

文章编号: 1672-2892(2012)02-0217-04

电荷耦合器件在电子束参数测量中的损伤问题

王 远, 江孝国, 李成刚, 禹海军, 张开志

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 针对直线感应电子加速器(LIA)实验束参数测量技术应用过程中, 电荷耦合器件(CCD)在纳秒激光辐照下工作的损伤效应方面进行研究。在分析 CCD 感光成像原理及其高能粒子测量应用的基础上, 通过监测这种辐射下 CCD 输出信号的变化和实验后 CCD 的成像, 对 CCD 中发生的软、硬损伤进行探讨, 得到 CCD 能量损伤阈值的光子的响应特性和辐射损伤评估, 保证了加速器束参数测量的可靠性。

关键词: 电子束测量; 电荷耦合器件图像传感器; 激光干扰; 损伤阈值

中图分类号: TN911.6

文献标识码: A

Damage problem of CCD in the electron beam parameters measure

WANG Yuan, JIANG Xiao-guo, LI Cheng-gang, YU Hai-jun, ZHANG Kai-zhi

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: There are strong electromagnetism interruption in the process of high power electron beam parameters measure and diagnosis. The Charge Coupled Devices(CCD) is irradiated by strong electron pulse, laser and X-ray. According to the analysis on the CCD imaging principle and the measure on high energy particles, the changes of the CCD output signals under the radiation environment are monitored as well as the CCD imaging after the experiment. The soft-damage and hard-damage of CCD are discussed. It is found that the damage occurs at the grid electrode of the device instead of at the light activated elements. The response characteristics of beam whose energy reaches the damage threshold are obtained. The evaluation on radiation damage is given, which ensures the reliability of beam parameters measure of accelerator.

Key words: electron beam measure; Charge Coupled Devices image sensors; laser interference; damage threshold

随着高能强流电子束束流参数测量技术性能研究的深入和测试技术的进步, 对束流参数的时间分辨测量提出了更高要求, 时间分辨测量的重要性在于可以了解电子束脉冲的各种参数在约 100 ns 内发生变化的过程, 从而对电子束的调控提供准确的数据, 能更准确了解电子束性能和电子束调试。进行时间分辨测量, 首先要有达到要求的具有时间分辨测量能力的高速分幅相机; 在具有时间分辨能力的高能强流电子束束流参数测量领域内, 需要幅间间隔时间约 10 ns、每幅图像曝光时间不大于 5 ns 的高速分幅相机。利用该相机建立了一套强流、高能电子束参数测量系统, 首次用于强流、高能加速器电子束的参数测量, 获得了具有高速时间分辨能力的测量结果, 并且观察到了较多过去未观察到的现象^[1]。CCD 在强磁、强流电子束脉冲、X 光、激光辐射环境中工作, 由于 CCD 异常引起的实验数据不完整或数据丢失, 通过分析诊断, 发现电磁脉冲和激光对 CCD 电子器件都会造成干扰和损伤。

1 强电磁脉冲辐射和瞬态 X 光辐射的 LIA 实验环境

直线感应加速器是强流加速器, 运行时产生很强的电磁干扰。以“神龙一号”为例, 加速束流 2.5 kA, 而 70 多个加速腔中, 除束流外, 还有近 10 kA 流过补偿电阻的电流, 它们都要在约 100 ns 的时间内释放出来。此

收稿日期: 2011-06-14; 修回日期: 2011-07-03

基金项目: 国防科技基础研究基金资助项目(51077119)

外,近百个束流输运线圈,每个需 100 A~600 A 的励磁电流;近 200 个磁场校正线圈,每个需 2 A 左右的电流;再加上脉冲功率系统、油、水、气系统和真空系统,每次实验需要的峰值耗电量在 2 000 kW 以上,功耗所产生的电磁辐射,会对所有测量和控制仪器电子元器件产生干扰和损伤。其次,由于这种加速器加速梯度较低,10 MeV~20 MeV 的加速器近百米长附属设备通常分布在数百米的范围内。必须考虑测试信号传输过程中的干扰和畸变。此外,强流电子加速器产生照射量率的瞬态 X 光辐射和电子束。具体技术条件为:电子束束流为 2.5 kA,能量 20 MeV,功率脉宽 60 ns。

2 激光对 CCD 的干扰和损伤机理

激光对图像传感器的损伤分为硬损伤和软损伤。前者是指器件局部或整体结构发生了可观测变化,通常是灾难性、不可逆的,如熔融、汽化、层裂等现象;后者是指器件功能产生变化,通常是瞬时的、可逆的,如由于材料的某些性质发生变化而导致的器件响应度损失、暗电流增加以至器件暂时失效,只需要较小的激光能量密度打在图像传感器上使传感器饱和即可实现干扰,即软损伤,而要实现硬损伤所需要的激光能量密度要高得多^[2]。

2.1 CCD 的基本原理

CCD 的基本单元结构是 MOS(Metallic Oxide Semiconductor)(金属-氧化物-半导体)结构,通常由金属栅电极、氧化物绝缘层(纯净 SiO_2)和 P 型半导体组成。当对电极未加电压时,半导体内多数载流子(空穴)和少数载流子(电子)均匀分布,不体现空间电荷分布特性。电极上施加一定的正向低电压时,由于电场的作用, P 型半导体内接近绝缘层且又在电极下的区域中的空穴被排斥而远离界面,形成耗尽区。该耗尽区的深度与电压成正比;电极上施加的正向电压增大到一定时,电场强得足以使耗尽区与绝缘层界面处的电子浓度大于空穴浓度而形成一层厚度很薄(约 0.01 μm)、电子浓度很高的反型层。反型层的存在表明其存储电子电荷的功能^[3]。

对 CCD 成像探测器信号处理自动增益控制(Automation Gain Control, AGC)电路的干扰,是指不断变化激光干扰信号的振幅,使 AGC 电路增益高时激光振幅也高,AGC 电路增益低时激光振幅也低,这样 AGC 电路就不能提供足够的信噪比,从而引起干扰^[4];对 CCD 成像探测器帧同步(或场同步)信号的干扰,主要是指用脉冲激光信号来破坏成像探测器的帧同步或场同步信号,从而使 CCD 成像探测器的输出紊乱,进而引起干扰;对 CCD 成像探测器光学系统的散光干扰显而易见。

2.2 LIA 中激光干涉法的实验

相机主要结构如图 1 所示。它主要由成像物镜、平行光转换器及 8 路分光系统、8 路 CCD 相机、时间控制系统和微机组成。激光干涉法的实验布局见图 2。激光器是 1 064 nm 脉冲激光器、脉宽 5 ns、重复频率为 100 Hz,用能量计监测激光能量,经过适当的衰减后透过真空靶室有机玻璃照射到相机镜头上,相机带有光学镜头,将激光聚焦在 CCD 图像传感器的表面形成足够的像点,有机玻璃对 1 064 nm 激光的投射率为 90%以上,忽略它对激光的衰减,根据成像光斑面积、发射激光的能量、衰减器的衰减系数,可以求出打在图像传感器上的激光能量密度,实验中采用高速分幅相机,相机处于工作状态^[5]。

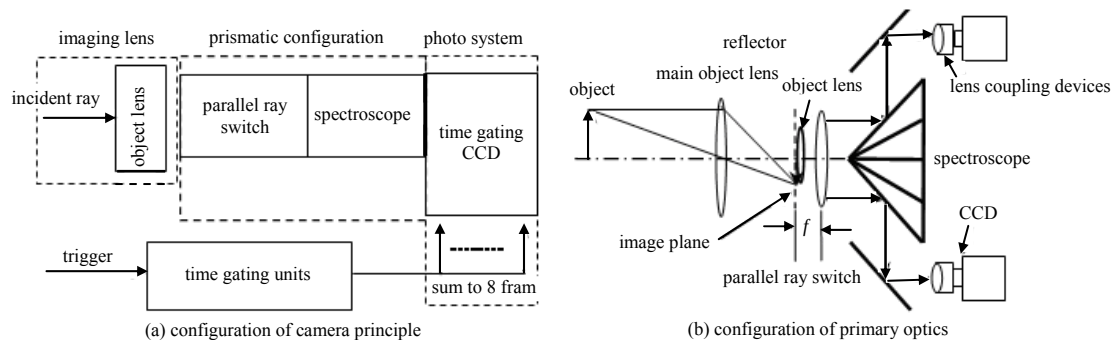


Fig.1 Structure of high speed multi-framing gated camera

图 1 高速分幅相机结构

实验时,先在激光光路上加上足够的衰减片,使入射到 CCD 的激光能量足够小,以防止饱和甚至直接损伤;通过逐渐调节衰减量,逐步提高 CCD 表面的激光辐照能量。当能量率密度达到一定值时,CCD 响应信号突然从串扰区峰值急剧下降,直至无响应,从示波器中可以看出,图 3 中的曲线是 3 次(6 620#,6 521#,6 522#)实验得到

的信号数值结果, 从信号峰值到信号消失的时间约为 150 ms。

分析结果表明, CCD 表面的微透镜阵列是最容易受到损伤的部位, 也是损伤的起始部位, 它的损伤将造成 CCD 感光度不均匀, 导致影响其成像质量, 随着激光能量密度的逐步增大, 遮光铝膜开始出现融蚀损伤和应力损伤, 它的剥落使激光直接射入垂直位移寄存器, 造成漏光现象。CCD 出现线状或带状白色噪声, 同时遮光铝层也是 CCD 电路布线层, 它的损伤也可能造成 CCD 电路短路或断路, 造成 CCD 无法正常成像, 若进一步增大激光能量, 损伤继续向纵深方向发展, 当伤及时钟驱动脉冲硅电极时, 将造成时钟线间短路或时钟线断路, CCD 耦合探测器将彻底失效。图 4 是用分幅相机获得的 X 丝阵 Z 箍缩过程的一个实验结果(20091017#), 图中的左侧是第 2 幅 CCD 正常采集的图像, 右侧是第 5 幅 CCD 异常采集的图像, 图像出现线状背底。

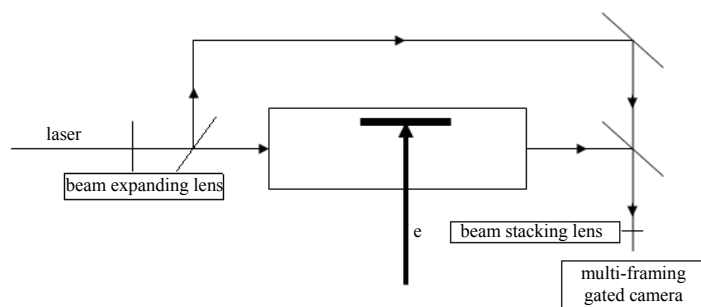


Fig.2 Experiment layout in laser intervene

图 2 激光干涉法的实验布局

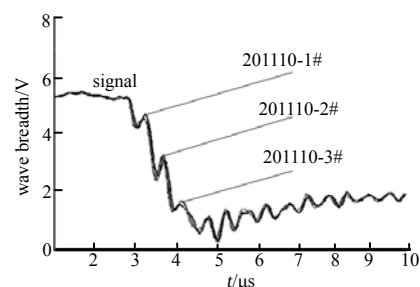
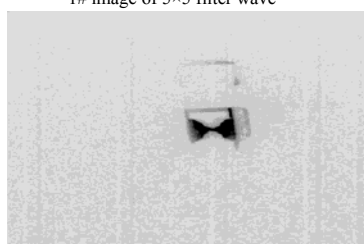


Fig.3 Damage to signal of CCD

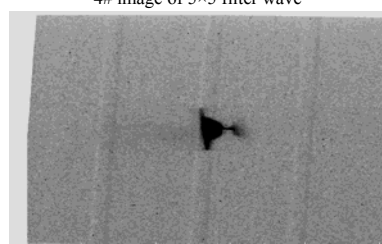
图 3 CCD 信号损伤衰减

1# image of 5×5 filter wave



normal image of CCD in experiment

4# image of 5×5 filter wave



abnormal image of CCD in experiment

Fig.4 Typical X-Z pinch with X silk array load(20091017#)

图 4 X 丝阵 Z 箍缩过程(20091017#实验结果)

为了进行对比, 在无干扰和有干扰的实验室环境条件下对 CCD 图像传感器进行损伤阈值测量, 表 1 给出不同条件下相机受到干扰、损伤和严重损伤的阈值实验测量结果。

表 1 实验测量结果

Table 1 Experimental results

	value of slight irradiated/(J·cm ⁻²)	threshold value of hard damage/(J·cm ⁻²)	destructive damage/(J·cm ⁻²)
atmosphere	< 1.45×10 ⁻³	0.29	1.5
vacuum	1.90×10 ⁻⁴	0.27	> 1

2.3 强电磁脉冲和瞬态 X 射线对 CCD 的损伤

由于强电子束的辐射, 大量电子束瞬间注入器件, 改变氧化层中电场的分布, 增加了空穴复合, 并使电子填充界面陷阱, 因而导致阈电压灵敏度降低, 同时, 大量电子的注入极大地增加了流过保护二极管上的瞬态反向光电流, 发生寄生二极管效应, 致使器件 PN 结失效或金属化层烧毁, 器件出现类似内部断路或短路现象。

X 射线属致电离辐射, 当作用于半导体器件时, 会在 MOS 结构中栅氧层的感生电子—空穴对以及在 Si/SiO₂ 界面产生新的界面态。辐照引起的载流子和界面陷阱的多少与辐照剂量、辐射脉冲宽度和器件的几何参数、制造工艺密切相关, 器件相应程度取决于器件栅氧层内电子—空穴对数目多少和 Si/SiO₂ 界面引起的新增的界面态数量。阈电压漂移是对电离辐射敏感的参量之一, 主要由辐射感生的氧化物电荷和界面态决定, 它还与器件辐照时偏置电场密切相关, 因为偏置电场直接影响辐照感生载流子的运动方向和栅氧层中感生氧化物空间电荷位置、大小, 并影响着界面陷阱对电子的俘获^[6]。

由于 MOS 的瞬间辐照的寄生二极管效应, 导致厚氧 pMOS 场效应管对瞬态 X 射线和强电子束辐照响应的显著差异。瞬态 X 光辐射下的阈电压响应十分明显, 其辐照响应灵敏度是稳态的近百倍。而对强电子束辐照, 阈电压漂移显得十分“迟钝”, 甚至低于稳态电子束辐照的响应水平。在强电子束辐照下, 更容易造成器件损坏^[7]。

3 结论

实验结果表明,在强电磁脉冲和瞬态 X 射线实验环境中^[8],激光辐射照射下,CCD 永久性硬损伤干扰阈值为 1.5 J/cm^2 ,CCD 相机的干扰阈值小于 $1.45 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$,强磁脉冲和瞬态 X 射线与 CCD 光敏元件和传输电路的破坏、损伤的阈值之间是否存在关系尚不清楚,这是下一步侧重研究的工作。

参考文献:

- [1] 邓建军. 直线感应电子加速器[M]. 北京:国防工业出版社, 2006. (DENG Jianjun. Linear induction electron accelerator[M]. Beijing:National Defence Industry Press, 2006.)
- [2] 孙承伟. 激光辐射效应[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. (SUN Chengwei. Laser radiated effects[M]. Beijing:National Defence Industry Press, 2002.)
- [3] 郭维廉. 硅—二氧化硅界面物理[M]. 北京:国防工业出版社, 1982. (GUO Weilian. Silicon-Interfacial physics of SiO_2 [M]. Beijing:National Defence Industry Press, 1982.)
- [4] 巫松祯. 电气电子绝缘材料[M]. 北京:机械工业出版社, 2006. (WU Songzhen. Electric insulation material[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006.)
- [5] 江孝国,杨国君,张开志,等. 光学渡越辐射测量中能量分辨精度分析[J]. 强激光与粒子束, 2005,17(6):956-960. (JIANG Xiaoguo,YANG Guojun,ZHANG Kaizhi,et al. Energy resolution for measurement method using optical transition Radiation[J]. High Power Laser and Particle Beam, 2005,17(6):956-960.)
- [6] Hornsey Richard. Design and Fabrication of Integrated Image Sensors[D]. Waterloo:University of Waterloo, 2002.
- [7] 代荣. CCD 在 X 射线直接探测中的应用[J]. 信息与电子工程, 2007,5(6):462-465,472. (DAI Rong. Application of CCD in Direct X-ray Detection[J]. Information and Electronic Engineering, 2007,5(6):462-465,472.)
- [8] 王远,江孝国,禹海军,等. LIA 强电磁干扰环境下束流测量的实现[J]. 信息与电子工程, 2008,6(4):297-299. (WANG Yuan, JIANG Xiaoguo,YU Haijun,et al. Implementation of the beam parameters measure system on the strong electromagnetism interruption[J]. Information and Electronic Engineering, 2008,6(4):297-299.)

作者简介:



王 远(1965-),男,江苏省无锡市人,高级工程师,主要从事加速器束参数测量、测控技术研究.email:ideawy@163.com.

江孝国(1968-),男,四川省泸州市人,研究员,从事加速器束参数测量技术研究.

李成刚(1979-),男,山西省运城市人,博士,从事加速器 X 光辐射技术.

张开志(1971-),男,四川省广汉市人,研究员,从事加速器物理及应用研究.

禹海军(1970-),男,郑州市人,副研究员,从事加速器束靶技术.