

脉冲激光对星载探测器的干扰和损伤分析

张英远^{①②} 郑荣山^② 刘劲松^③

^①(西安电子科技大学 西安 710071)

^②(东北电子技术研究所 锦州 121000)

^③(华中科技大学激光技术国家重点实验室 武汉 430074)

摘要 该文采用高斯光束辐照半无限固体的温升模型,研究了探测器表面温升与激光干扰和损伤阈值的变化关系。发现脉冲CO₂激光对探测器的干扰和损伤与脉宽无关,只与脉冲能量密度有关,探测器表面温升与入射激光脉冲能量密度成正比关系,干扰阈值比损伤阈值要低一个数量级。通过理论分析,求出了干扰和损伤星载HgCdTe探测器所需CO₂激光的脉冲能量。定性分析结果表明高平均功率重频脉冲激光更容易对星载探测器造成有效干扰和永久性损伤。

关键词 激光干扰,激光损伤,脉冲激光,星载探测器

中图分类号: TN249, TN362

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)09-1758-03

Analysis of Pulsed Laser Disturbance and Damage on Satellite-borne Detector

Zhang Yin-yuan^{①②} Zheng Rong-shan^② Liu Jin-song^③

^①(Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China)

^③(State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract A semi-infinite thermal model is presented which describes temperature rise in photoelectric detector under pulsed laser irradiation. The laser disturbance and damage thresholds with the detector's temperature rise are analyzed. The results show the disturbance and damage of detector are independent of the CO₂ laser pulse-width, only depend directly on the energy density, at the same time, the disturbance threshold is one order lower than damage threshold. A numeric analysis about pulse CO₂ laser irradiating satellite-borne HgCdTe detector is given. The feasibility of high average repetitive pulse laser disturbance and damage satellite-borne detector is qualitatively analyzed.

Key words Laser damage, Laser disturbance, Pulsed laser, Satellite-borne detector

1 引言

脉冲二氧化碳激光器,由于具有易于获得高能、高峰值功率的激光脉冲输出的优点,常被用于干扰和损伤光电探测器。已有许多学者报道了激光对各种光电探测器干扰和损伤机理的实验和理论研究,得到了大量的实验结果,并发现了很多激光干扰和损伤光电探测器的规律^[1-3]。近年来强激光对远程光电探测器的干扰和损伤问题引起了广泛的关注^[4],美国和前苏联进行了多次激光反卫星试验,影响最大的一次是美国军方于1997年10月在白沙导弹靶场采用中红外先进化学激光器(MIRACL)和低功率化学激光器(LPCL)进行激光照射卫星探测器实验,出人意料的是两种激光器均对探测器起到了很好干扰效果,但都未对探测器造成永久性损伤。脉冲激光对探测器的干扰表现为探测器的响应率在激光照射时大幅度下降,引起探测器暂时失效,当激光脉冲撤走后,探

测器的各项指标能迅速恢复正常;而当激光脉冲能量足够高时,引起探测器光敏面发生变形、爆裂和熔融等不可逆变化时,我们称为激光损伤,显然脉冲激光对探测器的干扰比损伤更容易实现。由于卫星轨道距地面很远(约400km),因此评估激光对星载探测器的干扰和损伤能力时,需要考虑大气对激光束传输的影响,为了简单起见,我们采用合理的 η_a 表示激光受大气吸收、散射等影响后的激光传输效率,本文仅限于研究红外脉冲激光对星载探测器的干扰和损伤可能性,并以HgCdTe探测器为例,初步分析了脉冲CO₂激光对星载探测器的干扰和损伤能力。定性分析表明,高平均功率重频脉冲激光更容易对星载探测器形成有效干扰和永久性损伤。

2 脉冲激光干扰和损伤探测器的温升模型

脉冲激光辐照干扰和损伤探测器的原因很复杂,但起主要作用的是热效应。在计算探测器损伤阈值时,可以做一个合理的假设,假定探测器的干扰和损伤是由探测器受激光辐照表面的温升引起的。采用高斯光束辐照半无限固体的二维

模型,可以得到干扰和损伤发生时探测器表面的温升和激光能量密度的关系。设 ΔT_{th} 是发生干扰或永久性损伤时的最小温升。探测器表面可以看作光热特性各向同性的半无限固体,其吸收系数看作无穷大。辐照的高斯光束为 $P(r) = P_0 \exp(-r^2/a^2)$,探测器表面的温度分布为^[5]

$$\Delta T(r, z, \tau) = \frac{(1-R)P_0 a^2}{\rho c (\pi k)^{1/2}} \int_0^\tau \frac{dt}{t^{1/2} (4kt + a^2)} \cdot \exp\left[-\left(\frac{z^2}{4kt} - \frac{r^2}{4kt + a^2}\right)\right] \quad (1)$$

其中 a 为高斯光束的腰斑半径, R 是表面反射率, ρ , c 分别是材料密度和比热, k 是热扩散率。在探测器表面($z=0$)光束中心($r=0$)处温升为

$$\Delta T(0, 0, \tau) = \frac{(1-R)P_0 a}{\rho c k \pi^{1/2}} \times \arctan\left(\frac{4k\tau}{a^2}\right)^{1/2} \quad (2)$$

从式(2)可得到温升为 ΔT_{th} 所需的功率密度 P_{th}

$$P_{th} = \frac{\Delta T_{th} \rho c k \pi^{1/2}}{(1-R)a \arctan\left(\frac{4k\tau}{a^2}\right)^{1/2}} \quad (3)$$

功率密度阈值 P_{th} 乘以 τ 即可得到能量密度阈值 E_{th} 。由于实际探测器材料的吸收系数 α 是有限的,以上表达式只在长时间内热传导的距离远大于吸收深度(α^{-1})时才有效。当辐照时间很短时热传导可忽略,此时的能量密度阈值 E_{th} 可表示为

$$E_{th} = \frac{\Delta T_{th} \rho c}{(1-R)\alpha} \quad (4)$$

综合式(3),式(4)对于实际的探测器,能量密度阈值可近似地表示为

$$E_0 = E_{th} \left[1 + \frac{k\tau\alpha\pi^{1/2}}{a \arctan(4k\tau/a^2)^{1/2}} \right] \quad (5)$$

式(5)中第1项在短时间内起主要作用,因为热传导可忽略,其温度变化取决于吸收深度。第2项在长时间内起主要作用,此时热扩散距离 $\sqrt{k\tau} \square \alpha^{-1}$,当 $4k\tau < a^2$ 时

$$E_0 \approx E_{th} \left[1 + \frac{\alpha(k\pi\tau)^{1/2}}{2} \right] \quad (6)$$

当 $4k\tau \gg a^2$ 时

$$E_0 \approx E_{th} 2k\tau\alpha / a\sqrt{\pi} \quad (7)$$

从以上过程可看出能量密度阈值 E_0 与脉宽 τ 的依赖关系显示了3个不同的性能区域。(1)对于短时间($\sqrt{k\tau} \square \alpha^{-1}$),在吸收深度以外没有热量扩散,因此能量密度阈值与光束的腰斑半径无关, E_0 近似为常量, P_0 随 τ 成反比关系变化。(2)对于长时间($\sqrt{k\tau} \square a/2$),被加热的探测器表面与周围环境达到稳态热分布,这时的热扩散对探测器的温升起主要作用,表现为能量密度阈值与光束的腰斑半径成反比关系, P_0 近似为常量, E_0 随 τ 成正比关系变化。(3)当辐照时间介于上述两

种情况之间时, E_0 正比于而 P_0 反比于 τ 的平方根。

3 脉冲CO₂激光对HgCdTe探测器的干扰和损伤分析

HgCdTe探测器有两种工作方式,分别工作在常温下和制冷状态下,常温HgCdTe探测器的灵敏度较低,受干扰和损伤的阈值比制冷状态工作的HgCdTe探测器高。下面以脉冲CO₂激光辐照室温HgCdTe探测器为例,根据以上温升模型,可以求出脉冲CO₂激光的干扰和损伤的能量和功率密度阈值。假定探测器的响应率下降两个数量级时认为激光对探测器形成了有效的瞬时干扰,当探测器表面发生熔融时认为激光对探测器形成了永久损伤。室温HgCdTe探测器的主要参数为^[6]: 10.6 μm 处的吸收系数 $\alpha=100\text{cm}^{-1}$,热扩散率 $k=0.01\text{cm}^2\text{s}^{-1}$,熔融温度 $T_{\text{melting}}=707^\circ\text{C}$,密度 $\rho=7.95\text{gcm}^{-3}$,比热 $c=0.18\text{Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$,光敏面反射率 $R=0.3$ 。探测器响应率的下降主要与载荷子的寿命和数目有关,Arora^[7]发现当探测器的响应率下降两个数量级时的温升约为70 $^\circ\text{K}$ 。载荷子的寿命从 $5 \times 10^{-5}\text{s}$ 下降到 $5 \times 10^{-6}\text{s}$,载荷子数目从 $5 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$ 增至 $6 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 。

由于脉冲CO₂激光的脉宽为0.1 μs –10 μs ,热传导深度 $D=\sqrt{k\tau}$ 为0.32–3.2 μm ,远小于吸收深度 $\alpha^{-1}=100\mu\text{m}$,因此无须考虑热扩散,采用式(4)可以得到在探测器发生永久性破坏前探测器温升与入射激光能量的关系,如图1所示。显然探测器温升与入射激光束的能量密度成正比。在满足 $\sqrt{k\tau} \ll \alpha^{-1}$ 条件的前提下,探测器的温升与激光脉宽无关,只与激光束的能量密度有关。利用式(4),可以得到脉冲CO₂激光近距离干扰室温HgCdTe探测器的能量密度阈值 $E_r=1.43\text{J/cm}^2$,脉冲CO₂激光近距离造成室温HgCdTe探测器永久损伤的能量密度阈值 $E_d=13.9\text{J/cm}^2$,这个损伤阈值与文献[6]中报道的19 J/cm^2 非常接近。

高斯激光束随传输距离的增大,光斑进一步扩大和发散,横向分布趋于平缓,加上大气扰动作用,使得激光束的分布更加均匀,因此可以认为到达卫星探测器表面的光强分布是均匀的。由激光器发射高能脉冲CO₂激光,经激光发射系统后方向性进一步得到改善,然后射向卫星上的接受系统。星载探测器一般都是通过一个接收望远镜光学系统将地面的辐射聚焦到位于焦平面的一个多元探测器阵列上,对地面的或低层大气中的物体成像。根据以下公式可以计算进入卫星探测器光敏面的激光能量密度。

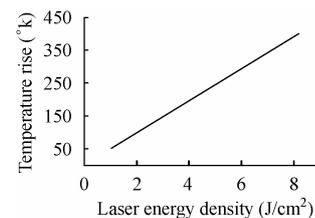


图1 探测器表面温升与激光能量密度的变化关系
Fig.1 Variety relation between temperature rise and laser energy density

$$E = \frac{\eta_a \eta_1 \eta_2 G W_0}{\pi (L \theta / \beta)^2} \quad (8)$$

式中 η_1 , η_2 , η_a 分别为激光发射光学系统和卫星接受系统的激光传输效率, L 为卫星轨道高度, θ 为激光器光束发散角(半角), 设 $\eta_1=0.8$, $\eta_2=0.9$, $\eta_a=0.5$, $L=400\text{km}$, $\theta=2\text{mrad}$, 假定激光发射系统的光束发散角的压缩比为 $\beta=20$, 星载光电传感器的光学天线增益 $G=10^7$, 根据式(8)可以得到

$$E = 0.072 W_0 \quad (9)$$

将 $E_r=1.43\text{J}/\text{cm}^2$ 代入上式可以求出干扰星载 HgCdTe 探测器所需的脉冲 CO_2 激光能量阈值为 19.9 焦耳; 将 $E_d=13.9\text{J}/\text{cm}^2$ 代入上式得到致损星载 HgCdTe 探测器所需的脉冲 CO_2 激光能量阈值为 193 焦耳。

对于重复频率脉冲激光与探测器的作用效果, 实验和理论分析的报道很少^[8]。原因是重复频率脉冲激光与探测器作用时, 涉及到激光的脉冲能量、脉冲宽度、作用时间和重复频率等多种条件的变化, 此时除了考虑热吸收外, 还需考虑热传导和热扩散等对温升的影响。我们可以作以下定性的分析: 在低重复频率下, 激光脉冲辐照探测器光敏面时, 温度变化呈强烈的周期振荡升温。随着激光脉冲的到来, 温度迅速上升, 激光脉冲结束后, 由于热量向探测器纵向和径向扩散、传导及与环境对流、辐射换热造成热损失, 使得光敏面温度快速下降, 脉冲间的热积累效应不明显, 脉冲间温升变化不大, 重复频率越低, 脉冲间的热积累效应越不明显, 干扰和破坏探测器所需的脉冲能量越高。随着激光脉冲重复频率的增加, 这种温升振荡特性逐渐减弱, 前一个脉冲的热量还来不及完全扩散和传导, 后一个脉冲的加热作用使得光敏面的温升进一步加剧。重复频率越高, 脉冲间的热积累效应越明显, 因此干扰和破坏探测器所需的脉冲能量越低。每个特定的重复频率存在不同的激光脉冲能量阈值, 使得脉冲间的热损失与热积累达到平衡。以上分析表明, 当激光脉冲能量大于某个阈值时, 探测器的表面温升随重复频率脉冲激光器的平均功率和作用时间的增大而增大。因此高平均功率重复脉冲激光更容易对星载探测器形成有效干扰和永久性损伤。

4 结束语

考虑到探测器表面温度升高是激光干扰和永久性损伤探测器的直接原因, 通过二维温升理论模型, 得到激光脉冲能量密度和峰值功率密度与温升的变化关系。在激光脉宽较窄(小于 10^{-4}s)时, 发现探测器表面温升与入射激光的能量密度成正比, 探测器的干扰和损伤能量密度阈值与激光脉宽无关。根据已知的温升数据, 求出了干扰和损伤能量密度阈值, 干扰阈值比损伤阈值要低一个数量级。理论结果与已有的实验数据能够很好地符合。最后估算了干扰和损伤星载 HgCdTe 探测器所需 CO_2 激光的脉冲能量, 定性分析结果表明与单脉冲激光相比, 重复频率脉冲激光更能对星载探测器形成有效干扰和永久性损伤。

参考文献

- [1] Wood R M. Laser damage in optical material. Adam Hilger, Bristol and Boston, 1986: 104-106.
- [2] 蒋志平, 陆启生, 刘泽金等. 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.
- [3] Vaidya.Nathan. Laser damage in MWIR MCT detector. SPIE, 1995, 2114: 726-731.
- [4] 周建民, 郭劲, 付有余. 激光对远程目标光电探测器的干扰技术分析. 导体光电, 2004, 25(4): 326-328.
- [5] Bartoli F, Esterowitz L, Krumer M, et al..Irreversible laser damage in ir detector materials. Appl. Opt, 1977, 16(11): 2934-2937.
- [6] Vogt T, Joeckle R, Schwab C. Study of the effects of CO_2 laser irradiation on CdO.204HgO.796Te. Materials Science and Engineering, 1993, A168: 75-79.
- [7] Arora V K, Dawar A L. Effect of laser irradiation on the responsivity of HgCdTe detectors, Infrared Physics &Technology, 1996, 37: 245-249.
- [8] 柯常军, 万重怡. 红外光电探测器的激光损伤分析. 光学技术, 2002, 28(2): 118-122.

张英远: 男, 1968 年生, 高级工程师, 从事光电子技术的研究.
 郑荣山: 男, 1962 年生, 高级工程师, 从事光电子技术的研究.
 刘劲松: 男, 1959 年生, 博士生导师, 从事光电子科学与技术的研究.