

对于超短脉冲来说更容易发生空间畸变和较差的聚焦性,可能导致光束的焦面半径 w_0 增大。在近场对二次谐波频率分辨光学开关法产生的信号进行适当的孔径过滤作用可以减少结构模糊现象。用适当的孔径,选择信号的中央部分减少几何模糊效应,但是同时也减少了信号的强度。用孔径进行选择时应避免与延迟有关的光谱成像。

(2) 模式尺寸对测量的影响

如果超短脉冲光束来自于线性光学腔并且是完美的高斯形状,那么与频率有关的模式大小与波长平方根成正比[157]。在这种情况下,可以在式(4-15)和(4-17)中加入一个 ω 因子表示频率决定的模式大小。克尔棱镜锁模的Ti:sapphire激光器的模式大小是由克尔非线性和腔内色散的相互作用共同决定的。因此,模式大小对脉冲的形状有很强的依赖性,而且这种依赖性只是克尔棱镜锁模激光器的特殊性质。

对于频率模式大小的很强依赖效应表明频率的边缘与基谱的自卷积偏差太大。一般情况下,由于输入光中的所有模式在非线性晶体中是以卷积的方式进行作用,与频率有关的模式大小在频率分辨光学开关的数据中很难校正。然而,对于某些常见情况而言,这种校正是可以进行的。

目前,超短脉冲的振幅和位相测量技术都是以空间积分的方式进行的。然而,光谱极宽的超短脉冲却表现出了极强的频率模式尺寸效应。频率模式尺寸效应导致了光束的光谱内容发生横向变化,使脉冲的时间轮廓与横向有关。另外,在所有的脉冲测量技术中都使用了非线性光学过程,而与频率有关的变化在非线性光学过程会得到进一步加强,必然引入误差,尤其是对于放大的超宽脉冲或小于10fs的脉冲。

在脉冲展宽、放大和频域整形中,飞秒激光脉冲很容易发生空间畸变。通常,当脉冲的光谱极宽时,空间畸变就更为严重。除了装置的影响外,超宽脉冲的光谱衍射导致空间结构的变化,从而产生与频率有关的模式尺寸效应。对高斯光束而言,光斑半径 w 与传播距离的关系为:

$$w(z) = \sqrt{\frac{\lambda z_c}{\pi}} \left[1 + \left(\frac{z}{z_c} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4-22)$$

λ 为波长, z_c 为共焦参量,对于来自线性谐振腔中的光束而言,共焦参量 z_c 为恒量。因此,对于离焦点一定距离处的模式面积区域与波长成正比。对于5fs的脉冲,这种效应导致模式面积区域的光谱变化超过50%。

有文献报道了克尔棱镜锁模激光的复杂模式尺寸效应[158]。在激光的增益介质中,由于克尔棱镜效应与时间有关,因此可以把脉冲的时间强度形状转变为伴随的空间结构,反过来也是如此。所以,在这种激光中,模式尺寸与脉冲的形状有关,在图4.9中给出了由克尔棱镜锁模激光器产生的小于10fs的脉冲的由频率决定的模式尺寸效应,模式区域是用光束轮廓仪测量的并使用了10nm的干涉滤

波器。光谱能量密度和模式区域面积随波长的变化反映出在腔内使用的双啁啾镜的色散振荡,对腔内的色散进行调整可以改变脉冲在克尔介质中的时间轮廓,引起模式尺寸的明显变化。

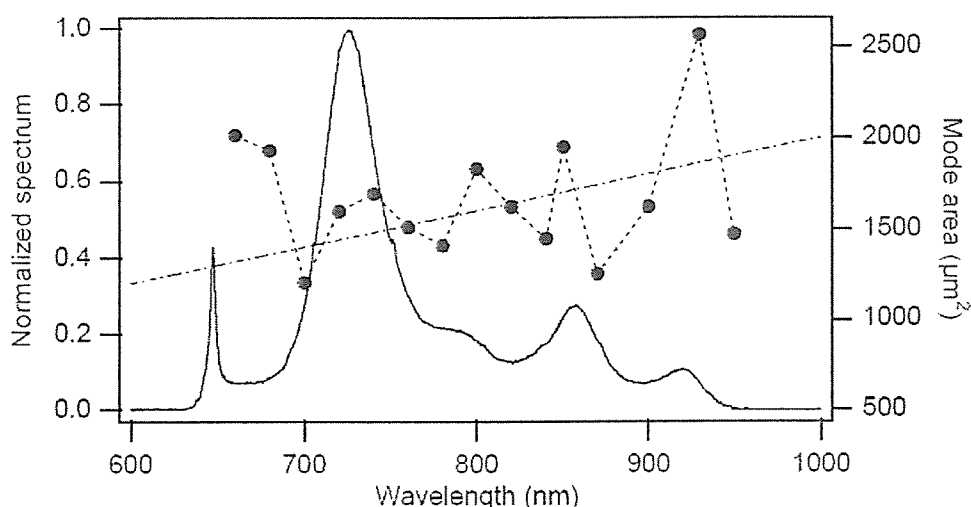


图 4.9 小于 10fs 的克尔棱镜锁模 Ti:sapphire 激光脉冲的模式区域与波长的关系。实线为能量密度随光谱的变化;虚线为模式区域随光谱的变化

用二次谐波频率分辨光学开关进行自相关或互相关测量时,脉冲的每一频率分量与开关脉冲的每一频率分量混合进行类似于卷积的运算(图4.10a)。理想情况是所有频率分量以相同的效率进行混合;然而由于模式尺寸效应,即使是在完美的位相匹配情况下,使得转化效率与频率有关。例如,即使在光谱准单色分量这种情况下,模式尺寸的大小增加41%时,二次谐波信号就可以减少2倍(图4.10b)。这种效率的变化可能导致错误的测量结果。理论上,在进行脉冲再现算法时任何给定模式尺寸都应考虑在内,并且模式结构变得越复杂运算也就越困难。

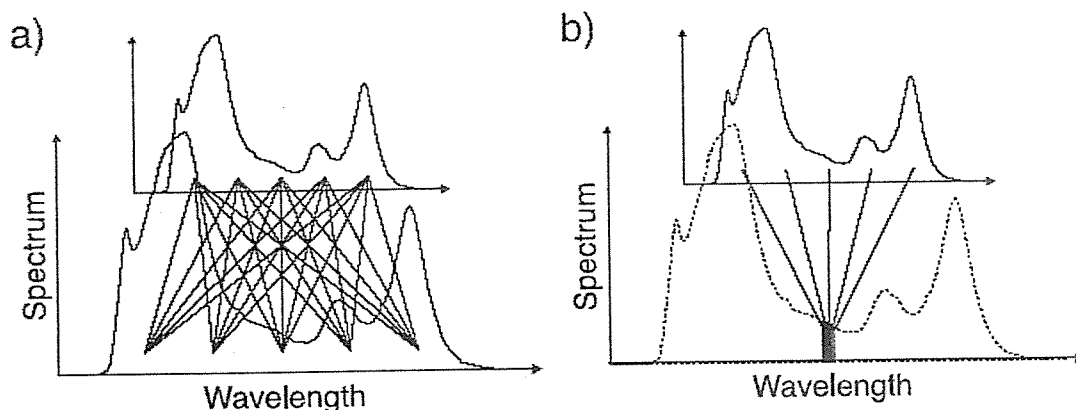


图 4.10 光谱混合过程示意图 (a)超宽脉冲的二次谐波混合, (b)一个超宽脉冲与一个准单色的光谱片混合产生和频。在二次谐波过程中, 许多空间模式不同的输入波长对于确定波长信号的产生都有贡献, 而在和频过程中, 信号的每一单独光谱分量只由单一的混合过程产生

4.2.5 频率分辨光学开关法的相关讨论

当用频率分辨光学开关装置测量小于 10fs 的脉冲时所面对的一个问题是: 时间如此短的脉冲的光谱是如此的宽。对光谱灵敏性的过度依赖可能会减少探测系统的探测范围并导致光谱边缘的噪音增加, 为了防止这样的光谱畸变和数据中其它系统误差, 算法中提供了算法边界。文献[159]提出了一种可以明显增加测量中使用的非线性晶体有效带宽。与数据中的噪音密切相关的问题是位相再现算法的收敛性, 对于复杂的描述图来说过多的噪音可能使最佳算法在并没有得到最小值的时候就停止了, 而且使运算速度变慢。到目前为止, 用非共线的二次谐波频率分辨光学开关技术测量的最短脉冲为 4.5fs [160]。如果测量的脉冲宽度小于这一数值, 必须对位相再现算法中结构模糊现象进行直接校正。频率分辨光学开关法的优点有以下几个方面:

- 1). 可以对结果进行过滤, 减小噪音的影响;
- 2). 在计算的过程中可以去掉某些误差较大的点;
- 3). 能够确定和去掉独立于光源之外的系统误差;
- 4). FROG 图中的噪音使得测量的结果不准确, 可以采用去掉背景、边角压缩、低通滤波等方法去掉噪音的影响;
- 5). 能够给出脉冲的强度、位相、时间和频率;
- 6). 装置简单, 尤其是单发的二次谐波频率分辨光学开关装置;
- 7). 简单和复杂的脉冲都可以测量, 从几个飞秒到皮秒, 从中红外到远紫外;
- 8). 可以进行单发和多发的测量, 灵敏到可以测量从皮焦到微焦的脉冲;

- 9). 算法的边界条件可以对测量进行检测,并在检测出系统误差之后对误差进行矫正。

频率分辨光学开关法是建立在简化的脉冲模型基础上,即把脉冲的时间特性和空间特性分离开,只对脉冲的时间特性进行测量,不考虑其空间特性。在实际中脉冲的空间特性和时间特性是相互依赖的,即使在自由空间传播的飞秒脉冲它的时间和空间特性之间也发生着相互的耦合作用;另外,由于飞秒脉冲的宽光谱特性,当它通过光学元件时不可避免地发生角色散现象,从而导致脉冲时空畸变现象的发生,而空间啁啾和脉冲波前倾斜是最常见的时空畸变现象。

超短激光脉冲是电磁场辐射的瞬时脉冲群,是受限于有限范围的时间和空间区域,它的电场通常可以用空间和时间的函数 $E(x, t)$ 描述,在测量超短脉冲的理论和实验中,电场的空间特性和时间特性被看成是相互独立的,横向空间特性是均匀变化的时间脉冲分布,电场的横向空间特性是被忽略的。实际上,大部分的超短脉冲测量技术都无法解决脉冲的横向空间特性。

4.3 飞秒激光脉冲的实验测量

实验室所用激光系统为美国相干公司 (Coherent, Inc.) 生产的 76MHz 钛宝石 (Ti:sapphire) 飞秒激光器,它由中心波长在 532nm 的半导体激光器 (Verdi-V6) 进行泵浦,其结构如图 4.11 所示,由光谱仪 (InSpectrum, Acton) 测得其典型的光谱曲线如图 4.12 所示,这里可以看出其输出飞秒激光的中心波长在 800nm。

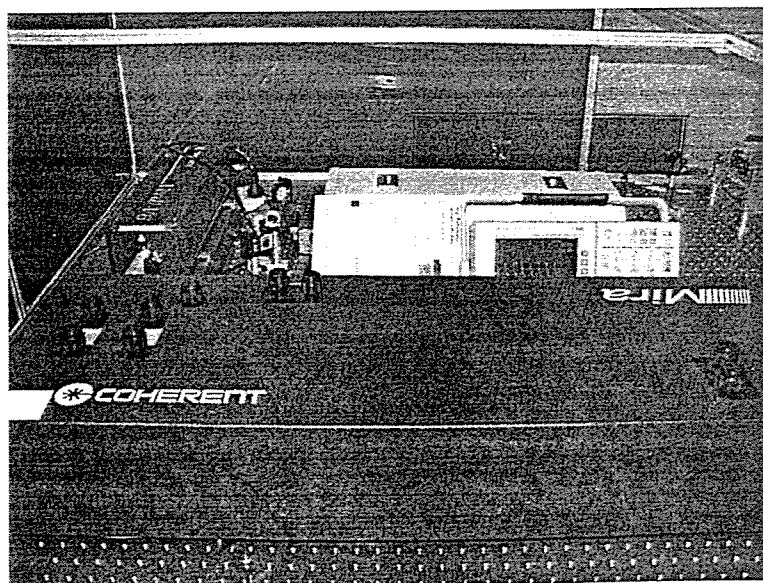


图 4.11 实验室飞秒激光系统

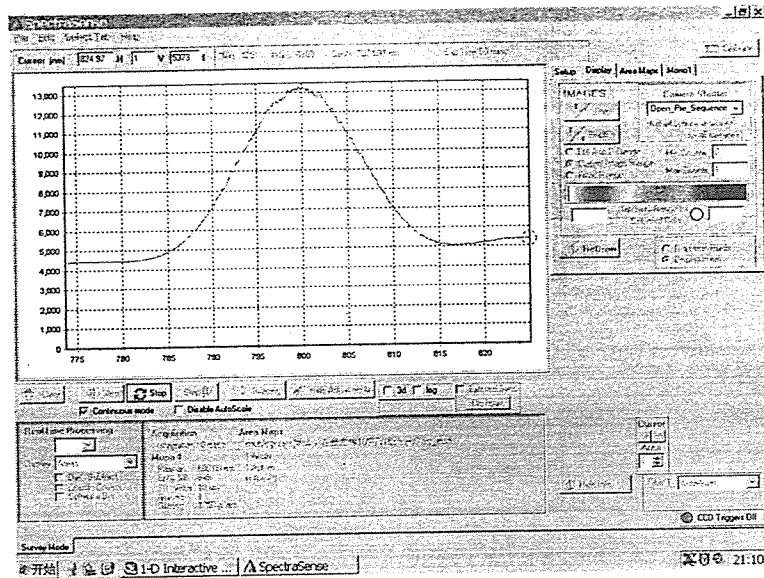
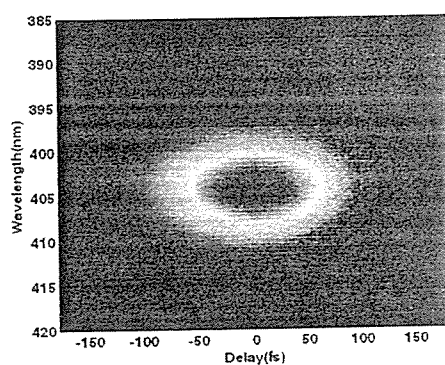
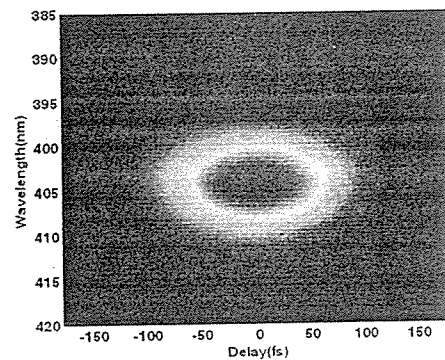


图 4.12 飞秒激光器典型的输出光谱曲线

利用课题组自行搭建的基于 Dammann 光栅的 FROG 飞秒测量装置[161], 对上述飞秒激光器的输出脉冲进行测量, 所得到的 FROG 图谱以及脉冲的时域和频域信息分别如图 4.13 所示。其中, 脉冲电场的时域半高全宽(FWHM)为 99.7fs, 脉冲电场的谱域 FWHM 为 25.4nm, 此次脉冲测量的最小 FROG 误差约为 3%。



(a)



(b)

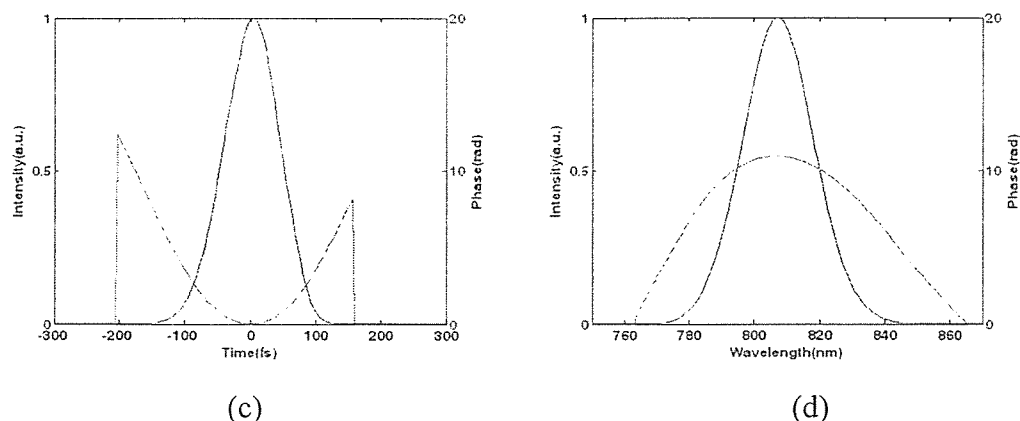


图 4.13 达曼 FROG 飞秒测量装置所测得的脉冲信息 (a) 测量得到的 trace 图谱 (b) FROG 算法重构得到的 trace 图谱 (c) 脉冲电场的时域信息 (d) 脉冲电场的频域信息

4.4 总结

本章主要介绍了飞秒激光脉冲参数测量的方法和基本原理,其中包括强度自相关法和频率分辨光学开关法(FROG)。

强度自相关法是飞秒超短脉冲测量方法中发展较早、比较成熟的方法。这种方法是将待测脉冲分成两束,并使它们之间有时间 τ 的延迟。然后将两束脉冲光以一定角度聚焦到非线性晶体上,产生频率上转换的信号光,测量信号光强度 I 随时间 τ 的变化关系即可得到自相关曲线。再通过相关算法求解出脉冲复振幅。

频率分辨光学开关测量法是二十世纪九十年代在自相关测量法的基础上发展出的一种测量超短激光脉冲的有效方法。区别于自相关法在时域上的一维测量,频率分辨光学开关测量法是在时域和频域上的二维测量。

本章最后还给出了利用实验室自行搭建的基于 Damann 光栅的 FROG 测量装置,对所用飞秒激光脉冲的相关测量结果。

5 飞秒激光微加工的研究

近年来,由于飞秒激光技术的发展,稳定可靠的飞秒激光系统已经被广泛应用于微加工研究中[162-164]。与通常的加工方法相比,利用超短脉冲进行微加工,具有许多独特的优点:①超高的精确度;②极小的间接热损害;③移除效率高;④可实现直接刻划,工序简单;⑤能够加工各种材料。正因为具备上述特点,超短脉冲在微加工领域显示出了极大的潜力,并成为研究的热点。本章内容主要研究利用飞秒激光脉冲对微电子和微光学工艺中常用的金属铬掩模版(Chromium Mask)进行微加工过程中的相关特性。

5.1 飞秒激光微加工的研究

目前,多数利用飞秒激光脉冲进行微加工的激光系统重复频率都在千赫兹左右,即采用经过啁啾脉冲放大器(Chirped-pulse Amplifier, CPA)放大后的飞秒脉冲,单脉冲能量可以达到毫焦量级,脉宽在几十到上百飞秒之间。然而,在对烧蚀阈值较低的材料进行微加工或研究阈值附近材料的加工特性时,就没有必要使用如此大的脉冲能量,而且加入放大系统后,无疑会使飞秒激光系统变得复杂和昂贵。

在本节中,我们直接使用由振荡器产生的纳焦飞秒激光脉冲,分别对以玻璃和石英为衬底材料的金属铬掩模版进行了烧蚀研究。实验发现,无论是玻璃衬底还是石英衬底,在样品表面所加工的线条处均产生了周期性的微突起结构。为此,还研究了激光功率与微突起结构幅度的关系,这些微突起结构离开样品表面的高度从10-300nm不等,并且随着激光功率的增大而增加,在一定功率下达到饱和状态。通过化学方法证明了这些微突起结构是由玻璃和石英的主要成分 SiO_2 组成的,并非样品表面的铬元素。此外,通过适当的控制飞秒激光功率和曝光时间,我们还制作了两种不同周期和线宽的光栅结构,显示出飞秒激光振荡器良好的加工性能。

5.1.1 飞秒激光微加工实验装置

飞秒激光微加工的实验装置如图5.1所示[165],实验中我们采用美国相干公司(Coherent, Inc.)生产的76MHz 钛宝石(Ti:sapphire)飞秒激光器,它产生中心波长在800nm,脉冲宽度100fs,单脉冲能量为1.3nJ(相应于激光功率100mw

时)的飞秒脉冲, 脉冲的参数由实验室自制的达曼 FROG 装置测得, 单脉冲的能量通过中性衰减片来调整。为了获得较小的焦斑尺寸, 采用了倒置的望远镜先进行扩束, 然后再通过 40 倍的显微物镜 (NA 0.65) 聚焦, 使光束垂直入射到样品表面。实验所用样品为镀有 145nm 厚铬膜的玻璃和石英基片, 实验当中样品固定在具有 30nm 精度的三维移动平台上, 移动平台由计算机通过运动控制卡 PCI-7344 和伺服放大系统进行控制。

加工过程中, 可以通过功率计观察从样品表面反射的激光功率变化来确定焦点的位置。具体方法如下: 飞秒脉冲在样品表面被反射后, 经物镜和分束器 (BS2) 后会进入功率计, 当我们沿 x 轴调整样品的位置时, 入射到样品表面上的激光功率密度会随着改变, 并在焦点正好位于样品的表面时达到极大值, 这时就会发生铬层的烧蚀。随着烧蚀的发生, 样品表面的反射功率就会减少, 透射功率增加, 并且烧蚀现象越明显, 反射功率变化越快。通过这种方式, 把样品调整到反射功率开始变化并且下降到最小时, 即可认为样品表面正好位于聚焦物镜的焦点上。

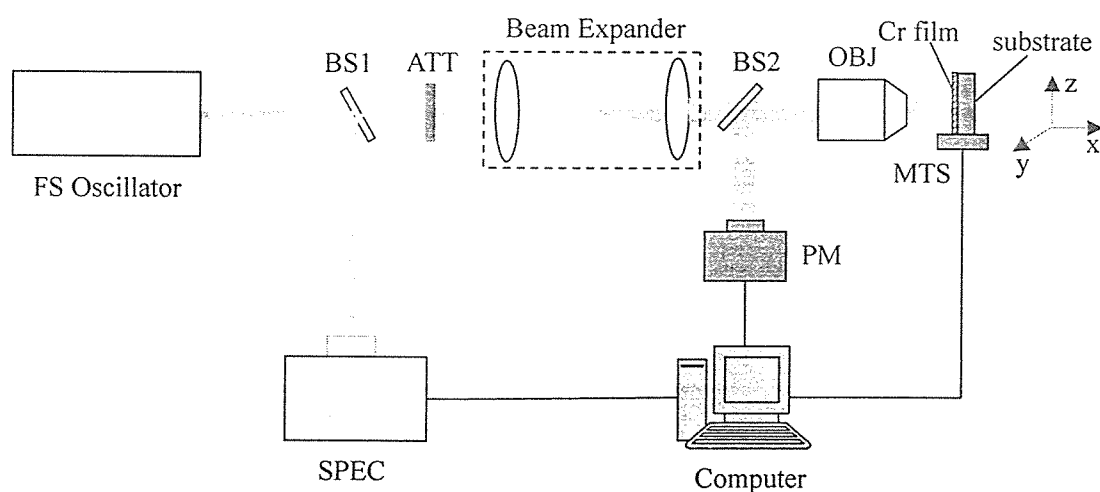


图 5.1 实验装置. FS Oscillator: 飞秒激光振荡器, BS(1-2): 分束器, ATT: 衰减片, OBJ: 物镜, PM: 功率计, MTS: 电动移动平台, SPEC: 光谱仪。

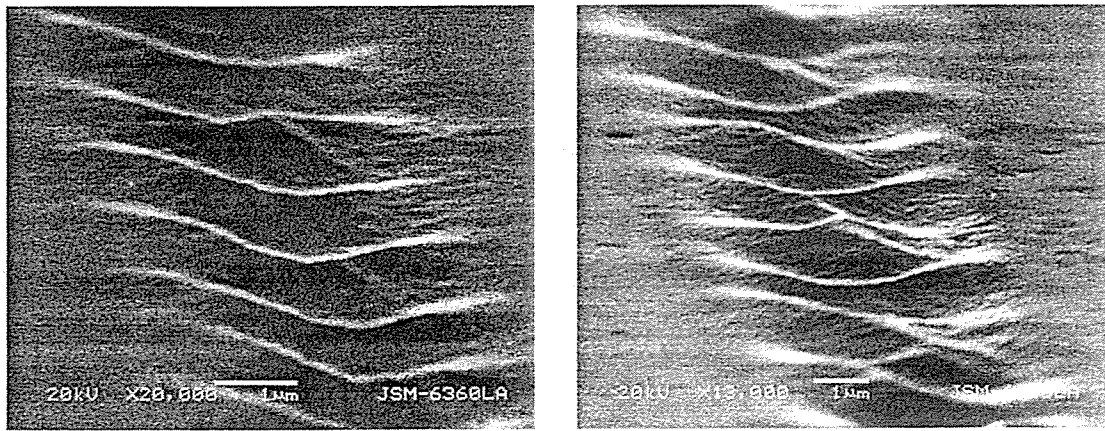
5.1.2 微加工实验结果与讨论

我们的实验是在室温和空气环境中进行的。加工后样品表面的形貌和轮廓分别由扫描电子显微镜 (SEM) 和 Taylor Hobson 台阶仪测得。在一定范围的激光功率下, 飞秒脉冲照射样品表面后产生的周期性微结构可以在 SEM 图中清晰地看到, 如图 5.2 所示。这些微结构沿表面向上突起, 其几何形状和高度与入射到样品表面的激光能流 F 有很大的依赖关系。实验中, 可通过控制移动平台的运动速

度 V 来调节入射到样品表面的激光能流 F ，它们之间满足：

$$F = 4P / \pi V d_0 \quad (5-1)$$

这里 P 为飞秒激光的功率， d_0 为聚焦光斑的尺寸。我们在 30mw 飞秒激光功率下对样品进行加工，移动平台的运动速度从 $3\mu\text{m/s}$ 变化到 $300\mu\text{m/s}$ ，实验发现随着激光能流的增加，样品表面上首先出现周期性的波纹结构($F > 3.64 \times 10^3 \text{J/cm}^2$)，如图 5.2(a)所示；然后开始出现皱褶状突起结构($F > 1.82 \times 10^4 \text{J/cm}^2$)，如图 5.2(b)所示。图 5.3 给出了不同激光入射功率下两种基片上产生的微结构的突起高度变化曲线，很明显，两种基片上产生的微结构突起高度在饱和以前都随着入射飞秒激光功率的增大而增加，但在激光功率超过 140mw 时就开始减少，当激光功率持续不断地增大时，样品表面的周期性微结构将变得不稳定或者被破坏掉。从图 5.3 还可以看出，玻璃和石英两种基片上产生的微结构突起高度相差一个数量级，这是因为石英材料的结构比玻璃更加致密和紧凑。



(a)

(b)

图 5.2 不同入射激光功率下产生的周期性微结构的 SEM 图片 (a) 波纹状突起结构 (b) 皱褶状突起结构

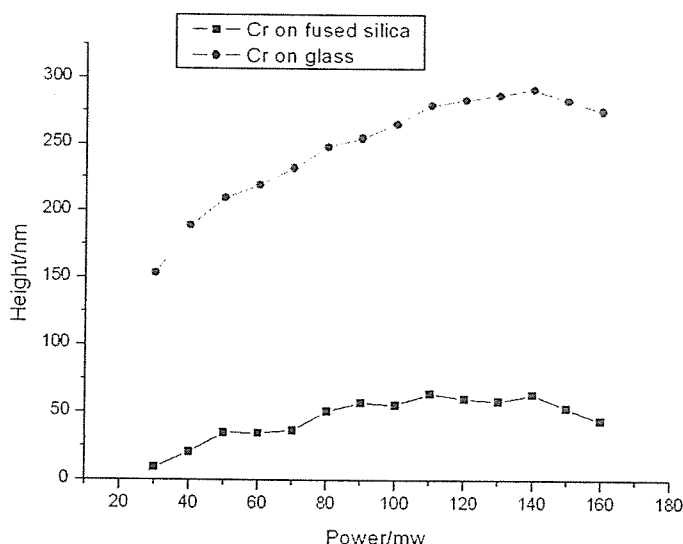
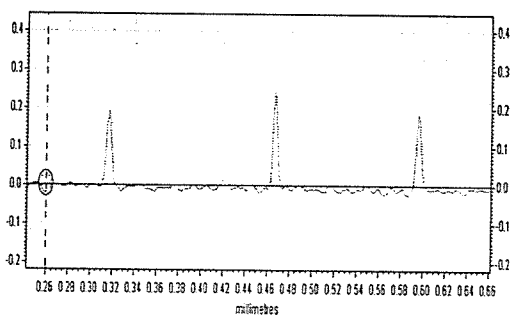
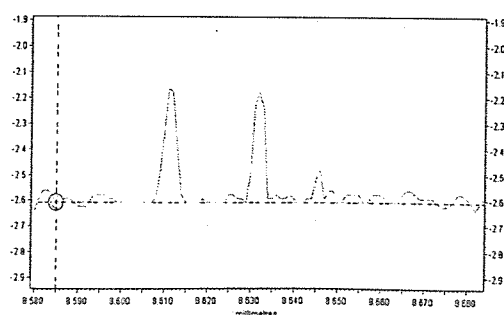


图 5.3 不同入射激光功率下石英和玻璃两种基片上微结构突起高度的变化曲线

为了更好的了解样品表面微突起结构的形成机制,我们在 60mw 的飞秒激光功率下,制作了两片表面具有微突起结构的样品,并在 Taylor Hobson 台阶仪下测出其表面轮廓。然后,一片放入实验室配制的去铬溶液中;另一片放入浓度为 10% 的氢氟酸溶液。过二十分钟后取出两片样品再分别在台阶仪下进行测量,并与放入溶液之前测量的结果进行对比,如图 5.4 所示。结果发现放入去铬溶液的那一片样品的表面形貌基本保持不变,只是微结构的突起高度增加了约一层铬膜的厚度;而放入氢氟酸溶液中的那片样品的表面形貌则出现了截然相反的变化,样品表面原来的微突起结构在经过氢氟酸溶液处理后变成了凹陷。这从化学上证明了,样品表面经飞秒激光加工后所形成的微突起结构是由玻璃和石英的主要成分 SiO_2 组成的,而不是由其表面的金属铬组成。



(a)



(c)

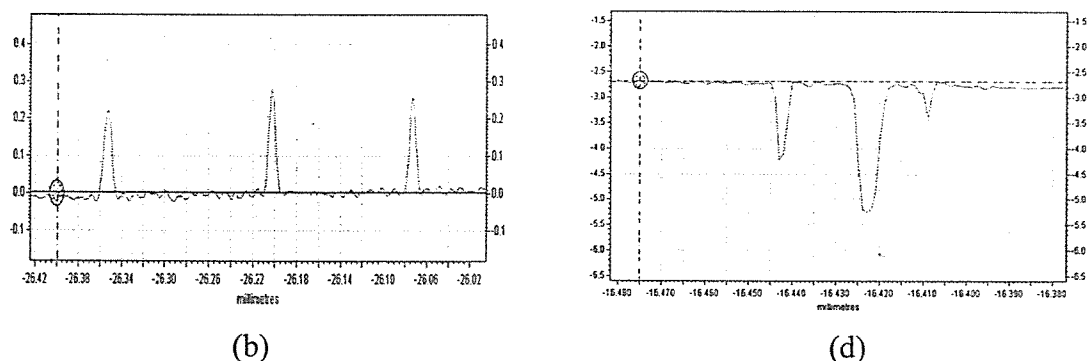


图 5.4 样品放入溶液处理前后 Taylor Hobson 测得的其表面形貌的对比 (a)和(b) 分别是样品放入去铬溶液前后的表面轮廓; (c)和(d)分别是样品放入 10%氢氟酸溶液前后的表面轮廓。

通过飞秒激光脉冲对金属和透明材料加工纳米结构,已有很多文献报道[166-170]。利用聚焦的飞秒脉冲直接烧蚀材料可产生亚微米的孔和周期性的微结构,并且最小尺寸可以做到 100nm 以下,包括微突起和纳米喷嘴结构。然而,文献所报导的微突起结构,大都是由样品表面的金属膜材料构成的,我们在本节实验中却发现较高激光功率下所形成的周期性微突起结构并不是由样品表面的金属膜材料构成,而是由样品的衬底材料构成的。此外,在同样的实验条件下,利用飞秒激光脉冲对洗去铬膜的样品进行加工时,其表面却没有任何现象和变化发生。所以可以推断,样品表面铬层的存在帮助了这种周期性微突起结构的形成。在高重复频率情况下,入射到铬层上的飞秒激光脉冲充当一个点热源,铬层吸收能量除用于自身的烧蚀外,还传导给衬底材料,并导致衬底表面的熔化,从而促使了样品表面微突起结构的形成。从图 5.2(a)还可以看出,这种波纹状突起结构具有垂直于入射电场方向(飞秒激光为水平方向偏振)的波矢,并且呈现出飞秒激光波长量级的周期。不难推断这种周期性波纹结构的形成包含了入射波被熔化的样品表面散射而转换为表面波的过程,入射波和表面等离子波(Surface-Plasma Waves, SPW)的干涉对光强的调制促使了波纹结构的快速增长,而且波纹结构的生长又增强了对入射波的散射,并形成一个正反馈效应,最终产生的周期性波纹结构随着材料的凝固而被固定下来。实验中,我们还发现这种周期性的波纹结构在较低的激光能流下形成,在较高激光能流时退化成皱褶状突起结构,随着入射到样品表面的飞秒脉冲数的持续增加,激光能流累积到一个更高的水准,就会破坏掉样品表面所形成的微突起结构。这意味着波纹状微突起结构的形成存在着一个激光能流的上限。实验表明,这些周期性微突起结构的形貌、尺寸和高度取决于入射飞秒激光的能流,以及飞秒脉冲的参数,如脉冲宽度、重复频率等。适当选取这些参数,可以在样品上获得形状规则并且可控的高密度波纹状突起结构,这为利用飞秒激光快速制作表面纳米器件提供了实验基础。我们通过选取适当的飞秒激光功率和样品加工速度,还制作出了两种不同周期和线宽的光栅结构,如

图 5.5 所示，可以看出在光栅线条的边缘处具有很好的均匀性和质量，显示了飞秒激光器具有良好的加工性能。

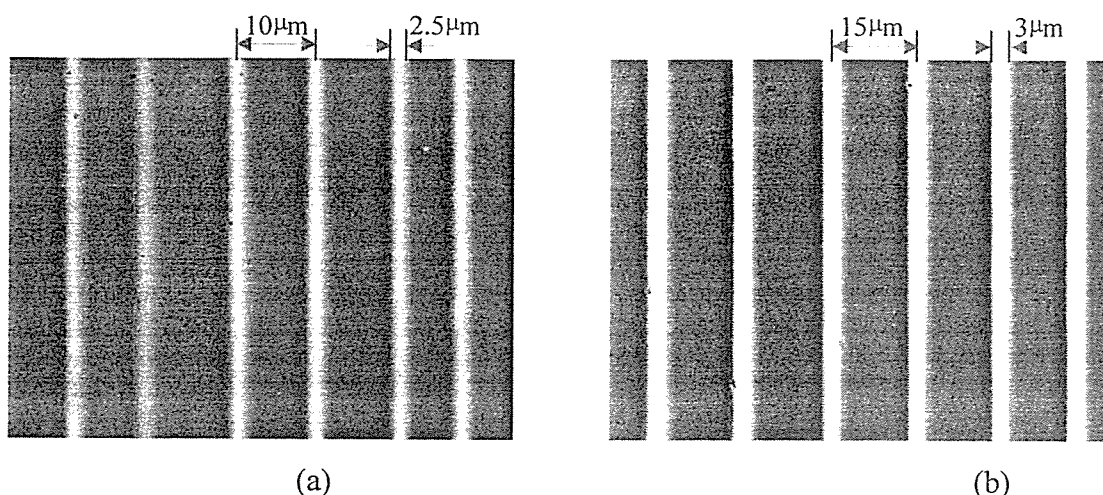


图 5.5 飞秒激光振荡器制作的两种不同周期和线宽的光栅结构 (a) 周期=10 μm ，线宽=2.5 μm ，(b) 周期=15 μm ，线宽=3 μm 。

5.2 双脉冲飞秒激光微加工的研究

随着飞秒激光技术的发展以及飞秒激光微加工研究的深入，新的各种各样的飞秒激光脉冲微加工应用研究竞相开展。比如，利用多脉冲串的技术进行微加工，或者利用不同偏振状态的飞秒激光进行微加工，这些新的方法可以在不同程度上提高微加工的质量和分辨率。本节主要利用双脉冲的方法 (Double-pulse Method) 对飞秒激光微加工金属铬掩模版的情况进行研究，并结合不同偏振状态下的微加工实验结果进行相关分析。

5.2.1 双脉冲飞秒激光微加工实验

双脉冲飞秒激光微加工实验的装置示意图如图 5.6 所示[171]，其中飞秒激光器系统同本章的 5.1 节。一个迈科尔逊 (Michelson) 干涉仪用来作为双脉冲发生器，其中有一臂可以自由移动，通过它可以调整两个脉冲之间的光程差，进而使两个脉冲之间产生一定的时间延迟，图 5.7 和 5.8 分别是在双脉冲无时延时和具有一定时延时，由光谱仪测得的双脉冲光谱图，从这两张图中可以看出，在双脉冲无时延时，其光谱形状和单个高斯脉冲的光谱形状一样，而在双脉冲具有一定的时延时，双脉冲光谱的形状就会变成具有高斯包络的多个尖峰序列，并且随着双脉冲之间时间延迟的增加，双脉冲光谱曲线上的尖峰序列也变的密集起来。

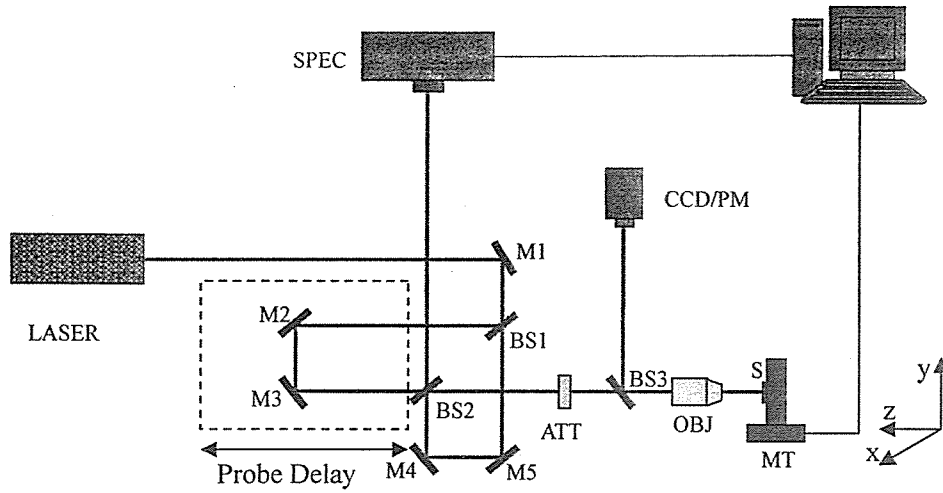


图 5.6 双脉冲飞秒激光微加工实验装置

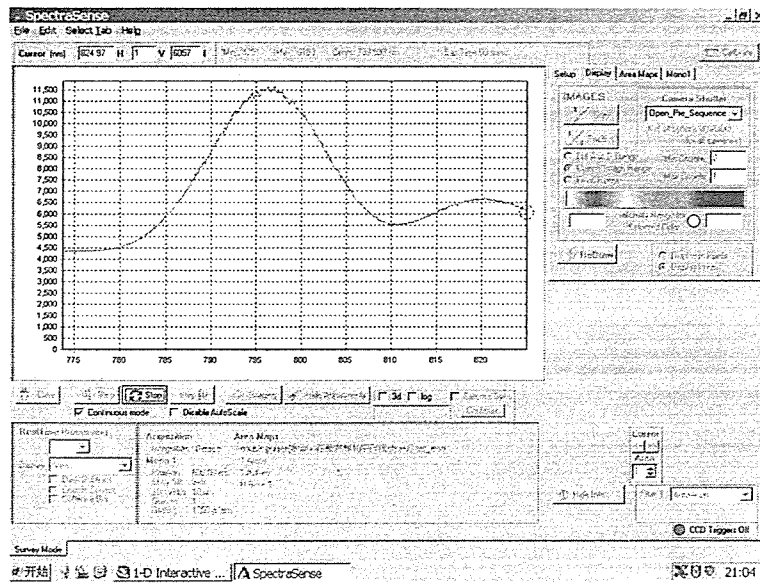


图 5.7 双脉冲重合时的光谱曲线

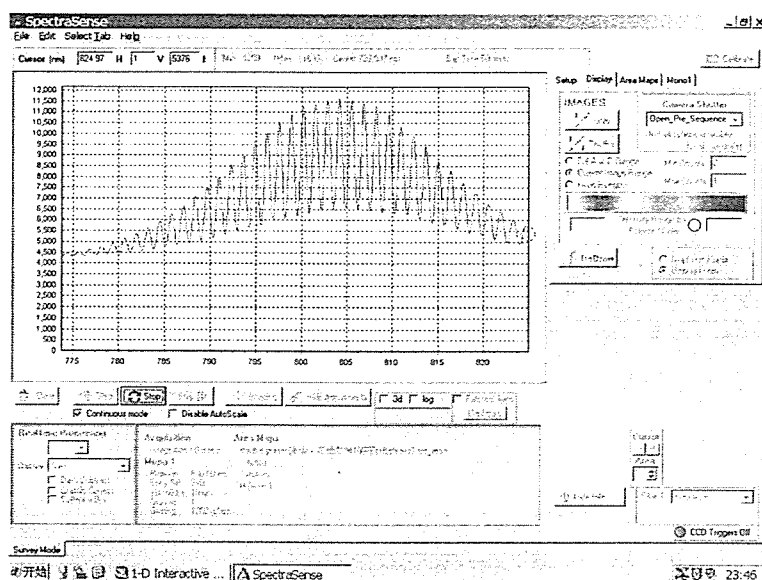


图 5.8 双脉冲时间延迟为 1.33ps 时的光谱曲线

如图 5.6 所示,在利用双脉冲飞秒激光对金属铬掩模版进行微加工的过程中,用一个激光功率计来监测从样品表面反射的激光功率。为研究阈值附近超短激光脉冲对金属的烧蚀特性,我们利用中性滤波器对入射到样品前的激光脉冲能量进行适当的衰减,使双脉冲中单个脉冲在样品表面的功率密度稍低于金属铬掩模版的烧蚀阈值。在初始未发生烧蚀时,从金属铬掩模版表面反射的激光功率处于一个较高的水平,而在发生烧蚀现象之后,从金属铬掩模版表面反射的激光功率便降低到一个较低的水平,这是因为金属铬掩模版的烧蚀使得更多的激光脉冲透过了烧蚀区域。图 5.9 给出了在不同飞秒激光功率条件下进行微加工时,金属铬掩模版表面反射率随双脉冲时延的变化关系,图中的每个点都对应着 6 个实验数据的平均,这些点的标准偏差范围在 8%-11%之间。从图 5.9 可以看出,在几种不同的功率条件下,反射率在双脉冲时间延迟接近 400ps 量级的时候都会出现急剧上升的现象。根据实验上的观察,在飞秒激光功率较低的情况下,当双脉冲之间的时间延迟少于 400ps 的量级时,对金属铬掩模版的烧蚀现象就比较明显,并且其表面的反射率会一直保持在一个较低的水平上。当双脉冲之间的时间延迟大于 400ps 的量级时,对金属铬掩模版的烧蚀就变得不再可能,而且其表面的反射率也急剧上升到一个较高的水平上。这一实验现象可以看作双脉冲超短激光烧蚀材料时所具有的时域烧蚀窗口效应。

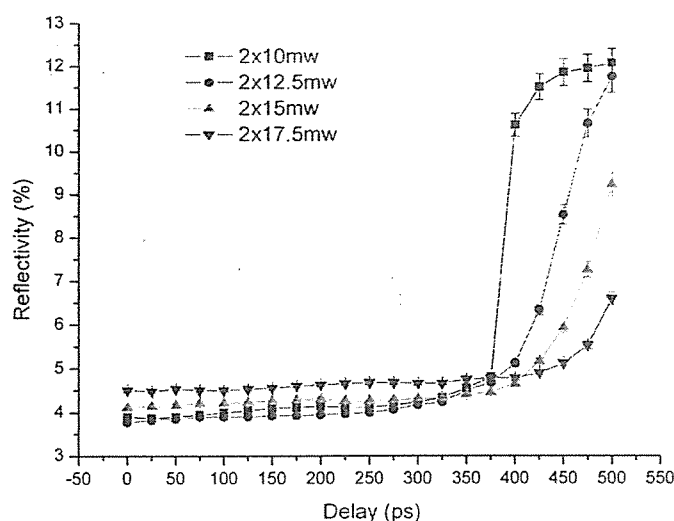


图 5.9 金属铬掩模版表面反射率随双脉冲时延的变化关系

为解释上述双脉冲飞秒激光微加工金属铬掩模版过程中出现的时域烧蚀窗口效应,我们对本论文 3.2 节中的双曲线型双温模型方程(3-15)和(3-16)进行改进,将这一模型发展成双脉冲下的双温模型,对双脉冲飞秒激光微加工金属铬掩模版的过程进行模拟。这时方程(3-15)中的体激光源项 S 可以写成如下的形式:

$$S = 0.94 \frac{1-R}{t_p \delta} J \left\{ \exp\left[-\frac{z}{\delta} - 4 \ln 2 \left(\frac{t-2t_p}{t_p}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{z}{\delta} - 4 \ln 2 \left(\frac{t-2t_p-\tau}{t_p}\right)^2\right] \right\} \quad (5-2)$$

这里 R 是反射率, t_p 是激光脉冲的半高全宽 (FWHM), δ 是包含弹道范围的光学穿透深度。 τ 是双脉冲之间的时间延迟, J 表示入射激光能流通量, 金属铬的其它热物理和光学性质如下[116]: $C_e = 194T_e Jm^{-3}K^{-1}$, $C_l = 3.24 \times 10^6 Jm^{-3}K^{-1}$, $k_e = 94T_e/T_l Wm^{-1}K^{-1}$, $G = 4.2 \times 10^{17} Wm^{-3}K^{-1}$, 熔点 $T_m = 2180K$, 反射率 $R = 0.631$, 飞秒激光脉冲宽度 $t_p = 100fs$, 包含弹道范围的光学穿透深度 $\delta = 24nm$, 吸收系数 $\alpha = 6.8 \times 10^7 m^{-1}$ 。

根据双脉冲下的双温模型方程, 双脉冲超短激光烧蚀金属材料物理原理如图 5.10 所示, 这里烧蚀的发生定义为金属材料中晶格的温度达到熔点 T_m 。通过适当调整入射飞秒激光的功率, 使双脉冲中的单个脉冲强度稍低于金属材料的烧蚀阈值。这样当双脉冲没有时间延迟, 即它们在时间上重合时, 金属材料中晶格温度的峰值将会高于熔点温度 T_m , 这时烧蚀将会发生, 如图 5.10(a)所示。当双脉冲之间有一定的时间延迟, 比如在十几皮秒的量级, 金属材料中晶格温度的峰值仍然会高于熔点 T_m , 烧蚀依然会发生, 只是峰值温度相比双脉冲之间没有时间

延迟时有所下降, 如图 5.10(b)所示。当双脉冲之间的时间延迟足够大, 以至于在第二个脉冲到达时, 由第一个脉冲加热所造成的较高晶格温度已经冷却下来了, 在第二个脉冲的作用下晶格温度只是再重复上升一次, 而其峰值温度却达不到熔点温度 T_m , 这时烧蚀就不会发生, 如图 5.10(c)所示。由此看来, 在单个脉冲强度稍低于阈值时, 双脉冲超短激光烧蚀金属材料的过程存在着一个时域的烧蚀窗口, 当双脉冲之间的时间延迟超出这一窗口之外时, 烧蚀便不能发生。这一理论推测与实验所得到的双脉冲烧蚀特性非常接近, 进而也说明了我们所改进的双脉冲下的双温模型在模拟双脉冲超短激光烧蚀金属材料时的有效性。

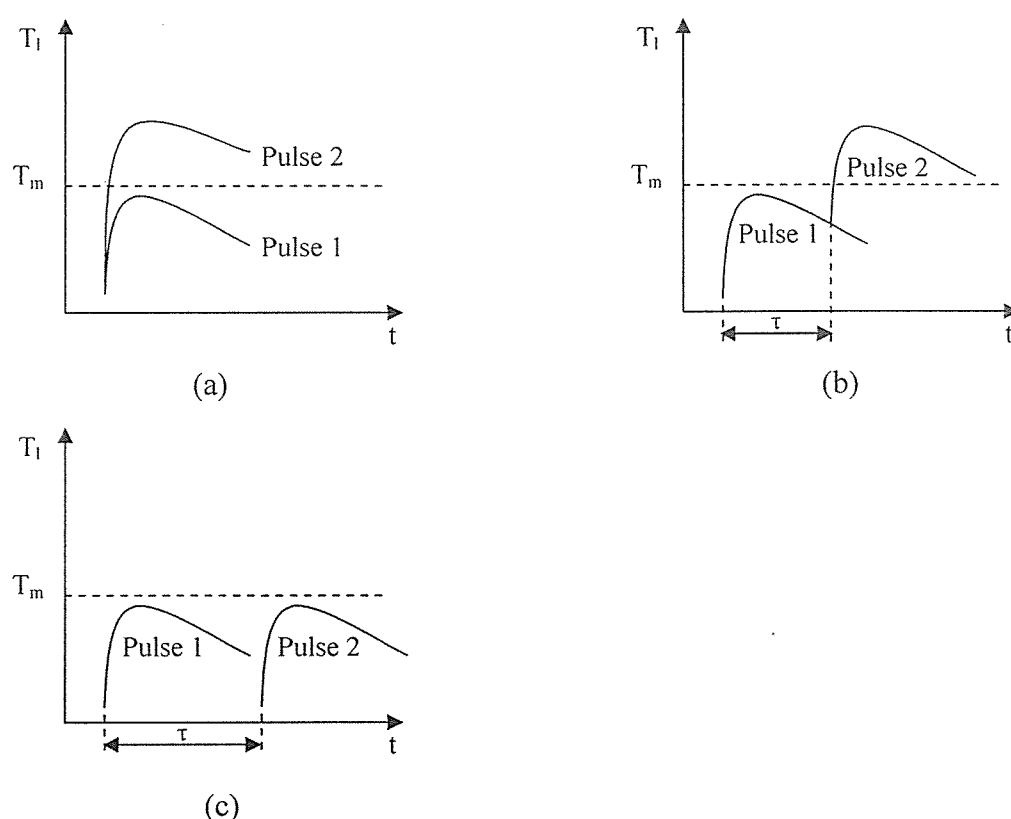


图 5.10 在单个脉冲强度稍低于阈值时, 双脉冲超短激光烧蚀金属材料的物理原理示意图 (a) $\tau = 0$, 烧蚀可以发生, (b) τ 适当改变, 但烧蚀仍可发生, (c) τ 变得足够大, 以至于烧蚀不能发生。

图 5.11 给出了由双脉冲双温模型模拟的, 在激光功率为 $2 \times 10 \text{ mw}$ 以及两种不同的双脉冲时延下, 中心波长为 800 nm , 脉冲宽度为 100 fs 的飞秒激光辐射 145 nm 厚的金属铬掩模板时, 其前表面晶格温度随时间演化的关系。从图中可以清晰地看出, 当双脉冲之间的时间延迟超过 400 ps 的量级之后, 晶格温度的峰值将会低于金属铬的熔点 T_m , 这就意味着此时烧蚀现象将不会发生, 而且金属表面的反

射率也会因此出现急剧地上升。

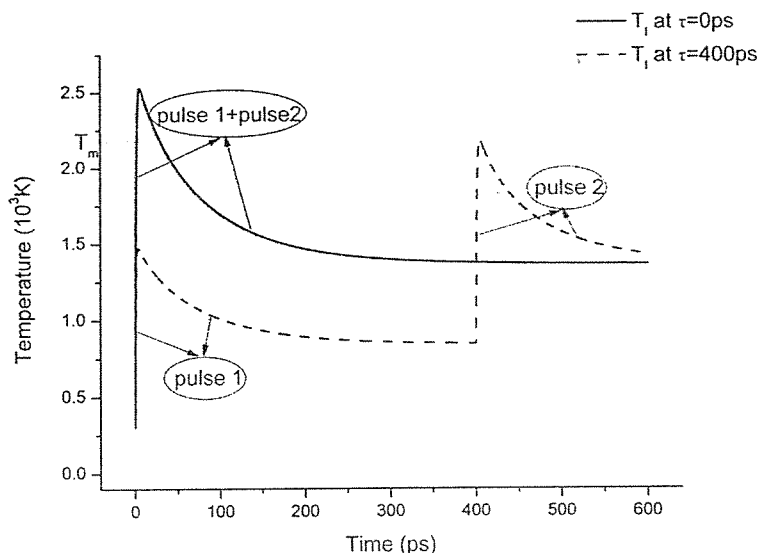
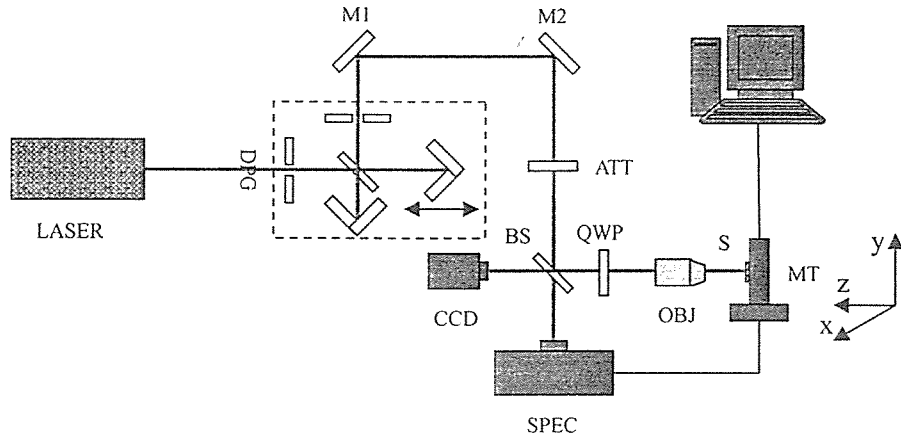


图 5.11 在激光功率为 $2 \times 10 \text{ mw}$ 以及两种不同的双脉冲时延下, 由双脉冲双温模型模拟得到的 800nm, 100fs 的飞秒激光辐射下 145nm 厚金属铬掩模版前表面晶格温度随时间演化的关系

5.2.2 偏振双脉冲飞秒激光微加工实验

一般情况下, 飞秒激光器直接输出的都是线偏振的飞秒激光脉冲。有时为了获得更好的微加工效果, 还会将飞秒激光器输出的线偏振光转换成圆偏振光, 或者其他的偏振光形式, 比如径向或者角向偏振的光。本小节主要讲述由线偏振和圆偏振飞秒激光对金属铬掩模版进行微加工的相关研究。

利用偏振光飞秒双脉冲对金属铬掩模版进行微加工的实验装置如图 5.12 所示[172]。图中的双脉冲发生器是由一个迈科尔逊 (Michelson) 干涉仪构成, 其中的一个角锥反射镜装在可移动臂上, 在 0-75mm 的范围内移动时可产生 0-500ps 的时间延迟。双脉冲的光谱通过光谱仪监测, 中性衰减器用来控制飞秒脉冲的能量。插入的 1/4 波片用来将线偏振的飞秒脉冲激光转换为圆偏振光, 然后再经过数值孔径 (NA) 0.25 的显微物镜聚焦, 使光束垂直入射到样品表面。CCD 用来监控样品表面位置, 以保证样品在同样的聚焦条件下进行加工。实验所用样品为玻璃衬底上的 145nm 厚金属铬掩模版, 样品固定在具有 30nm 精度的三维移动台上, 平台由计算机通过运动控制卡 PCI-7344(NI, Inc.)和伺服放大系统 MC-4SA (NAI, Inc.) 进行控制。



(LASER): femtosecond Ti:sapphire laser (10nJ/pulse, 800nm, 76MHz, 90fs); (DPG): double pulses generator; (M1, M2): mirrors HR 45°; (ATT): attenuator; (BS): beam splitter; (QWP): quarter-wave plate; (OBJ): focusing objective lens; (S): sample; (MT): motorized translations; (SPEC): spectrometer.

图 5.12 偏振光飞秒双脉冲微加工实验装置

本小节中的偏振飞秒激光微加工实验都是在室温和空气环境中进行的。样品表面先后用酒精和丙酮清洗，其加工后的表面轮廓和形貌分别用 Taylor Hobson 台阶仪和扫描电子显微镜 (SEM) 测得。图 5.13 和 5.14 给出在激光功率 40mw，加工速度为 18um/s 时，分别由线偏振和圆偏振飞秒双脉冲，得到的微突起状结构的高度和宽度随双脉冲时延的变化关系。两张图中的每个点都对应于 60 个实验数据的平均，图 5.13 中微突起状结构高度和宽度的标准方差分别约为 10% 和 6%，图 5.14 中微突起状结构的高度和宽度的标准方差分别约为 9.2% 和 5.6%。从图 5.13 和 5.14 中可以看出，对于这两种偏振光，微突起状结构的宽度在 0-400ps 的范围内都没有明显的变化，只是有轻微地起伏，但微突起状结构的高度在 1-10ps 的范围内都呈现明显的下降，而在此时延范围以外却没有明显的变化。

根据第 5.2.1 小节中的双脉冲双温模型，在激光功率为 $2 \times 20mw$ 以及两种不同的双脉冲时延下，模拟得到的 800nm, 100fs 的飞秒激光辐射下 145nm 厚金属铬掩模版前表面电子和晶格温度随时间演化的关系如图 5.15 所示。从图 5.15 可以看出，对于 0ps 和 10ps 两种不同的双脉冲时间延迟，电子—声子的弛豫时间，也即是自由电子和晶格达到热平衡所需要的特征时间，都在 1-10ps 之间。另一方面，根据双脉冲双温模型的计算，在 800nm, 100fs 的双脉冲飞秒激光辐射下，对于 0-400ps 的双脉冲延时范围和 $10-5000J/m^2$ 的入射能流通量范围，145nm 厚的金属铬掩模版中的电子—声子弛豫时间都覆盖在 1-10ps 的时间范围内。这与双脉冲飞秒激光微加工金属铬掩模版过程中，微突起状结构高度开始具有明显下降的时间范围段 1-10ps 相一致。从这些事实可以看出，这些微突起结构的形成

过程可能涉及到电子—声子相互耦合的过程,并且电子—声子相互耦合的这一过程在减少微突起状结构形成的趋势方面起到了重要作用。此外,由线偏振和圆偏振两种偏振状态下获得的微突起状结构随双脉冲时延具有共同的变化特点可知,入射光束的偏振状态对微突起状结构的产生与否并无太大影响,这一实验结果有助于理解飞秒激光微加工金属材料时电子和声子的相互耦合过程。另外,从图 5.13 和 5.14 中还可以看出,在同一双脉冲时延下,圆偏振飞秒双脉冲得到的微突起状结构的高度要比线偏振光得到的高几十纳米,宽度也要宽一微米左右,这是由于在通过光束移动进行微加工的情况下,材料对不同偏振状态的光会表现出不同的加工阈值,其中采用 s-偏振光时加工阈值最大,圆偏振光次之, p-偏振光加工时阈值最小[173]。这里,图 5.13 中所采用的线偏振光属于 s-偏振光加工的情况,因而所获得的微突起状结构的尺寸相比圆偏振光的情况要小一些。

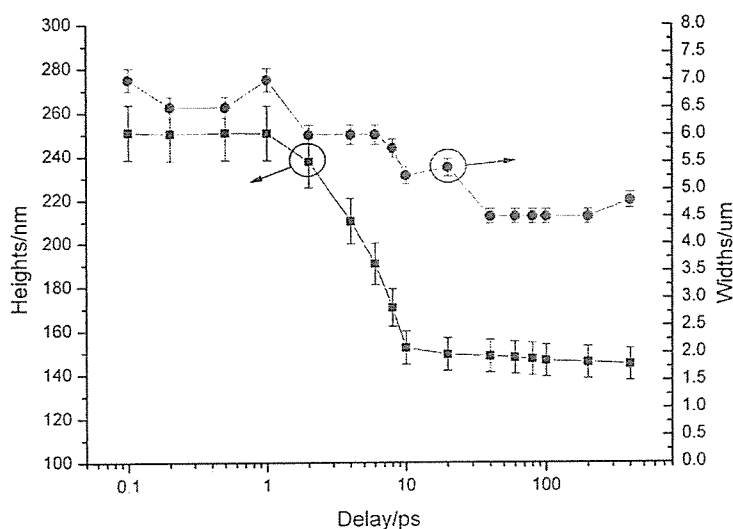


图 5.13 激光功率 40mw, 加工速度 18 $\mu\text{m}/\text{s}$ 时, 线偏振飞秒双脉冲微加工得到的微突起状结构的高度(方点)和宽度(圆点)随双脉冲时延的变化关系

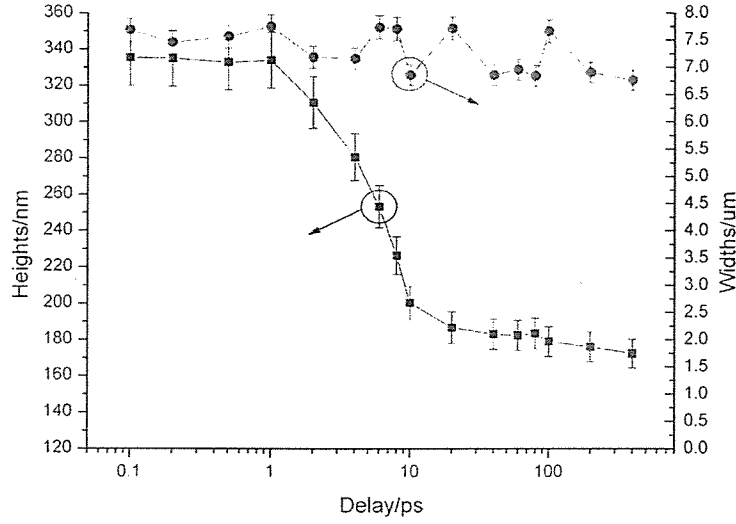


图 5.14 激光功率 40mw，加工速度 18um/s 时，圆偏振飞秒双脉冲微加工得到的微突起状结构的高度（方点）和宽度（圆点）随双脉冲时延的变化关系

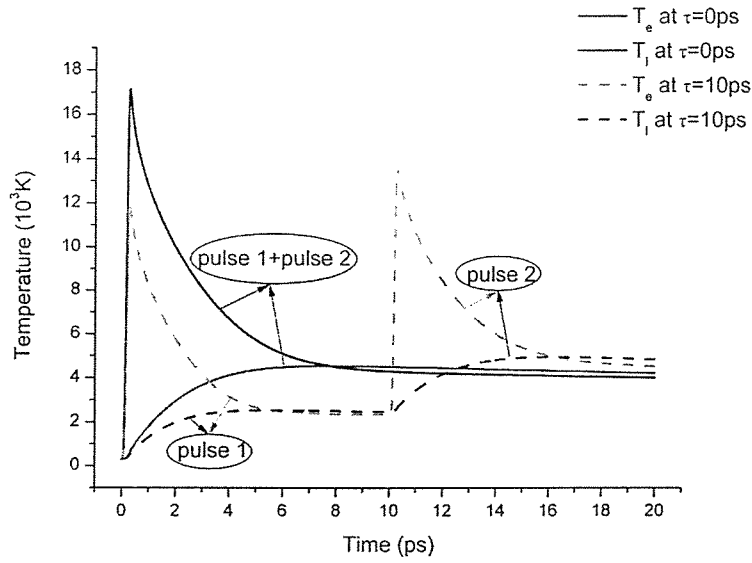


图 5.15 在激光功率为 $2 \times 20mw$ 以及两种不同的双脉冲时延下，由双脉冲双温模型模拟得到的 800nm, 100fs 的飞秒激光辐射下 145nm 厚金属铬掩模版前表面电子和晶格温度随时间演化的关系

图 5.16 和 5.17 给出在激光功率 40mw，加工速度为 18um/s 时，分别由线偏

振和圆偏振飞秒双脉冲, 加工样品所得到的表面形貌图。通过这些 SEM 图片, 可以清晰的看到, 样品表面均呈现出明显的微突起状结构。而且, 对于线偏振和圆偏振这两种偏振光, 利用双脉冲方法 (选取适当的延时), 都可以获得更好的加工质量 (残余物质较少)。并且, 线偏振光得到的微突起状结构比较细长, 在入射光束的偏振方向上有所伸长, 如图 5.16 (a)和(b)所示。而圆偏振光得到的微突起状结构就比较接近圆形, 如图 5.17 (a)和(b)所示。这是因为, 在低脉冲能量的情况下, 只有光束的中心部分有足够的能量可以对材料进行微加工, 这时光束的偏振情况就对所加工的形貌起到了重要作用。由此看来, 在低脉冲能量, 高重复频率的情况下, 具体的微加工特征形貌与入射光束的偏振状态有关, 采用圆偏振光来进行微加工就可以获得圆形的加工形貌, 但这时应特别注意 $1/4$ 波片的快 (慢) 轴的方位, 与入射线偏振光束偏振方向的夹角稍微偏离 45° 就会将其转换为椭圆偏振光, 而非理想的圆偏振光, 当然这可以通过在 $1/4$ 波片后面放置偏振片, 旋转偏振片, 检测偏振片之后的光功率是否改变来判断波片所转换的光是否为圆偏振光。此外, 还有另两种方法可以获得圆形的加工形貌, 一种是采用偏振钻孔法, 即把 $1/2$ 波片放在一个电控转动台上, 通过波片的旋转来改变相邻两飞秒脉冲的偏振状态[174]; 另一种就是采用具有柱对称性的径向或角向偏振光来进行微加工, 而且这种方法相比圆偏振光有着更好的加工质量, 加工效率以及更小的加工分辨率[175]。

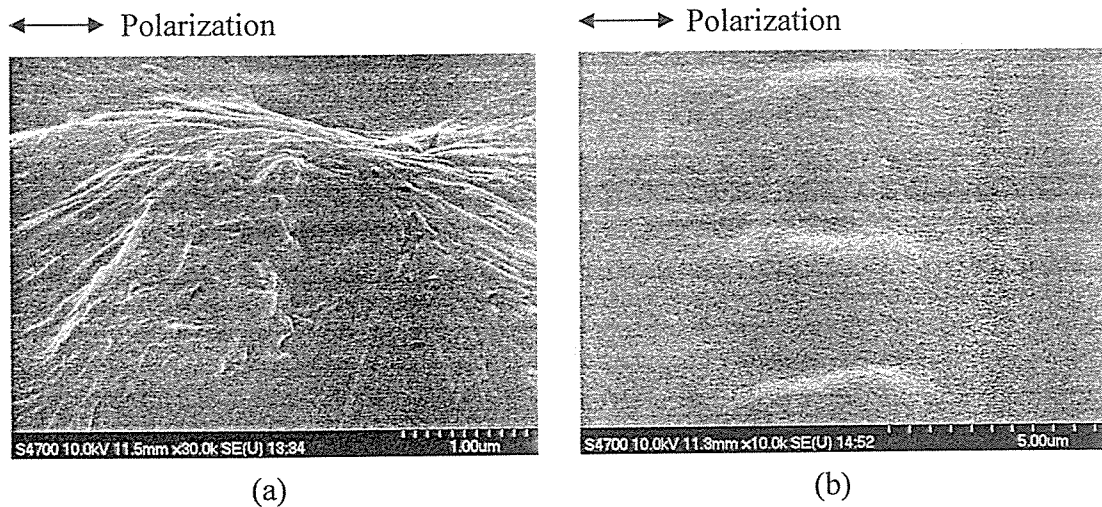


图 5.16 激光功率 40mw, 加工速度 18um/s 时, 线偏振飞秒双脉冲在(a) 0ps (b) 0.2ps 两种时延下得到的微突起状结构的扫描电子显微镜图片 (箭头为入射光束偏振方向)

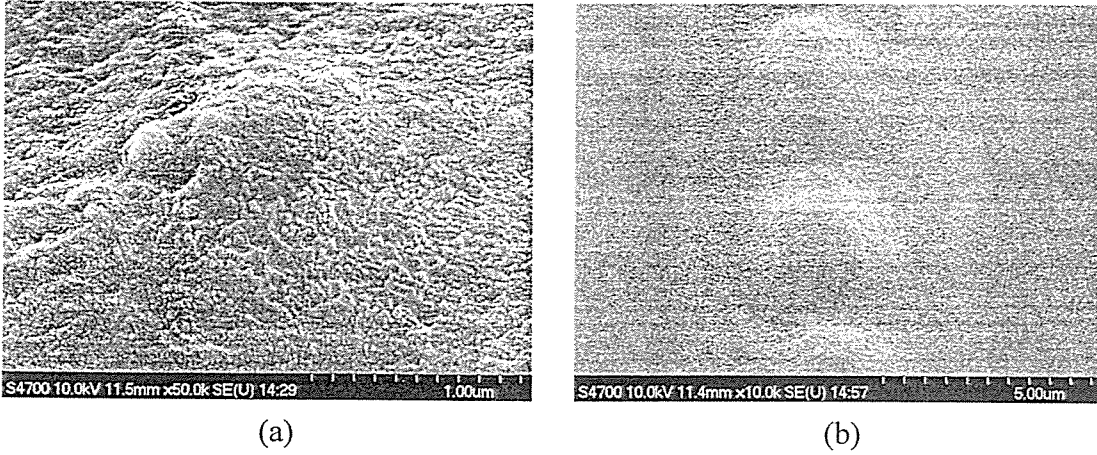


图 5.17 激光功率 40mw, 加工速度 18um/s 时, 圆偏振飞秒双脉冲在(a) 0ps (b) 0.2ps 两种时延下得到的微突起状结构的扫描电子显微镜图片

5.3 飞秒激光导致微突起结构的研究

从以上的实验结果可以看出, 无论对于单脉冲飞秒激光还是双脉冲飞秒激光, 它们在对金属铬掩模版进行微加工时都会产生微突起状结构, 本节内容将通过理论模型的模拟来解释实验当中所出现微结构的形成机制。

在本文第 3.2.4 小节中, 曾讲到了 J. K. Chen 等人在基于热电子爆炸模型和双重双曲线型双温模型所建立的超快热弹性模型 (UTEM) [136]。在本节中, 我们将结合有限元方法 (FEM) 和超快热弹性形模型, 对飞秒激光脉冲微加工金属铬掩模版时所产生的微突起状结构进行模拟研究[176], 这就需求解超快热弹性模型方程(3-28)-(3-32)。

考虑到金属铬掩模版初始时在室温下处于自由的状态, 我们有以下的初始条件表达式:

$$u_i(r, z, 0) = 0, \quad \dot{u}_i(r, z, 0) = 0 \quad (5-3)$$

$$\sigma_{ij}(r, z, 0) = 0 \quad (5-4)$$

$$T_e(r, z, 0) = T_l(r, z, 0) = 300K \quad (5-5)$$

$$q_{ei}(r, z, 0) = q_{hi}(r, z, 0) = 0 \quad (5-6)$$

由于在超短激光脉冲作用的很短时间内, 向边界以及金属铬膜前后表面辐射或者传导的热量非常小, 可以忽略不计, 这样就有了下面的边界条件:

$$q_{ei}(r, 0, t) = q_{ei}(r, L, t) = q_{ei}(R, z, t) = 0 \quad (5-7)$$

$$q_{li}(r, 0, t) = q_{li}(r, L, t) = q_{li}(R, z, t) = 0 \quad (5-8)$$

这里, L 是金属铬掩模版中铬膜的厚度, R 是周围边界的半径。对于机械响应, 通常认为金属膜的前后表面没有应力产生, 而周围边界则会受到约束, 这样就有:

$$\sigma_{ij}(r, 0, t) = \sigma_{ij}(r, L, t) = 0 \quad (5-9)$$

$$u_i(R, z, t) = 0 \quad (5-10)$$

这里我们结合有限元方法 (Finite Element Method, FEM) 对超快热弹性模型方程(3-28)-(3-32)进行求解, 并在数值分析中考虑到样品是一块厚度 $L=145\text{nm}$ 的方形金属铬掩模版, 它受到具有高斯脉冲形状的飞秒激光的辐射。此外, 还设光束横截面中心与金属铬掩模版前表面中心一致, 并设飞秒激光具有脉冲宽度 100fs , 中心波长在 800nm 。模拟中所用到的金属铬的相关热物理和热弹性质分别如下 [116]: $\rho = 7190\text{kgm}^{-3}$, $C_{e0} = 194\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-2}$, $G = 4.2 \times 10^{17}\text{Wm}^{-3}\text{K}^{-1}$, $R = 0.631$, $z_s = 24\text{nm}$, $\chi = 300\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\eta = 0.20$, $T_F = 8.01 \times 10^4\text{K}$, $C_l = 3.24 \times 10^6\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$, $K_l = 0\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\Lambda = 194\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-2}$, $E = 248\text{GPa}$, $\nu = 0.40$, $\alpha = 19.5 \times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ 。

图 5.18 和 5.19 给出了在两种不同的入射激光能流通量下, 100fs , 800nm 飞秒激光脉冲辐射金属铬掩模版的模拟变形情况。从这两张图中均可以看出, 在飞秒激光辐射后在金属铬膜表面形成了圆锥状微突起结构。在入射激光能流通量分别为 0.8Jcm^{-2} 和 1.4Jcm^{-2} 时, 计算得到的圆锥状微突起结构的高度分别为 139nm 和 208nm 。微突起结构的高度随着入射激光能流通量的增加非线性地增加, 这主要是因为超快热弹性模型中, 热电子爆炸力随着入射激光能流通量的变化并不是线性的。图 5.20 显示出飞秒激光导致的微突起结构的形成过程。在飞秒激光脉冲的作用下, 铬膜表面光斑处会获得垂直于薄膜衬底表面, 方向向上的热弹应力 σ , 当这一应力超过铬膜材料的屈服应力 σ_y 时, 就会产生塑性变形, 从而在铬膜表面产生这种微凸的结构。随着飞秒激光能流的增大, 铬膜表面光斑处的晶格温度也会随着升高, 当这一温度达到铬膜的熔点时, 光斑处的铬就会变成液态, 这时其屈服应力也降到了 0, 液态的铬将会在热弹应力的作用下继续伸展, 但这一过程会随着液体的表面张力和由冷却凝固所带来的应力而停止。在入射能流足够大时, 铬膜表面所获得的热弹应力不能被表面张力和塑性变形平衡掉, 这时就会有材料从其表面喷射出来, 从而造成了材料的烧蚀效应。图 5.21 展示了在 1.4Jcm^{-2} 的入射激光能流通量下, 100fs , 800nm 飞秒激光辐射金属铬掩模版之后得到的表面形态和轮廓图。从图 5.21 可以看出, 在飞秒激光辐射之后, 金属铬膜上面出现了近乎圆锥状微突起结构, 它具有 230nm 的高度, 这就表明实验得到

的结果与根据超快热弹性模型的模拟结果，即图 5.19 的结果，在圆锥状微突起结构的形状和高度上具有良好的一致性。这也从实验上证实了超快热弹性模型的合理性和有效性。此外，根据超快热弹性模型的数值模拟结果，在同样的飞秒激光辐射条件下，弹性模量（elastic modul）较小的材料，例如：金，银和铜所获得的微突起状结构的高度要高一些。这对于在超短脉冲激光下选择合适的材料进行纳米构造是非常有益的。

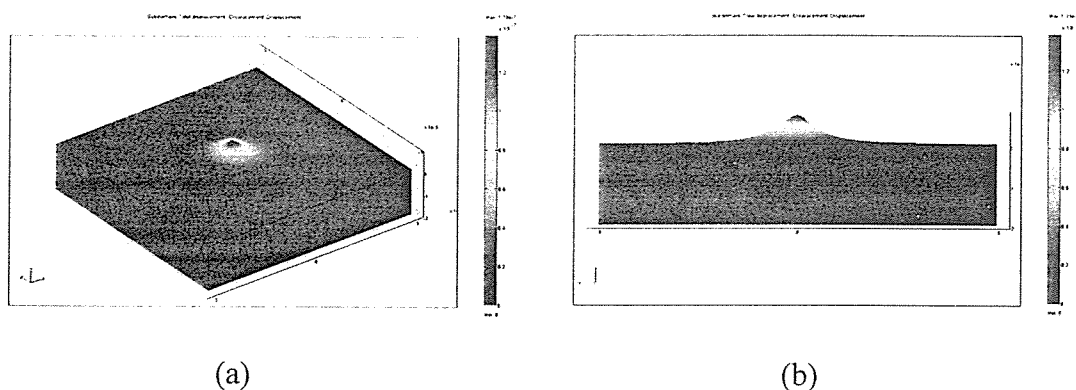


图 5.18 在入射激光能流通量为 0.8Jcm^{-2} 时，对于 100fs, 800nm 飞秒激光辐射下的金属铬掩模版变形情况的模拟 (a) 3D 视图, (b) 截面视图

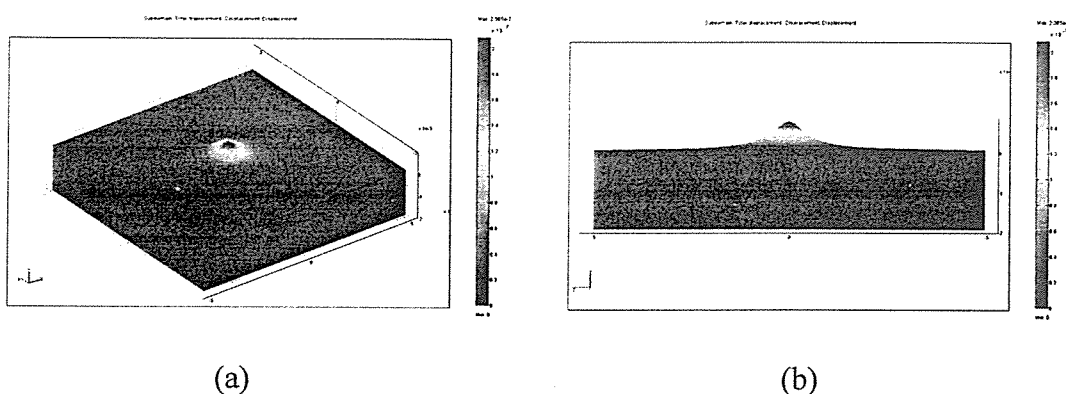


图 5.19 在入射激光能流通量为 1.4Jcm^{-2} 时，对于 100fs, 800nm 飞秒激光辐射下的金属铬掩模版变形情况的模拟 (a) 3D 视图, (b) 截面视图

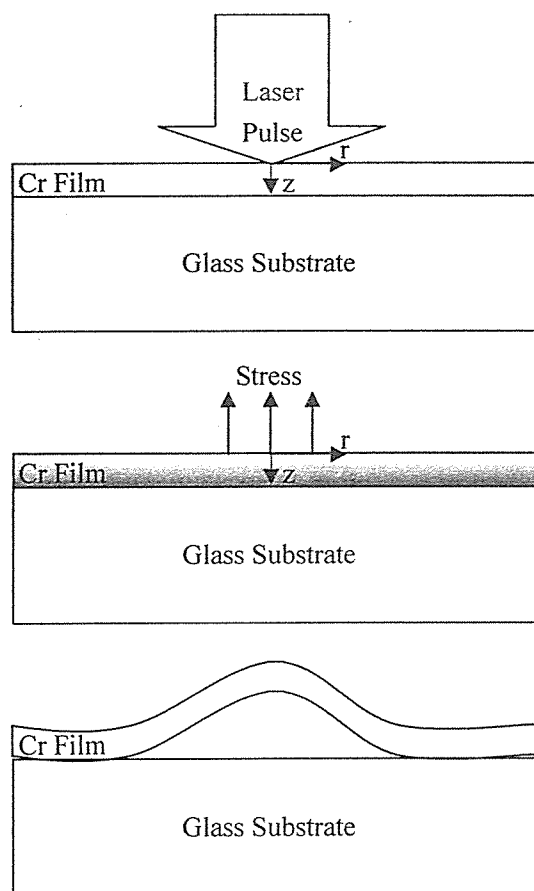
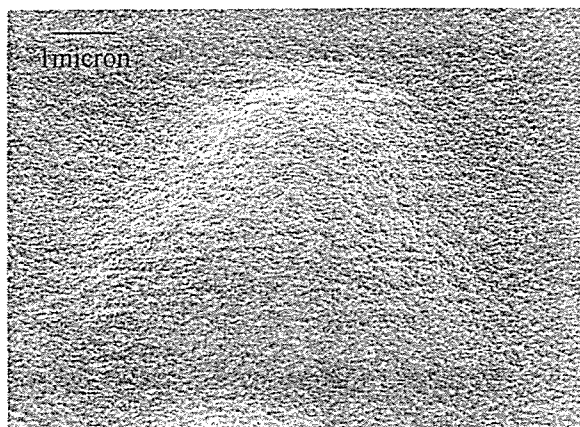
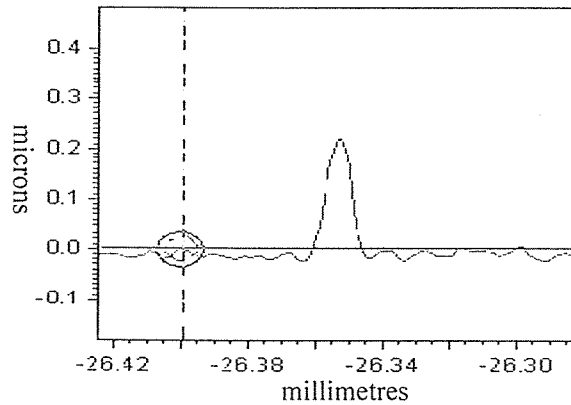


图 5.20 飞秒激光脉冲导致的微突起状结构的形成过程



(a)



(b)

图 5.21 在入射激光能流通量 1.4Jcm^{-2} 时, 100fs, 800nm 飞秒激光辐射下的金属铬掩模版表面的形态(a)和轮廓(b)

5.4 总结

本章主要介绍了利用飞秒激光对金属铬掩模版进行微加工的研究。

利用飞秒激光分别对以玻璃和石英为衬底的金属铬掩模版进行微加工, 发现在样品表面均有周期性的微突起结构产生。通过化学方法证明这些周期性微突起结构并不是由铬组成的, 而是由衬底材料的主要成分 SiO_2 组成的。通过选择合适的飞秒激光功率和加工速度, 还在金属铬掩模版上制作了两种不同周期和线宽的光栅结构。

在利用双脉冲飞秒激光研究金属铬掩模版微加工特性的过程中, 当调整单个脉冲强度使其稍低于阈值时, 双脉冲烧蚀过程存在着时域的烧蚀窗口效应, 即当双脉冲之间的时间延迟介于 400ps 的量级这一窗口之内时, 对金属铬掩模版的烧蚀现象就可以发生, 而当双脉冲之间的时间延迟超出 400ps 的量级这一窗口后, 对金属铬掩模版的烧蚀就变得困难。我们在双曲线形双温模型的基础上改进了双温模型方程, 给出了双脉冲下的双温模型方程, 并成功用来解释双脉冲飞秒激光烧蚀过程中存在的时域烧蚀窗口效应。

在利用偏振飞秒双脉冲对金属铬掩模版进行微加工的研究中, 对于线偏振和圆偏振这两种偏振光, 随着双脉冲之间时间延迟的变化, 样品表面所产生的微突起结构的宽度在 0-400ps 的范围内都没有明显的变化, 但它们的高度在 1-10ps 的范围内都呈现明显的下降, 而在此时延范围以外却没有明显的变化。又根据双脉冲双温模型对飞秒激光微加工金属铬掩模版的模拟分析, 可以判断金属样品表面微突起结构的产生涉及到了金属中电子-声子的耦合过程, 并且电子和声子的

耦合作用在减少微突起结构的形成趋势方面起到了重要的作用。这一实验结果证实了双脉冲双温模型的有效性,也有利于对超短激光脉冲与材料相互作用的动力学过程的进一步探索。

此外,还利用有限元方法并结合超快热弹性模型对飞秒激光微加工金属铬掩模版的过程进行了模拟和分析,很好地解释了微突起结构的形成原因,并与实验结果进行对比,在圆锥形微突起结构的形状和高度方面两者基本一致,这也从实验上证实了超快热弹性模型的合理性和有效性。

6 总结和展望

随着飞秒激光技术的发展,飞秒脉冲激光在材料精细加工中变得越来越有吸引力,尤其是在微加工、微光学和微电子学的领域中。相对于长脉冲激光,飞秒脉冲激光的优势在于,在脉冲持续的很短时间内电子来不及向周围的晶格传递能量,从而积聚极高的能量,并最终导致高度局域化激光破坏。利用飞秒脉冲激光进行微加工具有:热损害小,移除效率高,可加工各种材料以及精确控制加工尺寸等诸多独特优点。正因为如此,飞秒激光微加工也越来越受到科研人员广泛的关注和研究。

本论文围绕飞秒激光微加工这一主题,对飞秒激光微加工金属铬掩模版进行了深入细致的理论与实验研究,着重开展了以下几个方面的工作:

- 分析对比了飞秒激光脉冲与物质相互作用的各种理论模型,并针对贵金属金和过渡金属铬在不同入射激光能流通量下的双温模型方程进行了数值模拟与计算,这为研究飞秒激光微加工金属材料提供了理论上的基础;
- 利用飞秒激光脉冲分别对玻璃和石英衬底的金属铬掩模版进行微加工,发现两种样品表面均有波纹状的微突起结构产生。这些微突起结构的高度随着激光功率的增大而增加,并在一定功率下达到饱和状态,它们的形貌、尺寸和高度取决于衬底材料以及入射飞秒激光的脉冲参数和能流通量。通过化学方法证明了这些微突起结构是由玻璃和石英衬底的主要成分 SiO_2 组成的,并非样品表面的铬元素。此外,通过适当选取飞秒激光功率和加工速度,还在金属铬掩模版上制作了两种不同周期和线宽的光栅结构。该工作发表于《中国激光》2007 年第 34 卷 5 期, PP.715-718;
- 开展了双脉冲飞秒激光微加工金属铬掩模版的研究,发现在单个脉冲强度稍低于阈值时,双脉冲飞秒激光烧蚀过程中存在着时域的烧蚀窗口效应。即当双脉冲之间的时间延迟介于这一窗口之内时,对金属铬掩模版的烧蚀现象就比较明显,并且其表面的反射率会一直保持在一个较低的水平上。当双脉冲之间的时间延迟超出这一窗口之后,对金属铬掩模版的烧蚀就变得不再可能,而且其表面的反射率也急剧上升到一个较高的水平上。通过对双曲线型双温模型方程中的体激光源项进行修改,给出了双脉冲下的双温模型方程,并成功用来解释上述双脉冲飞秒激光烧蚀过程中的时域烧蚀窗口效应。该工作发表于 *Optics Communications*, 现已录用,正在出版发表;

- 进行了偏振飞秒双脉冲微加工金属铬掩模版的研究,发现无论是线偏振还是圆偏振飞秒激光,它们在样品表面所造成的微突起结构的高度都是在 1-10ps 的双脉冲时延范围内呈现明显的下降,而在此时延范围之外并没有什么大的变化,这说明微突起结构的形成与偏振状态无关。而通过对双脉冲双温模型的模拟分析,发现在 0-400ps 的双脉冲时延范围以及 $10\text{-}5000\text{Jm}^{-2}$ 的激光能流通量范围下,实验所用铬掩模版中电子-声子相互耦合的弛豫时间都在 1-10ps 的范围内,这说明微突起结构的形成过程可能涉及到电子-声子的相互耦合过程,而且电子-声子的耦合过程对减少微突起结构形成的趋势起到非常重要的作用。该工作发表于《中国激光》2008 年第 35 卷 5 期, PP.768-771;
- 利用有限元方法并结合超快热弹性模型,对飞秒激光微加工金属铬掩模版的过程进行模拟分析,很好地解释了微突起结构的形成原因。特别是在圆锥形微突起结构的形状和高度上,数值模拟与实验结果相符很好,这也从实验上证实了超快热弹性模型的合理性和有效性。该工作发表于 *Chinese Optics Letters*, 现已录用,将于 2008 年第 6 卷 8 期上发表。

现阶段已经完成的飞秒激光微加工方面的理论与实验工作只是初步的,还有很多方面的工作需要进一步开展和完成:

- 超短激光脉冲与各种材料相互作用理论模型的数值计算与分析;
- 皮秒超声学 (Picosecond Ultrasonics) 的相关理论与实验研究;
- 表面等离子体基元 (Surface Plasmon Polaritons, SPPs) 的激发与探测等。