

# 超快电子衍射系统的时间空间分辨能力 研究及其优化\*

梁文锡<sup>1)</sup> 朱鹏飞<sup>1)</sup> 王 瑄<sup>2)</sup> 聂守华<sup>2)</sup> 张忠超<sup>3)</sup> 曹建明<sup>2)†</sup> 盛政明<sup>1)3)</sup> 张 杰<sup>1)3)‡</sup>

1)(中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

2)(Physics Department and National High Magnetic Field Laboratory, Florida State University, Tallahassee 32310, USA)

3)(上海交通大学物理系, 上海 200240)

(2008 年 11 月 21 日收到; 2008 年 12 月 9 日收到修改稿)

超快电子衍射技术是研究物质瞬态结构变化及超快结构动力学的有效手段. 研制了国内第一套同时具有超快时间分辨及超高空间分辨能力的超快电子衍射系统, 并研究了在该超快电子衍射系统上实现超快时间分辨及超高空间分辨能力的技术手段及其优化方法. 实验结果表明: 经过优化后该系统可以具有优于 500 fs 的时间分辨能力, 其空间分辨能力达到 0.04% 的衍射峰位置变化, 对应的晶面变化为 0.0005 Å. 该系统可以为实时测量超快光脉冲激发的物质瞬态结构变化, 特别是为研究晶体材料的超快动力学行为提供了强有力的实验工具.

关键词: 超快电子衍射, 空间分辨, 时间分辨

PACC: 6110F, 6114H

## 1. 引 言

自 Mourou 等<sup>[1]</sup>于 1982 年首次从条纹相机中发展出超快电子衍射 (Ultrafast Electron Diffraction, UED) 技术并应用到金属 Al 的相变研究后<sup>[2]</sup>, UED 技术在物理和化学领域中的瞬态结构变化及超快动力学过程研究中取得越来越多的进展, 这些研究包括了材料表面晶格的温度变化过程<sup>[3]</sup>、金属融化的相变过程<sup>[4]</sup>、有机分子分解中的瞬态结构变化<sup>[5]</sup>、环烃分子的开环反应<sup>[6]</sup>以及羟化硅表面的瞬态电势变化<sup>[7]</sup>等. 最近两年曹建明等应用 UED 技术发展出在室温下测量电子 Grüneisen 常数的方法, 精确测量了金属 Al 及铁磁材料金属 Ni 的 Grüneisen 常数<sup>[8,9]</sup>, 而传统的方法测量该常数需要在低温条件下进行, 对某些磁性材料例如稀土元素, 用传统的测量方法甚至无法得到精确的结果<sup>[8]</sup>. 作为一种新兴的超快测量技术, UED 在物理和化学等领域特别是晶格材料的超快动力学研究方面展示出独特的优势.

UED 技术通过引入超快激光脉冲激发光阴极,

产生超快电子脉冲作为探针而获得超快时间分辨能力, 其时间及空间分辨能力随着超快激光技术和微电子信号探测技术的发展而逐步提高. 在刚刚发明时 UED 具有约 100 ps 的时间分辨和约 0.1 Å 的空间分辨<sup>[1]</sup>; 1997 年 Zewail 等在气相 UED 实验中实现了约 4 ps 的时间分辨能力<sup>[5]</sup>; 2001 年文献<sup>[6]</sup>报道的第三代 UED 装置的时间分辨和空间分辨能力分别达到了 1 ps 和 0.01 Å; 2003 年文献<sup>[4]</sup>在金属 Al 熔化相变研究中 UED 的时间分辨能力发展到 600 fs; 2005 年曹建明等进行了实时测量金属多晶薄膜相干振荡和晶格热运动的实验研究, 将 UED 的时间和空间分辨能力分别提高到优于 500 fs 和亚毫埃 (sub-milli-ångstrom)<sup>[10]</sup>. 多个研究组仍在探索改善 UED 时间分辨能力的方法, 例如 Zewail 等将探测电子脉冲的电子数降至单电子, 以便抑制空间电荷效应带来的时间分辨损失<sup>[11]</sup>; Wang 等则从射频电子枪出发, 研制具有兆电子伏探测脉冲能量的 UED 装置以获得更好的时间分辨<sup>[12]</sup>.

我们自 2000 年开始进行超快激光与物质相互作用产生超热电子的实验, 在实验中提出了自主的

\* 国家自然科学基金(批准号: 10728409, 10734130, 10735050, 60621063)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2007CB815102)资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: jcao@magnet.fsu.edu

‡ 通讯联系人, E-mail: jzhang@aphy.iphys.ac.cn

UED 技术方案<sup>[13]</sup>, 于 2006 年设计制造出国内第一台光阴极电子枪的 UED 原型系统, 并得到了 Au 薄膜样品的静态衍射图样<sup>[14, 15]</sup>. 近两年来, 我们通过 Florida 州立大学的合作, 研制成功国内第一台具有亚皮秒时间分辨能力和亚毫埃空间分辨能力的 UED 系统<sup>[16]</sup>. 本文分析了影响 UED 系统时空分辨能力的各项因素以及在系统研制、实验过程和数据处理中采用的优化方法, 计算了 UED 系统所能达到的时间空间分辨能力. 最后, 对金属 Al 薄膜样品的超快动力学测量结果表明, 所研制的 UED 系统的时间空间分辨能力达到了设计要求, 具备原子运动时空尺度的探测能力, 为开展精细测量超快动力学的研究提供了强有力的实验工具.

## 2. UED 系统的构成

### 2.1. 系统组成

我们研制的 UED 系统由飞秒激光器、飞秒电子枪、超高真空靶室和探测器组成<sup>[16]</sup>. 钛蓝宝石 (Ti: sapphire) 飞秒激光器提供的 1 kHz, 中心波长为

800 nm 的入射光被分作两路, 一路作为激发超快动力学过程的抽运光, 另一路作为产生电子脉冲的探针光. 抽运光经过一个可调光学延时平台在  $t_0$  时间到达样品表面, 探针光经三倍频仪转换为 266 nm 的波长, 进入飞秒电子枪产生光电子脉冲, 再经过电子光路的加速、聚焦和偏转, 在时间  $t_1$  到达样品上产生衍射图样. 通过调节延时光路在  $t_0$  与  $t_1$  之间产生不同的时间差  $\Delta t$ , 在不同的  $\Delta t$  对样品的结构进行衍射成像, 样品的超快动力学行为的整个过程就被记录下来.

探测器由荧光屏、像增强器和电荷耦合器件 (CCD) 相机三部分组成. 探测电子的荧光屏安装在超高真空靶室内, 将被样品散射的高能电子转换成光信号, 通过光纤耦合输出到靶室外的荧光屏. 输出的荧光信号再耦合到具有 V 形叠堆微通道板 (MCP) 结构的像增强器中放大, 从而令探测器具备探测单电子的能力. 经过放大的电子信号输出到像增强器终端的荧光屏, 以光信号的形式被 CCD 相机成像并记录下来.

### 2.2. 飞秒电子枪的结构

我们研制的飞秒电子枪结构如图 1 所示.

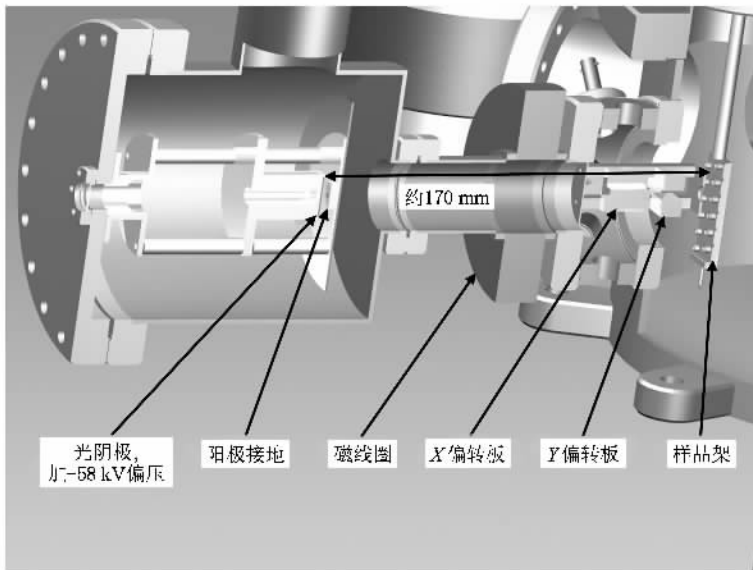


图 1 飞秒电子枪的结构. 紧凑化的设计有利于缩短电子脉冲的自由漂移时间, 抑制空间电荷效应导致系统的时间分辨下降.

266 nm 的探针光经过蓝宝石玻璃窗口, 入射到镀有 40 nm 厚 Ag 薄膜的光阴极上产生光电子. 光阴极被加上 -58 kV 的偏压, 光电子脉冲在 5 mm 的距离内被 11.6 MV/m 的电场加速到达阳极 (对应的电子波长为 0.0495 Å). 最后电子脉冲由一个直径

100  $\mu\text{m}$  的针孔整形, 进入自由漂移阶段. 被加速的电子脉冲经磁透镜聚焦进入偏转区域, 两对偏转板可以分别调节电子脉冲的 X 和 Y 方向位置, 使电子斑到达探测器的中心点. 偏转板主要用于消除外界磁场特别是地磁对电子脉冲飞行轨迹的影响, 其中 Y

方向的偏转板可以加入扫描电压, 以便对电子脉冲的时间宽度进行测量.

### 3. UED 系统的时间分辨和空间分辨能力的研究和优化

#### 3.1. 影响 UED 系统时间分辨能力的因素及其优化

要对超快动力学过程进行研究, 探针的时间宽度需要达到不大于被研究过程的时间尺度, 因此时间分辨能力是 UED 系统最重要的性能指标. UED 采用抽运-探测的实验布局, 其综合时间分辨能力  $t_{\text{total}}$  由抽运光的时间宽度  $t_{\text{pump}}$ 、电子脉冲探针的时间宽度  $t_{\text{probe}}$  以及两者之间的失配时间  $t_{\text{mis}}$  卷积而成, 如下式<sup>[17]</sup>:

$$t_{\text{total}} = (t_{\text{pump}}^2 + t_{\text{probe}}^2 + t_{\text{mis}}^2)^{1/2}. \quad (1)$$

飞秒激光器提供  $t_{\text{pump}}$  的脉冲宽度为 50—80 fs, 在亚皮秒的时间尺度里对综合时间分辨的影响很微弱. UED 的时间分辨能力主要由  $t_{\text{probe}}$  和  $t_{\text{mis}}$  决定.

电子脉冲宽度  $t_{\text{probe}}$  的展宽主要由以下两种效应造成: 电子脉冲在自由漂移时库仑力带来的空间电荷效应, 以及其他因素导致脉冲展宽的非空间电荷效应. 电子从光阴极中被激发产生时, 因为光脉冲的能谱宽度使得产生的电子存在能量展宽, 另外电子脱离光阴极表面时亦有不同的出射角. 不同能量和发散方向的电子在各自的飞行轨迹中所需的时间不同, 从而给电子脉冲带来非空间电荷效应的时间展宽<sup>[18]</sup>. 从光阴极表面激发出来的电子初动能很低, 这时空间电荷效应的展宽非常显著. 我们选择 Ag 作为阴极, 令电子脉冲的初始能量展宽只有约 0.6 eV<sup>[19]</sup>. 通过在光阴极与阳极栅网之间加上强电场对电子脉冲进行加速, 11.6 MV/m 的场强可以将这阶段的展宽压缩在 200 fs 左右<sup>[20]</sup>. 栅网后的 100  $\mu\text{m}$  针孔对电子脉冲加以整形, 滤去大发散角的出射电子, 可以减小发散角带来的时间展宽.

电子脉冲从阳极针孔出来后进入自由漂移的阶段, 此时电子脉冲展宽的主要因素是电荷之间库仑斥力产生的空间电荷效应. 为此我们的电子枪采用紧凑化设计, 尽量抑制空间电荷效应的作用时间. 飞秒电子枪从光阴极到样品的距离只有约 170 mm, 如图 1 所示. 平均场理论的计算表明, 电子脉冲在自由漂移区域的展宽可以由下式描述<sup>[21, 22]</sup>:

$$\frac{d^2 l}{dt^2} = \frac{1}{\kappa} \frac{Ne^2}{m\epsilon_0\pi r^2} \left(1 - \frac{l}{\sqrt{l^2 + 4r^2}}\right), \quad (2)$$

式中  $l$  为电子脉冲沿传播方向的长度,  $\kappa$  为与电子脉冲形状相关的形状因子,  $e$  和  $m$  分别是电子的电荷与质量,  $\epsilon_0$  为真空中的介电常数,  $N$  为电子脉冲中包含的电子数,  $r$  为电子脉冲的束斑大小. 由 (2) 式可知, 电子数  $N$  将非常重要地影响电子脉冲的展宽. 实验测量电子脉冲展宽的结果与平均场理论的计算十分符合, 根据我们当前 UED 的电子光学设计, 包含 1000 个电子的电子脉冲在离开偏转板时的时间宽度约为 400 fs<sup>[23]</sup>.

降低 UED 系统时间分辨的另一个因素是失配时间  $t_{\text{mis}}$ , 由抽运光与电子脉冲之间的几何关系以及速度差造成<sup>[24]</sup>. 电子脉冲被 58 kV 的电压加速后其速度不到光速的 1/2, 即使电子脉冲与抽运光同轴传播, 在样品前后两个表面分别产生的衍射图样, 所记录的动力学状态处于不同的时间点, 其时间差取决于样品的厚度. 在实验中抽运光与电子脉冲有一定的夹角更令失配时间增大. 我们的 UED 实验中采用薄样品(厚度小于 30 nm)可以抑制样品厚度的影响, 失配时间可以简化描述如图 2 所示.

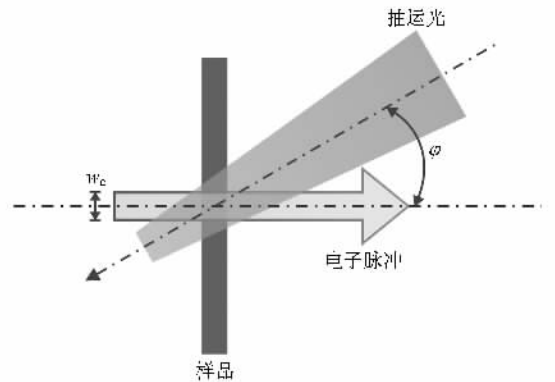


图 2 抽运光与探测电子之间的夹角和速度差造成的失配时间. 薄样品的实验设计可以消除样品厚度带来的失配时间

图 2 中  $w_e$  为电子脉冲的束斑大小. 失配时间  $t_{\text{mis}}$  可由下式计算<sup>[25]</sup>:

$$t_{\text{mis}} = \frac{w_e \sin \varphi}{c}, \quad (3)$$

式中  $c$  为光速. 由 (3) 式可知, 通过减小电子脉冲的束斑  $w_e$  以及电子束与抽运光的夹角  $\varphi$  都可以抑制  $t_{\text{mis}}$ . 在我们的 UED 设计中, 经过针孔约束的电子脉冲到达样品时  $w_e$  小于 400  $\mu\text{m}$ . 夹角  $\varphi$  的设计小于 10°, 由此得到的  $t_{\text{mis}}$  小于 230 fs. 对于样品体积带来

显著失配时间的实验配置,可以通过整形抽运光的办法进行抑制<sup>[26]</sup>.

通过上述分析可以确定,UED 系统时间分辨能力主要由电子脉冲中包含的电子数  $N$  决定.当选择  $N$  小于 1000 时,系统可以获得优于 500 fs 的时间分辨能力.从以下的实验结果可以看到 UED 系统在实际的实验测量中已经具有亚皮秒的时间分辨能力.

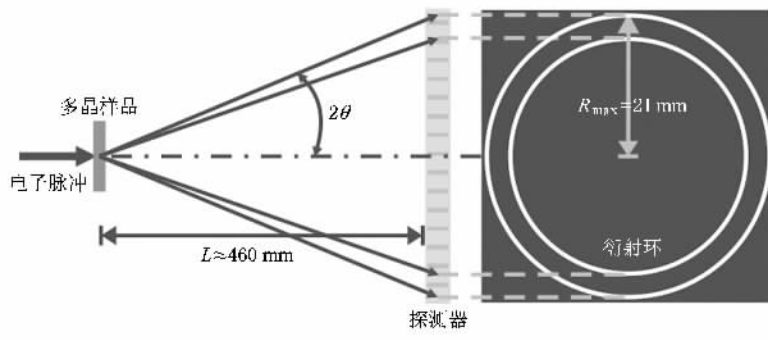


图 3 多晶衍射 Bragg 方程中变量的几何关系

探测电子脉冲照射在多晶薄膜样品上,在  $2\theta$  方向发生衍射,形成以  $4\theta$  为顶角的圆锥面,与探测器相截而得到呈圆环分布的衍射图样.对 Bragg 方程取微分可得

$$\frac{\Delta d}{d} = -\cot\theta\Delta\theta, \quad (4)$$

式中  $d$  为晶面间距.由(4)式可知, $\theta$  取最大值时  $\Delta d$  有最小值,即在  $R$  取最大值时系统能探测最小的晶面间距变化  $\Delta d$ ,因此实验中需要尽量让衍射图样

### 3.2. 影响 UED 系统空间分辨能力的因素及其优化

UED 系统成像时得到晶体倒易空间的信息,因此系统的空间分辨能力由倒易空间的衍射图样变化对应的正空间晶格变化来反映.UED 实验中采用的样品为多晶薄膜,衍射行为服从 Bragg 方程,其变量的几何关系如图 3 所示.

布满探测器的成像范围.影响 UED 系统空间分辨能力的主要因素是衍射图样的成像质量和信噪比.为了使样品对准探测电子脉冲并与电子脉冲传播方向垂直,样品架通过具有 5 个调节维度的伺服机构进行姿态调节,以便采集到图案对称且强度均匀的衍射图样.如图 4 所示,样品可以通过三维平移台调整空间位置对准电子脉冲,通过旋转装置调整水平方向的方位角和端口调节器调整俯仰姿态的极角,从而保证样品的表面法线与电子脉冲传播方向平行.

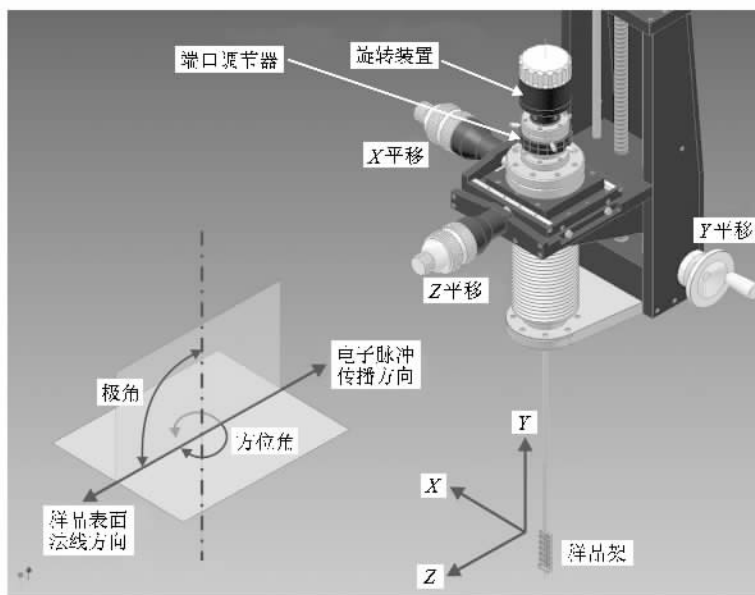


图 4 五维调节伺服机构提供样品架的位置和姿态调节,保证探测电子脉冲正入射到样品处

通过样品架的调节伺服机构,还可以在实验中调节样品与电子枪的距离,以便尽量缩短电子脉冲到达样品的飞行时间。

要克服探测器在放大电子信号时对单个电子响应的空间展宽并定量地分析探测器所记录的衍射图样,就需要对衍射图样的强度分布进行数学处理.为此抽取衍射图样的强度分布并进行曲线拟合<sup>[27]</sup>.通过选择合适的函数拟合得到的衍射强度曲线,其位置变化的灵敏度超过了探测器一个像素的分辨限制,可以测量小于 0.1 像素的空间位置变化,因此大幅提高了 UED 系统的空间分辨能力.对超快激光脉冲激发多晶 Al 薄膜样品产生相干振荡的测量结果表明,经过拟合分析处理后的 UED 系统可以提供探测 0.04% 衍射峰位置变化的分辨能力,对应的晶面变化为 0.0005 Å.

#### 4. 实验结果和讨论

利用 UED 系统,我们测量了多晶铝薄膜样品在超快激光脉冲激发下产生的晶格热运动和相干振荡<sup>[16,27]</sup>.铝薄膜厚度为 $(20 \pm 3)$ nm,悬空在 TEM 网络上.

抽运激光穿过样品时加热金属 Al 中的电子,电子将能量传递给晶格引起晶格温度上升,导致衍射环的强度发生衰减.通过测量关联的衍射峰强度变化,可以推算样品中晶格温度上升过程,如图 5 所示<sup>[16,27]</sup>.对测量所得的(311)峰衍射强度变化进行归一化处理,拟合得到温度上升曲线,从曲线的上升沿可以拟合出晶格被加热时对应的电子-声子耦合常数.实验使用的探测电子脉冲每个包含约 1900 个电子,可以推算此时系统的时间分辨约为 800 fs<sup>[23]</sup>.将此值代入曲线拟合的结果进行去卷积,得到 Al 的电子-声子耦合常数与已有测量结果符合较好<sup>[16,27]</sup>.晶格热运动测量的实验结果表明,UED 系统已具有亚皮秒的时间分辨能力.需要指出的是,当前参数并未对应系统的最佳时间分辨能力.通过调节电子数  $N$  小于 1000,可以让系统得到优于 500 fs 的时间分辨<sup>[23]</sup>,但相应地必须增加信号采集的积分时间以便提高图样的信噪比.

当 Al 薄膜受到超快激光脉冲照射时,Al 膜吸收光子能量而产生形变,在薄膜内部沿薄膜表面法线方向产生一维驻波,形成各晶面同步的“呼吸”运动,如图 6 所示.

对(311)峰位置随时间变化的测量结果进行曲

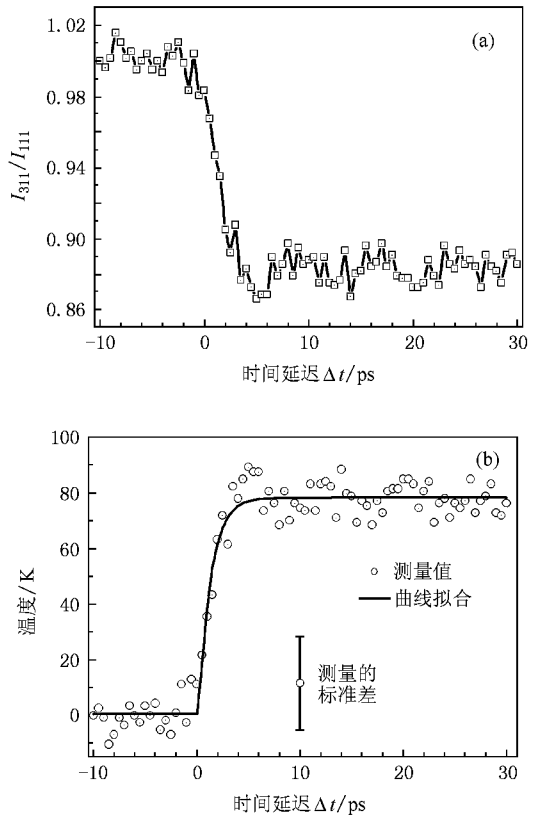


图 5 Al 的(311)峰衍射强度随时间的衰减以及对应的晶格温度上升过程 (a)衍射强度随时间的衰减,(b)晶格温度的上升过程.数据经过归一化处理

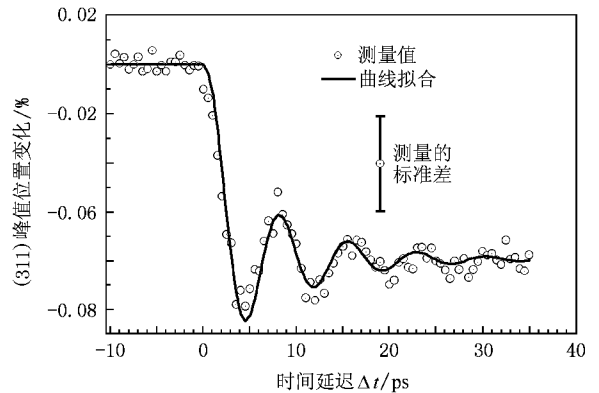


图 6 多晶 Al 薄膜受超快激光脉冲照射产生的(311)峰相干振荡.时间延迟为正值表示探测电子脉冲在抽运激光脉冲之后到达样品.数据经过归一化处理

线拟合,得到的振荡周期约为 $(7.4 \pm 1.1)$  ps,与根据 Al 的声速和样品厚度所得的计算值符合较好<sup>[16,27]</sup>.由图 6 可见,考虑了测量误差,UED 仍可以灵敏地探测衍射峰值位置 0.04% 的变化.Al(311)峰对应的晶面间距约为 1.2 Å,可知此时 UED 系统的空间分辨

能力达到  $0.0005 \text{ \AA}$ .

## 5. 结 论

我们设计制造了一台具有亚皮秒时间分辨及亚毫埃空间分辨能力的 UED 系统. 通过对影响 UED 系统时空分辨能力的各个因素进行研究, 并针对这些因素在设计制作、实验方法以及数据处理中进行优化, 我们的 UED 系统最优的时间分辨可以达到  $500 \text{ fs}$ , 空间分辨可以达到  $0.0005 \text{ \AA}$ . 应用这套 UED

系统, 测量了金属 Al 薄膜样品在超快激光激发下的晶格热运动和相干振荡, 从实验结果的分析可以得知系统达到了亚皮秒的时间分辨以及亚毫埃的空间分辨. 该 UED 系统具备原子运动尺度的时间空间分辨能力, 为研究光激发超快结构动力学, 例如瞬态相变、表面化学反应等现象, 特别是为研究晶体材料的超快动力学行为提供了强有力的实验工具.

感谢凌行工程师对制备 Al 薄膜样品的帮助.

- [1] Mourou G, Williamson S 1982 *Appl. Phys. Lett.* **41** 44
- [2] Williamson S, Mourou G, Li J C M 1984 *Phys. Rev. Lett.* **52** 2364
- [3] Elsayed-Ali H E, Herman J W 1990 *Appl. Phys. Lett.* **57** 1508
- [4] Siwick B J, Dwyer J R, Jordan R E, Miller R J D 2003 *Science* **302** 1382
- [5] Williamson J C, Cao J M, Ihee H, Frey H, Zewail A H 1997 *Nature* **386** 159
- [6] Ihee H, Lobastov V A, Gomez U M, Goodson B M, Srinivasan R, Ruan C Y, Zewail A H 2001 *Science* **291** 458
- [7] Murdick R A, Raman R K, Murooka Y, Ruan C Y 2008 *Phys. Rev. B* **77** 245329
- [8] Nie S H, Wang X, Park H, Clinite R, Cao J M 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 025901
- [9] Wang X, Nie S H, Li J J, Clinite R, Wartenbe M, Martin M, Liang W X, Cao J M 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 121918
- [10] Park H, Wang X, Nie S, Clinite R, Cao J M 2005 *Solid State Commun.* **136** 559
- [11] Lobastov V A, Srinivasan R, Zewail A H 2005 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **102** 7069
- [12] Wang X J, Xiang D, Kim T K, Ihee H 2006 *J. Korean Phys. Soc.* **48** 390
- [13] Zhang J, Zhang J, Chen Q, Peng L M, Cang Y, Wang H B, Zhong J Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1764 (in Chinese) [张 军、张杰、陈 清、彭练矛、苍 宇、王怀斌、仲佳勇 2002 物理学报 **51** 1764]
- [14] Liu Y Q, Zhang J, Liang W X 2005 *Chin. Phys. Lett.* **14** 1671
- [15] Liu Y Q, Liang W X, Zhang J, Wu J J, Tian J S, Wang J F, Zhao B S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6500 (in Chinese) [刘运全、梁文锡、张 杰、吴建军、田进寿、王俊峰、赵宝升 2006 物理学报 **55** 6500]
- [16] Liang W X, Zhu P F, Wang X, Nie S H, Zhang Z C, Cao J M, Sheng Z M, Zhang J 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 020701
- [17] Cao J, Hao Z, Park H, Tao C, Kau D, Blaszczyk L 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 1044
- [18] Niu H, Sibbett W 1981 *Rev. Sci. Instrum.* **52** 1830
- [19] Srinivasan R, Lobastov, Ruan C Y, Zewail A H 2003 *Helvetica Chimica Acta* **86** 1763
- [20] Murnane M M, Kapteyn H C, Falcone R W 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 1948
- [21] Siwick B J, Dwyer J R, Jordan R E, Miller R J D 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 1643
- [22] Reed B W 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 034916
- [23] Wang X, Nie S H, Park H, Li J J, Clinite R, Li R K, Wang X J, Cao J M 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **80** 013902
- [24] Williamson J C, Zewail A H 1993 *Chem. Phys. Lett.* **209** 10
- [25] Nie S H, Wang X, Li J J, Clinite R, Cao J M 2008 *Microsc. Res. Tech.* **72** 131
- [26] Baum P, Zewail A H 2006 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **103** 16105
- [27] Liang W X, Zhu P F, Wang X, Nie S H, Zhang Z C, Cao J M, Sheng Z M, Zhang J 2008 *Acta Phys. Sin.* **58** 5546 (in Chinese) [梁文锡、朱鹏飞、王瑄、聂守华、张忠超、曹建明、盛政明、张 杰 2008 物理学报 **58** 5546]

# Development and optimization on spatiotemporal resolution of ultrafast electron diffraction \*

Liang Wen-Xi<sup>1)</sup> Zhu Peng-Fei<sup>1)</sup> Wang Xuan<sup>2)</sup> Nie Shou-Hua<sup>2)</sup> Zhang Zhong-Chao<sup>3)</sup>  
Cao Jian-Ming<sup>2)†</sup> Sheng Zheng-Ming<sup>1)3)</sup> Zhang Jie<sup>1)3)‡</sup>

1) (*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*Physics Department and National High Magnetic Field Laboratory, Florida State University, Tallahassee 32310, USA*)

3) (*Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China*)

(Received 21 November 2008; revised manuscript received 9 December 2008)

## Abstract

Ultrafast electron diffraction is a powerful technique for the measurement of transient structure at atomistic level and on ultrafast timescale. Here we report the development of the first such an ultrafast electron diffraction system in China. With careful design and after performing optimization of its spatiotemporal resolution, we are able to detect a sub-milli-ångstrom lattice spacing change with a sub-picosecond temporal resolution in an ultrafast heated Al film. This achievement offers great promise to conduct real-time measurements of transient structures in many dynamical processes that can be initiated by ultrafast optical excitation.

**Keywords:** ultrafast electron diffraction, spatial resolution, temporal resolution

**PACC:** 6110F, 6114H

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10728409, 10734130, 10735050, 60621063) and the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2007CB815102).

† Corresponding author. E-mail: jcao@magnet.fsu.edu

‡ Corresponding author. E-mail: jzhang@aphy.iphy.ac.cn