

·光电系统·

光电探测系统激光辐照效应的远场仿真分析

张咏梅, 张建新

(东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000)

摘要:建立了激光辐照软损伤的远场仿真模型, 仿真了不同作用距离下激光辐照的远场功率分布, 三维关系曲线是一个斜率很大的上翘鞍形结构。分析和讨论了单元探测型和CCD型两种光电探测系统的远场激光辐照软损伤情况。

关键词:激光; 辐照损伤; 光电探测系统; 饱和; 阈值

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2011)06-0014-04

Far-field Simulation and Analysis on Laser Irradiation of Electro-optical Detection System

ZHANG Yong-mei, ZHANG Jian-xin

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

Abstract: The far-field simulation model of the soft-damage under the laser irradiation is established. The far-field laser power distribution of the different ranges is simulated and the 3D curve is a steep saddle shape structure with a very high slope. The far-field soft damage of the single-element and CCD electro-optical detection system are discussed and analyzed.

Key words: laser; irradiation damage; electro-optical detection system; saturation; threshold

光电探测的原理是基于光与探测材料之间相互作用的光电效应, 而激光是具有单色、单向、高亮等特点的相干光源。一方面, 当激光辐照强度处于光电探测系统的线性工作区时, 激光是高效的信号光源; 另一方面, 在激光辐照强度超出光电探测系统的线性工作区时, 光电探测系统会出现饱和、致眩、致盲等强光辐照效应, 导致系统的非正常工作、暂时性失效和功能退化。因此, 研究激光对光电探测系统的强光辐照效应具有重要的意义。

强光辐照效应是激光束与光电探测系统相互作用, 导致光电材料或器件的功能性退化或暂时失效, 如致盲、致眩、饱和等各种光学性能的退化以及自动控制增益 AGC 电路失效, PN 结、结电容以及去耦电容软击穿、信噪比大幅降低等电学性能的退化。强

光辐照效应的特点是具有可恢复性、物理过程可逆。当强光去除后, 隔一段时间开机系统仍能正常工作。

20 世纪 70 年代, F. Bartoli 等人建立了强激光与光电探测器相互作用的理论模型^[1,2], 激光损伤模型为高斯光束辐照半无限固体的二维模型。激光损伤能量密度 E_0 表示为^[1]

$$E_0 = E_{\Delta T} \left[1 + \frac{k\tau\alpha\pi^{1/2}}{a \tan^{-1}(4k\tau/a^2)^{1/2}} \right] \quad (1)$$

其中,

$$E_{\Delta T} = \frac{\Delta T \rho c}{(1-R)\alpha} \quad (2)$$

式中, k 为热传导系数; τ 为激光脉宽; α 为材料吸收系数; a 为高斯光束的光斑半径; ΔT 为材料温升; R

收稿日期: 2011-12-14

作者简介: 张咏梅(1970-), 女, 山东人, 高级工程师, 主要从事光电技术方面的研究工作; 张建新(1968-), 女, 辽宁人, 高级工程师, 主要从事光电技术方面的研究工作。

为材料反射率; ρ 为密度; c 为比热容。

式(1)中的第一项表示短脉冲激光辐照的情况,其数值取决于材料的吸收(α^{-1}),热传导因素可忽略;第二项表示宽脉冲激光辐照的情况,热传导作用($k\tau$)^{1/2}是主导因素,材料的吸收因素不是主要的。

CCD电荷耦合器件的饱和串扰是强光辐照效应的主要研究方向之一。CCD器件发明后不久,国外就对强光致眩可见光CCD器件的机理进行了研究。1978年,R. H. Dyck和W. Steffe研究了面阵和线阵CCD器件的光学串扰效应^[3]。1985年,J.P.Lavine对CCD成像器件基于扩散的串扰效应进行了仿真^[4]。这些早期研究成果揭示了满阱溢流导致的串音饱和和机理。即CCD的每个像元等效于一个电容,势阱中所能容纳和处理的最大电荷数是一定的,当强光辐照CCD的局部时,CCD的光积分时间约为几微秒到几百微秒,而光生载流子产生时间却只需几个皮秒,这就使得光生载流子有足够的时间向邻近势阱发生“溢流”。从而引起CCD电荷耦合器件的“串音饱和现象”。

国内学者在CCD强光辐照效应方面也进行了大量的研究。1999年,曾雄文等人根据MOS器件的基本工作原理推导出了电荷耦合器(CCD)的输入输出函数关系的解析解,并在此基础上求得了CCD的串音阈值^[5]。2002年,王世勇等人研究了脉冲与连续激光辐照WAT-505EX型可见光CCD探测器系统时的“光饱和串音”现象,测量了CCD探测器系统的饱和阈值范围,并分析了造成饱和的原因。在激光重频为50 Hz和100 Hz时,观察到CCD图像中有雨滴状光斑在循环移动^[6]。2009年,王思雯和郭立红采用尾纤输出的808 nm连续激光对JAI CV-A50相机进行了辐照实验,观测到了饱和串扰和黑屏的强光辐照现象,给出了 3.55×10^{-5} mW/cm²的辐照饱和阈值^[7]。

在单元探测器的强光辐照效应方面,1991年,陆启生、蒋志平、刘泽金等人先针对InSb(PV)进行了激光辐照光伏型探测器瞬变行为的研究,给出了InSb探测器(PV型)在激光辐射下开路电压随时间变化的实验曲线^[8]。当光照功率密度达到器件饱和阈值以后,随着光功率密度的增加探测器电压输出信号反而下降甚至零压输出。1997年,该科研团队进一步研究了强激光与光电探测器相互作用瞬间可能产生的光学记忆、光学饱和、混沌、受激散射等一系列非线性光学效应^[9]。给出了某些光伏、光导型探测器以

及CCD的光学饱和阈值,InSb(PV)饱和阈值约为30 W/cm²;HgCdTe(PC)器件的饱和阈值约为8 W/cm²;1.06 μ m激光均匀照射东芝TD102C-1型CCD的光饱和功率为0.5 mW/cm²;而串音饱和功率约为100 mW/cm²。

文中基于点源辐射理论建立了激光远场作用下的功率密度模型,仿真了不同作用距离下的远场激光功率分布,分析和讨论了单元探测型和CCD型2种光电探测系统的强光辐照损伤情况。

1 远场仿真建模

激光在自由空间传播,激光的能量(功率)按传播距离的平方衰减,大气的吸收散射也会对激光造成很大的损耗。而激光对光电探测系统的辐照损伤是一定强度的激光与光电探测器及探测器后续电路综合作用的结果。所以,在远距离条件下,激光束对光电探测系统远场作用的定量分析显得至关重要。

假定激光器的激光束功率为 P_e 、激光束散角为 θ 。根据立体角的定义,激光器发射光束的立体角 Ω_e 为^[10,11]

$$\Omega_e = \frac{A}{R^2} = \frac{\pi r^2}{R^2} = \frac{\pi(2r)^2}{4R^2} = \frac{\pi\theta^2}{4} \quad (3)$$

式(3)中, A 为激光光斑面积; R 为光斑与激光器距离; r 为激光光斑半径; θ 为激光束散角。

发射激光束的强度 I_e 为^[10]

$$I_e = \frac{P_e}{\Omega_e} \quad (4)$$

式(4)中, P_e 为发射激光功率。

落在远场距离 R 处激光的照度 H 为^[12]

$$H = \frac{I_e}{R^2} = \frac{P_e}{R^2 \Omega_e} \quad (5)$$

则光电探测系统截获的激光功率 P_o 为^[13]

$$P_o = HA_o K_\phi = \frac{P_e}{R^2 \Omega_e} A_o K_\phi \quad (6)$$

式(6)中, A_o 为激光束照射到光电探测系统输入窗上的面积; k_ϕ 为倾斜因子。

对于平面目标, k_ϕ 表示为

$$k_\phi = \cos \phi \quad (7)$$

式(7)中, ϕ 为入射光线与光电探测系统输入窗法线的夹角。

考虑到光电探测系统的功率传递效率 η 和大气衰减,则落在光电探测系统传感器上的激光功率密

度为

$$p_d = \frac{P_o \tau \eta_s}{A_d} = \left(\frac{P_e}{R^2 \Omega_e} \right) \left(\frac{A_o}{A_d} \right) (\tau K \phi \eta_s) \quad (8)$$

式(8)中, τ 为激光大气传输单程透过率; A_d 为光电传感器面积。第一括号项表示激光发射功率通量密度, 第二括号项表示光电探测系统中光学系统的放大倍数; 第三括号项表示激光远场作用过程中的激光能量传输效率。

式(8)即为仿真的理论模型, 当远场光电探测系统传感器上的激光功率密度大于辐照损伤阈值时, 光电探测系统就会出现暂时性失效的致眩、致盲效应。

2 仿真与分析

不同探测器的辐照损伤阈值不同; 同一种探测器在激光参数(波长、连续激光、脉冲激光、脉宽、重频、辐照时间等参数)不同时, 其辐照损伤阈值也不同; 另外, 同一种探测器构成的各种光电探测系统, 由于放大电路的差异其辐照损伤阈值也不尽相同。为使结论具有普遍性, 以仿真实论模型为基础, 仿真了不同辐照损伤阈值的探测器在不同作用距离下产生强光辐照效应所需的激光器功率, 参见图1。

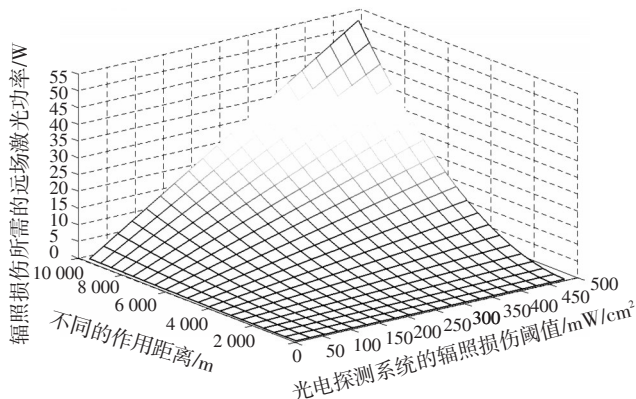


图1 辐照损伤阈值、作用距离与远场激光器功率之间的关系

仿真条件如下: 假定激光束正入射光电探测系统, 即 $k_\phi = 1$; 光电探测系统的功率传递效率 $\eta_s = 1$; 大气透过率 τ 约为0.83。

图1所示曲线是一个斜率很大的上翘鞍形结构, 反映出辐照损伤所需的远场激光器功率将随着光电探测系统辐照损伤阈值的增加、斜程作用距离的增大而快速增加。

由于对激光辐照损伤程度的界定不同, 所得的阈值也存在差异。而且辐照损伤阈值不仅取决于探

测器种类, 还与探测器的前放和AGC的增益直接相关。参照有关文献, 单元HgCdTe(PC)器件的光饱和和阈值^[9]约为 8 W/cm^2 , 单元InSb(PV)器件的光饱和和阈值^[9]约为 30 W/cm^2 。为使分析具有代表性, 折中选择 15 W/cm^2 的辐照损伤阈值来进行分析和讨论。

单元探测器产生辐照损伤所需的远场激光器功率如图2所示。

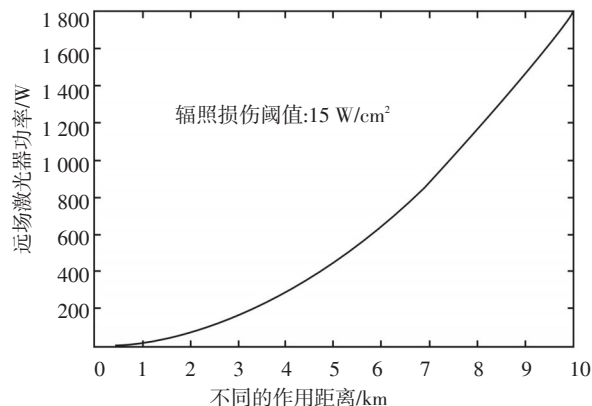


图2 单元探测器产生辐照损伤所需的远场激光器功率

CCD器件的激光辐照损伤阈值要远低于单元探测器。像素饱和及局部饱和的阈值在 10^{-5} mW/cm^2 数量级^[7], 全屏饱和的阈值最高也就在 100 mW 左右^[9]。计算了 100 mW 辐照损伤阈值时的远场激光器功率情况, 如图3所示。

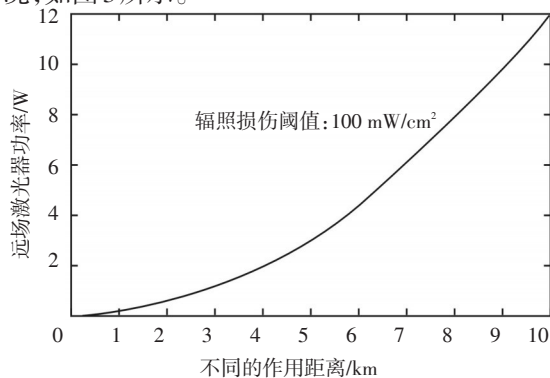


图3 CCD器件产生辐照损伤所需的远场激光器功率

3 结束语

激光远场辐照软损伤效果受探测器种类、探测器前放及读出电路、光学接收口径、作用距离、跟瞄精度、大气条件以及激光参数如束散角、脉宽、重频和波长等多种因素的影响。其中, 跟瞄精度和激光参数是重要因素。压缩激光束散角、提高跟瞄精度可以提高远场的激光功率密度。平均功率相同时,

不同脉宽、不同频率的激光束对光电探测系统的辐照损伤阈值不同。探测器积分时间、前放带宽、读出电路时钟、行/场频率等对强光辐照软损伤阈值有明显影响。

参考文献

- [1] F Bartoli. Irreversible damage in IR detector materials[J]. Appl. Opt, 1977, 16: 2934.
- [2] F Bartoli. A generalization in thermal model for laser damage in infrared detectors[J]. J Appl. Phys, 1976, 47: 2875.
- [3] R H Dyck, W Steffe. Effects of optical crosstalk in CCD image sensors[C]// in Proc. 5th Int. Conf on Applications of Charge-Coupled Devices. San Diego, CA, 1978: 55-61.
- [4] James p Lavine, Win-chyi Chang, Constantine N Anagnostopoulos. Monte-Carlo Simulation of the Photoelectron Crosstalk in Silicon Imaging Devices[C]// IEEE Transactions on Computer-aided Design. CAD-4(4), 1985: 531-535.

- [5] 曾雄文, 陆启生, 赵伊君, 等. CCD的光电特性研究[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(1): 47-51.
- [6] 王世勇, 付有余, 郭劲. 激光辐照面阵 CCD 探测器系统局部的干扰效应[J]. 半导体光电, 2002, 23(2): 106-108.
- [7] 王思雯, 郭立红. 激光对卫星探测器的干扰技术研究[J]. 半导体光电, 2009, 30(4): 622-625.
- [8] 陆启生, 蒋志平, 刘泽金. 激光辐照下 Insb 探测器(PV 型)的瞬变行为[J]. 1991, 3(1): 102-108.
- [9] 陆启生, 蒋志平, 刘泽金. 光电探测器中的非线性光学效应[J]. 红外与激光工程, 1997, 26(1): 12-21.
- [10] 车念曾, 闫达远. 辐射度学和光度学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.
- [11] 周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [12] 刘贤德. 红外系统设计基础[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1985.
- [13] R.D. 小哈得逊. 红外系统原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1975.

(上接第10页)

控制系统进行了设计。进行了系统结构设计, 平台采用 T 型结构, 并通过整体减振的方式隔离载体的高频振动。进行了控制系统设计, 利用陀螺稳定装置实现平台的粗级稳定, 高频快速反射镜实现平台的精级稳定, 对系统的控制模型进行建模, 采用粗精二级稳定的方法提高系统精度。进行了模拟仿真试验, 通过摇摆台来模拟车载环境试验进行系统测试, 试验结果表明该系统能达到较高的跟踪精度。

参考文献

- [1] 张国斌. 国外车载主动防护[J]. 国外坦克, 2002, 8(12): 30-32.
- [2] 张景旭, 王洋. 动载体光学图像视轴稳定技术[J]. 光电技术应用, 2007, 22(1): 4-8.
- [3] 王连明. 机载光电平台的稳定与跟踪伺服控制技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002: 29-42.
- [4] 毕永利, 刘洵, 葛文奇, 等. 机载多框架陀螺稳定平台速度稳定环设计[J]. 光电工程, 2004, 2(31): 16-18.
- [5] 周静淑, 刘朝晖, 许峰. 车载状态下光电经纬仪的减振防护研究[J]. 光子学报, 2007, 6(36): 244-247.
- [6] 潘平. 减震在车载光电系统中的应用[J]. 舰船光学, 1998,

- 2(8): 11-17.
- [7] 纪明. 车载机载稳瞄系统 FSM 补偿技术[J]. 火力与指挥控制, 1997, 1(22): 58-63.
- [8] 纪明. 武装直升机瞄准线粗/精组合二级稳定技术[J]. 航空学报, 1997, 5(18): 289-293.
- [9] 王岳宇, 赵学增. 补偿压电陶瓷迟滞和蠕变的逆控制算法[J]. 光学·精密工程, 2006, 1(13): 1032-1036.
- [10] 岳冰, 杨文淑, 傅承毓. 空间光通信中的快速倾斜镜跟踪实验系统[J]. 光电工程, 2002, 6(29): 35-39.
- [11] 马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. 光学工程, 1989, 16(3): 1-42.
- [12] 魏克新, 王云亮, 陈志敏, 高强. MATLAB 语言与自动控制系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 155-202.
- [13] Rogers R M. Weapon IMU transfer alignment using aircraft position from actual tests. Proc. of IEEE PLANS' 96, Atlanta, GA, 1996: 328-335.
- [14] 李亦君, 陈祖金. 某型光电跟瞄平台跟踪回路的设计与实现[J]. 航空兵器, 2006, 4(12): 38-39.
- [15] 毕永利, 王连明, 葛文奇. 光电稳定平台控制系统中数字滤波技术研究[J]. 仪表技术与传感器, 2005, 1(13): 54-55.
- [16] 孟中, 张涛, 戴明, 等. 陀螺滤波在改善伺服系统低速特性中的应用[J]. 压电与声光, 2006, 2(28): 109-110.