

一种飞秒电子衍射系统的设计与分析*

盛立志^{1,2} 赵宝升¹ 张小秋¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 设计了飞秒电子衍射系统,详细分析了影响系统时间分辨率的因素,如阴极的材料及厚度、阴极附近场强、聚焦方式、偏转灵敏度及扫描速度等.设计的电子枪采用 35 nm 厚的 Ag 阴极,阴栅之间场强为 10 kV/mm,磁线圈聚焦,偏转灵敏度为 26.3 mm/kV 的平折扫描板,5.5 kV/ns 的扫描电压斜率,最终获得了 1.45×10^8 m/s 的扫描速度.计算出系统总的时间分辨率为 500 fs 左右.

关键词 飞秒电子衍射;磁聚焦;时间分辨率;扫描速度

中图分类号 TN2 **文献标识码** A

0 引言

为了研究 μ s、ps、fs 量级的瞬态过程,具有飞秒量级或更快的电子衍射系统越来越受到科研人员的重视^[1,2].国外相关实验室也非常重视该方面研究工作.第一个具有时间分辨能力的电子衍射系统报导于 1982 年^[3],该文研究了金属 Al 的融化过程.利用超快电子衍射系统研究 Al 的晶格结构的类似实验在以后相继进行^[3~5].1998 年, M. Ya. Schelev 研究组研制了电子束脉宽为 500 fs,能量为 30 keV 的电子衍射系统,并用 30 nm 厚的 Al 靶进行实验,得到了清晰的衍射图案^[6].1999 年的诺贝尔奖得主、飞秒化学的奠基人 A. H. Zewail^[7,8] 研究组利用 UED(Ultrafast electron diffraction)装置研究了 C₂F₄I₂ 中 C-I 键的断裂动力学过程, Bradley J. Siwick^[5] 研究组利用 600 fs 的电子脉冲,研究了 Al 的溶化,即 Al 在超快光脉冲的作用下从固相到液相的转化过程.人们还利用具有时间分辨能力的电

子衍射装置研究了激光引起的 Si、Au、GaAs 等的晶格膨胀,研究了钒的氧化物在加热时所表现出的从绝缘体到金属的转化过程,研究了物质表面结构和物质表面分子的振动等.

本文设计了一种飞秒电子衍射系统.文中分析了影响分辨率的各种因素,并进行优化,得到了 500 fs 的总时间分辨率.

1 飞秒电子衍射系统组成

飞秒电子衍射系统(Femtosecond Electron Diffraction System)组成如图 1.飞秒激光脉冲(266 nm)激发电阴极产生超快电子脉冲,电子脉冲经过电子光学系统的加速和聚焦.电子束的能量和尺寸分别为 50 kV、100 μ m,加速、聚焦后的电子束能够在 X、Y 方向进行二维偏转,这些能量电子轰击晶体样品而产生电子衍射,电子衍射图像经双 MCP 倍增后在荧光屏(光纤面板)上显示并由 CCD 读出记录.

为了测量脉冲电子的时间特性,在扫描板上加

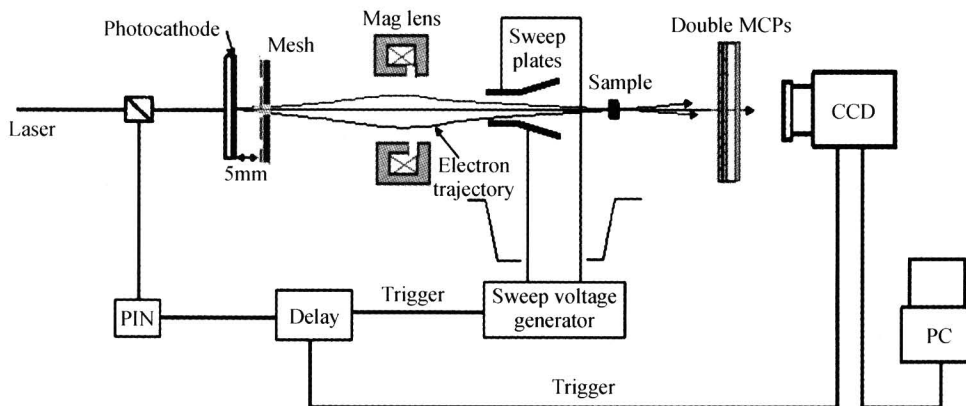


图 1 飞秒电子衍射系统组成

Fig. 1 The block diagram of the FED system

* 国家自然科学基金(10527002)资助
Tel: 029-88498712 Email: shenglizhi80@163.com
收稿日期: 2005-08-12

一超快斜坡电脉冲对电子束进行扫描,扫描图像显示在荧光屏上,根据扫描速度、偏转灵敏度和空间分辨率,可计算出电子束的脉冲宽度.

影响整个系统时间分辨率的主要因素是电子光学系统即电子枪的时间分辨率,因此下面将对电子枪的时间分辨率进行分析.

2 电子枪的时间分辨率

飞秒电子衍射系统的电子枪主要由光阴极、加速阳极、磁聚焦线圈、扫描板组成,如图 1. 系统最为核心的两个参量是其时间分辨率和空间分辨率.

电子枪的时间分辨率定义为能够分辨的两个事件的最小时间间隔 τ , 两个事件的分辨程度用瑞利判据来判断. 通常将时间分辨率 τ 分为物理时间分辨率 τ_P 和技术时间分辨率 τ_T 两个部分. 总的时间分辨率为

$$\tau = \sqrt{\tau_P^2 + \tau_T^2} \quad (1)$$

2.1 物理时间分辨率

物理时间分辨率定义为电子在电子枪各部分渡越时间弥散的总效果,即

$$\tau_P = \sqrt{\tau_C^2 + \tau_L^2 + \tau_D^2 + \tau_{DP}^2} \quad (2)$$

式中 τ_C 为光电子在阴极和栅网之间的渡越时间弥散; τ_L 为光电子在磁透镜中的渡越时间弥散; τ_D 为光电子在偏转系统中的渡越时间弥散; τ_{DP} 为光电子在偏转系统等位区的渡越时间弥散.

光电子在电子光学系统中的渡越时间弥散主要是由阴极发射光电子的初能量和初角度分布引起的. 要减小 τ_P , 阴极应尽量薄, 面电阻要小, 且必须有良好的导电基底, 电子初能量弥散要小, 加速电场要强. 因此选用 35 nm 厚的 Ag 膜, 其表面逸出功 ($\phi = 4.26$ eV) 小于波长 266 nm 的紫外光所对应的光子能量 ($h\nu = 4.67$ eV), 满足光电子发射的条件, 且导电性能强. 在阴极和栅网之间加 50 kV 的电压, 场强为 10 kV/mm, 根据式

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{2\eta}} \frac{\sqrt{\Delta\epsilon}}{E} \quad (3)$$

式中 $\eta = e/m$ 为电子的荷质比, $\Delta\epsilon$ 为阴极发射电子的初能量弥散, E 为阴极和栅极之间的场强. 由于光电子初能量在 (0~0.6 eV) 满足 $\beta(1,4)$ 分布, 因此初能量弥散 $\Delta\epsilon$ 约在 0.2 eV 左右, 计算得到阴极和栅网之间由于光电子初能量引起的渡越时间弥散为 77 fs. 通过追踪 3000 个具有初角度分布的电子在电子光学系统中的运行轨迹, 得到其到达最佳像面处的电子束脉宽为 300 fs 左右 (如图 2), 即由初角度分布引起的渡越时间弥散为 300 fs 左右, 因此

综合计算得到电子枪的物理时间分辨率为 $\tau_P = \sqrt{77\text{fs}^2 + 300\text{fs}^2} = 310$ fs 左右^[9].

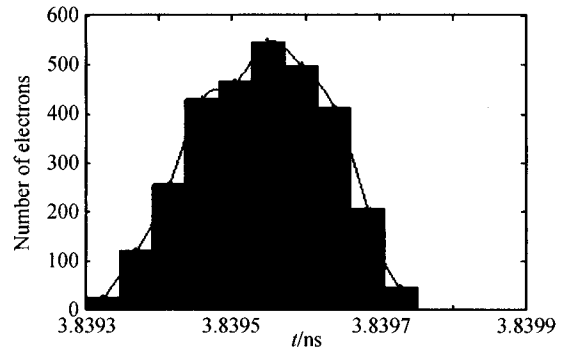


图 2 3000 个电子的时间分布

Fig. 2 Temporal distribution of the 3000 electrons

2.2 技术时间分辨率

技术时间分辨率定义为

$$\tau_T = (\nu\sigma)^{-1} \quad (4)$$

式中, ν 为扫描速度, σ 为扫描方向的静态空间分辨率.

$$\nu = KP \quad (5)$$

式中, K 表示加在偏转系统上的扫描电压随时间变化的斜率, 单位为 kV/ns, P 表示偏转系统的偏转灵敏度, 单位为 mm/kV.

可见, 要提高电子枪的技术时间分辨率, 必须提高扫描电压变化斜率和偏转系统的偏转灵敏度.

2.2.1 扫描速度

扫描是电子枪进行脉冲宽度测量的过程, 通过加在扫描板上的斜坡电压来实现. 由于扫描板上加有随时间线性变化的斜坡电压, 不同时刻进入扫描板的电子受到不同偏转电压的作用, 电子束到达荧光屏时, 将沿垂直于扫描板的方向展开, 这一方向对应于时间轴, 因此可以通过计算测量荧光屏上光斑的空间信息而反算得到电子束的时间信息.

2.2.2 扫描板的设计

扫描板是电子枪实现时间信息向空间信息线性转换、实现电子束脉宽测量的关键技术环节. 在实际应用中, 希望较小的电信号就能控制电子束使之产生足够的偏转. 此外, 电子轰击荧光屏后产生的光点在荧光屏上位移变化与信号变化应一一对应, 才能使波形保持正确的形状, 而且在偏转时光点尺寸不宜变得过大, 因此要求偏转系统应具有高的偏转灵敏度和良好的偏转线性和较小的板间电容.

设计了如图 3 的平折扫描板, 该扫描板较平行扫描板有更大的偏转灵敏度. 根据式 (6) 可计算出偏转灵敏度^[7]

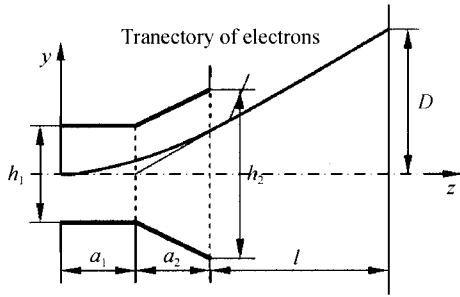


图3 平折扫描板

Fig. 3 Schematic diagram of sweep plates

$$P = \frac{D}{V} = \frac{a_2}{2V_a(h_2 - h_1)} \left[\left(\frac{a_2 h_2}{h_2 - h_1} + l \right) \ln \frac{h_2}{h_1} - a_2 \right] + \frac{a_1}{2V_a h_1} \left(\frac{a_1}{2} + a_2 + l \right) \quad (6)$$

式中 V_a 是阳极和阴极之间的电位差 (50 kV), l 为扫描板边缘到样品处即像面的距离, D 为偏转后的电子在像面上的全位移。

通过计算,确定了扫描板参量为 $a_1 = 27$ mm, $a_2 = 20$ mm, $h_1 = 3$ mm, $h_2 = 6$ mm, $l = 148$ mm, 计算得偏转灵敏度 $P = 26.3$ mm/kV。在确定偏转灵敏度之后,最小电容量依靠变化扫描板的宽度来获得,最终确定扫描板宽度为 8 mm,此时的电容为 0.22 pF。

2.2.3 斜坡电压的产生

整个电子枪设计、装配好之后,其物理时间分辨率和偏转灵敏度就确定了,能改变系统时间分辨率的唯一环节就是加在扫描板上的斜坡电压的斜率,斜率越大,扫描速度越快,技术时间分辨率越小,从而系统总的时间分辨率就越小。为了得到高的时间分辨率,所设计斜坡电压斜率高达 5.5 kV/ns。

采用如图 4 所示的串并联合的雪崩晶体管扫描电路和共面波导结构^[10],可使脉冲上升斜率到达 5.5 kV/ns。

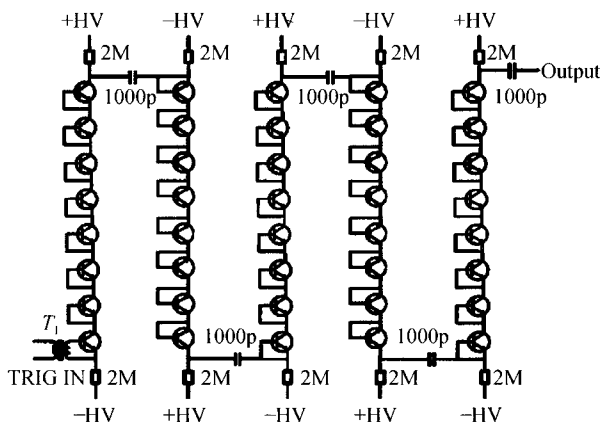


图4 扫描电路原理图

Fig. 4 High voltage pulse generator circuit

根据式(5)计算得扫描速度 $v = 1.45 \times 10^8$ m/s, 则技术时间分辨率 $\tau_T = (v\sigma)^{-1} = (1.45 \times 10^8 \text{ m/s} \times 18 \text{ lp/mm})^{-1} = 383$ fs。根据式(1),总的时间分辨率

为 $\tau = \sqrt{\tau_p^2 + \tau_T^2} = \sqrt{310 \text{ fs}^2 + 383 \text{ fs}^2} = 540$ fs。

3 结论

通过对电子枪物理时间分辨率和技术时间分辨率影响因素的分析,改进了电子光学系统的设计,提高了加速电压、采用了磁聚焦系统和平折扫描板、提高了扫描电压斜率,最终获得的总时间分辨率为 500 fs 左右。准备进一步改进扫描系统,采用行波偏转板和半导体光导开关扫描电路,从而提高扫描速度、提高时间分辨率,相关工作正在进行中,结果将另文报导。

致谢:对西安光机所光电子学室所有参与此项工作的老师、同学表示感谢,同时感谢西安光机所瞬态光子学研究室的田进寿老师和西安交通大学唐天同教授的指导!

参考文献

- 1 赵宝升,田进寿,吴建军,等. 飞秒电子衍射系统的设计研究报告. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所, 2005
- 2 Zhao B S, Tian J S, Wu J J, et al. Report of study on femtosecond electron diffraction system. Xi'an: Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, 2005
- 3 Zewail A H. Laser femtochemistry. *Science*, 1988, **242** (4886): 1645~1653
- 4 Mourou G, Williamson S. Picosecond electron diffraction. *Appl Phys Lett*, 1982, **41**(1): 44~45
- 5 Williamson S, Mourou G, Li J C M. Time-resolved laser-induced phase transformation in aluminum. *Phys Rev Lett*, 1984, **52**(26): 2364~2367
- 6 Siwick B J, Dwyer J R, Jordan R E, et al. An atomic-level of melting using femtosecond electron diffraction. *Science*, 2003, **302**: 1382~1385
- 7 Schelev M Ya, Brtukhnevich G I, Lozovoi V I, et al. 500 fs photoelectron gun for time-resolved electron diffraction experiments. *Opt Eng*, 1998, **37**(8): 2249~2254
- 8 Williamson J C, Cao J, Ihee H, et al. Clocking transient chemical changes by ultrafast electron diffraction. *Nature*, 1997, **386**(13): 159~162
- 9 Cao J, Ihee H, Zewail A H. Ultrafast electron diffraction and direct observation of transient structures in a chemical reaction. *Proc Natl Acad Sci*, 1999, **96**: 338~342
- 10 Wu J J, Zhao B S, Tian J S, et al. A Femtosecond Electron Diffraction System. *Acta Photonica Sinica* (to published)
- 11 Liu J Y, Shan B, Chang Z H. High voltage fast ramp pulse generation using avalanche transistor. *Rev Sci Instrum*, 1998, **69**(8): 3066~3067

Design of a Femtosecond Electron Diffraction System

Sheng Lizhi^{1,2}, Zhao Baosheng¹, Zhang Xiaoqiu¹

¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068

² Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2005-08-12

Abstract A new designed FED system was introduced in this article and the components of the system were illustrated. The factors that affected the temporal resolution of the system were analyzed in detail, such as the material and thickness of the photocathode, electric field near the cathode, focusing method, deflection sensitivity and sweeping speed. Finally, designed a FED system with 3.5 nm-thickness Ag film, 1.0 kV/mm electric field near the cathode. Magnetic focusing was used and the deflection sensitivity was 26.3 mm/kV, the sweeping speed could reach up to 1.45×10^8 m/s, so the total temporal resolution was reduced to about 500 fs.

Keywords Femtosecond electron diffraction; Magnetism focusing; Temporal resolution; Sweeping speed



Sheng Lizhi was born in 1980. He graduated from Xidian University in 2003. Now as a postgraduate he is studying in the photoelectronics Laboratory of Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Science.