

多波长拉曼激光对CCD损伤实验研究

刘金生 刘金波 李晓文

Experimental study on CCD damage by multi-wavelength Raman lasers

LIU Jin-sheng, LIU Jin-bo, LI Xiao-wen

引用本文:

刘金生, 刘金波, 李晓文. 多波长拉曼激光对CCD损伤实验研究[J]. *中国光学*, 2023, 16(2): 373–381. doi: 10.37188/CO.2021-0228

LIU Jin-sheng, LIU Jin-bo, LI Xiao-wen. Experimental study on CCD damage by multi-wavelength Raman lasers[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 373-381. doi: 10.37188/CO.2021-0228

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0228>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

飞秒脉冲激光对硅基多层膜损伤特性

Femtosecond pulsed laser induced damage characteristics on Si-based multi-layer film

中国光学. 2019, 12(2): 371 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0371>

高反射光学薄膜激光损伤研究进展

Research progress in laser damage of high reflective optical thin films

中国光学. 2018, 11(6): 931 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0931>

高重频CO₂激光干扰技术研究

Research on the interference technology of high repetition frequency CO₂ laser

中国光学. 2018, 11(6): 983 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0983>

基于激光诱导击穿光谱和拉曼光谱对四唑类化合物的快速识别和分类实验研究

Fast recognition and classification of tetrazole compounds based on laser-induced breakdown spectroscopy and raman spectroscopy

中国光学. 2019, 12(4): 888 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0888>

远程紫外拉曼光谱检测技术研究进展

Research progress of remote detection with ultraviolet Raman spectroscopy

中国光学. 2019, 12(6): 1249 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1249>

激光对鳞片石墨改性酚醛树脂涂层的损伤机理

Laser damage mechanism of flake graphite modified phenolic resin coating

中国光学. 2017, 10(2): 249 <https://doi.org/10.3788/CO.20171002.0249>

文章编号 2097-1842(2023)02-0373-09

多波长拉曼激光对 CCD 损伤实验研究

刘金生^{1*}, 刘金波^{2*}, 李晓文¹

(1. 北方电子设备研究所, 北京 100191;

2. 中国科学院大连化学物理研究所化学激光重点实验室, 辽宁大连 116023)

摘要: 本文开展了多波长纳秒脉冲拉曼激光对行间转移 CCD 相机的损伤实验。分别研究了 496 nm、574 nm、630 nm 单波长拉曼激光与混合输出的多波长拉曼激光对 CCD 的点损伤、线损伤和面损伤情况, 测量了不同波长拉曼激光的损伤阈值区间, 并根据损伤情况统计拟合, 获得了不同波长拉曼激光能量与损伤概率的关系曲线。实验结果表明: 混合波长拉曼激光对 CCD 的损伤阈值低于单波长拉曼激光的损伤阈值, 不同波长拉曼激光对于 CCD 的损伤阈值也存在区别, 其中 630 nm 拉曼激光的损伤阈值低于 496 nm 激光, 574 nm 激光的损伤阈值介于 496 nm 和 630 nm 拉曼激光之间。在此基础上, 通过分析 CCD 不同损伤情况的显微图像, 以及受损伤 CCD 的电子学特性, 对拉曼激光损伤 CCD 的机理进行了探讨。

关键词: 多波长激光; 拉曼激光; CCD; 损伤阈值

中图分类号: TN249 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2021-0228

Experimental study on CCD damage by multi-wavelength Raman lasers

LIU Jin-sheng^{1*}, LIU Jin-bo^{2*}, LI Xiao-wen¹

(1. Institute of North Electronic Equipment, Beijing 100191, China;

2. Key Laboratory of Chemical lasers, Dalian Institute of Chemical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China)

* Corresponding author, E-mail: lasercosmos@163.com; hitliujinbo@163.com

Abstract: The damage threshold of an interline transfer CCD irradiated by different wavelength nanosecond Raman lasers was studied and an experiment with 496 nm, 574 nm, 630 nm Raman and multispectral Raman laser-irradiated CCD was carried out. The damage threshold interval of dot damage, line damage and total damage were observed and collected by adjusting the energy of each focused Raman laser. By careful fitting, the damage threshold interval and the damage possibility curve of the CCD at different laser energy densities with each Raman laser were estimated. Results showed that the multispectral Raman laser including a residual pump laser is most effective for damaging the CCD than the monochrome Raman laser, and the 630nm

收稿日期: 2021-12-22; 修订日期: 2022-02-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 22073101); 大连化学物理研究所创新基金(No. 202105)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 22073101); Innovation Foundation of Dalian Institute of Chemical Physics (No. 202105)

Raman laser acts better than 574 nm and the 496 nm Raman laser. The microscopic images of the damaged CCD were reviewed, and the electronic characters of the damaged CCD were also tested to understand the damage and blindness mechanism of a Raman laser pulse-irradiated CCD.

Key words: multi-wavelength laser; Raman laser; CCD; damage threshold

1 引言

CCD 是一种重要的成像器件,广泛应用于民用和军事等领域,但是在强光照射下易产生饱和、串扰现象,甚至产生硬损伤,当停止激光辐照后也不能恢复正常成像状态,甚至完全无法成像。国外开展激光损伤 CCD 的实验研究较早,20 世纪 80 年代年末,Becker Michael F 等人开展了脉宽为 10 ns,重频为 10 Hz 的 1.06 μm 激光对 CCD 的损伤研究,发现激光最易引起多晶硅时钟线间、漏极—衬底间和漏极—源极间漏电流以及 MOSFET 中跨导参数的变化,当激光能量密度高于 1.0 J/cm^2 时,多晶硅和铝的互连线熔化并破裂^[1-3]。

国内也开展了大量激光辐照 CCD 的实验研究。郝向南等人进行了不同工作状态激光损伤 CCD 的实验,发现连续激光损伤 CCD 的阈值最高,较低重频激光对 CCD 的损伤阈值较低^[4]。朱志武等人研究了单脉冲纳秒激光对 CCD 的硬损伤,发现 CCD 的损伤是从内部材料逐渐向外扩展的,并且 3 个损伤阶段的阈值无法严格区分^[5]。王明等研究了面阵 CCD 相机的飞秒激光损伤现象和损伤机理^[6]。邵俊峰、蔡跃等人研究了皮秒激光对 CCD 的损伤效应,分析了探测器功能失效的主要原因^[7-8]。赵洋等人进行了毫秒脉冲激光损伤彩色 CCD 的实验,认为 CCD 的损伤是由外部材料逐渐向内延伸的,当激光能量密度达到一定阈值时才会造成 CCD 的多晶硅电极熔融,从而导致 CCD 无法工作^[9]。张鑫等人研究了三波长激光对 CCD 的损伤现象^[10]。王金宝、刘泽金、周旋风等通过实验发现激光辐照对可见光 CCD 的损伤包括点损伤和串扰等效应^[11-13]。

已有的研究主要集中于连续激光、脉冲激光对 CCD 的辐照实验,在脉冲激光方面又进行了不同波长、不同重频、不同脉宽、单脉冲和多脉冲的激光辐照 CCD 的实验现象观测、损伤阈值测量、

显微结构观测、部分电阻测量和损伤机理分析,但是未见窄脉宽多波长拉曼激光及其混合波长激光辐照 CCD 的研究报道。作为有效的激光波长调变对抗技术,拉曼激光可以有效避开敌方针对性的防御措施^[14-17]。此外,多波长拉曼激光还具有包含的激光谱线多、各波长激光时域严格同步等特点,在光电对抗领域具有巨大的应用潜力,但有关多波长拉曼激光对 CCD 的损伤效应,如损伤阈值、破坏规律等的研究十分欠缺。因此,本文开展了纳秒脉宽、不同波长拉曼激光以及多波长混合拉曼激光对 CCD 损伤的实验研究,从图像失效、损伤阈值和电子学等方面做比较分析,给出了不同激光能量密度下拉曼激光辐照 CCD 的损伤几率。

2 实验装置

用于产生多波长拉曼激光的光源装置如图 1 所示。泵浦源是镭宝光电 SGR 20 型 Nd:YAG 激光器倍频输出的 532 nm 激光,光斑直径约 8 mm,发散角小于 1 mrad,脉宽为 10.0 ns,最大脉冲能量为 300 mJ,偏振态为线偏振,重复频率为 1~10 Hz 可调,实验中采用 1 Hz 固定重复频率。泵浦光首先经过 $\lambda/2$ 波片和偏振分束器(PBS),两者组合可实现对入射到拉曼池中的泵浦激光能量的连续调谐。随后泵浦激光再经过透镜 L1(f

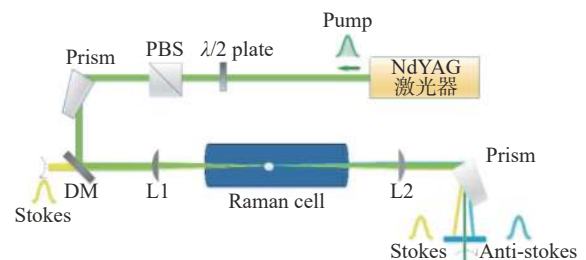


图 1 受激拉曼散射激光光源示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup of multiple Raman lasers in a single Raman cell. L1-L2: lens; DM: Dichroic mirror; PBS: polarized beam splitter; Prism: Pellin-Broca prism

1000 mm) 聚焦在 1.80 m 长的拉曼池的中心, 光路中采用 Pellin-Broca 棱镜折转泵浦光 90°, 防止后向拉曼激光返回对激光器造成损坏。当两个 Pellin-Broca 棱镜以布儒斯特入射角放置时, 损耗可忽略不计。拉曼池中充有高压 CH₄、CO₂、H₂ 混合气体, 在高压拉曼池中通过受激散射及四波混频效应产生多波长拉曼激光。二向色镜用于测量后向拉曼散射, 并避免后向拉曼散射光对泵浦激光器造成损坏。泵浦光和产生的拉曼光在拉曼池的出口处用透镜 L2 进行准直, 并由色散棱镜进行分光, 选择所需波长的拉曼激光进行 CCD 激光损伤实验。

拉曼激光对 CCD 损伤实验的实验装置如图 2 所示。首先将选定的拉曼光经过小孔光阑空间滤波, 再经一个长波通激光二向色镜(Thorlabs DMLP650 nm, 650 nm-longpass)反射, 进一步经可变衰减片衰减后, 由聚焦透镜后聚焦到 CCD 上。为实时监测照射到 CCD 上的激光脉冲能量, 在光路中插入分束镜分出一定比例的监测光, 由激光能量计进行监测。所有拉曼激光能量都由同一能量计(Gentec-EO PE 10B-Si-D0/DA)测量并同步采集。

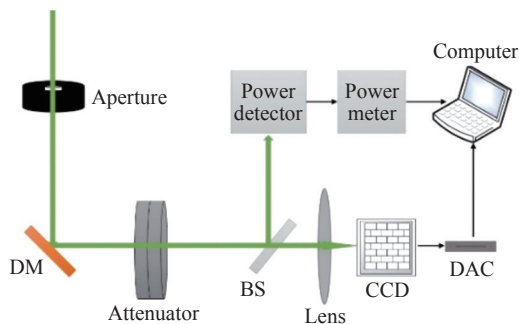


图 2 多波长拉曼激光损伤 CCD 实验装置

Fig. 2 Experimental setup of multi-wavelength Raman lasers damage CCD. DM: Dichroic mirror; BS: beam splitter; DAC: data acquisition card

激光聚焦辐照损伤实验所用的 CCD 芯片为 Sony ICX633BKAA 行间转移型面阵传感器, 该芯片的总像素数为 537(H)×597(V), 其中有效像素数为 500(H)×582(V), 像素尺寸是 9.8 μm(H)×6.3 μm(V)。采用 EasyCAP USB 视频采集卡对 CCD 板机所成图像进行实时采集, 通过聚焦光斑所占像素数量计算聚焦光斑的大小。

实验过程中采用 1 on 1 模式测量 CCD 的损

伤情况, 实验中激光器始终保持 1 Hz 工作状态, 采用机械挡板阻断光路的办法, 每发脉冲辐照后将 CCD 移动一定距离, 确保 CCD 的每一个位置仅受到一个激光脉冲的照射。

3 结果与讨论

拉曼激光装置产生的多波长拉曼激光光谱如图 3 所示, 其中除了 532 nm 泵浦光之外, 能量占比较大的包括 496 nm 拉曼光、574 nm 拉曼光、624 nm 拉曼光和 630 nm 拉曼光; 另外还包括较弱的 460 nm、683 nm、690 nm 等波长的拉曼光; 图 3 中 532 nm 剩余泵浦光经窄带滤波片衰减, 因此 532 nm 的光谱峰较低。

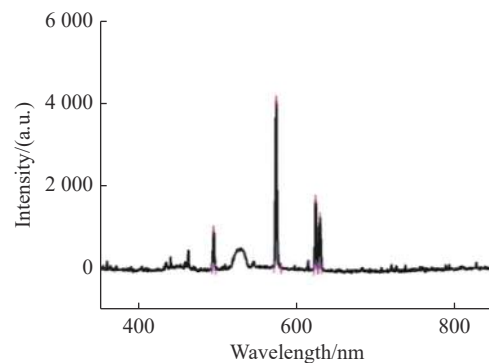


图 3 多波长拉曼激光光谱图

Fig. 3 The spectrum of the multi-wavelength Raman laser used in this paper

输出拉曼光中包含的较强的主要波长激光的能量及其在混合激光中的占比见表 1。其中 630 nm 拉曼光能量包含了波长相近的 624 nm 拉曼激光的能量。表 1 还包括了经图像处理计算得到的各波长激光聚焦后的光斑图像面积。

表 1 拉曼池输出的混合激光谱线的能量分布

Tab. 1 Energy distribution of the mixture laser from a Raman cell

激光波长/nm	脉冲能量/μJ	能量占比	聚焦光斑面积/(10 ⁻⁴ cm ²)
496	2.8	3.2%	1.07
532	64.5	73.3%	-
574	8.3	9.4%	0.713
630	11.5	13.1%	1.09
其他	0.9	1.1%	-
混合激光	88	100%	2.73

激光在 CCD 上的能量密度是决定 CCD 损伤程度的重要因素, 因此需要准确测量不同波长激光在 CCD 上聚焦区域的面积。由于聚焦透镜存在色差, 因此分别获取不同波长拉曼激光聚焦光斑的图像, 并分别计算其聚焦区域的面积。实验获得的不同波长拉曼激光经聚焦透镜后在 CCD 上所成的图像见图 4。另外, 实验中采用未镀膜的平凸石英透镜作为聚焦镜, 以确保聚焦透镜对各波长激光的透过率基本一致。

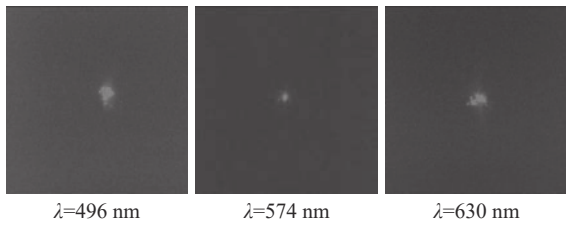


图 4 不同波长拉曼激光在 CCD 上的聚焦图像

Fig. 4 The focused spots of Raman laser with different wavelengths on the CCD

针对不同波长的拉曼激光照射图像, 编制 Matlab 图像处理程序, 计算求得拉曼激光照射到 CCD 上的激光光斑所占据的像素数量及每个像素上的图像亮度值大小, 根据光斑图像灰度值分布判定激光光斑所占的像素数, 并进一步计算出传感器表面的光斑面积。对每个波长的多幅拉曼激光照射图像进行多次计算求平均值, 求得 496 nm 拉曼激光、574 nm 拉曼激光和 630 nm 拉曼激光和多波长混合激光在 CCD 靶面上聚焦后的光斑面积为 $1.07 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ 、 $7.13 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ 、 $1.09 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ 、 $2.73 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$, 见表 1 所示。

实验过程中, 采用 1 on 1 方式, 记录每发激光脉冲的脉冲能量, 并观察 CCD 是否产生点损伤/线损伤或面损伤, 获得不同脉冲能量下 CCD 损伤情况的统计信息。据此拟合分析求出不同情况下的 CCD 损伤概率, 对在一定概率下损伤 CCD 所需的各波长激光功率密度进行评估。实验中观察到的 CCD 点损伤、线损伤和面损伤情况下的 CCD 输出图像见图 5 所示。实际记录的一组 496 nm 激光照射 CCD 造成点损伤情况的实验统计及分析结果见图 6(彩图见期刊电子版)。数据拟合所用的统计概率函数表达式为:

$$y = A_2 + (A_1 - A_2)/(1 + (x/x_0)^p) \quad (1)$$

其中, y 为发生损伤的几率; $A_1=0$, 表征激光能量

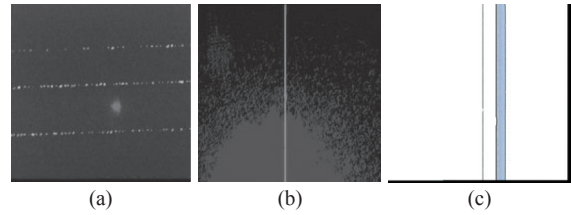


图 5 CCD 损伤情况下的输出图像。(a)点损伤情况下 CCD 的输出图像; (b)出现线损伤情况下 CCD 的输出图像; (c)面损伤情况下 CCD 的输出图像

Fig. 5 The output images of the damaged CCD at different severities. (a) Dot damage; (b) line damage; (c) total damage.

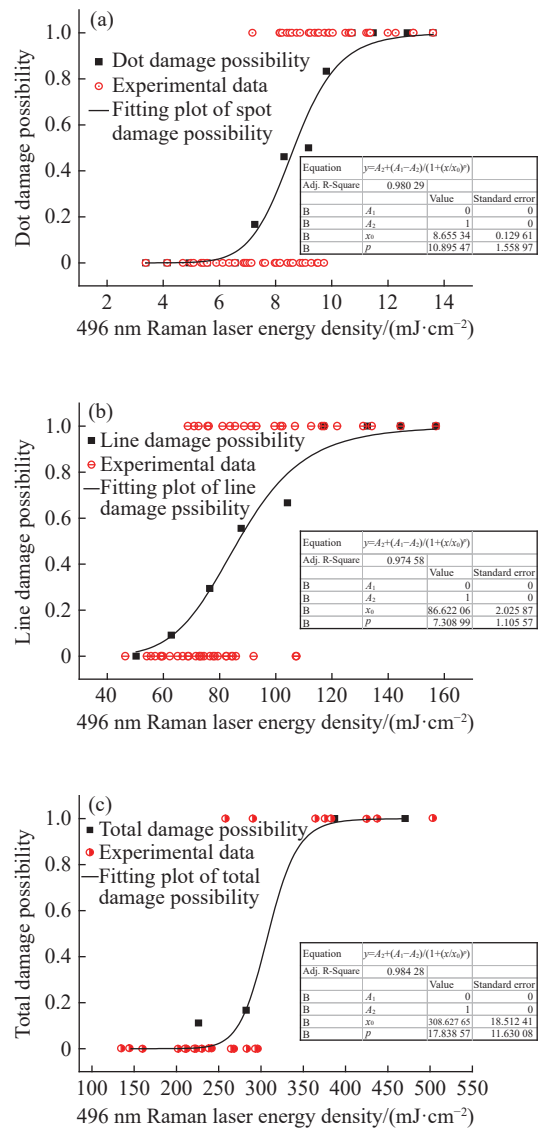


图 6 496 nm 拉曼激光照射 CCD 形成损伤类型及统计分析。(a)点损伤; (b)线损伤; (c)面损伤

Fig. 6 The damage types and possibility of the CCD focused by the 496 nm Raman laser at different energy densities. (a) Dot damage; (b) line damage; (c) total damage

密度极小时的损伤概率; $A_2=1$, 表征激光能量密度极大时的损伤概率; x_0 表征损伤几率为 50% 时的激光能量密度; 指数项 p 表征损伤几率对激光能量密度的敏感程度。在本文中, 以 x_0 来代替激光损伤阈值能量密度, 并按照不同损伤类型将损伤阈值细分为点损伤阈值、线损伤阈值和面损伤阈值。

图 6 中, 红色散点为实验测量值, 散点值为 1 代表该次照射造成了 CCD 的点损伤/线损伤/面损伤, 散点值为 0 则代表该次照射未造成 CCD 的此类损伤。可以看出 CCD 损伤与否在损伤阈值附近存在较大的不确定性, 利用损伤概率来表征不同能量密度下的损伤效果更有利于指导实际应用, 因此利用统计概率函数拟合了点损伤/线损伤/面损伤的概率分布。拟合函数及拟合结果见图 7 中表格所示。拟合结果表明 496 nm 拉曼激光对 CCD 的损伤阈值约为: 点损伤 8.66 mJ/cm², 线损伤 86.8 mJ/cm², 面损伤 308.6 mJ/cm²。

采用同样的方法, 依次利用 574 nm 激光、630 nm 激光和包含剩余 532 nm 泵浦光的全波段混合激光对 CCD 进行了损伤实验, 对结果统计拟合得到对 CCD 的点损伤、线损伤和面损伤阈值, 见图 7~9(彩图见期刊电子版) 所示。

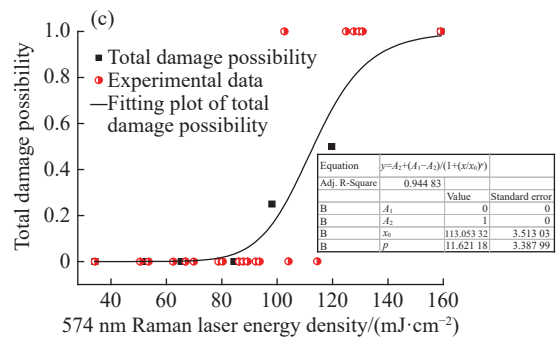
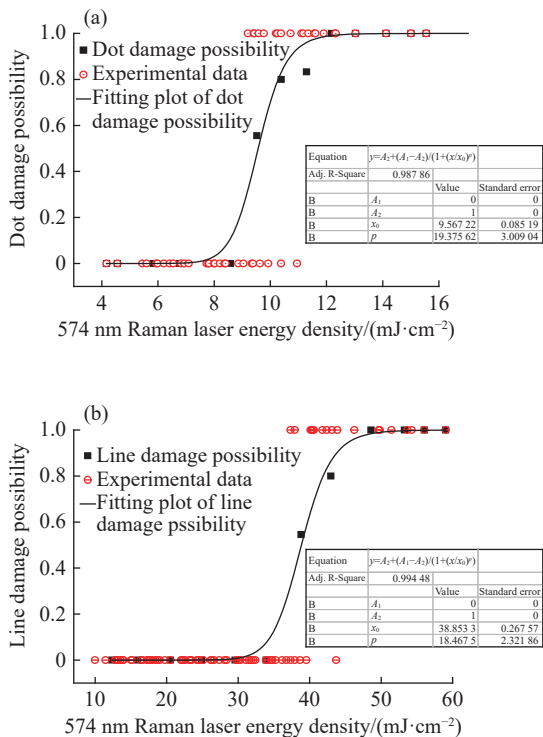


图 7 574 nm 拉曼激光照射 CCD 形成损伤类型及统计分析。(a)点损伤;(b)线损伤;(c)面损伤

Fig. 7 The damage types and possibility of the CCD focused by the 574 nm Raman laser at different energy densities. (a) Dot damage; (b) line damage; (c) total damage

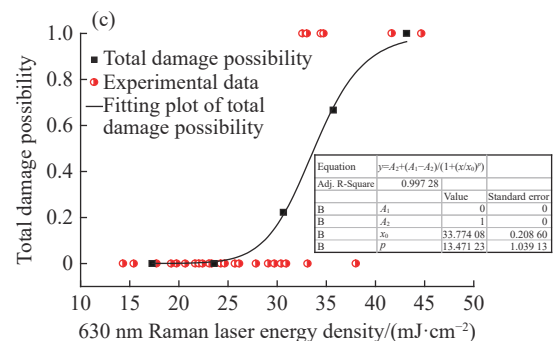
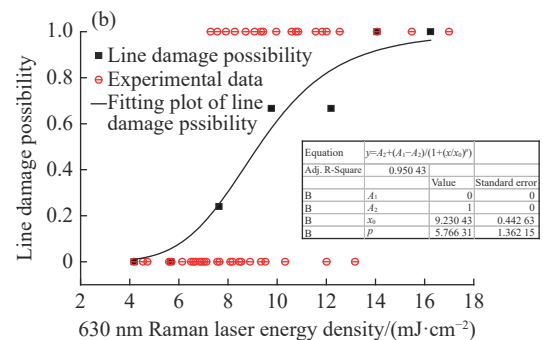
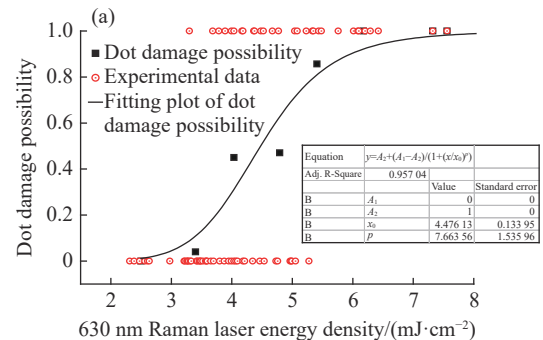


图 8 630 nm 拉曼激光照射 CCD 形成损伤类型及统计分析。(a)点损伤;(b)线损伤;(c)面损伤

Fig. 8 The damage types and possibility of the CCD focused by the 630 nm Raman laser at different energy densities. (a) Dot damage; (b) line damage; (c) total damage

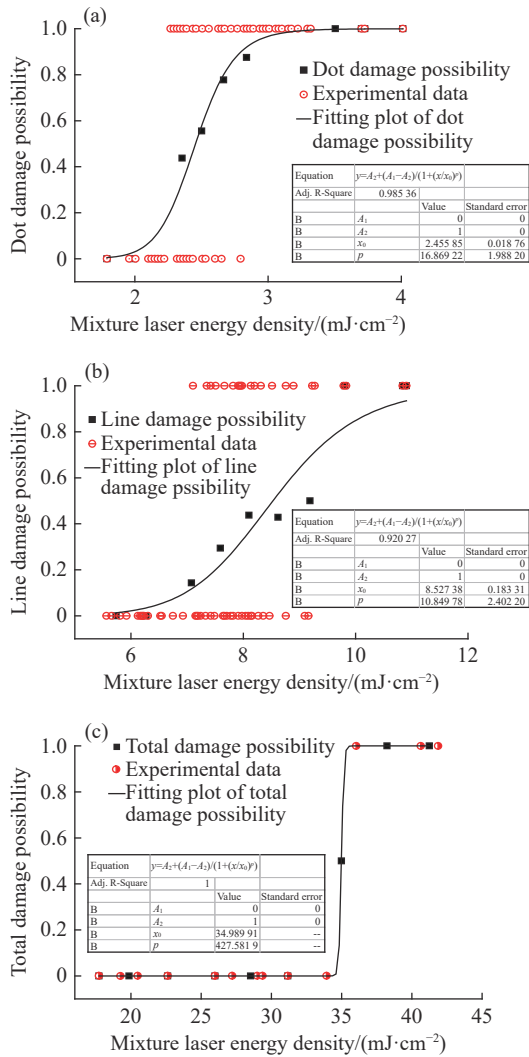


图 9 多波长混合激光照射 CCD 形成损伤类型及统计分析。(a)点损伤;(b)线损伤;(c)面损伤

Fig. 9 The damage type and possibility of the CCD focused by the multi-wavelength lasers at different energy densities. (a) Dot damage; (b) line damage; (c) total damage

对比几种不同波长的拉曼激光对 CCD 的损伤阈值, 630 nm 拉曼激光对本实验中的 CCD 的损伤阈值最小, 其次为 574 nm 拉曼激光波长, 损伤阈值最大的是 496 nm 激光。不同波长照射作用下 CCD 的点损伤、线损伤和面损伤阈值具体见表 2。

分阶段来看, 在点损伤阶段, 496 nm 激光和 574 nm 激光的点损伤阈值相当, 而 630 nm 激光的点损伤阈值约为前两者的一半左右; 在线损伤阶段, 574 nm 激光的线损伤阈值约为 496 nm 激光的 40%, 而 630 nm 激光的线损伤阈值仅为 496 nm 激光的 1/10 左右; 在面损伤阶段, 574 nm

表 2 不同波长激光辐照下 CCD 的点损伤阈值, 线损伤阈值和面损伤阈值拟合结果

Tab. 2 Fitting damage threshold of dot, line and total damage by different wavelength lasers

拉曼激光波长	点损伤阈值 / $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$	线损伤阈值 / $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$	面损伤阈值 / $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$
496 nm	8.66 ± 0.13	86.8 ± 2.0	308.6 ± 18.5
574nm	9.57 ± 0.85	38.85 ± 0.27	113.1 ± 3.5
630 nm	4.48 ± 0.13	9.23 ± 0.44	33.8 ± 0.2
混合波长	2.46 ± 0.02	8.53 ± 0.18	35.0 ± 0.0

激光的面损伤阈值约为 496 nm 激光的 1/3, 而 630 nm 激光的面损伤阈值仅为 496 nm 激光的 1/9 左右。值得特别关注的是, 在多波长混合拉曼激光照射 CCD 试验中, 混合激光点损伤阈值明显小于单波长拉曼激光, 而线损伤阈值和面损伤阈值与 630 nm 红光相当。

为分析在不同波长拉曼激光及混合拉曼激光作用下 CCD 的损伤机理, 利用显微镜对 CCD 的点、线、面损伤情况进行观察, 获取了不同实验条件下的 CCD 损伤显微图, 详见图 10~13(彩图见期刊电子版) 所示。

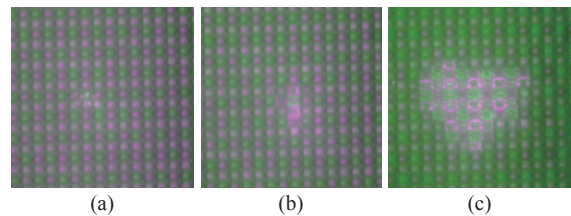


图 10 496 nm 拉曼激光损伤 CCD 显微图。(a)点损伤;(b)线损伤;(c)面损伤

Fig. 10 The micrographs of the CCD damaged by a 496 nm Raman laser at different severities. (a) Dot damage; (b) line damage; (c) total damage

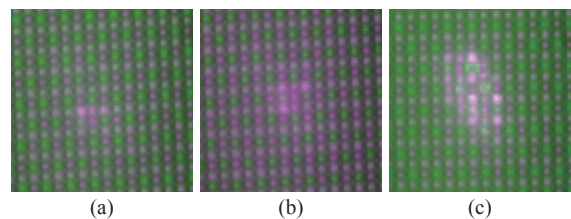


图 11 574 nm 拉曼激光损伤 CCD 显微图。(a)点损伤;(b)线损伤;(c)面损伤

Fig. 11 The micrographs of the CCD damaged by a 574 nm Raman laser at different severities. (a) Dot damage; (b) line damage; (c) total damage

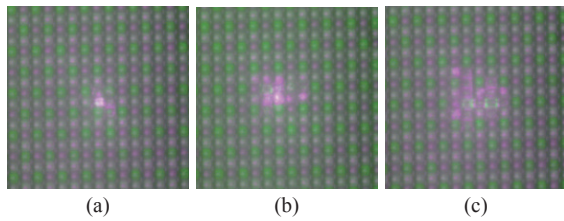


图 12 630 nm 拉曼激光损伤 CCD 显微图。(a)点损伤; (b)线损伤; (c)面损伤

Fig. 12 The micrographs of the CCD damaged by a 630 nm Raman laser at different severities. (a) Dot damage; (b) line damage; (c) total damage

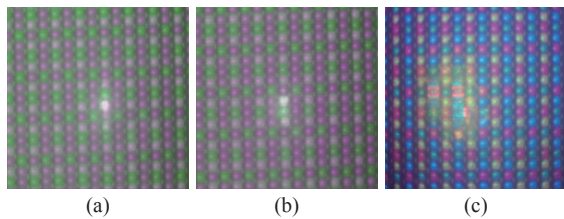


图 13 混合波长拉曼激光损伤 CCD 显微图。(a)点损伤; (b)线损伤; (c)面损伤

Fig. 13 The micrographs of the CCD damaged by the multi-wavelength lasers at different severities. (a) Dot damage; (b) line damage; (c) total damage

通过对比不同激光辐照 CCD 产生的损伤显微图样可知, 在点损伤阶段, 一到两个像素对应的聚合物微透镜出现坏点或完全破坏, 聚合物微透镜被破坏后对照明光漫反射, 在图中表现为高亮度的亮点, 这一阶段 CCD 的感光像素单元不一定受到损伤, 当激光能量密度增加至线损伤阶段, 微透镜损伤的数量开始增加, 在显微图上表现为多个微透镜变为坏点, 开始观察到微透镜被完全熔融掉的图样, 部分滤色片也被完全破坏, CCD 的硅基底出现熔融。不同波长激光辐照出现的线损伤图像未见显著差别。激光功率密度持续增大后, 出现面损伤现象, 在显微图上表现为大片的微透镜和滤色片层被破坏, CCD 的硅基底熔融, 周围金属网格线清晰可见且数量增多, 露出多至几十个 CCD 感光像素。

对比各波长激光损伤情况来看, 496 nm 激光辐照面损伤时破坏的感光像素数量最多, 图 10(c) 中 50~60 个像素被破坏, 574 nm 激光辐照面损伤破坏的感光像素数量明显少于 496 nm 辐照情况, 图 11(c) 中约 25~30 个像素被破坏, 630 nm 激光辐照时面损伤破坏的像素数最少, 图 12(c) 约 15~20 个像素被破坏, 混合波长激光辐照时面损

伤破坏的像素数较多, 图 13(c) 约 40~50 个像素被破坏; 从图 12(c) 中还能明显看到存在两个破坏严重的分区, 这是因为 630 nm 激光实际是包含了 624 nm 的双波长激光, 因这两束光并不完全重合, 因此在焦平面上存在两个焦点。与此类似, 多波长激光在焦平面上也应该存在多个焦点, 但是由于多波长混合激光聚焦时存在散焦现象, 故在 CCD 显微图上并未见明显的分区损伤现象, 相应的, 多波长激光辐照 CCD 面损伤时破坏区域及像素数量明显多于 574 nm 和 630 nm 时的情况。

从对 CCD 引脚的电子学特性测试可知, 在点、线损伤阶段, 损伤 CCD 像素像元或其前方微透镜没有对其他部位产生影响; 而在面损伤阶段, 硅电极损伤会造成电极间出现电阻减小或短路现象。对未损伤以及被不同激光完全损伤失效的 CCD 芯片的部分引脚电阻进行了测试, 结果表明, 完全破坏的 CCD 的水平转移时钟线、垂直转移时钟线之间的电阻值都明显变小。说明在脉冲激光的辐照下, 转移电荷电路出现了短路等情况。这一结论与文献 [10-11] 中纳秒激光损伤过程相同: 即硅电极损伤造成电极间出现短路现象。

由 CCD 结构可知, 移位寄存器间、移位寄存器与硅基底间存在绝缘层, 由图 10~13 可知, 面损伤的 CCD 硅基底熔融, 周围金属网格线清晰可见, 因此推断高强度的激光辐照, 致使硅基底不断升温, 达到甚至超过其熔点产生熔融, 其溢出物首先破坏了基底与移位寄存器间的绝缘层, 导致基底与多晶硅电极发生短路, 基底与移位寄存器间的电阻下降。当溢出物很多时, 一方面会破坏移位寄存器间的绝缘层; 另一方面, 激光的辐照已使硅发生了相变, 相变产物的导电性也会进一步增强, 致使基底/移位寄存器间的电阻下降甚至短路; 电子学测量结果也表明了这一点。

对比不同波长激光的损伤阈值还发现, 630 nm 激光完全破坏 CCD 时, 发生损伤的像素数量较少, 但是破坏的 CCD 基底与移位寄存器之间的电阻降低程度与其他波长激光损伤 CCD 情形类似, 可能原因是实际拉曼激光聚焦光斑比灰度图像的计算值偏小, 导致其焦点处实际激光功率密度偏大。对比显微图 10~13, 也能发现不同波长激光造成损伤的像素数量关系为 496 nm (50~60 像素) > 混合激光 (40~50 像素) > 574 nm (25~30 像素) > 630 nm (15~20 像素)。

如果将激光光斑面积修正为被损伤像素所占面积,则表 2 中各单波长激光的损伤阈值差距将会显著缩小,496 nm 激光的点损伤、线损伤和面损伤阈值将变为约 23~28、232~278、823~987 mJ/cm²; 574 nm、630 nm 和混合激光的点损伤、线损伤、面损伤阈值将依次变为 32~39、133~160、382~459 mJ/cm²; 35~47、75~100、271~361 mJ/cm² 和 20~25、71~89、290~363 mJ/cm²。

但考虑到 CCD 的面损伤情况在面损伤阈值附近存在较大随机性,像素破坏数量存在较大不确定性,因此损伤像素数仅能部分反映激光聚焦光斑大小,将损伤像素所占面积当作激光聚焦光斑面积的估算方法明显存在较大偏差。

另外,不同波长拉曼激光和多波长混合激光在经过透镜聚焦后的能量分布明显不同,特别是在面损伤阈值附近,混合激光包含多条激光谱线,导致在面损伤阈值附近部分区域未能完全损坏 CCD 像素,导致完全破坏的像素数较少;与之类似,630 nm 激光所包含两条谱线中较弱的一支所破坏的像素数也较少,这也反映了包含多个波长的激光聚焦时造成了光强分布不规则的情况。

与单波长激光辐照效应相比,实验发现多波长混合激光的聚焦光斑面积较大,而且点损伤阈值较低,从面损伤显微图像来看,造成破坏的像素数也较多。这一方面可能与激光聚焦区域内光强分布不规则有关;另一方面可能与多波长激光在对 CCD 面阵前方的微透镜的制造材料有机聚合物材料的光化学损伤有关,在多波长复合激光辐照过程中,有机聚合物可能通过吸收多个不同光

子发生更多的化学反应,形成更多的光化学破坏通道,使微透镜更容易被破坏,导致 CCD 点损伤阈值降低。进一步的,被破坏的微透镜吸收率会增加,更容易吸收激光热量,进而熔融破坏微透镜及滤色片,使 CCD 像元失去保护,使 CCD 像元及基底的损伤和短路现象更容易发生,因此在多波长激光辐照损伤试验中点损伤阈值低于单波长拉曼激光,相应的线、面损伤阈值也较低。

4 结 论

在本文中,主要就 532 nm 激光泵浦产生的不同波长受激拉曼激光及多波长混合拉曼激光辐照面阵 Si 基 CCD 产生的损伤现象进行了实验测量、拟合计算及对比分析。通过观察对比被损伤 CCD 的显微图像,结合被损伤的 CCD 引脚电子特性测量,分析了 CCD 的失效机理。实验结果表明不同波长的拉曼激光照射时 CCD 点损伤、线损伤和面损伤阈值存在差异;针对本文中使用的 Sony ICX633BKAA CCD,单波长激光辐照时,630 nm 激光出现点损伤,线损伤和面损伤的阈值最小;当利用包括剩余泵浦光在内的全波段拉曼光照射时,点损伤阈值又小于所有单波长光照射时的情况,而线损伤和面损伤阶段,多波长激光的损伤阈值也较小。通过对实验结果的拟合分析,获得了不同波长拉曼激光对 CCD 形成的损伤的破坏几率函数曲线,这可为以后 CCD 激光损伤系统设计及损伤概率评估提供有力的数据支撑和参考依据。

参考文献:

- [1] BECKER M F, ZHANG CH ZH, WATKINS S E, *et al.*. Laser-induced damage to silicon CCD imaging sensors[J]. *Processing of SPIE*, 1989, 1105: 68-77.
- [2] BECKER M F, ZHANG CH ZH, BLARRE L, *et al.*. Laser-induced functional damage to silicon CCD sensor arrays[J]. *Processing of SPIE*, 1992, 1624: 67-79.
- [3] ZHANG CH ZH, WATKINS S E, WALSER F M, *et al.*. Laser-induced damage to silicon charged-coupled imaging devices[J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(5): 651-657.
- [4] 郝向南,李化,聂劲松,等.不同工作状态激光对可见光 CCD 的损伤实验[J]. *光电工程*, 2012, 39(9): 113-118.
HAO X N, LI H, NIE J S, *et al.*. Experiment of visible CCD damaged by laser operating in different state[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(9): 113-118. (in Chinese)
- [5] 朱志武,张震,程湘爱,等.单脉冲激光对 CCD 探测器的硬损伤及损伤概率[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 113-118.
ZHU ZH W, ZHANG ZH, CHENG X A, *et al.*. Damage phenomenon and probability of CCD detectors under single-laser-pulse irradiation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 113-118. (in Chinese)

- [6] 王明,王挺峰,邵俊峰.面阵CCD相机的飞秒激光损伤分析[J].中国光学,2013,6(1):96-102.
WANG M, WANG T F, SHAO J F, *et al.*. Analysis of femtosecond laser induced damage to array CCD camera[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 96-102. (in Chinese)
- [7] 邵俊峰,刘阳,王挺峰,等.皮秒激光对电荷耦合器件多脉冲损伤效应研究[J].兵工学报,2014,35(9):1408-1413.
SHAO J F, LIU Y, WANG T F, *et al.*. Damage effect of charged coupled device with multiple-pulse picosecond laser[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(9): 1408-1413. (in Chinese)
- [8] 蔡跃,叶锡生,马志亮,等.170 ps激光脉冲辐照可见光面阵Si-CCD的实验[J].光学精密工程,2011,19(2):457-462.
CAI Y, YE X S, MA ZH L, *et al.*. Experiment of 170 ps laser pulse irradiation effect on visible plane array Si-CCD[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 457-462. (in Chinese)
- [9] 赵洋,金光勇,李明欣,等.毫秒脉冲激光损伤CCD探测器的实验研究[J].激光技术,2017,41(5):632-636.
ZHAO Y, JIN G Y, LI M X, *et al.*. Experimental study about CCD detectors damaged by millisecond pulsed laser[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(5): 632-636. (in Chinese)
- [10] 张鑫,牛春晖,马牧燕,等.三波长单脉冲纳秒激光损伤CCD实验研究[J].应用激光,2020,40(2):300-307.
ZHANG X, NIU CH H, MA M Y, *et al.*. Experimental study on three-wavelength single-pulse nanosecond laser damage CCD[J]. *Applied Laser*, 2020, 40(2): 300-307. (in Chinese)
- [11] 王金宝.激光辐照可见光面阵 Si-CCD 探测器实验研究[D].长沙:国防科学技术大学,2003.
WANG J B. Experimental investigation of the visible light arrays of Si-CCD irradiated by the laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003. (in Chinese)
- [12] 刘泽金,陆启生,蒋志平,等.面阵CCD图像传感器点破坏机理研究[J].应用激光,1995,15(2):85-86.
LIU Z J, LU Q SH, JIANG ZH P, *et al.*. Research on damaging mechanism of CCD video camera irradiated by a focusing laser beam[J]. *Applied Laser*, 1995, 15(2): 85-86. (in Chinese)
- [13] 周旋风,张德锋,王彦斌,等.激光辐照行间转移型CCD的串扰效应[J].光学精密工程,2021,29(6):1225-1233.
ZHOU X F, ZHANG D F, WANG Y B, *et al.*. Crosstalk effects of IT-CCD irradiated by laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(6): 1225-1233. (in Chinese)
- [14] 姜玉刚,刘华松,王利栓,等.卫星激光防护薄膜窗口的设计与制备技术研究[J].中国光学,2019,12(4):804-809.
JIANG Y G, LIU H S, WANG L SH, *et al.*. Design and preparation technology of laser protective film window of satellite[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 804-809. (in Chinese)
- [15] 周晟,王凯旋,刘定权,等.3.2~3.8 μm和4.9~5.4 μm红外双色滤光片的研制[J].中国光学,2021,14(3):536-543.
ZHOU SH, WANG K X, LIU D Q, *et al.*. Research on infrared dual-color filters with 3.2~3.8 μm and 4.9~5.4 μm bands[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 536-543. (in Chinese)
- [16] 陈柄言,于永吉,吴春婷,等.窄线宽1064 nm光纤激光泵浦高效率中红外3.8 μm MgO:PPLN光参量振荡器[J].中国光学,2021,14(2):361-367.
CHEN B Y, YU Y J, WU CH T, *et al.*. High efficiency mid-infrared 3.8 μm MgO:PPLN optical parametric oscillator pumped by narrow linewidth 1064 nm fiber laser[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 361-367. (in Chinese)
- [17] 徐飞,潘其坤,陈飞,等.中红外Fe²⁺:ZnSe激光器研究进展[J].中国光学,2021,14(3):458-469.
XU F, PAN Q K, CHEN F, *et al.*. Development progress of Fe²⁺:ZnSe lasers[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 458-469. (in Chinese)

作者简介:



刘金生(1980—),男,江苏盐城人,2009年于哈尔滨工业大学获得博士学位,高级工程师,长期从事光电领域技术研究。E-mail: lasercosmos@163.com



刘金波(1981—),男,河南郑州人,2010年于哈尔滨工业大学获得博士学位,副研究员,硕士生导师,主要从事受激拉曼激光、受激拉曼光谱技术研究。E-mail: hitliujinbo@163.com