

· 光电系统与 设计 ·

## 混合频率激光对 CCD 探测器损伤机理

张 强<sup>1</sup>, 汪岳峰<sup>1</sup>, 韩玉东<sup>1</sup>, 黄明冀<sup>2</sup>, 董 伟<sup>1</sup>, 段欣涛<sup>1</sup>, 贾文武<sup>1</sup>, 殷智勇<sup>1</sup>

(1. 军械工程学院, 河北 石家庄 050003; 2. 空军石家庄航空四站装备修理厂, 河北 石家庄 050003)

**摘 要:**为了进行对 CCD 探测器的损伤机理的探索研究, 提出了采用双光束合成器件产生混合频率激光的原理与方法. 利用 Zemax 软件模拟了双光束合成器件, 同时对远场光斑进行了采集. 基于热传导和热弹性力学的基本关系式建立了混合频率激光辐照 CCD 探测器遮光铝膜层的热力耦合数学物理模型, 对热传导方程和应力平衡方程进行了半解析求解, 计算得到混合频率激光辐照 CCD 探测器的遮光铝膜层的瞬态温度场和环向热应力场, 并通过数值仿真比较了不同工作模式激光光源对 CCD 的损伤效果.

**关键词:**激光损伤; 面阵 CCD; 光束合成; 高重频; 高脉冲能量

**中图分类号:** TN249

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2010)01-0004-05

## Damage Effect of Mixture Frequency Laser to CCD Detectors

ZHANG Qiang<sup>1</sup>, WANG Yue-feng<sup>1</sup>, HAN Yu-dong<sup>1</sup>, HUANG Ming-ji<sup>2</sup>,  
DONG Wei<sup>1</sup>, DUAN Xin-tao<sup>1</sup>, JIA Wen-wu<sup>1</sup>, YIN Zhi-yong<sup>1</sup>

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Air force Shijiazhuang Avionic Four Equipment Repair Plant, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** In order to study the damage effect of CCD detectors, the principle and method of mixture frequency laser by using double beams combination device was proposed. The double beams combination device by using the ZEMAX was emulated, and the far field light spot was collected in the meantime. The thermal mechanical physical model of CCD light shading Al film irradiated by mixture frequency laser is set up based on heat conduction and thermal elastic mechanics theories, the heat conduction differential equation and stress-balance equation are solved by the semi-analytical method, the temperature field and thermal stress field of light shading Al film are obtained. Through the numerical simulation, the damage effects of CCD by the laser source in different working modes were compared.

**Key words:** laser induced damage; array CCD; beams combination; high repetition frequency; high pulse energy

CCD(charge coupled devices)电荷耦合器件, 是 20 世纪 70 年代初发展起来的新型半导体器件, 因其体积小、质量轻、灵敏度与分辨率高、功耗低等优点, 已被广泛应用于光电成像、监控等诸多商用及民用工程领域, 在较复杂的光电环境下, 以 CCD 图像

探测器为核心的精密光电设备极易受到激光的损伤而不能正常工作, 因此开展激光对 CCD 探测器的损伤机理的研究具有重要意义.

激光对 CCD 探测器损伤方式主要有 2 种: 一种是低重频高脉冲能量激光直接损伤 CCD 探测器或

收稿日期: 2010-12-04

基金项目: 总装备部武器装备军内科研基金项目

作者简介: 张强(1985-), 男, 黑龙江鸡西人, 硕士研究生, 主要从事光电工程方面的研究; 汪岳峰(1963-), 男, 博士生导师, 主要从事固体激光和仪器检测方面的研究.

使其深度饱和;另一种是高重频低脉冲能量激光或连续激光对 CCD 探测器产生软损伤,使之暂时性致盲或失效.近年来许多研究工作者已对上述 2 种方式的损伤机理进行了较深入的分析与探讨<sup>[1-4]</sup>.在此基础上进行了对 CCD 探测器的损伤机理的探索研究,为了较好地分析混合频率激光(即低重频高脉冲能量激光和高重频低脉冲能量激光混合作用)对 CCD 探测器的损伤机理,建立了混合频率激光辐照 CCD 探测器遮光铝膜层的热力耦合数学物理模型,通过数值仿真进行了不同工作模式激光光源对 CCD 的损伤效果评估.

## 1 双光束合成器件工作原理

混合频率激光是指光学器件将一束低重频高脉冲能量激光与一束高重频低脉冲能量激光合并成一束激光或使它们平行发射.由于 2 束激光是非相干光,它们在频域上是严格分开的,各光束之间没有相互作用,所以合束之后不会对各自的光学性质产生本质的影响<sup>[6]</sup>.目前光束合成的方法很多,比较常用的主要有以下几种<sup>[7]</sup>:几何光学法(平板玻璃法;缺角直角棱镜法;小角度全反射棱镜法);镀膜法(滤光片法;棱镜偏振分光镜法;平板偏振分光镜法;多面反射镜法);特殊晶体法(冰川石双窗 OE 双输出棱镜法).在损伤机理研究中,综合考虑成本、复杂性及技术实现难易程度,采用镀  $1.064 \mu\text{m}$  增反膜的直角棱镜做为光束合成器,并经由倒装望远系统将两路光束发射使其在远场形成合束.两光路合成及光束发射系统的技术方案如图 1 所示.

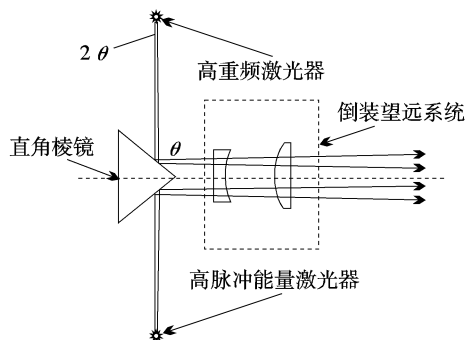


图 1 双光束合成器件工作原理图

图 1 中  $2\theta$  为激光发散角,其中高脉冲能量激光器与高重频激光器相对放置,且它们的光轴在一条直线上.两激光器发出的激光同时入射到等腰直角棱镜的两腰.棱镜两相互垂直的腰均镀有增反膜,则

两相向光束经过棱镜反射后将平行出射.两平行光束经过其后的倒装望远系统进一步的扩束准直后,向远场传播.由于出射激光具有一定的发散角,经过一定距离的传播后 2 路激光将会相互重叠变为一束激光,从而达到光束合成的目的.

## 2 光束远场合成情况的 Zemax 仿真

为了较直观地反映出远场光斑的合成情况,利用 Zemax 软件模拟了双光束合成器件,并利用矩形探测器探测到空间不同距离处的光斑图像.Zemax 是美国 Focus Software Inc. 公司的通用、高效的光学设计软件.在这里利用 Zemax 软件中的 NSC(non-sequential components 非序列元件)对整个双光束合成器件进行了模拟,其中高重频低脉冲能量激光和低重频高脉冲能量激光的光束发散角均为  $2 \text{ mrad}$ ,准直扩束系统的准直倍率为 5 倍,仿真结果如图 2 所示.

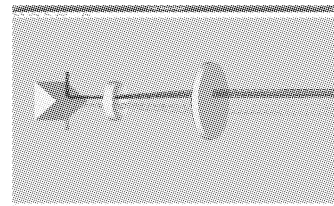


图 2 双光束合成器件的仿真图

图 3 所示为用空间矩形探测器探测到的双光束远场的合成情况,从图 3 中可以看到,在距发射面  $100 \text{ m}$  时,两光束的重合程度不高,可以明显地分辨出 2 个光斑没有重合;距发射面  $150 \text{ m}$  时的光斑已经很难分辨出是由 2 个光斑重合而成,可以认为 2 个光斑重合,光斑半径边缘区域约为  $0.1228 \text{ m}$ ,高能量区域半径约为  $0.1092 \text{ m}$ ;在距发射面  $5000 \text{ m}$  时,两光斑已经基本重合,光斑半径边缘区域约为  $5.466 \text{ m}$ ,高能量区域半径约为  $5.290 \text{ m}$ .

## 3 混合频率激光辐照 CCD 探测器的温度场和环向应力场的理论计算

导致 CCD 探测器发生损伤的机理有很多种,如:雪崩电离击穿、多光子吸收电离、非线性效应、饱和效应以及热-力损伤等.其中雪崩电离击穿、多光子吸收电离以及非线性效应等破坏机理仅在激光辐照功率密度极高等特定条件下居于主导地位<sup>[8]</sup>,且对此类

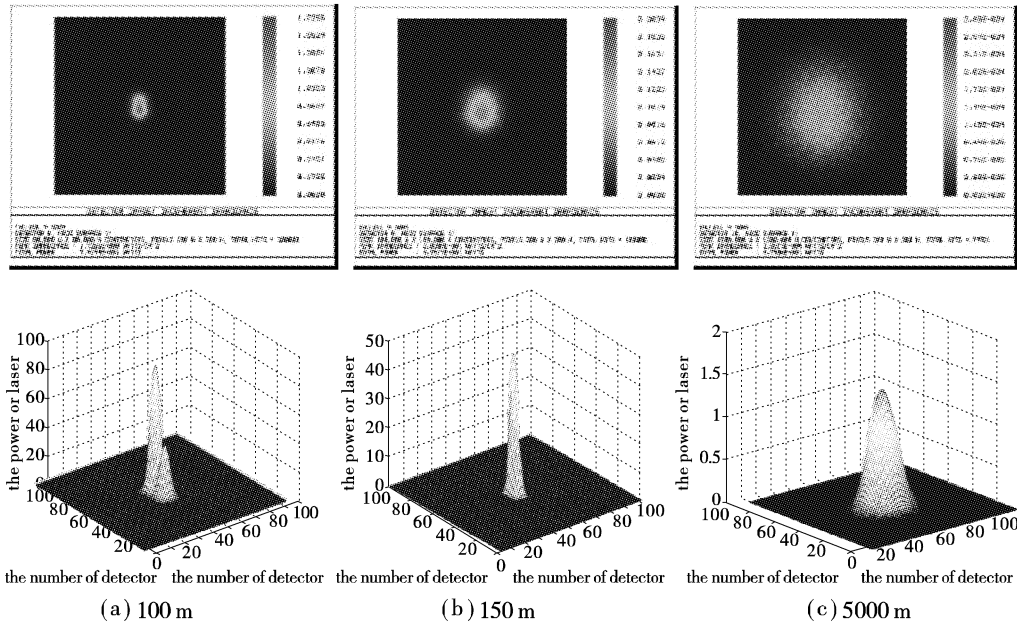


图 3 远场光束合成情况的仿真图

破坏机理的讨论目前还主要集中在实验研究和定性描述的阶段,建立定量分析模型的难度较大.在现有的激光应用领域,损伤机理仍以热-力学损伤模型为主.相关的理论与实验研究表明<sup>[9,10]</sup>,激光辐照 CCD 的热力损伤效应首先从遮光铝膜层开始,所以以铝膜层为研究对象建立物理模型如图 4 所示.  $z$  向为轴向,最大值为  $h$ ,  $r$  向为 CCD 径向,最大值为  $b$ ,入射激光的光斑半径为  $\omega_0$ .假设物质均匀、各向同性,在

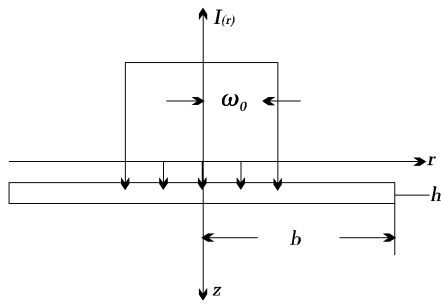


图 4 激光辐照 CCD 铝膜层的物理模型

柱坐标系中,关于  $z$  轴对称的三维热传导微分方程可表示为<sup>[11]</sup>

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中,设  $T(r, z, t)$  为物体内部的温度场,是空间坐标  $(r, z)$  及时间  $t$  的函数;  $\rho$  为材料的密度;  $c$  为材料的比热容;  $k$  为材料的导热系数;  $\rho, c, k$  通常是温度  $T$  的函数,对于大多数材料来说  $\rho, c, k$  随温度的变化不是很明显,可以认为是常数;  $a = \frac{k}{\rho c}$  为材料的

热扩散系数;  $q(r, z, t)$  为内热源功率密度,将激光视为一个随  $r, z, t$  等参数变化的内热源,该热源存在于材料的一个极微薄的表层.高重频低脉冲能量激光与低重频高脉冲能量激光混合激光光源的功率密度表达式为

$$P(r, t) = \left[ 4P(t - m \Delta t_2) \times \sum_{m=0}^{M-1} \text{rect} \left( \frac{t - m \Delta t_2}{\Delta t_1} - \frac{1}{2} \right) + 4P(t - n \Delta t_4) \times \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect} \left( \frac{t - n \Delta t_4}{\Delta t_3} - \frac{1}{2} \right) \right] \times \frac{\left( \eta + \frac{r^2}{\omega^2} \right) \exp(-2 \frac{r^2}{\omega^2})}{\pi \omega^2 (2\eta + 1)} \quad (2)$$

式中,  $\Delta t_1$  为高重频激光的脉冲宽度;  $\Delta t_2$  为高重频激光脉冲周期;  $\Delta t_3$  为低重频激光的脉冲宽度;  $\Delta t_4$  为低重频激光脉冲周期;  $M, N$  为时间  $t$  内包含的脉冲个数;  $P(t - m \Delta t_2)$  为高重频激光的瞬时功率,  $P(t - n \Delta t_4)$  为低重频激光的瞬时功率,可通过式(3)求出

$$P(t - \Delta t_e) = P \exp \left[ - \frac{2(t - \frac{\Delta t_e}{2})^2}{(\frac{\Delta t_e}{2})^2} \right] \quad (3)$$

式中,  $\Delta t_0$  为脉冲周期;  $\Delta t_e$  为脉冲宽度;  $P$  为脉宽内的峰值功率.

初始条件和边界条件可表示为

$$T|_{t=0} = T_0, T_0 \text{ 为环境温度} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial r} = 0, r = b; \frac{\partial T}{\partial r} = 0, r = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial z} = 0, z = 0; \frac{\partial T}{\partial z} = 0, z = h \end{cases} \quad (5)$$

对热传导方程进行半解析求解<sup>[10]</sup>,得出  $t$  时刻混合频率激光在材料表面邻近区域激起的温度场为

$$\begin{aligned} T(r, z, t) = & T_0 + \frac{4p\sqrt{a}(1-\tau)}{k(2\eta+1)\pi^{3/2}} \left[ \sum_{m=0}^{M-1} \int_0^t \frac{\text{rect}\left(\frac{t'-m\Delta t_2}{\Delta t_1} - \frac{1}{2}\right) p_1(t'-m\Delta t_2)}{\sqrt{t-t'}} \right. \\ & \left. + \sum_{n=0}^{N-1} \int_0^t \frac{\text{rect}\left(\frac{t'-m\Delta t_4}{\Delta t_3} - \frac{1}{2}\right) p_2(t'-m\Delta t_4)}{\sqrt{t-t'}} \right] \times \\ & \left\{ \frac{\eta}{8a(t-t')+\omega^2} + \frac{4a(t-t')}{[8a(t-t')+\omega^2]^2} + \frac{\omega^2 r^2}{[8a(t-t')+\omega^2]^3} \right\} \times \exp\left[-2\frac{r^2}{8a(t-t')+\omega^2} - \frac{z^2}{4a(t-t')}\right] dt' \quad (6) \end{aligned}$$

CCD 的力学损伤主要表现为环向应力损伤<sup>[8-11]</sup>,对于上述物理模型,温度场轴对称分布,根据热弹性理论、应力的平衡方程、应力应变的几何方程及应力应变的广义胡克方程,可解出环向热应力分布的表达式为<sup>[7]</sup>

$$\sigma_\theta = \frac{\beta E}{1-\gamma} \left[ \frac{1}{R^2} \int_0^b T r dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r T r dr - T \right] \quad (7)$$

式中,  $\sigma_\theta$  为沿环向的热应力分量;  $\beta$  为材料热膨胀系数;  $E$  为薄膜杨氏弹性模量;  $\gamma$  为泊松比. 将式(6)代入环向热应力分量的式(7)就能计算出混合激光光源辐照下遮光铝膜层热应力分布的半解析表达式.

### 4 数值仿真

对式(6)、式(7)采用有限差分法进行数值求解. 参考实际像元尺寸,计算中选取遮光铝膜厚度为  $1 \mu\text{m}$ ,计算用激光光源参数为 3 种状态:A—100 kHz、平均输出功率 20 W 的高重频激光单独输出;B—1 Hz、单脉冲能量 0.1 J 的低重频激光单独输出;C—高重频激光和低重频高脉冲能量激光同时输出,3 种状态的激光输出波长均为  $1.064 \mu\text{m}$ . 结构参量为:聚焦后的激光光斑半径为  $30 \mu\text{m}$ ,计算半径  $r = 100 \mu\text{m}$ ,初始温度取  $T_0 = 300 \text{ K}$ ,Al 对  $1.064 \mu\text{m}$  激光的吸收系数为 0.08,材料对激光的反射率约为 5%,根据测量  $\eta = 0.8$ . 为了模拟激光功率(能量)密

度在大气传输过程中的衰减效应以及 CCD 光学系统的聚焦作用,引入衰减系数  $\rho$ (实验中可通过添加衰减片来实现),计算时取  $\rho = 0.001$ . Al 的热物性参量为:密度  $\rho = 2.7(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ ;热导率  $k = 2.38(\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ ;比热  $c = 1.05(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ ;热扩散系数  $a = 8.4 \times 10^{-1}(\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$ ;热膨胀系数  $\beta = 2.29 \times 10^{-5}(\text{K}^{-1})$ ;杨氏模量  $E = 6.8 \times 10^6(\text{N}\cdot\text{cm}^{-2})$ ;泊松比  $\gamma = 0.3$ ;熔点  $T = 658 \text{ }^\circ\text{C}$ .

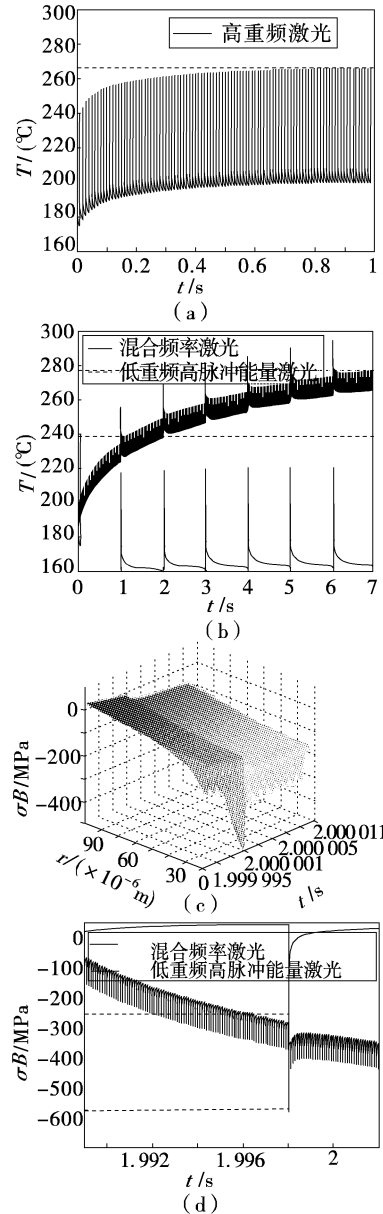


图 5 仿真结果

图 5a 所示为高重频激光单独作用 CCD 遮光铝膜层时,  $r = 0, z = 0$  点处的温度随时间变化的分布情况. 在第一脉冲到来后光束中心点处温度就达到了  $240 \text{ }^\circ\text{C}$ , 之后在这一温度的基础上缓慢增加, 在

$t = 0.0073$  s 时达到  $265\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 途中曲线的宽度是由材料的热导率和热扩散系数决定的,数值越大目标点处温度降低幅度也越大,曲线宽度越宽,可见要想使目标达到某一温度,相对于连续激光来说,高重频激光需要更少的时间. 图 5b 上方曲线为混合频率激光辐照遮光铝膜层时光束中心点处的温升情况,下方曲线代表混合频率激光成分中低重频高脉冲能量激光单独作用目标时,光束中心点处的温升情况. 从中可以看出混合频率激光使材料产生的温升综合了高重频激光和低重频激光各自的作用效果,表现在:它可以在高重频激光引起的温升的基础上附加低重频脉冲激光引起的温度跳变. 如图 5b 所示,低重频脉冲激光单独作用时目标处温度始终低于  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而加入了高重频激光后,在  $t = 1$  s 时温度就跳变到  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  达到了微透镜阵列的熔点<sup>[9]</sup>,在  $t = 3$  s 时温度再次跳变到  $670\text{ }^{\circ}\text{C}$  达到了铝膜的熔点,之后目标处温度稳步升高在低重频脉冲激光到来时均伴有温度的跳变现象发生,每次跳变后的温度都会高于铝膜的熔点. 可见,相比于高重频激光或低重频激光单独辐照 CCD 的情况,混合频率激光将会给遮光铝膜带来更高的温升,进而对 CCD 产生更严重的热损伤. 图 5c 为混合频率激光辐照中心点处,在  $t = 2$  s 左右的环向应力随时间、半径变化的三维分布图. 为了便于分析,只给出了  $1.999995 \sim 2.000011$  s 时间段内应力的分布情况. 可以看出采用混合频率激光辐照目标时,最显著的特征是材料所受的环向应力存在跳变的现象,特别是在低重频激光脉冲到来的时刻,会发生较大幅度的应力跳变,这种跳变带有热冲击的特征,会使材料发生反复的压缩与拉伸,对一些脆性材料很容易形成破坏. 在  $t = 2$  s 时,光照中心点处材料在高重频激光作用的同时又迎来了低重频激光的辐照,使得这一点处的环向应力发生了较大幅度的跳变现象,压强接近了  $500\text{ MPa}$ ,这与文献[4]中所述的 Al 与  $\text{SiO}_2$  的层间附着力接近,铝膜有可能与  $\text{SiO}_2$  层发生部分的分离,激光通过铝膜边缘的反射、衍射进入垂直移位寄存器,造成 CCD 的漏光现象,由于垂直移位寄存器串行的工作方式,将在 CCD 的竖直方向拉出线状或带状白色的噪声. 图 5d 所示为光照中心点处混合频率激光引起的环向应力与低重频激光单独作用引起的环向应力的比较

图,没有高重频激光的作用下,低重频激光引起的环向应力的跳变峰值为  $240\text{ MPa}$ ,而且脉冲结束后应力值迅速衰减. 而采用混合频率激光辐照材料时,环向应力的跳变峰值可以达到  $500\text{ MPa}$ ,之后虽有所衰减但在高重频激光的持续作用下很快就又保持了稳定的增长. 综上所述,与连续激光、高重频激光和低重频激光单独作用相比,混合频率激光可对 CCD 探测器形成更大的热力损伤.

## 5 结束语

通过上面的分析可以看出,采用低重频高脉冲能量激光与高重频低脉冲能量激光综合集成的混合频率激光会对 CCD 探测器产生更强烈的损伤效果.

## 参考文献

- [1] 武利翻. CCD 制造的关键工艺[J]. 光电技术应用, 2005, 20(1): 38-42.
- [2] 周建民, 郭劲, 付有余, 等. 激光对电视成像跟踪系统的软杀伤效应研究[J]. 光学技术, 2004, 30(1), 85-88.
- [3] 车进喜, 薛建国, 陈勇. 高重频激光对半主动激光制导武器干扰机理分析及实施方法探讨[J]. 光电技术应用, 2006, 21(6): 29-33.
- [4] 钟海荣, 陆启生, 文铁峰, 等. 激光辐射 CCD 的破坏机理分析[J]. 强激光与粒子束, 1998, 10(4): 537-542.
- [5] William L, Nighan Jr. Diode bars pump solid-state crystals to high powers[J]. Lasers Focus World, 1995, 97: .
- [6] 胥杰, 赵尚弘, 周万银, 等. 非相干光纤激光组束系统耦合效率的优化分析[J]. 光学技术, 2008, 34(3): 379-382.
- [7] 李红艳, 任向军. 光束合成技术研究及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2002, 39(7): 22-25.
- [8] 黄峰, 牛燕雄, 汪岳峰, 等. 光学窗口材料激光辐照热力效应的解析计算研究[J]. 光学学报, 2006, 26(4): 576-580.
- [9] 姜楠, 张雏, 牛燕雄, 等. 脉冲激光辐照 CCD 探测器的硬破坏效应数值模拟研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(10): 1004-1007.
- [10] 沈洪斌, 沈学举, 周冰, 等. 532 nm 脉冲激光辐照 CCD 实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(10): 1449-1454.
- [11] 李俊昌. 激光的衍射及热作用计算(修订版)[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 298-368.