

高能激光武器的发展及卫星激光防护膜的研究

崔云 贺洪波 范正修 邵建达

(中国科学院上海光学精密机械研究所,上海 201800)

摘要 现代战争中激光武器具有举足轻重的作用,激光武器对卫星实施的致盲攻击使抗激光损伤膜的研究成为关键。介绍了高能激光武器的种类及卫星防护膜的研究现状,总结了几种防护措施的优点,指出了卫星防护膜的发展趋势。

关键词 激光武器;激光防护;热致相变

中图分类号: TJ95

Development of High Energy Laser Weapon and Research of Laser Protective Coatings

CUI Yun HE Hongbo FAN Zhengxiu SHAO Jianda

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract Laser weapons have been very important in modern war. Attack of laser weapons to secondary planet makes the research of laser protective coatings pivotal. The catalog of high energy laser weapons and actuality of laser protective coatings are introduced. The advantage and disadvantage are compared based on the several protective measures. Developing trends of laser protective coatings are respected.

Key words laser weapons; laser protective; thermal phase transformation

1 引言

军用侦察卫星、通讯卫星和导航卫星等在高技术战争中发挥着巨大作用,已成为战场作战行动的重要支援保障系统,其探测系统的研制尤为重要。另外,随着航天技术的发展,人们对太空的探索越来越深入,空间遥感探测也成为各国发展的重要方向。

随着各类卫星的发展,反卫星激光武器也逐步发展并应用起来,它可以破坏卫星上的仪器或摧毁卫星平台,使敌方的指挥、控制、通讯和情报系统瘫痪。例如,光电传感器是卫星的“眼睛”,卫星上的光电传感器由于其高灵敏度很容易

遭到激光的攻击而使其致盲,严重者可使整颗卫星报废。因此,卫星防护和生存技术已变得越来越重要。

本文对高能激光武器的种类、现状作了一个概述,分析了激光防护手段的优缺点及今后卫星探测元件激光防护的发展趋势。

2 激光武器对卫星造成损伤的实例

高能激光器是应用波长 1.06~10.6 μm (以 2.7 μm 和 3.8 μm 为主),连续功率 1~10MW 的激光辐射能束来摧毁目标或使之失效的定向硬杀伤武器。对卫星而言,遭受破坏

的光电传感器^[1]主要为 0.5~0.8 μm 可见光-近红外 CCD 相机、2.5~3.3 μm 短波红外相机和 3.5~4.5 μm 中波红外相机。

从 1975 年 10 月 18 日开始^[2],在莫斯科以南 50km 处,连续 5 次使用氟化氢激光器照射了两颗飞临西伯利亚上空美国用以监视洲际导弹(ICBM)发射用的早期预警飞机,使其红外传感器饱和达 4 小时。1981 年 3 月,前苏联利用一颗卫星上的小型高能激光器照射一颗美国卫星,使其光学、红外电子设备完全失灵。从 20 世纪 80 年代末到 90 年代初,前苏联共进行了 18 次反卫星激光武器试验,11 次

收稿日期: 2006-01-18; 收到修改稿日期: 2006-03-15

作者简介: 崔云(1978~),女,山西长治市人,博士研究生,主要从事薄膜损伤和激光防护方面的研究。E-mail: cuiyun@siom.ac.cn

导师简介: 邵建达(1964~),男,浙江宁海人,研究员,博士生导师,主要从事光学薄膜技术与光电信息功能薄膜等方面的研究。

E-mail: jdsiao@siom.ac.cn

获得成功。

1997年10月17日^[4],美国首次进行了激光武器摧毁卫星的实验,用设在新墨西哥州怀特桑兹导弹发射场的激光发射装置,将地球轨道上一枚造价6000万美元、运行在420km高度轨道、运行速度达26800km/h的军用卫星[寿命即将到期的空军微型传感器技术集成计划的第三颗卫星(MSTI-3)]摧毁,这次试验用的大功率激光器是中红外高级化学激光器(MIRACL)。目的是考察激光武器的威力和军事卫星抵御激光武器的能力,验证MIRACL激光器在紧急时刻击落卫星的能力^[5]。MIRACL是功率为22 MW的氟化氙化学激光器,中心波长为3.8 μm ,试验中未全功率运行,有资料表明当时的光功率为200W,激光束径为2m^[4]。美陆军白沙导弹靶场^[6]已初步具备反卫星能力,其地基反卫星激光武器系统的参数如下:波长2.7 μm 连续氟化氢激光器,发射功率10MW。

3 国内外激光防护的内容、种类及现状

3.1 激光软杀伤防护的内容

激光威胁的出现促进了激光防护技术的发展。激光防护任务主要包括两个方面内容:1) 采取防护措施,防止目标被对方激光探测到;2) 采取防护措施,防止装备系统的光电传感器被激光致盲,对装备系统易损部位,如光学部件,采取抗激光加固措施,防止对方激光破坏。

人们希望有一种较理想的激光防护。它应具有如下性能:

1) 足够宽的防护带宽,对于我们关心的各种谱线的激光,包括可调谐激光,均有需要的衰减能力。

2) 快的响应时间,对脉宽为纳

秒的高重复频率激光束来得及响应。

3) 大的破坏阈值,对于足够强的激光入射,激光防护镜的性能不被破坏。

星载光学遥感仪器抗激光致盲的有效手段之一就是采用高强度的激光防护薄膜器件。

3.2 激光软杀伤防护薄膜的种类及研究现状

从防护原理来分,国内外实用激光防护技术有以下三类^[7]:

1) 基于线性光学或传统光学原理构成的激光防护薄膜

特点是,只对光波波长敏感,对光强度不敏感,平等吸收或反射同一波长的强光和弱光,在阻止某波长强激光破坏的同时也阻止了该波长弱光的吸收。这种激光防护薄膜分为吸收式、反射式及复合式三种。在国外这类比较典型的抗激光致盲的光学薄膜是采用 $\lambda/4$ 膜层结构的金属氧化物介质多层膜。制备这些薄膜的关键问题是实现膜层的均匀性、环境稳定性和找准中心波长。薄膜沉积工艺也是影响薄膜抗激光损伤强度的重要因素。

对于这类激光防护膜,国内外已进行过相关研究。

美陆军纳蒂克研究中心研制一种组合式层状结构防护镜^[7],其利用多层介质膜对特定波长激光的反射衰减达到激光防护效果。据报道可防护532nm、694nm和1064nm三种激光,光密度为4,可见光透过率达73%,其主要缺点是玻璃箔易损。目前国内专利^[8]报道在有色滤光片上用真空电子束蒸镀制备高反膜(膜系为 $\text{Sub}/(\text{HL})^{11}\text{H2L}/\text{空气}$,最外层加镀了 SiO_2 半波覆盖层),高反膜的损伤阈值为15.3J/cm²,对某一波段具有高反射性,而对其他波段则有高透射性,具有抗化学侵蚀性;用溅射法^[9]制备了

$\text{Sub}/(\text{HL})^9\text{PH2L}/\text{空气}(P=9\sim15)$ 防护膜,对1.06 μm 和1.315 μm 波长范围内的激光高反射,对可见光则高透过。

2) 基于非线性光学原理的激光防护

它主要利用三阶非线性光学效应,包括非线性吸收、非线性折射、非线性散射和非线性反射;对非线性光学材料的要求,一是非线性光学系数,特别是三阶非线性光学系数要大,以便构成全光激光防护薄膜;二是非线性响应时间要快,以便防护调Q和锁模激光;三是抗激光损伤阈值要高;四是物理化学性能稳定,能在较恶劣环境下可靠工作。

性能优良的非线性光学材料是用非线性光学原理实现激光防护的关键。

目前,采用非线性光学原理实现激光防护方案很多,主要是利用三阶非线性光学效应。其中比较成熟的有利用 C_{60} 的光强非线性作成的光限制器。图1、图2示出了 C_{60} 分子结构和它的光限制特性。

C_{60} 薄膜材料当受到弱光照射时,输出光强与输入光强成正比,即有线性关系;而当受到强光照射时,输出光强出现饱和,输出光强几乎不随输入光强变化,即有非线性关系。 C_{60} 的这种光强非线性特性已

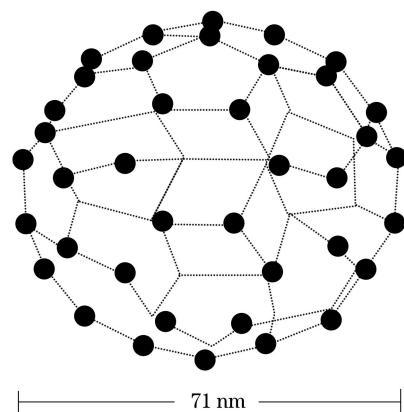


图1 C_{60} 分子结构

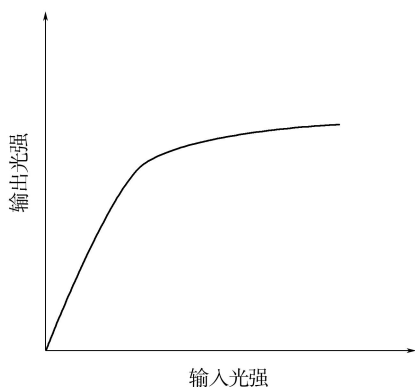


图 2 C_{60} 薄膜的光强非线性

被用来制成光限制器,采用这种光限制器可以实现光电传感器的激光防护。

哈尔滨工业大学开展了激光防护用高速开关和激光防护用 C_{60} 材料的研制^[9],国内首次用线性光学元件实现了 Nd:YAG 脉冲激光的限制^[1],但损伤阈值较低,对强光衰减不足。2003 年又报道了 Ag 与 C_{60} 的衍生物复合成了响应速度可达到纳秒的防护材料^[3]。浙江大学合成了复合物 ArOPdPc^[10] (aromatic oxygen palladium phthalocyanine)。总而言之,非线性有机材料的激光防护应用研究时间很短,但取得了很大的成就。不过由于其损伤阈值较低、对强光衰减不足,还没有得到广泛的应用。

3) 基于相变原理的激光防护它主要利用二氧化钒薄膜等材料吸收能量发生相变来达到阻止激光的目的。

由于激光与材料的相互作用首先是热效应,因而利用一些材料的热致相变机理可以实现强激光的防护。其中特别引人注意的是氧化钒(VO_2)热致相变薄膜材料,这是 20 世纪 80 年代发展的一种新型激光防护材料。 VO_2 薄膜是一种热致相变材料,在室温附近,为单斜结构,呈半导体态,禁带宽度 0.7eV,对应截止波长 $\lambda \approx 1800\text{nm}$,当温度上升到 68°C 时,转变为正交结构,呈金属态。随着相变发生,其电学

与光学性质,特别是红外波段的光学常数发生突变,利用其红外波段光学特性突变性质可作为 3000~5000nm 和 8000~12000nm 红外探测器的激光防护材料。

采用反应蒸发沉积方法,用硅做基底材料,镀制的单层 VO_2 薄膜,在未镀增透膜条件下,经可加温的分光光度计测试,在 $\lambda=2500\sim 12000\text{nm}$ 波段, 25°C 时的透射率为 55%,在不小于 68°C 时的透射率为 15%,透射谱为一平坦曲线。在镀增透膜条件下,两态的透射率可分别达到 85% 和 1%,可见 VO_2 薄膜在很宽波段内,在不同温度下具有不同透射率。其示意图如图 3 所示。

当氧化钒因激光束照射而受热时,材料将发生半导体-金属的相变过程。伴随这个过程,其光电

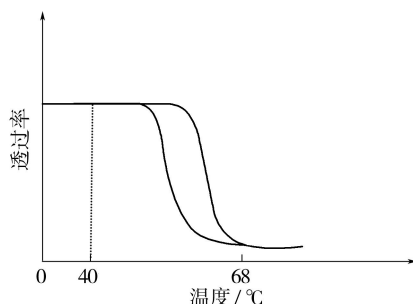


图 3 VO_2 薄膜的相变图

特性将发生较大的变化,特别是红外特性,将从高透射转变为高反射。利用 VO_2 和 V_2O_5 薄膜的光学性能随温度的变化而显示出大的改变这一特性可以阻挡红外光和电磁辐射的攻击,从而实现激光防护。 VO_2 的转变温度接近室温 (68°C),

因而受到极大的注意。 V_2O_5 的转变温度为 -123°C 左右,适合于低温应用。图 4 给出了 VO_2 薄膜在高、低温下的光谱透射特性。

据美国国防部的保密计划^[10],西屋电气公司研制成功氧化钒防激光涂层,用来保护卫星上的红外探测器免受激光武器的破坏^[14]。当强激光照射到卫星上镀有氧化钒膜的红外敏感窗时,具有光开关特性的薄膜立即防止激光通过,保护光电传感器。这种薄膜可正常工作 25 年。据称,这种薄膜由 VO_2 和 V_2O_5 组成,厚度达 $1\mu\text{m}$ 的薄膜已经制备成功。西屋科技中心采用在基片上涂镀对强光不透明的 VO_2 膜层制得了宽光谱强激光防护镜。国内哈尔滨工业大学和华中科技大学^[15,16]对 VO_2 薄膜用于激光防护的研究比较领先。

4 三类防护膜的优缺点比较及防护膜的发展趋势

理论与实验证明,基于不同原理的三类激光防护膜各有优缺点。

线性激光防护膜的优点是易于制备,阈值较高;缺点是对入射角度敏感,广角性差;当激光波长与光电传感器工作波长相同时,不能兼顾接收信号与抗激光致盲两种功能。

非线性膜的优点是反应速度快,激光波长与光电传感器工作波长相同时,能兼顾接收信号与抗激光致盲两种功能;缺点是制备

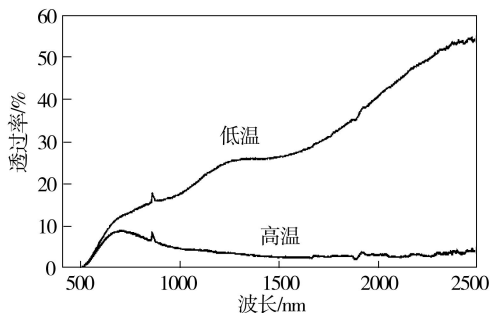


图 4 VO_2 薄膜高、低温透射光谱曲线

的 C_{60} 损伤阈值较低、对强光衰减不足, C_{60} 光学材料耐不住热冲击。

热致相变膜的优点是当激光波长与光电传感器工作波长相同时,能兼顾接收信号与抗激光致盲两种功能,防护带宽较宽;缺点是当激光照到 VO_2 膜上后,发生相变需一定时间,不能保证被保护产品一定不被损害,从金属态恢复到半导体态需要一定时间,在恢复时间内, VO_2 薄膜对红外辐射呈低透射,光电传感器不能接收信号,因此,它不能做到在强激光入射同时,照样接收信号的要求。

可以看出, C_{60} 光学材料可弥补氧化钽薄膜材料反应速度慢的缺点;而氧化钽材料又弥补了 C_{60} 光学材料耐不住热冲击的缺点,两者结合可以较好地实现卫星遥感光学仪器的激光防护。

另外,目前正在使用的激光防护滤光片无论是吸收型、反射型、还是复合型大多数只能在较少的特定波长上有防护作用,多波长(如 1064nm、1315nm、1319nm、2.8 μ m、3.8 μ m 等波长)激光防护将成为激光防护重要的发展方向。再者,高能激光武器攻击卫星时存在一定

的入射角,因此用于倾角入射的激光防护膜的研究也是激光防护的发展方向之一。可见光透过率、大的入射角及高的光密度是激光防护的发展方向之一。不断采用新技术和新材料,兼顾某一波长的防护和探测,也是激光防护的重要发展方向。

在某些探测波段内(如 3.55~3.93 μ m),同时存在探测波长与防护波长(如 3.8 μ m),为了确保探测波长和防护波长,就需要不断探索新技术和新材料来实现这项功能。

参考文献

- 1 任宁,秦凤英.国外激光对抗预警卫星的技术浅析[J].光电对抗与无源干扰,2003,69(1):12~15
- 2 邱家稳,达道安.卫星激光防护技术研究[J].真空与低温,1999,5(2):64~69
- 3 翁晓东,徐军,周文明.美俄激光反卫星武器的发展现状[J].激光与光电子学进展,2003,40(8):22~25
- 4 袁大发,唐勇.美国研制的高能激光武器系统[J].激光与光电子学进展,2004,41(12):15~18
- 5 谭显路.高能激光武器的发展和应用前景[J].航空兵器,2000,(3):25~29
- 6 刘大军.多波段激光防护塑料的研制[J].中国个体防护装备,2001,(3):10~11
- 7 罗振坤.激光致盲安全防护技术[J].激光杂志,2000,21(3):4~5
- 8 胡建平. HfO_2/SiO_2 光学薄膜激光损伤阈值的测量[J].光电子激光,2002,13(4):356~357
- 9 熊胜明.一种激光防护膜及其制作方法[P].CN 1439900A,2001
- 10 李世涛,乔学亮,陈建国.卫星多功能激光防护膜层的研究[J].激光杂志,2005,26(4):9~10
- 11 刘大军,何兴权.激光防护材料的研究现状[J].激光杂志,2002,23(6):7
- 12 Yachen Gao, Yuxiao Wang, Yinglin Song *et al.* Strong optical limiting property of a novel silver nanoparticle containing C_{60} derivative[J]. *Opt. Commun.*, 2003, 223:103~108
- 13 Zhan Hongbing, Wang Minquan, Chen Wenzhe. Encapsulation of aromatic oxygen palladium phthalocyanine in silica xerogel and its optical limiting property[J]. *Opt. Materials*, 2003, 22:377~382
- 14 付伟.激光防护技术及其发展现状[J].航天电子对抗,2001,(1):43
- 15 田雪松,掌蕴东. VO_2 用于红外激光防护技术的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2002
- 16 张弛,刘梅东.氧化钽薄膜的 Sol-gel 法制备及性能研究[D].武汉:华中科技大学,2003

光学期刊联合编辑部招聘市场营销人员

我们是一个朝气蓬勃、锐意进取的团队,我们立志打造中国最优秀的光学期刊。我们编辑的《光学学报》、《中国激光》、《激光与光电子学进展》和 *Chinese Optics Letters* 代表我国光学界的最高水平。

如果您是一个有梦想的人,并同时具备管理、市场营销、新闻传播、物理学、光学、光电子等方面的特长,有意与我们一起,为实现未来的光学期刊出版集团而努力,请与我们联系。

联系人:段家喜 电话:021-69918426

Email:duanjiayi@siom.ac.cn <http://www.opticsjournal.net>