

文章编号 :1001-4322(2004)02-0185-04

利用普通视频 CCD 作为紫外激光 和软 X 射线探测器的研究*

马景龙, 马维义, 周创志, 胡风明, 龚 堃, 单玉生, 王乃彦

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要: 介绍了利用价格便宜的普通视频 CCD 来获取紫外激光和软 X 射线图像的方法和应用结果, 以代替价格昂贵的紫外 CCD、使用不方便的 X 光胶片或者昂贵的 X 光 CCD, 其关键是 (1) 去除 CCD 相机的自动增益校正 (2) 将相机的校正系数 γ 值设置为 1 (3) 去除 CCD 相机前面的保护窗。作为一种简易的装置, 可以用于紫外激光测量及激光与等离子体相互作用研究。结果表明, 采用改造后的普通视频 CCD 测量紫外激光光斑, 准确可靠, 其灵敏度比科学级紫外 CCD 的低一个量级, 它还可以测量软 X 射线的二维分布, 作为 X 光针孔相机使用非常方便。

关键词: CCD; 紫外激光; 软 X 射线

中图分类号: TN247 文献标识码: A

KrF 激光因其波长短、频带宽、可平滑性好等特点, 在直接驱动 ICF, JFE 和 EOS 研究中受到广泛重视^[1]。在激光器件的研制及激光与物质相互作用的研究中, 紫外 CCD 被广泛地用来进行光束的准直、调焦和远近场分布的测量。一般 CCD 对紫外光是不敏感的, 经过特殊处理的紫外 CCD 目前价格比较昂贵, 仅被用来进行较为准确的数据测量, 而由激光等离子体产生的软 X 射线二维分布和光谱, 则用 X 光针孔相机来获取, 以更好地反映激光的聚焦性能^[2]。一般的针孔相机利用 X 光胶片作为记录体, 存在许多缺点, 比如不在线、调整困难、引入误差的环节较多等等, 当然使用 X 光 CCD 仍然是最好的解决方案, 但是因为 X 光 CCD 价格昂贵, 很少有人将它作为针孔相机探测器。使用普通的视频 CCD 作为软 X 射线的探测器已经多有报道^[3, 4], 我们将这种方法应用到“天光一号”KrF 激光的等离子体诊断中, 同时也将这个办法推广到直接测量紫外激光的分布, 实验证明这种方法是可行的。

1 利用普通视频 CCD 测量紫外光和软 X 射线的原理

一般的 CCD 表面结构从上到下依次是: 作为保护层的 SiO_2 (约 $2\mu\text{m}$), 多晶硅电极 (零点几 μm), n 型硅 (零点几 μm), p 型硅耗尽层 (约 $2\mu\text{m}$), p 型硅衬底 (几百 μm)。某种波长的光子必须穿透表面层, 将能量沉积在耗尽层中, CCD 才能输出信号。CCD 对波长为 λ 的光子响应的量子效率为^[3]

$$S = \exp(-\alpha_{\text{SiO}_2} l_{\text{SiO}_2} - \alpha_{\text{Si}} l_e) \times \{1 - \exp[-\alpha_{\text{Si}}(l_n + l_d)] + \alpha_{\text{Si}} L / (\alpha_{\text{Si}} L + 1) \exp(-\alpha_{\text{Si}} l_d)\} \quad (1)$$

式中 α_{SiO_2} 和 α_{Si} 分别为光子在 SiO_2 和 Si 中的吸收系数; l_{SiO_2} 是 SiO_2 保护层的厚度; l_e 是多晶硅电极的厚度; l_n 是 n 型硅的有效厚度; l_d 是耗尽层的厚度; L 是 p 型硅衬底的厚度。对于文献 [3] 中提到的摄像头 (类似于 CCD), 以取自文献 [5] 的吸收系数计算得到波长从 $0.5\text{nm} \sim 1\mu\text{m}$ 的量子效率曲线, 如图 1 所示。这种 CCD 对峰值响应波长 620nm 的量子效率为 84% , 而对 248nm 的量子效率仅有 10^{-24} , 实际上紫外光被作为电极的硅层完全吸收了。

我们在实验中发现, 当用紫外激光 (248nm) 直接照射 CCD 时, CCD 是有输出的, 这与上面的分析不符。文献 [6] 报道, 用波长为 250nm 的单色光, 激发在氧气氛下用气相沉积法制备的非晶态薄膜, 发现在 $330 \sim 600\text{nm}$ 范围内有一发光带, 认为可能是由于 SiO_2 中空位缺陷引起的。我们认为这可能是普通 CCD 对紫外光产生响应的原因, 在 CCD 表面有一层用气相沉积法制成的 SiO_2 , 这层 SiO_2 起到了波长转换体的作用。

从图 1 可以看到, 软 X 射线可以穿透表面层到达耗尽层, 所以前照射的普通 CCD 对于软 X 射线有相当高的灵敏度。例如对于 2keV 的软 X 射线, 量子效率可达到 48% 。从几百 eV 到几千 eV 的软 X 射线, 表征了非

* 收稿日期 2003-07-24; 修订日期 2003-10-08

基金项目 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 马景龙 (1968—), 男, 博士, 副研究员, E-mail: jinglong@iris.ciae.ac.cn。

常丰富的原子和等离子体信息,恰好是 CCD 的可探测范围,但是高能 X 射线(约 MeV)会穿透耗尽层,所以 CCD 探测不到。

2 使用普通视频 CCD 测量紫外光和软 X 射线的方法

使用普通视频 CCD 用于绝对测量,需要注意它与科学级 CCD 的两个主要差别(1)自动增益(2) γ 校正。自动增益是指在不同的明暗环境下,视频 CCD 自动调节输出放大倍数的功能,有了这个功能,视频 CCD 在亮环境下拍摄不至于饱和,在暗环境下拍摄又不至于太暗。显示器的亮度与输入信号之间并不是线性关系,而是一个指数关系(一般 $\gamma = 2.2$)。视频 CCD 为适配显示器的输出而改变了输入输出之间的线性,这就是 γ 校正(一般 $\gamma = 0.45$)。这样被拍摄对象的亮度与显示器的输出亮度之间是线性关系。视频 CCD 的输出(mV)可以写成为

$$V = [g(Q + A)]^\gamma \quad (2)$$

式中 g 是放大器的增益; Q 是信号产生的电子数; A 是本底噪声产生的电子数; γ 为校正系数。从式中看出,如果 g 是一个不定常的数,不同次测量之间就没有可比性。 γ 指数的影响可以在数据处理时用下式加以修正,

$$v = (V/P)^{1/\gamma} P \quad (3)$$

式中 v 是真实的信号; V 是视频输出信号; P 是信号峰值。去掉自动增益并且将 γ 指数设置为 1 后,输出电压与入射光的能量密度或者功率密度就是一个线性关系

$$V = \alpha(Q + A) \quad (4)$$

如上所述,使用普通视频 CCD 测量紫外光和软 X 射线,关键有 3 点(1)去除 CCD 相机的自动增益校正;(2)将相机的 γ 值设置为 1(3)去除 CCD 相机前面的保护窗,这层零点几 mm 厚的普通玻璃对紫外光和软 X 射线是不透明的。我们选择了 WATEC 公司的 902B(CCIR),这是一款非常小巧的相机,芯片尺寸为 1/2",像元数目为 795(H) × 596(V),像元尺寸为 8.6 μm(H) × 8.3 μm(V),输出电视线数为 570 行,自动增益可以开关, γ 指数可以在 0.45 和 1 两个值之间选择。挑选噪声较小的 CCD,去掉保护玻璃,将自动增益关掉,将 γ 设置成 1 以后,即可用来进行绝对测量。

3 应用结果

我们用上述方法处普通视频 CCD 测量了一束 KrF 激光的聚焦分布,并与目前使用较为普遍的紫外 CCD(COHU C4812)的测量结果进行了比较,如图 2 所示,图中同时给出了在光斑相同位置上的分布曲线。从图中可以看出,两个 CCD 反映的光斑特征是基本一致的。但是由 902B 测出的分布曲线上有众多小的起伏,这些小的起伏不是激光束的特征,因为所测激光是经过光滑的,由 C4812 的测量结果反映了这一点,我们认为是前面所述的波长转换机制在不同像元上的不一致性造成了这个结果。从分布曲线得到的光斑在两个方向上的半高宽度,902B 的结果小一些,有两个原因,一是由于使用同一块图像获取卡,无法同时测量一个激光脉冲的分布,这里给出的是两次测量结果;二是两个 CCD 芯片相对于激光束的位置有一定差别。由于普通视频 CCD 没有采取特殊的降噪措施,所以本底较大,本文给出实测的两个 CCD 的本底相对值,C4812 的本底平均为 63,902B 的本底平均为 160,而信号峰值为 4 095,可见普通视频 CCD 对测量结果的影响并不很严重。但需要注意的是,普通视频 CCD 的像元中一般会有一些“热点”,即本底输出远远大于平均本底,这个问题可以通过挑选较好的 CCD 或者使测量避开这个区域来解决。测量得到 902B 对 248nm 紫外光的灵敏度比 C4812 低约 1 个数量级。

在视频 CCD 前端安装一个壁厚 2mm 的锥形铝筒,铝筒的前端安装用 50 μm 钽膜为基底的针孔,就制成了针孔相机。利用能量为 20J,靶点直径约 300 μm,功率密度约 $0.8 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 的 KrF 激光照射厚度 13 μm 的铝靶,针孔相机与激光方向成 30°角来测量 X 光分布。靶室内真空度低于 5Pa。图 3 给出针孔相机的测量结果,这次测量使用了直径 70 μm 的针孔,针孔距离靶点和 CCD 面分别为 5cm 和 12cm,在针孔前使用 12 μm 的镀膜

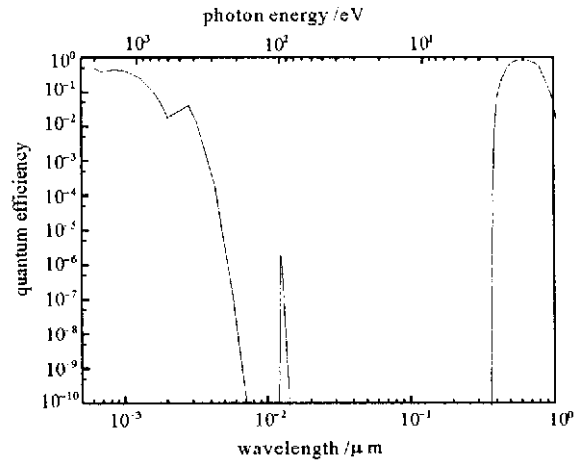


Fig. 1 Quantum efficiency of a commercial CCD

图 1 普通 CCD 的量子效率

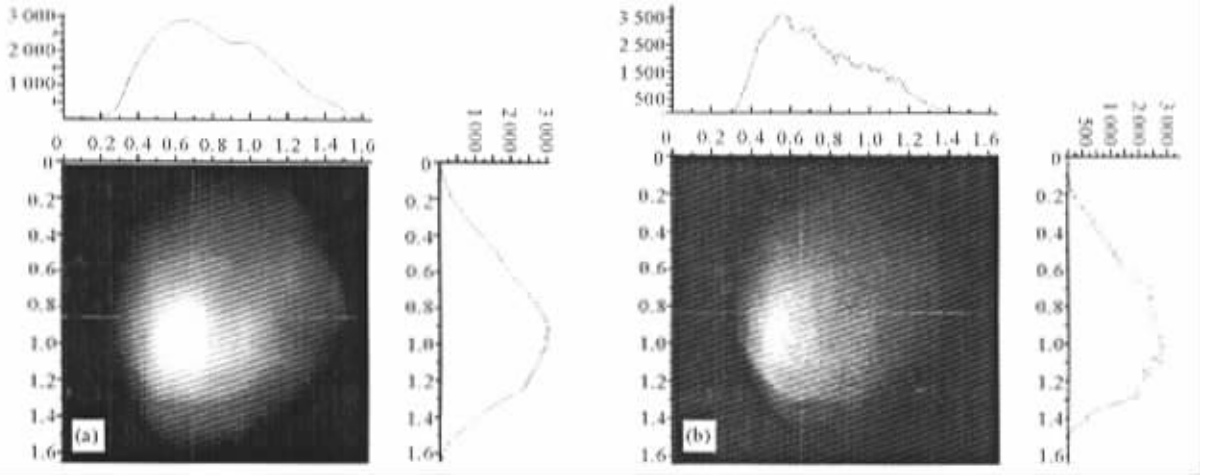


Fig. 2 UV laser focal spot measured by a UV CCD (a) and a commercial CCD camera (b)

图2 用紫外 CCD (a)和普通视频 CCD (b)测量得到的紫外激光的焦点分布

来屏蔽可见光。在插入镀膜之前,首先用聚焦激光照射靶位处的白纸发出的蓝色荧光来对准相机,并且相机事先用强光检验过密封性,保证没有杂散光进入。在真空中使用时,CCD 的散热很差,接通电源一段时间后,CCD 输出的本底明显增加,所以电源应在测量开始前才加上。

4 结论

分析与实验表明,对普通视频可见光 CCD 作简单的处理,可以用来测量紫外激光和软 X 射线的二维分布。通过与紫外 CCD 测量结果的比较,证明对紫外激光光斑的测量是准确可靠的,灵敏度大致比科学级紫外 CCD 低一个量级。如果测量非常微弱的信号,可以考虑在 CCD 表面镀一层零点几 nm 的荧光材料以增加紫外光向可见光的转换效率。本底对测量的影响不严重,像元对波长转换的一致性与镀有 Lumogen 波长转换体的科学级 CCD 相比差一些,可以用于激光的调焦、准直、或者不太精确的分布测量。

实验也证明了视频 CCD 可以测量软 X 射线的二维分布,作为 X 光针孔相机使用非常方便。但是在实际应用中,有时希望 CCD 的灵敏度更高一些。在上面介绍的测量中,如果在铝靶的表面覆盖一层塑料薄膜,则用这个方法就得不到 X 光图像。当然可以采用像增强的方法,比如在 CCD 前增加一个 MCP^[7],但这增加了装置的复杂性和成本,目前还没有简单、便宜的办法提高这种方法的灵敏度。如果要进行绝对测量,应与标准的 X 光胶片进行校对测量,得到 CCD 的响应曲线。在 CCD 前面配上晶体或者光栅,就成为软 X 射线光谱仪^[8]。

总之,作为一种简单、便宜的探测器,普通视频 CCD 在紫外 KrF 激光“天光一号”的调整、诊断及等离子体实验中得到应用,并有一定推广价值。

参考文献：

- [1] Obenschain S P , Bodner S E , Colombant D , et al. The Nike KrF laser facility : performance and initial target experiments[J]. *Phys Plasmas* ,1996 , 3 : 2098—2107.
- [2] Marshall F J , Ohki T , McInnis D , et al. Imaging of laser-plasma X-ray emission with charge-injection devices[J]. *Rev Sci Instrum* ,2001 , 72(1) : 713—716.
- [3] Matsushima I , Koyama K , Tanimoto M , et al. Soft X-ray imaging by a commercial solid-state television camera[J]. *Rev Sci Instru* ,1987 , 58(4) : 600—603.
- [4] Peckerar M C , Baker W D , Nagel D J. X-ray sensitivity of a charge-coupled-device array[J]. *J Appl Phys* ,1977 , 48(6) : 2565—2569.

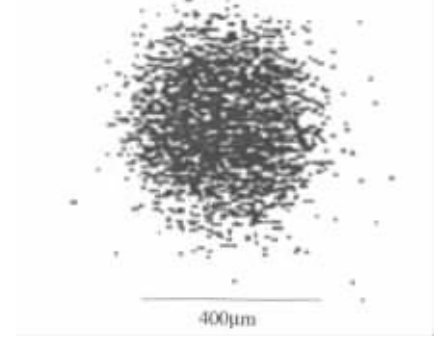


Fig. 3 X-ray pin-hole image measured by a commercial CCD camera

图3 用视频 CCD 作为接收器测到的等离子体 X 光针孔图像

- [5] Palik E D. Handbook of constants of solids[M]. Academic Press , Inc ,1985.
- [6] 郑祥钦 ,郭新立 ,廖良生 ,等. 脉冲激光沉积硅基二氧化硅薄膜的蓝光发射[J]. 半导体学报 ,1998 ,**19**(1) 21—25.(Zheng X Q ,Guo X L ,Liao L S , et al. Blue light emission from silicon based SiO₂ thin films prepared by pulsed laser deposition. *Chinese Journal of Semiconductors* ,1998 ,**19**(1) 21—25)
- [7] Arora V ,Kumbhare S R ,Naik P A , et al. A simple high-resolution on-line X-ray imaging crystal spectrograph for laser-plasma interaction studies[J]. *Rev Sci Instrum* ,2000 ,**71**(7) 2644—2650.
- [8] Koenig M ,Boudenne J M ,Legriell P , et al. A computer driven crystal spectrometer with charge coupled device detectors for X-ray spectroscopy of laser plasma[J]. *Rev Sci Instrum* ,1997 ,**68**(6) 2387—2392.

Imaging of UV laser beam and soft X rays using a commercial CCD camera

MA Jing-long , MA Wei-yi , ZHOU Chuang-zhi , HU Feng-ming , GONG Kun , SHAN Yu-sheng , WANG Nai-yan
(*China Institute of Atomic Energy , P. O. Box 275-7 , Beijing 102413 , China*)

Abstract : A commercial CCD camera is used to image UV laser beams and soft X rays instead of expensive UV CCD and inconvenient X-ray film or X-ray CCD after removing automatic gain correction , protection window and setting-up correction coefficient to be 1. The experimental results show that a revised commercial CCD camera can be used to cheaply diagnose collimation , focusing , etc in laser and plasma interaction research.

Key words : CCD ; UV laser ; Soft X-ray