

飞秒光纤激光器的发展及其工业应用

王玉英

1 引言

自超短脉冲光学问世以来,已经历了约 25 年的发展历程,飞秒激光器现已在工业加工中得到应用。

飞秒光纤激光器利用支撑光通信发展的光纤技术实现了集成化,使超小型激光器达到了高可靠性。最新研制的系统巧妙地利用光纤中的非线性现象,使其脉冲能量接近以往利用再生放大和盘形激光技术的固体激光器的能量。这种飞秒脉冲光纤激光器有望应用于超微细加工领域。目前,光纤单模传输技术的开发已取得进展,更高能量、更高功率的光纤激光器不久将展现在人们的面前。

2 飞秒激光器的历史

超短脉冲激光技术的诞生可追溯到 1980 年由 Fork 验证的锁模染料激光器。这项技术使研究人员获得了 100 fs 的超短脉冲激光光源,从此促进了世界性超短脉冲光学研究事业的蓬勃发展。超连续光源和多光子显微镜等的发明,以及超高速泵浦探测分光光谱的实现均基于锁模染料激光器。

由于染料激光器存在着脉冲能量有限、结构复杂所带来的不稳定性等问题,因此这种超短脉冲光学新技术很难得到广泛应用。锁模钛宝石(TiSAF)激光器的问世解决了上述问题。TiSAF 具有 600~1 000 nm

的较宽增益带宽和优异的热特性,是一种产生和放大超短脉冲的理想晶体。TiSAF 为多光子显微镜的实用化和超高速泵浦探测分光光谱的实现做出了贡献。21 世纪初, TiSAF 飞秒脉冲的产生首次得到了验证。

TiSAF 激光器在物理学和化学的科学研究中已取得了一些重要成果,但飞秒技术要在工业中得到应用尚存在诸多问题,如能量效率低,光学零件体积大,稳定性和可靠性差等问题。近年来,虽试制成功了掺 Yb 晶体的棒状或盘形激光器,但仍存在着结构复杂、稳定性和可靠性差等问题。

与此相反,光纤激光器具有小型和高可靠性能等特点,其基本特性非常适于工业应用。自 1993 年起,科研人员开始研发飞秒光纤激光器。

下面分别针对提高振荡器的稳定性和光纤放大器的高功率化以及高能量化等内容,叙述飞秒光纤激光器的发展。

3 提高振荡器的稳定性

1990 年, Fermann 等人首次验证了飞秒锁模振荡器,此后又提出了若干种方式的振荡器。为保持激光器的偏振面,这些振荡器需要用机械方式旋转偏振面的叶片。此外,温度等外部环境干扰也会影响锁模振荡。为解决上述问题,科研人员在法布里-珀罗谐振腔的两端设置了法拉第转子,对偏振旋转进行共轭补

偿,并研制出 Femtolite™ 产品。该产品作为实验室研究用工具得到了广泛应用,同时作为光源安装在超高速光采样示波器和 THz 光谱分析仪上,这为飞秒激光器在工业中的应用开辟了道路。

近年来,保偏(PM)光纤、波分复用(WDM)、隔离器等作为保偏光纤器件得到了普及。科研人员先后开发了结构更为简单的振荡器和放大器,并研制出新型 Femtolite 产品,这是一种将传统产品进一步小型化且可靠性更高的新型产品。基波 1 560 nm 产品的输出功率为 60 mW; 双倍波 780 nm 产品的输出功率为 20 mW,脉宽为 100 fs。这种新型产品的出现使机械安装变得更加容易,有望在迅速发展的 THz 领域中起到通用型光引擎的作用。

4 高功率化

连续波激光器的实际使用效果得到了人们的广泛认可,而光纤激光器具有不易产生热透镜效应和由热引起的增益饱和的特点。实际上,对高功率化而言,最重要的因素是泵浦耦合技术,双包层光纤的出现对功率的提高有很大的影响。虽然不能把飞秒光纤激光器和连续波激光器相提并论,但其基本特点是一样的。图 1 给出了连续波光纤激光器和飞秒光纤激光器功率逐年提高的情况。由图可知,飞秒光纤激光器的平均功率大体上随单模连续波光纤激光器而变,至少在研究水平上不久将达到千瓦级。

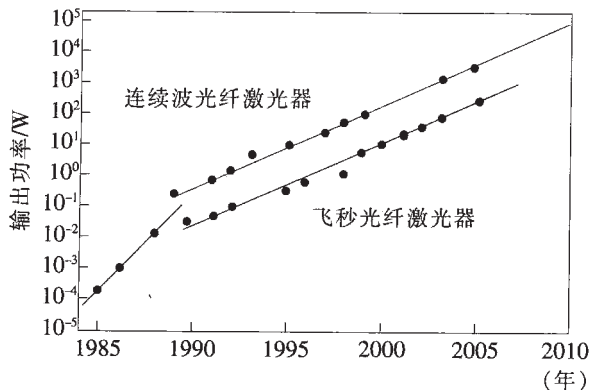


图 1 连续波光纤激光器和飞秒光纤激光器的功率逐年提高

5 光纤多级啁啾脉冲放大(FCPA)的高能量化

5.1 啁啾放大技术

与固体激光器相比,光纤激光器的缺点是脉冲能量低。对飞秒光纤激光器高能量化的尝试是基于 FCPA 技术,即在固体激光放大中应用了广为人知的啁啾脉冲放大技术,图 2 给出了 FCPA 的初期结构图。由图可知,脉冲能量大幅提高。随着脉冲能量的增大,由光纤非线性引起的相位滞后限制了脉冲的再压缩性。因此,初期 FCPA 可压缩最大脉冲能量至小于 100 nJ。目前,该结构仍是光纤激光器高能量化的基本结构,并发挥着重要作用。

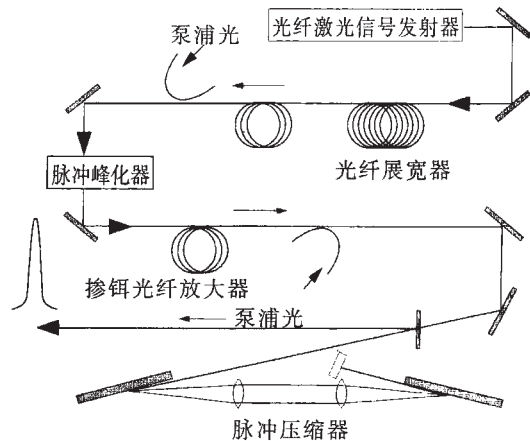


图 2 FCPA 的初期结构

5.2 有效纤芯面积的扩大

光纤的非线性效应来源于自相位调制和四波混频。自相位调制引起脉冲谱的加宽和位移,而四波混频则引起脉冲波长分量的耦合,但限制 FCPA 脉冲能量的主要因素是自相位调制。

光纤的脉冲啁啾时间是由各种设计因素设定的,但若确定此时间的延长率,则应依据光纤的有效纤芯面积决定自相位调制的大小。设非线性相应滞后的容许界限为 1π 时,最大脉冲能量与有效面积的关系如图 3 所示。图中分别对 3 个延长时间条件进行了比较。结果表明,脉冲能量的提高与有效面积的平方成正比。这是因为信号光的峰值强度与泵浦强度均

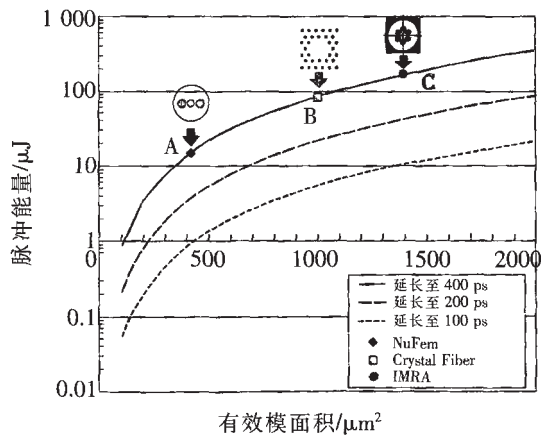


图3 有效模面积与脉冲能量

与有效面积成反比,即加大纤芯的有效面积是提高FCPA脉冲能量的有效方法。

总体而言,传输单模光需要单模光纤。但在用于FCPA较短的放大光纤中,如果注入的信号光与放大光纤的模相匹配,或选择性地提高放大光纤的高阶模损耗,则发现即使采用多模光纤也能保持高质量的光束。这一发现对于改善脉冲能量非常重要,因此开发有效大模面积的光纤已成为研究热点。

据报道,用传统方法试制的有效模截面积为 $420 \mu\text{m}^2$,数值孔径(NA)为0.06,芯径为 $30 \mu\text{m}$ 的光纤相当于图3中的A点。为计算方便,采用光纤中的16阶模。若扩大有效面积,NA则下降,或需要提高模数,但将导致两种后果,一是光纤的微弯曲使损耗增加;二是增大了从基模到高阶模的耦合,因此有效模截面积的极限约为 $500 \mu\text{m}^2$ 。近年来,扩大有效模截面积的方法得到了深入研究,即一种是在玻璃光纤截面上带有微孔的光子晶体光纤(PCF);另一种是由CrystalFiber公司开发的将微孔以六角形配置形成的包层光纤。新近报道的一种有效截面积达 $1000 \mu\text{m}^2$ 的光纤,相当于图3中的B点。将直径 $1.1 \mu\text{m}$ 的孔以 $12.3 \mu\text{m}$ 的节距堆积成蜂窝状,去除其中心的7个孔形成芯径为 $40 \mu\text{m}$,NA为0.03的纤芯。因这种光纤的NA非常小,所以对弯曲很敏感,与以往方法制作的光纤没有多大差别。要把这种光纤用作放大器需要把光纤设计成直线,因此需要非常大的外包装,这样便完全失

去了光纤激光器所谓小型化的优势。

科研人员基于独创的理念,开发了可弯曲的大有效模面积的PCF。试制的PCF的截面形状与出射光的近场图形如图4所示。所测得的 M^2 值为1.15。与同类的PCF相比,有少量的大孔。其独特的结构将弯曲带来的损耗降至最小,同时实现了极大的有效模截面积。这种光纤的有效模截面积相当于图3中的C点。在这种光纤中,因孔间隙(玻璃部分)使高阶模受到严重损失,但从设计上限制了大孔包层。此外,对弯曲损耗而言,这种由大孔组成的包层与纤芯的界面具有较大的有效折射率差,因此弯曲损耗变得很小。新试制的光纤有效模截面积为 $1400 \mu\text{m}^2$,是目前所见报道的最大值。图5比较了这种PCF的弯曲损耗。图中三角形和圆圈表示所试制的PCF在图中AA轴和BB轴上的损耗,而实线则表示计算时假定的晶体光纤弯曲损耗特性与具有相同有效模面积($1000 \mu\text{m}^2$)的传统光纤一样。由此图可知,新理念设计的PCF比传统光纤的有效模面积大很多,可以在更小的曲率半径下进行无损工作。

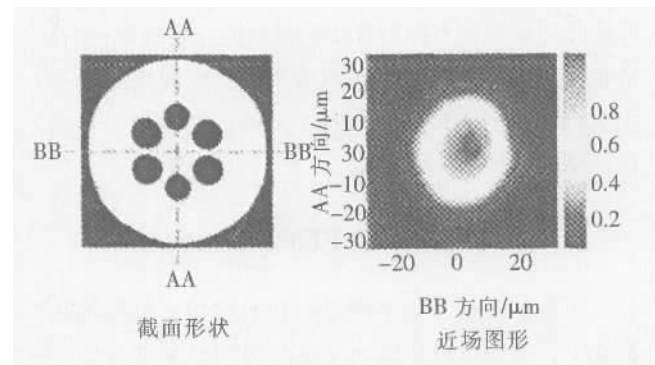


图4 PCF的弯曲损耗

5.3 非线性的有效利用

迄今为止,人们认为光纤的非线性是限制脉冲能量的主要原因,尤其在将自相位调制视为问题来讨论时。但实际上,这种自相位调制可以压缩飞秒脉冲并提高脉冲能量。1993年,Anderson等人预测,即便在正色散光纤中有自相位调制引起的谱线加宽和相位滞后,仍可以保持单啁啾的单脉冲。Tamura, Fermann等人也证实了这种现象的可利用性。因这种脉冲在

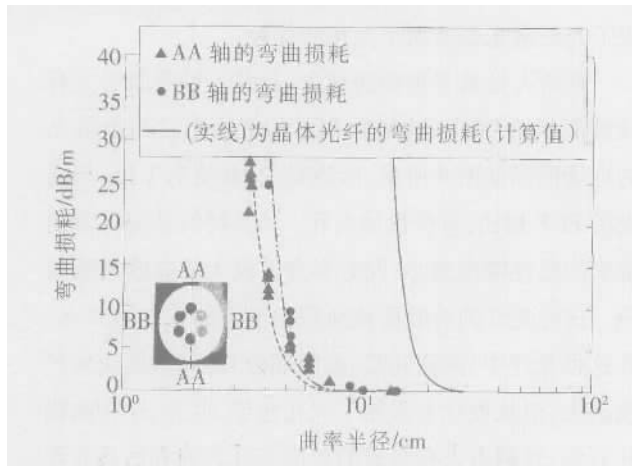


图5 PCF的弯曲损耗

保持光谱形状和单啁啾的同时能进行传输和放大,所以称为相似脉冲。

为使FCPA能在工业应用中实现高可靠性、稳定性及小尺寸而采用块状光栅作展宽器是完全不现实的。这里提供一种可行的方式,即用光纤作脉冲展宽器。但是,为获得高脉冲能量则需要使用长光纤,而这种长光纤与压缩器的三级色散的不协调难以实现飞秒压缩。对此,科研人员通过恰当地选择注入放大光纤的脉冲谱形状来控制自相位调制的三级色散,弥补了长光纤与压缩器的三级色散失配,并成功获得了 $20\ \mu\text{J}$ 的脉冲能量,同时实现了 $400\ \text{fs}$ 的压缩。人们将这种脉冲称为三次脉冲。

6 开发工业用的FCPA(μJewel)

飞秒加工具有如下特点:(1)对被加工材料的热影响少,因而可以控制加工部位周围纳米裂痕的产生;(2)加工碎屑少;(3)通过多光子吸收,可以加工透明材料。上述特点使飞秒加工受到诸多领域研究人员的极大关注。虽然飞秒加工具有上述优点,但飞秒技术目前仍止步于激光视力矫正(LASK)角膜切割、半导体领域光刻掩模的修复等有限的范围。

目前,将飞秒激光器应用于需要巨大脉冲能量的半导体投影光刻领域还不现实,但仍有其适用领域,如激光直接写入等。实际上,飞秒激光器在超微细加工领域、薄膜加工、局部材料改性等加工中有其优势,

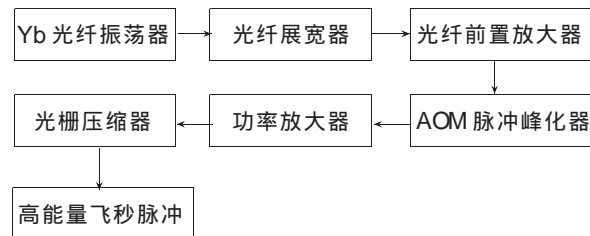
在很多情况下可以用脉冲能量为 μJ 或亚 μJ 的飞秒激光器进行理想的加工。然而由于Ti:SAF再生激光器的重复频率过低,目前仍很难达到实用生产要求。

如以工业应用为目的,则应将 μJewel 光纤激光器实现商品化。这种激光器利用光纤所具有的高稳定性、高可靠性和小型化等优异特性,实现了高重复性 μJ 级的脉冲能量。

表1给出了 μJewel 的基本特性,其基本结构如图6所示。

表1 μJewel 的基本特性

| | |
|---------------|----------------|
| 平均功率 | 400 mW@200 kHz |
| 脉冲能量改变 | <2% RMS |
| 脉冲时间宽度 | 500 fs@200 kHz |
| 重复脉冲 | 100 kHz-5 MHz |
| 偏振光 | 直线 |
| 光束质量(M^2) | <1.5 |
| 光束发散角 | <1 mrad |

图6 μJewel 的结构

使用掺Yb保偏光纤的锁模光纤激光振荡器在 $1045\ \text{nm}$ 波长进行啁啾放大产生重复频率为 $45\ \text{MHz}$ 的脉冲。脉冲通过光纤展宽器进行啁啾展宽,在单模Yb光纤被放大(前置放大),光音频效应模块(AOM)经脉冲采样之后,通过大模径双包层Yb光纤放大器(主放大器)将脉冲能量放大到 μJ 级,利用光栅压缩机将脉冲压缩至 $500\ \text{fs}$ 。通过改变AOM的设置,将重复频率从 $100\ \text{kHz}$ 设置到 $5\ \text{MHz}$ 。当设置为 $200\ \text{kHz}$ 时,脉冲能量为 $2\ \mu\text{J}$ 。通过基板的散热实现激光头的

冷却,且不需要外部冷却,电源为 90~220 VAC,耗电量为 400 W。除压缩器外,所有结构均靠光纤耦合完成,虽有 μJ 的输出能量,却完全不需要设置后的调整。

7 利用飞秒激光器进行微细加工

7.1 利用高重复激光器进行微细加工的特点

在飞秒加工中,当脉冲能量密度略超过烧蚀阈值时,可以进行高质量、高重复性和无碎屑的烧蚀加工。这是目前已得到证实的研究成果。当脉冲能量密度过大时,虽为飞秒加工,但在原材料的溶解、龟裂、热影响等方面,所获得的结果与利用纳米激光进行加工

的结果差不多。TiSAF 再生系统通常具有 1 kHz 的重复频率和约为 1 mJ 的脉冲能量,但要进行高质量的微细加工,必须用衰减器将能量大幅衰减后方可使用。相反,脉冲能量为 μJ 级、具有高重复频率的 μJewel 光纤激光器,既提高了微细加工的工艺速度,又提高了加工质量。

图 7 给出了在玻璃表面上加工直径为 50 μm 的圆形浅槽的实验结果。图中的参数分别表示激光器的重复频率、脉冲能量和加工步骤。图中(a)表明脉冲能量 100 μJ 过大,因而可以看出边缘的缺损和碎屑;(b)表明脉冲能量下降到 4 μJ ,表面状态虽有显著的改进,但边缘的缺损仍然可见;(c)表明通过降低加工

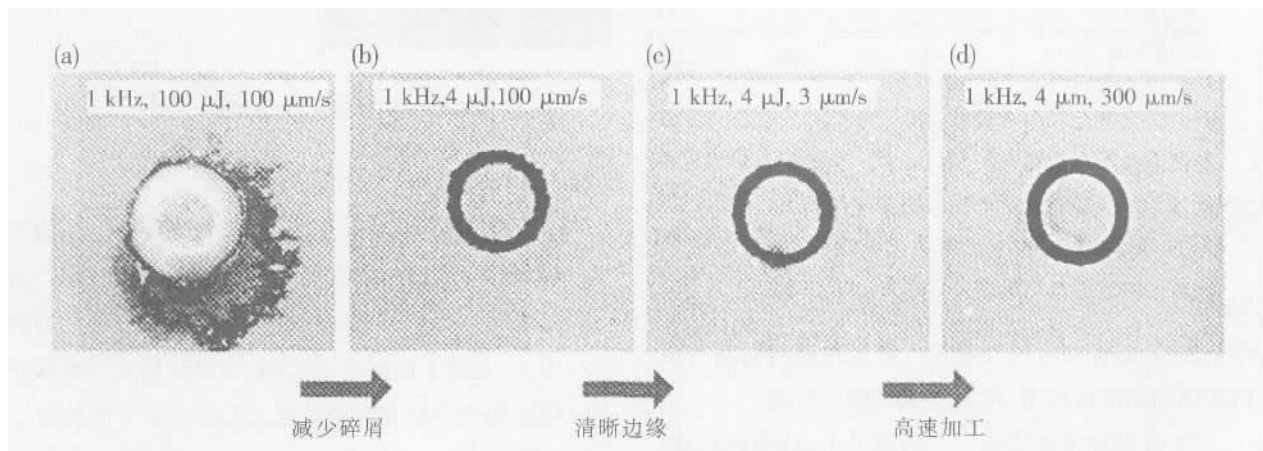


图 7 重复频率、脉冲能量与加工速度和加工质量的关系

工作台的移动速度,实现了无缺陷的理想加工,但加工速度变慢,从 1.6 s 延迟到 50 s; (d) 是将重复频率提高到 100 kHz,同时提高工作台的移动速度,将加工速度缩短至 0.5 s,使加工边缘的质量得到提高。由此可见,较低的脉冲能量与高重复频率的结合在微细加工中至关重要。

7.2 利用 μJewel 光纤激光器进行微细加工的应用实例

下面介绍几种实验结果。这些实验并不一定是在最佳加工条件下进行的,仅就利用 μJewel 光纤激光器进行加工的实例作以介绍。

7.2.1 铟锡氧化物(ITO)电极的修复

ITO 薄膜作为平板显示器等的透明电极得到了广泛应用。修复这种电极时,既不能在玻璃基板上留

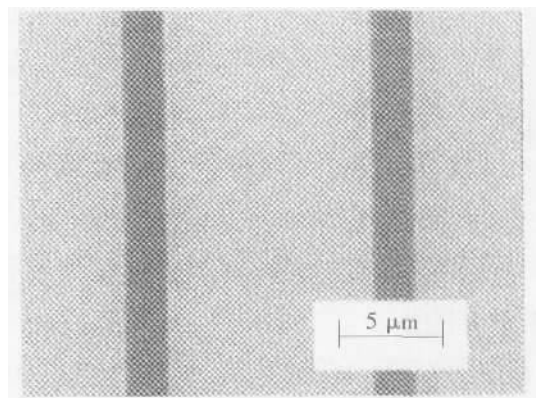


图 8 ITO 膜的去除

下碎屑,又不能出现 ITO 膜的剥离,要求仅去除所需部分的 ITO 膜。

利用 μ Jewel 光纤激光器对宽 $4\ \mu\text{m}$ 的 ITO 膜进行去除加工。图 8 为表面的显微照片,图 9 给出了表面仪的数据。实验表明,加工过程中没有膜的剥离,去除部位的底面为平面,玻璃衬底上没有碎屑,几乎完全去除了 ITO 膜。

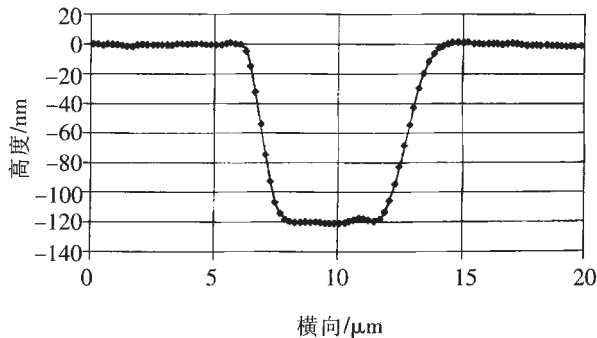


图 9 去除 ITO 膜的断面

7.2.2 光掩模的修复

在半导体和平板显示器等领域,用光掩模制造微细图案,主要是在石英和玻璃衬底上制作约 $100\ \text{nm}$ 的铬薄膜。这种情况需要在最大限度控制对衬底的损伤和铬剥离的条件下,达到去除铬膜的目的。

图 10 是在去除铬膜后,用原子力显微镜(AFM)对石英衬底表面进行测量的结果。衬底表面光洁度约为 $13\ \text{nm}$,没有损伤迹象,保持了光掩模的性能。

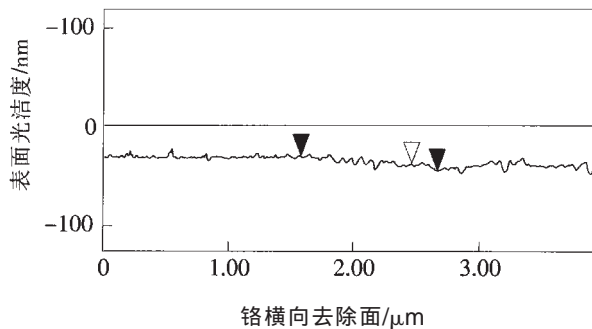


图 10 石英衬底的表面光洁度

7.2.3 微细打标

随着对跟踪能力要求的提高,提出了在像半导体芯片一样小的部件上打出微细标志的要求。图 11 为

在硅晶片上打标的实例。文字的高约 $10\ \mu\text{m}$,线宽小于 $1\ \mu\text{m}$,这种文字当然不能用肉眼识别,只能用扫描电子显微镜(SEM)照片才能辨认出加工部位的内部结构,从各种角度看,可视性良好。即使用 SEM 的分辨率也没有辨认出裂缝,没有发生因打标而使部件报废的现象。

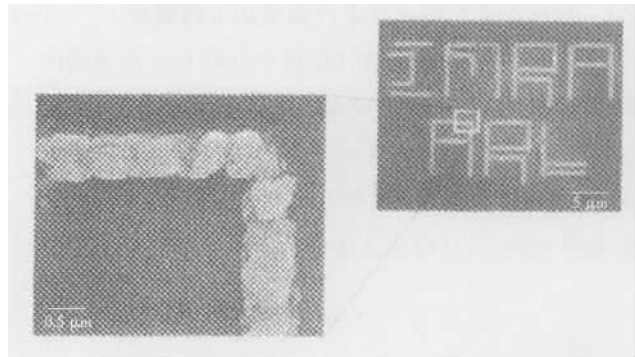


图 11 在硅晶片上打标

7.2.4 表面加网纹(纳米周期结构)

移动面的网纹影响微细线纹上润滑剂的性能和亲水性及疏水性,可根据加工条件改变摩擦特性。通过飞秒激光的照射,可加工出微米级或更小尺寸的网纹。图 12 是硅表面网纹的实例。该线纹随表面形状而变,线纹的方向具有与照射激光偏振面正交的性质。

7.2.5 光波导的制造

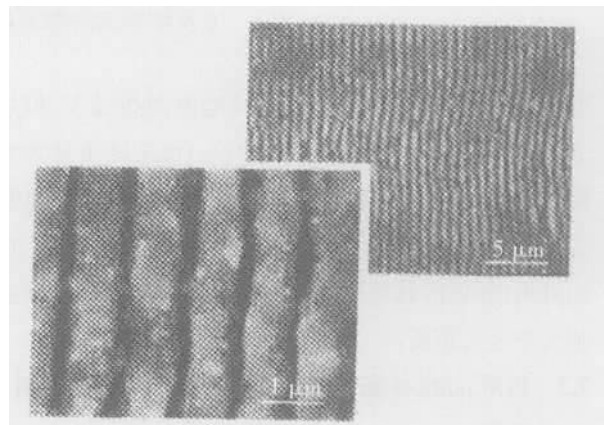


图 12 硅微小网纹

利用飞秒激光器可以在玻璃上直接写入光波导,以适宜的脉冲能量对玻璃内部照射高重复性飞秒激光,在焦点附近产生由多光子吸收引起的热,可在玻

璃内部产生残余应力,以改变该部位的折射率。实验中采用 μ Jewel 的双倍波(520 nm)激光器,在融石英玻璃上实现了无透射损耗的 0.9 dB/cm 的光波导。图 13 给出了用两个不同脉冲能量和扫描速度制造的光波导照片;图 14 给出了用不同扫描速度制造的光波导的模场直径。通过调整参数可任意控制波导半径。

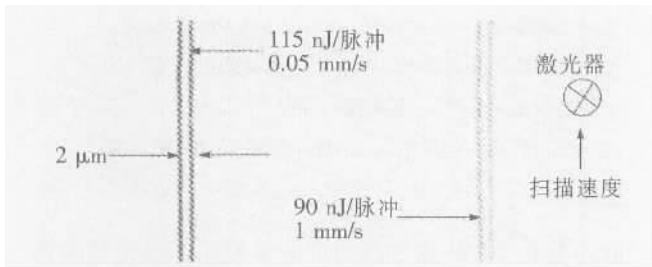


图 13 光波导

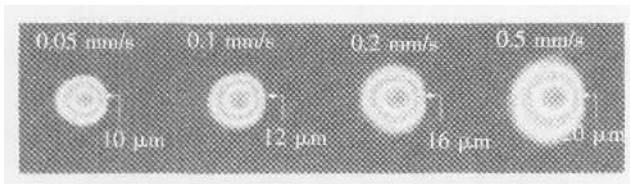


图 14 光波导的模场直径

7.3 其他应用

在 FCPA 的其他应用中,人们认为脉冲激光蒸镀 (PLD, Pulsed Laser Deposition) 具有极大的可行性。自 1987 年用准分子激光器作光源的 PLD 成功地制作出高温超导薄膜以来,已先后用于制造半导体、电介质、碳类、金属类以及有机高分子类的薄膜,尤其在探索新功能材料方面得到了广泛应用。就纳米激光器而言,蒸镀材料的等离子体重力喷流是经加热溶解

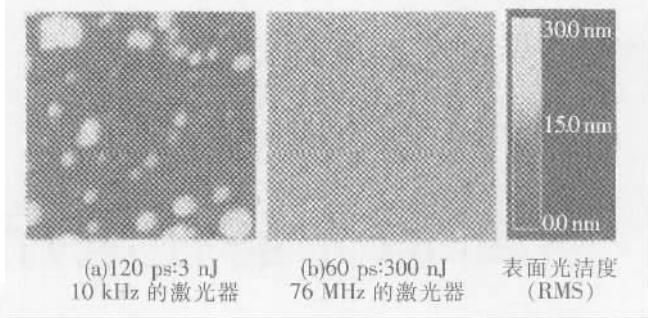


图 15 用 PLD 生产碳膜表面的比较

汽化蒸发等工艺形成。但飞秒激光器无需这样的加热过程,便可直接产生非常均匀的等离子体。图 15 为采用 PLD 生成碳薄膜的实例。图中 (a) 为用 AFM 对通用型纳米准分子激光器蒸镀的膜面光洁度的测量结果; (b) 为超短脉冲激光器所获得的结果。样品的测量范围为 $1 \mu\text{m}^2$ 。在 (b) 中虽可辨认出非常微细的凹凸,但完全看不到 (a) 中所能看到的飞沫,膜面光洁度已超过常规质量,实现了高质量膜面。

虽然研究实例尚少,但已在某些实例中证实了其优势,作为今后的全新制膜方法,倍受人们的关注。

8 结束语

利用光纤实现的 μ 级脉冲能量的飞秒激光器将对超微细加工等工业应用做出贡献。飞秒技术的应用从此步入发展阶段,将在很多领域得到应用。光纤的高性能化,尤其高能化和高功率化已确立了关键的单元技术。在不久的将来,脉冲能量为 100 μJ 输出功率为几十瓦的飞秒激光器有可能在工业中得到应用。(No.1)