

# 强激光对星载光电探测系统的干扰与破坏研究

牛燕雄<sup>1,2</sup> 张鹏<sup>2</sup> 姚建铨<sup>1</sup> 段晓峰<sup>2</sup> 汪岳峰<sup>2</sup> 郭丽<sup>1</sup>

(1 天津大学精密仪器及光电子工程学院激光与光电子研究所 教育部光电信息技术科学开放实验室, 天津 300072)

(2 解放军军械工程学院光学与电子工程系, 石家庄 050003)

**摘要** 建立了激光辐照星载光电探测器的数学模型,对激光干扰和破坏星载光电系统的机理进行了研究,分析了激光光束与探测器光轴的偏角对干扰和破坏的影响.以CO<sub>2</sub>激光辐照HgCdTe探测器的实例,研究了强激光对探测单元的破坏,得到其损伤阈值曲线,并从理论上证明了强激光对星载光电探测系统干扰和破坏的可行性.

**关键词** 激光干扰;激光破坏;星载光电探测;激光辐照

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A

## 0 引言

随着激光技术的发展,强激光对卫星及其光电探测系统的干扰和破坏引起广泛的重视.从二十世纪七十年代以来,美国、前苏联等国家先后进行了多次反卫星激光武器的研究和试验,为实战提供了较完整的数据资料<sup>[1,3]</sup>.由于卫星与地面之间的距离相对较远,例如低轨道侦察预警卫星轨道高度为400~1000 km,利用脉冲或连续的激光直接破坏卫星主体所需激光能量很大,而作为卫星“视觉系统”的光电探测系统是一种弱光探测系统,且光学系统对激光具有大的光学增益,因此激光辐照卫星极易造成光电探测系统的干扰和破坏.

本文讨论了强激光在大气中的传输,研究了强激光对光电探测单元的辐照破坏,以及探测系统与激光光轴的夹角对破坏效果的影响,建立了激光对星载光电探测系统的辐照模型,并以CO<sub>2</sub>激光辐照星载HgCdTe探测器为例,对激光辐照星载探测系统进行了研究和分析.

## 1 大气中的激光传输及其对强激光作用效果的影响

大气对激光传输的影响因素主要包括大气湍流的影响、大气气溶胶及大气分子(如CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O和O<sub>3</sub>)的吸收和散射等.气溶胶和大气分子的吸收和散射引起激光能量的衰减,作用距离下降;大气湍流引起激光束的偏转、抖动,强度起伏(闪烁)等效应,使激光的空间相干性下降,影响激光的作用效果和精度<sup>[2]</sup>.

大气分子对激光的衰减一般是波长选择性的,例如对10.6 μm激光的吸收较大而散射却较小.

吸收红外辐射的主要有水蒸气、CO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>.气溶胶是悬浮在大气中直径为0.001~100 μm的液体或固体微粒体系,其分布随高度、纬度和季节变化而变化,且一般情况下随着距离地面高度的增加而减少.气溶胶对激光传输的影响主要是吸收和散射造成的能量衰减.在假定大气均匀的条件下,大气透过率服从于Beer-Lambert定律<sup>[3]</sup>

$$\tau(\lambda, z) = e^{-\alpha_A(\lambda)z} e^{-\alpha_s(\lambda)z} \quad (1)$$

式中 $\tau(\lambda, z)$ 为波长 $\lambda$ 的激光传输距离 $z$ 后的透过率; $\alpha_A(\lambda)$ 为大气对波长 $\lambda$ 的激光的吸收系数; $\alpha_s(\lambda)$ 为对波长 $\lambda$ 的光的散射系数.

大气湍流产生大气折射率的随机变化,这些变化是10<sup>-6</sup>量级的,对于激光远距离传输的影响很大.根据Kolmogorov理论,两点间距 $r$ 满足所谓湍流惯性子区间内,湍流结构函数 $D_n$ 有如下形式<sup>[4]</sup>

$$D_n = C_n^2 r^{2/3} \quad (2)$$

$C_n^2$ 为大气湍流的折射率结构常数.

在大气湍流的影响下,激光光斑的形状会出现离散.图1为在理想高斯光束的传输公式中引入随机透过率后得到的高斯图样.如果高斯光束的能量较低,大气的湍流加剧,光斑将会更加离散,甚至破碎.

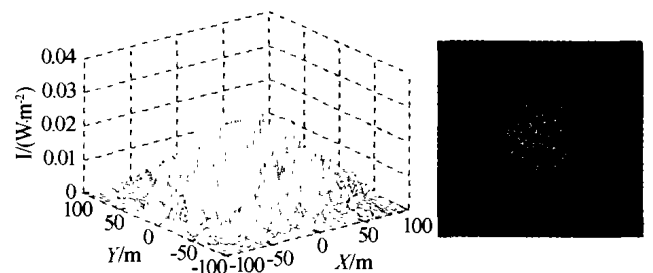


图1 随机透过率下的高斯图样

Fig. 1 Gaussian beam through a random disturbance

另外,强激光在大气中传输时,还会产生大气击穿、热晕效应等非线性效应<sup>[4]</sup>.热晕效应可导致发射激光的功率增大到一定值时,靶面上的功率密度

达到最大,此后即使再增加发射功率也不能增加靶面上的功率密度.这对于强激光远距离破坏卫星探测器是十分不利的.

大气对激光传输尤其是远距离传输的影响是非常复杂的.在复杂的地形和气象条件下,现有的理论模型仍相当有限.但对于研究激光破坏星载光电探测器而言,首先,我们是着重研究其破坏的可能性,只需要做出一个数量级的评估,而不是精确的测量,也就是说,在这样的近似下,对于远距离入射来的激光,只需考虑其光斑中最强的部分是否能造成破坏或干扰即可;其次,随着太空激光武器的发展,对于卫星的破坏可以在大气层以外实施,这时大气的影 响更小了;第三,由于大气条件的复杂性和互异性,不易得到确定的模型.基于以上三点考虑,我们在本文中不须引入复杂的大气模型,而为了简单起见,可对某一波长激光的各种大气衰减效应统一地用一个大气透过率系数来代替,此外对于发射系统及光电探测器对于激光的衰减也同样用透过率系数来表示,即有衰减因子  $\tau = \tau_1 \tau_2 \tau_3$  (其中  $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、 $\tau_3$  分别为发射系统、大气和接收系统的透过率).

## 2 探测器上激光辐照功率的分布模型

基模高斯光束的横向振幅分布为<sup>[5]</sup>

$$E(x, y, z) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} e^{-\frac{x^2+y^2}{\omega^2(z)}} e^{-i[kz + \frac{\pi}{2R(z)} - \arctan \frac{z}{f}]} \quad (3)$$

式中

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/f)^2} = \omega_0 \sqrt{1 + (\lambda z / \pi \omega_0^2)^2} \quad (4)$$

$$R(z) = z + f^2/z \quad (5)$$

$R(z)$ 、 $\omega(z)$  分别表示  $z$  处高斯光束的等相位面曲率半径及光斑半径; $z$  轴取激光的发射光轴方向,原点在光束的腰斑中心; $\omega_0$  为高斯光束的腰斑半径,且有

$$f = \pi \omega_0^2 / \lambda \quad (6)$$

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{\lambda}{\pi \omega_0} \quad (7)$$

式中,  $\theta$  为激光发散角.

则对于确定位置的探测器,考虑到传输过程中的衰减因子,激光照射的光强可以表示为

$$I(x, y) = I_0 \left[ \frac{\omega_0}{\omega(z)} e^{-\frac{x^2+y^2}{\omega^2(z)}} \right]^2 \tau = \frac{P_0 \tau}{\pi \omega^2(z)} e^{-2\frac{x^2+y^2}{\omega^2(z)}} \quad (8)$$

式中,  $I_0 = E_0^2$ ,  $P_0 = I_0 \pi \omega_0^2$ . 上式可用极坐标形式表示为

$$I(r) = \frac{P_0 \tau}{\pi \omega^2(z)} \exp\left[-2\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right] \quad (9)$$

设探测器接收物镜的面积为  $S_r$ , 探测单元的面积  $S_u$ , 则探测单元上的光强度为

$$I_u = IS_r / S_u \quad (10)$$

## 3 强激光对星载光电探测系统的干扰和破坏

### 3.1 激光对光电探测器的干扰和破坏

强激光对探测器的干扰或破坏效应主要有:强激光使探测器产生饱和效应及记忆效应、强激光致半导体材料电学参数的改变,热效应破坏探测器材料以及力学效应造成探测器结构的硬破坏等.本文主要讨论热效应破坏.强激光对探测器的热效应破坏主要表现为对探测器材料的加热,使探测器的温度迅速升高,可出现热饱和、热形变、熔化、气化、等离子体喷溅等现象.

探测器温升是一个比较复杂的三维模型<sup>[6,7]</sup>,考虑到经过远距离传输后,激光光斑的尺寸远大于激光脉冲作用时间内热量的传播深度,则可按一维热传导问题处理,并把探测器视为表面被均匀加热的半无限大物体.此时的热传导方程为<sup>[8]</sup>

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{a_i} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (11)$$

探测器表面的激光功率密度在时间上恒定不变,且分布均匀时的边界条件为

$$z = 0, -\lambda_i \partial T / \partial z = \alpha I_i \quad (12)$$

$$z = \infty, t = 0, T = 0 \quad (13)$$

则在材料表面处的温升为

$$T(0, t) = \frac{2\alpha I_i}{\lambda_i} \sqrt{\frac{a_i t}{\pi}} \quad (14)$$

式中,  $\alpha$  为探测器表面对激光的吸收比,  $I_i$  为作用于探测器表面的激光功率密度,  $a_i$  为探测器材料的热扩散率,且  $a_i = \lambda_i / \rho c$ ,  $\rho$  为材料密度,  $c$  为比热容,  $\lambda_i$  为材料的热导率.研究表明<sup>[9]</sup>当温度大于 353 K 时, Hg 析出;温度高于 423 K 时,晶体上的焊接引出线的 In 会熔化;温度达 993 K 以上, HgCdTe 熔化.此外,温度的变化能够引起  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  禁带宽度、长波限和峰值响应波长等参数甚至材料组分结构的改变,根据 Schmit 公式<sup>[10]</sup>

$$\lambda_c = [1.28x - 0.20 + 0.264x^2 + 4.22 \times 10^{-4} T(1 - 2.08x)]^{-1} \quad (15)$$

$\lambda_c$  为探测器响应的长波限,  $T$  为温度.

则激光辐照探测器后,随着探测器温度的变化,可造成响应波长发生变化,探测器的性能下降.

### 3.2 探测器与激光束夹角对激光辐照的影响

由于卫星绕地球转动、自身旋转以及激光的抖动或瞄准精度等因素的影响,导致激光射向卫星时,与探测器轴线将存在一定的夹角(如图 2).图中虚线部分为以高斯光束考虑,直线为能量均匀分布考虑.设激光器的输出功率为  $P_l$ , 发散角为  $\theta_l$ , 卫星

与激光器的空间距离为  $l$ , 探测单元接收到的功率为  $P_2$ , 探测器接收物镜的半径为  $d$ , 其面法线与激光光轴的夹角为  $\theta_2$ ,  $\tau_2$ 、 $\tau_3$  分别为大气和接收系统的透过率, 且有  $\tau = \tau_2\tau_3$ .

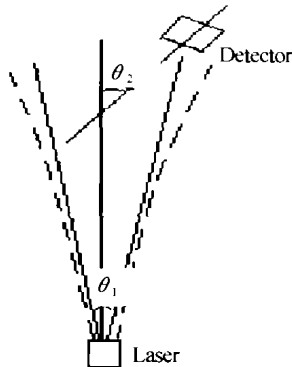


图2 探测器与激光束的相对位置

Fig.2 The relative position of laser and detector

对于激光光束截面的功率分布是均匀的情况, 辐照到探测单元的功率为

$$P_2 = P_1 \tau \frac{\pi d^2 \cos \theta_2}{\pi \left(\frac{l\theta_1}{2}\right)^2} = 4P_1 \tau \frac{d^2 \cos \theta_2}{l^2 \theta_1^2} \quad (16)$$

对于高斯光束的情形, 由于星载探测系统的接收镜头相对于很大的激光光斑尺寸来说可近似为一个点, 则可用探测面中心的光强度作为整个探测器面的平均光强度, 并设探测器中心与激光束中心的距离为  $r$ , 则

$$P_2 = P_1 \tau \frac{d^2 \cos \theta_2}{\omega^2(l)} \exp \left[ -2 \frac{r^2}{\omega^2(l)} \right] \quad (17)$$

### 3.3 数值计算

设激光器的发射波长  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ , 脉宽为  $1 \mu\text{s}$ , 激光发散角  $\theta_1 = 2 \text{ mrad}$ , 卫星与激光器的距离  $z = 400 \text{ km}$ , 发射系统透过率为 0.9, 取  $\text{CO}_2$  激光大气透过率  $\tau_2 \approx 0.6$ , 接收系统透过率  $\tau_3 = 0.8$ , 接收物镜的半径为 5 cm, 探测器单元的尺寸为  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ , HgCdTe 探测器的相关参量取<sup>[10]</sup>:  $\rho = 7.6 \text{ g/cm}^3$ ,  $c = 0.15 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ ,  $k = 0.2 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$ ,  $\alpha = 0.56$ . 计算结果见图 3 ~ 图 6.

图 3 为根据 3.1 中的破坏温度计算出的探测器

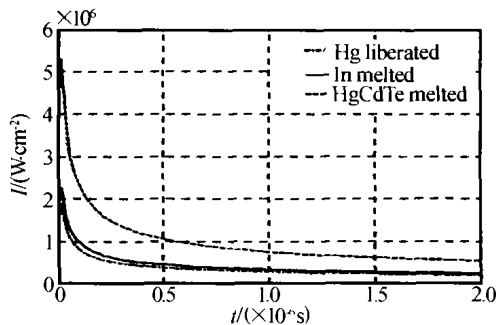


图3 探测器三种破坏状态下的阈值曲线

Fig.3 Threshold curves in three kinds of situation for damage

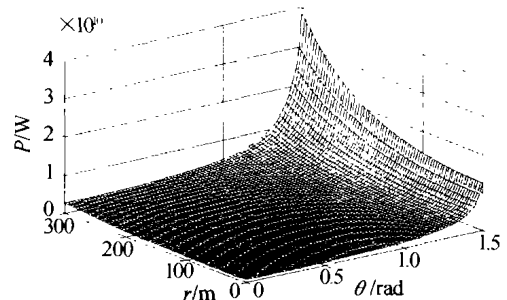


图4 不同偏角和位置下达到破坏的发射功率

Fig.4 Emitting power at different offset angles and positions for damage

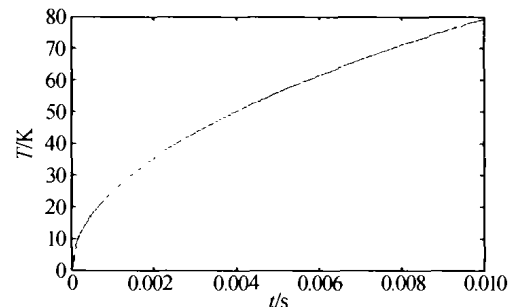


图5 温升随时间的变化曲线 ( $P_1 = 2 \text{ MW}$ )

Fig.5 Temperature rising as a function of time in the equ. (14)

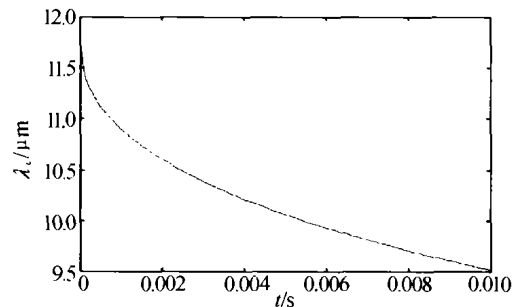


图6 探测器长波限的变化曲线 ( $x = 0.20$ )

Fig.6 The maximum wavelength of HgCdTe depend on time 在三种破坏状态下的阈值光强度曲线. 从图中可以看出表面温度达到破坏所需的光强度随脉冲作用时间的增长而下降, 这是热量积累的效果.

图 4 为探测器与激光光束在不同夹角、不同的瞄准精度下达到破坏所需的发射功率曲线图. 从图中可以看出, 发射功率随夹角的增大以及瞄准误差的增大而逐渐增大, 夹角的影响比距离的影响显著, 这是因为高斯激光的光强在  $\omega(z)$  内的变化幅度不大; 而夹角增大到一定值时, 直接作用在探测器上的光强很小, 夹角趋于  $90^\circ$  时, 发射功率更是趋于无穷大. 另外, 计算中得到的所需发射功率很大 ( $10^9$  量级), 这与所取的距离和破坏阈值有关; 同时也说明, 要从地基直接硬破坏探测器的材料是非常困难的. 但是, 如果考虑到光电转换系统的增益, 则对于光电系统的破坏阈值将大大降低.

图 5、图 6 分别为根据 3.1 中的模型得出的变化曲线, 从图 6 中可以看出探测器响应的长波限随温度的上升向短波方向移动. 由于采用一维半无限大加热模型, 所以变化幅度较大.

## 4 结论

本文的推导中,我们得到了激光辐照卫星探测器的接收功率分布模型,不但适用于本文所讨论的红外探测器的破坏研究,也适用于其他光电探测器的破坏或防护研究.通过研究表明,探测器与激光束的夹角对激光破坏卫星探测器的影响是非常显著的.要想提高激光对星载探测器造成有效破坏的概率,一是可以通过进一步提高发射功率;二是可以采用高重频、短脉宽激光;三是压缩激光发散角;四是提高激光瞄准的跟踪精度;另外,还可以通过在高空或外太空发射激光,以减少传播距离和大气的影

### 参考文献

- 1 农宁宁,林永.激光武器技术的发展现状.电子器件,1999,22(4):299~305  
Nong N N, Lin Y. *Journal of Electron Devices*, 1999, 22(4):299~305
- 2 张逸新,迟泽英.光波在大气中的传输与成像.北京:国防工业出版社,1997.5~17,63~82  
Zhang Y X, Chi Z Y. *The Propagation and Imaging of the Light Wave in Atmosphere*. Beijing: Press of National Defense Industry, 1997. 5~17,63~82
- 3 阎吉祥.激光武器.北京:国防工业出版社,1996.33~45,278~288  
Yan J X. *Laser Weapons*. Beijing: Press of National Defense Industry, 1996. 33~45,278~288
- 4 龚知本.激光大气传输研究若干问题进展.量子电子学报,1998,15(2):114~133  
Gong Z B. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, 15(2):114~133
- 5 俞宽新,江铁良,赵启大.激光原理与激光技术(第二版).北京:北京工业大学出版社,2001.210~214  
Yu K X, Jiang T L, Zhao Q D. *Laser Theory and Laser Technology*. Beijing: Beijing Industry University Press, 2001. 210~214
- 6 郑瑞伦,刘俊.强激光辐照下金属材料表面热力学效应.光子学报,2002,31(4):480~484  
Zheng R L, Liu J. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(4):480~484
- 7 刘顺发,陈洪斌.激光加热物体的三维模型计算.光子学报,2000,29(3):267~270  
Liu S F, Chen H B. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(3):267~270
- 8 陆建,倪晓武,贺安之.激光与材料相互作用物理学.北京:机械工业出版社,1996.25~28  
Lu J, Ni X W, He A Z. *The Physics of the Interacting of Laser and Materials*. Beijing: China Machine Press, 1996. 25~28
- 9 蒋志平,梁天骄,陆启生,等.激光辐照PC型HgCdTe探测器热效应的计算.应用激光,1995,15(4):155~156  
Jiang Z P, Liang T J, Lu Q S, et al. *Applied Laser*, 1995, 15(4):155~156
- 10 段晓峰,牛燕雄,张雏,等.激光辐照HgCdTe探测器的温度场数值分析.光电子·激光,2003,14(2):191~193  
Duan X F, Niu Y X, Zhang C, et al. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003, 14(2):191~193

## Investigation of Laser Disturbance and Damage to Satellite-borne Photoelectric Detecting System

Niu Yanxiong<sup>1</sup>, Zhang Peng<sup>2</sup>, Yao Jianquan<sup>1</sup>, Duan Xiaofeng<sup>2</sup>, Wang Yuefeng<sup>2</sup>, Guo Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Optoelectronic Information Science and Technology Laboratory, Tianjin University, Tianjin 300072

<sup>2</sup> Department of Optics & Electrical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003

Received date: 2003-07-07

**Abstract** High-power laser can disturb or destroy the photoelectric detecting system (PDS). A mathematical model of the laser irradiation on the satellite-borne PDS was set up. And the damage mechanism of high-power laser to PDS was studied; the effect of the offset angle between detector and laser's axis to the laser power illuminated on the surface of detecting element was discussed. A numeric analysis about CO<sub>2</sub> laser irradiating HgCdTe detector was given as an example for the investigation.

**Keywords** Laser disturbance; Laser damage; Satellite-borne photoelectric detecting; Laser irradiation



**Niu Yanxiong** was born in Wuji, Hebei, China, in 1967. He received the master's degree of military optics from the National Defense Technology University in 1992. He is currently an adjunct professor and now studying for the doctor's degree of physical electronics in Tianjing University. His research interest at present is in the fields of laser technology and optoelectricity countermeasure. More than 30 papers have been published.