

# 激光对 CCD 器件破坏时几种阈值的测量

倪晓武 陆建 贺安之

(南京理工大学应用物理系, 南京, 210014)

**摘要:** 本文简要地分析了激光与 MOS 结构 CCD 器件相互作用全过程, 提出了该破坏过程中的几种损伤阈值。在进行了实际测试的基础上, 首次得到了 Q 开关 YAG 激光致使该种器件产生的热熔融阈值、光学击穿阈值、直接破坏阈值和致使整个器件失效的激光能量阈值等有关结果。

**关键词:** CCD 器件 MOS 结构 激光破坏 阈值

## Measurement of laser damaging thresholds of CCD devices

*Ni Xiaowu, Lu Jian, He Anzhi*

(Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology)

**Abstract:** This paper analyzes the interaction process of laser beam and MOS CCD devices, and investigates the damage thresholds of CCD devices. In the experimental study, using a Q-switched YAG laser to irradiate a CCD device, the heat melting threshold, optical breaking threshold and direct damaging threshold of CCD are measured, and the laser energy threshold causing whole CCD device failure is measured too.

**Key words:** CCD device MOS structure laser destruction threshold

### 一、引言

电荷耦合器件(CCD)因其具有体积小和电路简单等优点,因而在军用和民用的摄像、探测等领域得到广泛应用。在现代战争的光电对抗领域更需要研究强激光对 CCD 器件的破坏过程和阈值。这里所说的破坏又有组成 CCD 的半导体材料中处于杂质能带的电子吸收激光能量大量向导带跃迁,引起暗电流增加而使器件失效甚至烧毁的软破坏和激光束直接作用于 CCD 器件,引起器件中材料和结构的硬破坏两种。对前一问题,已有文献进行了相关的研究<sup>[1,2]</sup>。本文通过对激光与组成 MOS 结构 CCD 器件的相互作用直至产生硬破坏的过程进行了理论研究的基础上,提出了激光与 MOS 结构 CCD 器件相互作用过程中的热熔融阈值、光学击穿阈值、直接破坏阈值和致使整个器件失效的激光能量等阈值的由来。在进行了实际测试的基础上,首次得到了 Q 开关 YAG 激光致使该种器件产生的热熔融阈值、光学击穿阈值、直接破坏阈值

和致使整个器件失效的激光能量阈值等有关结果。

## 二、激光对 MOS 结构 CCD 器件硬破坏过程

### 1. MOS 结构 CCD 器件的结构

MOS 结构 CCD 器件是由金属(M)-氧化物(O)-半导体(S)基底组成。其金属栅极常为铝(每个栅极厚约 1000nm, 宽约 15 $\mu$ m), SiO<sub>2</sub> 层(厚约 150nm)镀在 P 型 Si 衬底上, 如图 1 所示。假设激光的破坏从 CCD 器件的前表面开始, 则激光首先是与铝膜层相互作用, 随后与 SiO<sub>2</sub> 层和 Si 基底相互作用。

### 2. 激光与 CCD 器件相互作用过程简述

因为激光对 MOS 结构 CCD 器件硬破坏过程首先是对金属铝栅极膜和 SiO<sub>2</sub> 膜层的破坏, 最

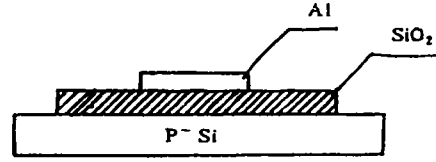


Fig. 1 Schematic diagram of CCD

后才与 P 型 Si 物质相互作用。在该过程中, 当作用激光功率密度大于 10<sup>7</sup>W/cm<sup>2</sup> 时, 激光的作用将使靶材气化, 产生物质蒸气。这种物质蒸气的温度和密度在后续激光的作用下随之增大, 并对后续激光强烈地吸收, 从而引起物质中原子或分子的激发和离化, 继而由雪崩离化形成高温高密度的等离子体。在该过程中, 处于圆频率为  $\omega$  的激光场中的电子能量增益为<sup>[2]</sup>

$$d\epsilon/dt = e^2 E^2 \nu_c / (2m\omega^2) \quad (1)$$

式中,  $\nu_c$  为电子与原子或分子的有效碰撞频率。当电子能量  $\epsilon$  达到接近物质原子或分子的离化能  $I$  时, 就将发生原子或分子的离化。继而, 电子数密度以雪崩的形式按

$$N \cong N(0) \exp(t/\tau_b) \quad (2)$$

规律增加, 直至形成等离子体。(2)式中  $\tau_b$  是雪崩时间常数, 对脉宽为毫微秒量级的激光而言, 时间常数  $\tau_b$  为

$$\tau_b = 2Im\omega^2 / [(1n2)e^2 E^2 \nu_c] \quad (3)$$

综合(1)~(3)式可见, 当作用激光参量一定时, 产生的激光等离子体的时间与物质原子或分子的离化能成反比。

### 3. 相互作用过程中的几种阈值

在上述作用过程中, 激光致使 CCD 器件产生物质蒸气或溶液喷溅的最小能量密度就是本文提到的热熔融阈值; 而引起物质中原子或分子的激发和离化, 形成高温高密度的等离子体的最小能量密度就是光学击穿阈值<sup>[4]</sup>。但是, 在激光致使 CCD 器件产生等离子体后, 器件只是在微观下产生不可逆的破坏, 对整个器件的性能不一定存在影响。如果光学击穿发生在组成 CCD 器件的铝栅极膜上, 则可能致使该膜层表面产生微观损伤或可能影响传输用的铝导体的某些电学性能, 不会使整个器件失效。倘若激光束使铝栅极膜层产生宏观可见的损伤以至影响铝导体的某些电学性能(如电导率或电阻值等)时, 对应的最小能量密度就是直接破坏阈值。当 CCD 器件由于激光的作用致使整个器件失效, 如激光将传输电信号的铝栅极膜全部损伤, 以至损伤点以下的象素都失去效果的最小激光能量密度就是致使整个器件失效的激光能量阈值。

## 三、实验和结果

### 1. 实验装置

采用 YAG 振荡放大激光器作为作用和探测激光光源。实验装置如图 2 所示。

图2中YAG激光器振荡级1输出的波长为1064nm激光经倍频晶体2后成为1064nm和532nm的混合激光束,该光束经对1064nm激光高透且对532nm激光高反的分光镜3分束,其中的532nm激光经棱镜10转折和光学延迟后作为探测光束。由分光镜3透射的激光经放大级4放大后再经衰减7,并由透镜8聚焦,用以与CCD

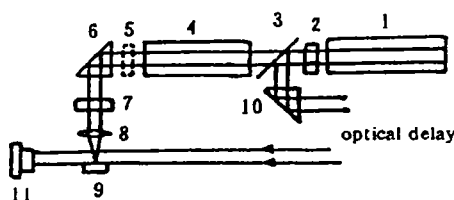


Fig. 2 Diagram of experimental set-up

器件9相互作用。这里的衰减由玻璃片堆7完成,利用它能调节作用于CCD的激光能量密度。如加入倍频晶体5(图2中虚线所示)并通过加在玻璃片堆7中的对532nm激光高透且对1064nm激光高反的滤光镜后就成为波长为532nm激光束,从而可以测量对波长为532nm的有关能量阈值。

## 2. 实验条件和方法

实验时作用激光的脉宽15ns,单脉冲最大能量为150mJ,作用激光波长1064nm和532nm,聚焦透镜8的焦距为147mm,焦点处光斑直径为50 $\mu$ m。

测定CCD器件的热熔融阈值时在与该器件平面平行地射入一束探测激光,以探测激光拍摄的光学阴影图中存在折射率变化时为判断是否存在物质蒸气。而当物质蒸气波前存在折射率剧变(即具有冲击波时)并伴随有等离子体闪光时的最小作用激光能量密度就是光学击穿阈值<sup>[4]</sup>。继续增加作用激光能量,当激光作用后在显微镜或人眼直接观察可见CCD器件表面存在宏观损伤时对应的最小激光能量密度就是直接破坏阈值。当一个激光脉冲作用后,致使CCD器件最外层(即铝栅极膜层)完全被破坏的最小激光能量密度就是致使整个器件失效的激光能量阈值。

## 3. 实验结果

通过实验测得1064nm的YAG激光及532nm激光致使组成CCD器件的铝栅极膜和SiO<sub>2</sub>膜层产生热熔融、光学击穿和直接破坏阈值。如附表所示,其中阈值的单位均为J/cm<sup>2</sup>,并由20组实验数据平均。

Table Summary of experimental data

laser wave length	532nm	1064nm
Al film thermal melting threshold	5.4	7.5
Al film optical breaking threshold	7.9	11.2
Al film direct damaging threshold	15.1	18.3
SiO <sub>2</sub> film thermal melting threshold	10.8	14.2
SiO <sub>2</sub> film optical breaking threshold	27.3	32.2
SiO <sub>2</sub> film direct damaging threshold	31.7	48.9

## 四、实验结果分析与讨论

1. 考虑到MOS结构的CCD最外层是传输电信号的金属铝栅极膜层,该膜层被破坏后,整个CCD器件将失去作用。即破坏CCD器件最外的铝栅极膜,就能达到破坏CCD器件的作用。因而致使整个CCD器件失效的激光能量阈值可以认为就是激光致使铝栅极膜产生直接破坏的能量阈值。比较铝栅极膜和SiO<sub>2</sub>膜层在1064nm激光作用下的直接破坏阈值可见,同样参量的激光使铝栅极膜产生破坏的能量阈值仅为SiO<sub>2</sub>膜层的37.4%;对热熔融阈值该比例为52.8%。

2. 由参考文献[5]可知,Al、O和Si元素的离化能分别为5.986、13.616和8.151(eV)。结合附表给出实验数据可见:激光致使CCD器件的铝栅极膜与SiO<sub>2</sub>膜层产生光学击穿的阈值

不同,而且光学击穿阈值的大小与组成物质元素的离化能成正比,即相同参数的激光与离化能大的元素作用较难产生等离子体,而同样参数的激光更易使离化能低的物质产生等离子体,这也是(3)式的实验验证。根据附表还可见,铝栅极膜比 SiO<sub>2</sub> 膜层产生光学击穿的阈值要低 2.875 倍,但铝元素的离化能即使与离化能较大的 O 元素相比也只低 2.27 倍。由此亦可见,激光致使物质产生光学击穿的阈值的大小是与组成物质元素的离化能之间是一种非线性的正比关系,其规律尚待探讨。

3. 由附表可见,不同波长的作用激光使 CCD 器件产生破坏的几种阈值均不同。但一般规律是波长为 532nm 的激光使 CCD 器件的破坏的阈值均低于 1064nm 激光。我们认为,这是因波长为 532nm 的绿色激光属可见光,CCD 器件对该波长的反射率低于 1064nm 红外激光,所以有这一实验结果。查阅 CCD 器件的光谱特性曲线还可知,CCD 对波长在 800nm 的近红外光量子效率更高,因而使用此种激光更易使 CCD 产生破坏。

4. 比较附表给出的热熔融阈值、光学击穿阈值和直接破坏阈值可知,就作用激光能量密度而言,热熔融阈值最低,而使用自由振荡激光器更易使 CCD 器件产生热熔融现象。可以说,从激光破坏的角度而言,使用自由振荡激光器能以较小的能量密度取得最佳的破坏效果。

#### 参 考 文 献

- 1 Klein N. Thin Solid Films, 1983;100:35
- 2 陈斗南. 物理学报,1987;36:838
- 3 倪晓武,陆建,贺安之 *et al.* Opt Commun, 1989;74(3~4):185
- 4 贺安之,倪晓武,陆建 *et al.* Opt Commun, 1992;91(1~2):62
- 5 张向宇. 实用化学手册,北京,国防工业出版社,1987,cha. 1

收稿日期:1993-08-04

· 简 讯 ·

### 单片激光二极管可同时发射红光及红外光

Xerox Palo Alto 研究中心(Palo Alto, CA)的科学家们在 GaAs 衬底上生长出单管可见(680nm)和红外(830nm)的激光二极管。这种紧密排列由芯片低压金属有机物气相外延方法制成。采用 AlInP 作为腐蚀间隔层,在单管之间形成绝缘层。

这种排列按照 David Bour 标尺杆,对生产厂商来说是困难的,但是提供了除红外激光之外产生红色激光的可能性。Bour 不愿谈论应用细节,但他说他们的目标之一就是在激光打印上,一次就能得到黑色和一种彩色颜色。

对于可见的(AlGaAsP)和红外的(AlGaAs)激光,大面积器件的脉冲阈值电流密度分别为 260A/cm<sup>2</sup> 和 240A/cm<sup>2</sup>。这种器件可单独寻址,但是,适当偏置电流下也可同步工作,连续运转可在折射率导引的器件上实现,在宽条结构中还不行。

译自 L F World, 1994;30(1):11 张贤义 译 巩马理 校