008–1012.
- [21] 张静, 黄啸谷, 陈娇, 等.  $\text{SmFeO}_3$  的制备及其多波段兼容隐身性能研究[J]. 功能材料, 2011, 42 (S1): 141–143.
- [22] 王春秀, 胡克良, 李福利. 纳米  $\text{CeO}_2$  的制备及其红外吸收性能研究[J]. 激光与红外, 2006, (05): 399–402.
- [23] 王春秀. 纳米材料红外吸收特性研究[D]. 北京: 首都师范大学硕士学位论文, 2004.
- [24] 王春秀, 李福利. 纳米晶  $\text{La}_2\text{O}_3$  的制备及其红外吸收特性的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, (05): 846–849.
- [25] 魏美玲, 任文娟, 隋学叶, 等. 过渡元素掺杂  $\text{SnO}_2$  激光隐身材料的制备及应用研究[J]. 功能材料, 2007, (A08): 3100–3102.
- [26] 李璐璐. 高分子类近红外光吸收材料的制备、性能及应用研究[D]. 上海: 东华大学硕士学位论文, 2017.
- [27] 胡露, 杨柱, 张小平, 等. 近红外吸收材料及其应用研究进展[J]. 化工新型材料, 2016, 44 (04): 41–43.
- [28] WANG C, WANG L, CHEN Z, et al. Production of flexible photonic crystal films for compatible far infrared and laser-band camouflage by vacuum coating method [J]. Journal of Russian Laser Research, 2016, 37 (3): 308–312.
- [29] 刘必臻, 时家明, 赵大鹏, 等. 光子晶体隐身应用分析[J]. 激光与红外, 2009, 39 (01): 42–45.
- [30] 张其土, 许仲梓, 付振晓, 等. 激光防护材料的研究与应用[J]. 南京化工大学学报(自然科学版), 2001, (03): 82–86.
- [31] GARDNER CS, WELSH BM, THOMPSON LA. Design and performance analysis of adaptive optical telescopes using laser guide star [J]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78 (11): 1721–1743.
- [32] FU G, YODA T, KASATANI K, et al. Third-order optical nonlinearities of naphthalocyanine derivatives measured by resonant femtosecond degenerate four-wave mixing technique [J]. Synthetic Metals, 2005, 155 (1): 68–72.
- [33] GANEEV RA, RYASNYANSKY AI, REDKORECHEV VI, et al. Variations of nonlinear optical characteristics of  $\text{C}_{60}$  thin films at 532 nm [J]. Optics Communications, 2003, 225 (1–3): 131–139.

- [34] 施德恒, 许启富. 基于非线性光学理论的激光防护材料近况[J]. 光学技术, 2000, (01): 52–55.
- [35] 邱阳, 陈玉峰, 祖成奎, 等. ITO 薄膜的研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2016, 37 (05): 303–324.
- [36] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Physical Review Letters, 1987, 58 (20): 2059–2062.
- [37] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Physical Review Letters, 1987, 58 (23): 2486–2489.
- [38] 李军. 热响应型光子晶体/液晶复合材料设计、制备及应用[D]. 北京: 北京化工大学硕士学位论文, 2017.
- [39] XING H, LI J, SHI Y, et al. Thermally driven photonic actuator based on silica opal photonic crystal with liquid crystal elastomer [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8 (14): 9440–9445.
- [40] KE Y, BALIN I, WANG N, et al. Two-dimensional SiO<sub>2</sub>/VO<sub>2</sub> photonic crystals with statically visible and dynamically infrared modulated for smart window deployment [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8 (48): 33112–33120.
- [41] HANSEN SG, ROBITAILLE TE. Laser ablation of a polysilane material [J]. Journal of Applied Physics, 1987, 62 (4): 1394–1399.
- [42] LI W, GAO L, MA Z, et al. Multi-synergy ablative effects of laminated SiO<sub>2</sub>-graphite/SiO<sub>2</sub>/Cu composite irradiated by high power laser [J]. Ceramics International, 2019, 45 (12): 15272–15280.
- [43] GUO D, LING C, WANG C, et al. Hydrothermal one-step synthesis of highly dispersed M-Phase VO<sub>2</sub> nanocrystals and application to flexible thermochromic film [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10 (34): 28627–28634.
- [44] 窦维维, 李小雨, 陈长, 等. VO<sub>2</sub>-WO<sub>3</sub> 复合薄膜的制备及其热致变色-电致变色性能研究[J]. 现代技术陶瓷, 2017, 38 (03): 225–230.
- [45] ZHANG C, HU D, GU H, et al. Crystallization and inter-diffusional behaviors in the formation of VO<sub>2</sub>(B) thin film with layered W-doping [J]. Journal of Advanced Ceramics, 2017, 6 (3): 196–206.
- [46] LIU K, LEE S, YANG S, et al. Recent progresses on physics and applications of vanadium dioxide [J]. Materials Today, 2018, 21 (8): 875–896.
- [47] LING C, ZHAO Z, HU X, et al. W Doping and voltage driven metal-insulator transition in VO<sub>2</sub> nano-films for smart switching services [J]. ACS Applied Nano Materials, 2019, 2 (10): 6738–6746.
- [48] 赵佳明, 边继明, 骆英民, 等. 用于智能激光防护武器的二氧化钒薄膜研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34 (02): 102–106.
- [49] 田雅慧. VO<sub>2</sub> 薄膜的制备和光学性能研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院硕士学位论文, 2011.
- [50] 刘大军, 何兴权, 段潜, 等. 激光防护材料的研究现状[J]. 激光杂志, 2002, (06): 5–6.
- [51] ROY R, NISSRINE Z, DENIS C. Relaxor behaviour and phase transition of perovskite ferroelectrics-type complex oxides (1-x)Na<sub>0.5</sub>Bi<sub>0.5</sub>TiO<sub>3-x</sub>CaTiO<sub>3</sub> system [J]. Journal of Advanced Ceramics, 2018, 7 (02): 124–142.
- [52] MA Z, ZHENG J, WANG S, et al. First-principle calculations of crystal structures, electronic structures, and optical properties of RETaO<sub>4</sub> (RE = Y, La, Sm, Eu, Dy, Er) [J]. Optical Engineering, 2018, 57: No.0171071.
- [53] ZHENG J, WANG S, GAO L, et al. First-principles calculations of crystal structure, electronic structure and optical properties of Ba<sub>2</sub>RETaO<sub>6</sub> (RE = Y, La, Pr, Sm, Gd) [J]. Journal of Materials Science, 2018, 53 (13): 9401–9410.
- [54] ZHENG J, WANG S, GAO L, et al. Theoretical and experimental studies of Ba<sub>2</sub>SmTaO<sub>6</sub> on crystal structure, electronic structure and optical properties [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6 (7): 1806–1814.
- [55] DURRUTHY-RODRIGUEZ MD, GERVACIO-ARCINIEGA JJ, HERNANDEZ-GARCIA M, et al. Photoluminescence characteristics of soft PZT 53/47 ceramic doped at A and/or B sites [J]. Journal of Advanced Ceramics, 2018, 7 (02): 109–116.
- [56] 刘芳超. 稀土掺杂氟氧化物材料的制备及光学频率变换特性研究[D]. 天津: 天津大学硕士学位论文, 2016.

[57] DOS SANTOS PV, GOUVEIA EA, DE ARAUJO MT, et al. IR-visible upconversion and thermal effects in Pr<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>-codoped Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:La<sub>2</sub>S<sub>3</sub> chalcogenide glasses [J]. Journal of Physics-Condensed Matter, 2000, 12 (48): 10003-10010.



郑佳艺, 女, 北京理工大学博士研究生, 2015 年于北京理工大学获得学士学位, 主要从事新型激光防护涂层材料的设计和制备研究。通过第一性原理计算探讨不同晶体结构、元素种类和原子占位等对材料电子结构和光学性能的影响规律, 通过同价置换,

掺杂等对材料光学性能进行优化。探讨制备工艺对钙钛矿型稀土钽酸盐光学性质的主要控制机制。研究稀土钽酸盐材料在激光作用下的损伤行为及响应机理。相关研究成果以第一作者身份发表论文 5 篇, 申请国家发明专利多项。



高丽红, 女, 2012 年获得法国博士学位, 北京理工大学副教授。入选军委科技委“军事青托”人才工程、北京理工大学“创新人才-青年拔尖人才支持计划”, 为冲击环境材料技术国家级重点实验室青年骨干人才, 是“xx材料”国防科技创新团队核心成员。

长期从事表面工程方向研究工作, 在特种防护材料方面取得突破性进展, 为国防重大重点装备研制提供了材料技术支撑。高能激光防护涂层材料研究成果通过 2018 年国防科技成果鉴定 (排名 2), 被评价为“发明的 xx 达到国际领先”。主持国家自然科学基金、装发领域基金重点项目等项目十余项, 参与科工局基础科研重点项目、装发预研、科技委国防特区等项目 10 余项。以第一/通讯作者发表论文 50 余篇, 以第一/第二发明人申请专利 29 项, 已授权 13 项, 申请国际专利 1 项, 以第一著作权人, 获得 1 项软件著作权。