



# 激光与物质相互作用及其精密工程应用

周锐<sup>1††</sup>, 李峰平<sup>2††</sup>, 洪明辉<sup>3\*</sup>

1. 厦门大学航空航天学院, 厦门 361005;
2. 温州大学机电工程学院, 温州 325035;
3. 新加坡国立大学电机工程系, 新加坡 117576, 新加坡

\*联系人, E-mail: elehnh@nus.edu.sg

††同等贡献

收稿日期: 2016-04-20; 接受日期: 2016-09-06; 网络出版日期: 2016-12-12

国家自然科学基金(编号: 61605162)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2013CBA01703)、温州大学激光加工机器人省重点实验室开放基金、中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室开放课题和福建省科技厅引进重大研发机构(编号: 2014I2005)资助项目

**摘要** 本文主要介绍了激光与物质的相互作用及其在精密工程中的应用. 为了更深入地研究激光与物质的相互作用过程, 在了解激光特点与原理的基础上, 分析激光与物质相互作用的动态过程及其机理, 通过对激光合成纳米材料的研究, 探索激光加工的具体过程和特点并加以广泛应用. 本文通过对4个应用实例的介绍, 简述了激光在精密工程中的具体应用, 包括激光超快直写、激光微阵列印刷、超衍射极限的纳米光学加工以及利用激光加工微纳尺寸杂化结构等技术, 展现激光加工技术在当今科研与实际应用中的巨大潜力. 这些研究如今已经引起了学术界和产业界的高度重视, 将会给我们的生活带来巨大的影响.

**关键词** 激光微加工, 激光纳米加工, 激光烧蚀, 微透镜阵列, 超疏水

**PACS:** 42.30.Sy, 42.62.Be, 42.62.Cf

## 1 引言

自1960年激光问世以来, 因其具有高单色性、高强度、高方向性和高相干性等优异的物理特性和广阔的应用领域而倍受科研人员的青睐, 并得到了长足的进步和发展, 日益突显出它在物理、化学、生物、医学等各个领域中的重要性. 在早期, 科研人员还将注意力集中在激光本身的特性, 随着技术的进步, 人们逐渐开始关心激光和其他科学领域的交叉应用, 考虑如何利用激光的特性, 把激光作为一种工具或者手

段应用于科研和生活中<sup>[1-5]</sup>. 激光与物质相互作用及其在精密工程中的应用就是其中的一个重要方面.

激光与物质相互作用的研究主要包括: 探索激光与物质相互作用出现的各种效应及其机理; 开拓激光在物性研究中的应用, 逐步将激光发展成为研究和探测物性的重要手段; 探索激光在改变物质的性质、状态等方面的作用; 探索产生激光的新物质和新机制<sup>[6]</sup>. 这些研究受到了各国科研人员的重视, 人们运用各种新的设备和技术, 投入了大量的人力、物力、财力进行研究.

**引用格式:** 周锐, 李峰平, 洪明辉. 激光与物质相互作用及其精密工程应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 024201  
Zhou R, Li F P, Hong M H. Laser interaction with materials and its applications in precision engineering (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 024201, doi: 10.1360/SSPMA2016-00213

## 2 激光原理与特点

激光是20世纪以来,继原子能、计算机、半导体之后,人类的又一重大发明,被称为“最快的刀”、“最准的尺”和“最亮的光”。

众所周知,粒子自发地从高能级激发态向低能级基态跃迁称为自发辐射,1917年爱因斯坦从理论上指出,除自发辐射外,处于高能级上的粒子还可以以另一方式跃迁到较低能级.他指出当在一定频率下一定数量的光子入射时,也会引发粒子以一定的概率迅速地从高能级跃迁到低能级,同时辐射与外来光子频率、相位、偏振态以及传播方向都相同的两个光子,这个过程称为受激辐射,而这两个光子再激发高能级粒子跃迁到低能级获得4个特征相同的光子,如此反复,光信号将不断放大,这个被放大的光就是激光。

激光也是一种光,它除了具有普通光的性质外,还有以下几种普通光不具有的优异特性<sup>[7]</sup>:

(1) 高单色性: 单色性是指光的频率或波长单纯的程度.原子吸收或发射所产生的任何谱线,其频率或波长都在一定的范围内,即有一定的宽度,这是衡量光的单色性好坏的量度.由于工作物质中的粒子在有限的几个高低能级之间实现粒子数反转,因此,激光振荡只发生在一条或几条谱线间,所以激光的谱线宽度很窄,单色性很好.但需要注意的是,单色性的好坏也是相对的,一般而言,连续激光具有高单色性,而对于超短脉冲激光,其谱宽则可达10 nm以上。

(2) 高方向性: 普通光源的自发辐射,由于光是直线传播,发光面发出的光向各方向传播,因此,发散角很大.而激光由于是受激辐射,谐振腔对光束方向性有限制,激光束的发散角很小,一般是毫弧度数量级.因此,激光的方向性很好,这表明激光即使传播到很远的地方仍可保持高强度。

(3) 高强度: 光强度定义为单位时间通过单位面积的功率,单位为 $\text{W}/\text{cm}^2$ .对于普通光源来说,由于方向性很差,所以光强度很低;而对于激光来说,由于发散角很小,所以光强度很高。

(4) 高相干性: 光波在空间能够产生干涉的最大距离称为相干长度;能够产生干涉的最大时间间隔称为相干时间.由于激光的谱线宽度很窄,所以它的相干长度和相干时间很长.激光的时间相干性和单色性密切相关;激光的空间相干性和方向性密切相关。

## 3 激光与物质相互作用的动态过程

激光与物质相互作用的物理基础是物质对激光的吸收.当激光照射在物质表面时,由于物质的折射率大于空气的折射率,一部分光线被反射,产生 $180^\circ$ 的相变;剩下一部分进入材料,能量以指数的方式递减。

当把激光作为一种工具或者手段进行微纳加工时,会引起两种复杂的过程,分别是光化学过程<sup>[8]</sup>和光热过程<sup>[9]</sup>.其中光化学过程是由于光引起的光化学反应,将化学键打断,从而使物质改性,主要应用于光刻等技术中.相比之下,光热过程应用更为广泛,其物理过程也需要研究清楚.光热过程大致是激光照射在物质表面,物质中的电子吸收光子,使电子能量上升,温度升高.电子再把能量传递给晶格,这个过程大概在皮秒数量级的时间内完成.通过电子和晶格的相互作用,晶格获得能量,如果能量较高,就使得物质升温熔化甚至气化.具体划分,大致可以分为以下几个过程<sup>[10,11]</sup>:

第一个过程: 当电子吸收光子后,在大致 $0-10^{-13}$  s的时间内达到准热平衡状态.激发态电子初始分布于一系列的能级,通过电子-电子散射迅速达到准热平衡状态,电子的能量服从费米-狄拉克分布规律.此时,物质吸收的激光能量全部被束缚于电子系统中,电子的温度要比周围的晶格高得多。

第二个过程: 在 $10^{-13}-10^{-12}$  s这段时间内是电子能量的弛豫过程.处于准热平衡态的自由电子主要通过辐射受限纵向光学波声子(LO声子)向晶格传递能量。

第三个过程: 在 $10^{-12}$  s之后,是声子动力学过程.这个过程主要是声子-声子弛豫,LO声子耦合成声学声子辐射,最终声子按照玻色-爱因斯坦分布规律在布里渊区重新分布.此时,被吸收能量分布接近热平衡状态。

第四个过程: 这个过程中,能量在晶格间进一步扩散.能量通过电子漂移和晶格-晶格耦合向周围扩散,扩散的时间取决于物质的热扩散特征长度和热扩散系数,扩散时间大致在 $10^{-11}$  s量级。

可以看出这是一个很复杂的动态过程,包括能量吸收、传递、温度上升甚至相变.正是由于过程的复杂,我们可以进行很多科研创新,把这个过程研究清楚,并带来诸多的应用.另外,材料在激光加工之后就会被快速地蒸发走,这就产生了两个很重要的应用:

一个是收集蒸发后的材料,用来制造纳米材料<sup>[12-14]</sup>;另一个就是材料表面在蒸发后产生微米、纳米尺度的构造<sup>[15-17]</sup>.

## 4 激光合成纳米材料

高能激光脉冲辐射靶材表面,会使其表面迅速加热、熔化、蒸发出很多材料,因此可以利用这个特点来进行微纳米材料的合成<sup>[14,18,19]</sup>.如图1所示,我们可以将靶材放在真空(可以使产生的等离子体飞行距离更远)或其他气体环境中,靶材可以是任何材料,金属、半导体甚至是聚合物,对面的支架上放一块基板用以进行纳米材料的收集.然后,将具有高强度的脉冲激光束经透镜聚焦,能在焦点附近产生数千度乃至上万度的高温,这个高温可以熔化所有的材料,产生等离子体羽流.用这个脉冲激光照射在靶材的表面时,入射光一部分被反射,一部分被吸收,一旦表面吸收的脉冲激光能量能产生超过蒸发所需要的温度,靶材就会蒸发溅射出大量的原子、电子和离子,从而在靶材表面形成等离子体<sup>[20]</sup>.由于反冲效应(喷发),等离子体从靶材表面溅射出来,在脉冲激光停止照射后,等离子体中的原子就会迅速地冷却、成核,并被靶材对面的基板所收集,这样就能获得所需的纳米材料.材料的性质可以通过对环境中的气压、脉冲激光照射的能量密度、靶材与基板之间的距离的控制来进行调节.依靠脉冲激光和靶材的相互作用产生的反冲压力,不同大小的纳米粒子会因重力作用被溅射到离烧蚀区域不同距离的地方.因此,不同大小的纳米颗粒可以通过纳米粒子的收集器在离靶材距离不同的地方收集到.由于尺寸越小的颗粒飞行距离会越远,所以靶材与基板之间的距离越远,收集到的纳米颗粒的尺寸就会越小.

这种方法称为激光气相烧蚀法,有很多的优点:操作可控性好、便利、易于排出杂质;反应室与激光器相互分离,产物不会对激光产生污染;可瞬间提供超高温、超高压等极端条件,用于特殊纳米结构的合成;反应器壁不参与整个反应,对产物无污染,保证产物纯度;反应区与周围环境的温度梯度较大,利于颗粒快速凝结<sup>[21]</sup>.用这种方法,可以合成碳纳米颗粒、金属纳米颗粒、硅纳米颗粒等纳米材料.除此之外,激光液相烧蚀法也比较常用<sup>[22,23]</sup>,与气相最大的不同

在于有一个会限制激光作用使材料向外膨胀的液体环境,等离子体在碰撞、冷却的过程中都会受到液体的作用<sup>[24]</sup>.

利用脉冲激光与物质的相互作用合成纳米颗粒是由光热过程导致的.光热过程必须要有电子参与.从图2中可以看出,对于金属来说,不存在禁带,很容易产生很多的自由电子;对于半导体,禁带较小,如果禁带 $E_g$ 小于激光能量 $h\nu$ ,低能级的电子就会跃迁,产生电子-空穴对;对于绝缘体和禁带较大的半导体,就要用超短脉冲激光(皮秒或飞秒激光)使材料进行非线性的多光子吸收,也可以产生电子.

## 5 激光加工过程和特点

激光加工的物理基础是激光与物质相互作用,它

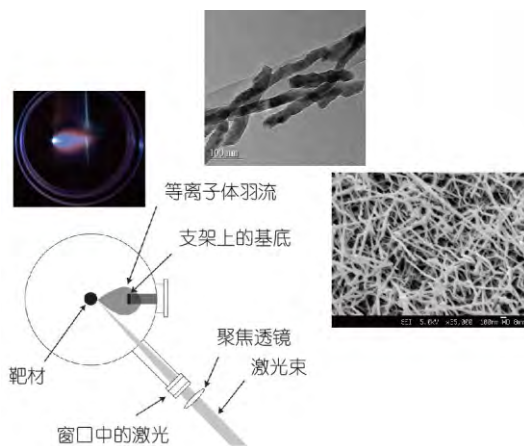


图1 (网络版彩图)脉冲激光合成纳米材料的实验装置  
Figure 1 (Color online) Experimental setup for nanomaterials synthesized by pulsed laser.

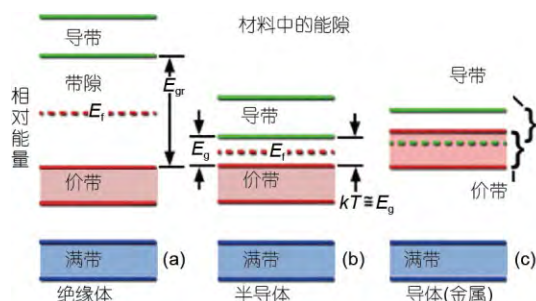


图2 (网络版彩图)材料的能量带隙. (a) 绝缘体; (b) 半导体; (c) 导体  
Figure 2 (Color online) Energy band structures in materials. (a) Insulator; (b) semiconductor; (c) conductor.

既包含复杂的微观量子过程, 也包含宏观的过程. 这些包括物质对激光的吸收、折射、反射、光电效应、气体击穿、干涉等<sup>[25]</sup>.

当激光照射在物质表面时, 随着时间的延长, 将在物质的表面和内部产生一系列的变化过程, 从图3中可以看出, 大致可以分为以下4个过程:

(1) 加热过程: 当激光照射在物质表面时, 除了发生散射和反射, 大量的光子会被电子吸收, 传递给晶格并发生热扩散, 使物质的温度上升. 物质对激光的吸收率受材料结构、激光波长等因素的影响.

(2) 表面熔化过程: 物质吸收激光能量的时间越长, 物质的温度越高. 当温度超过熔点时, 材料表面开始熔化, 随着照射时间的延长, 熔池也会不断扩大.

(3) 气化过程: 如果激光的能量密度足够高时, 物质表面的温度超过气化温度, 物质表面就会发生气化现象.

(4) 烧蚀过程: 随着激光照射时间的延长, 熔池表面将会生成等离子体, 形成表面烧蚀.

利用这些过程, 我们可以进行各种各样材料的精密加工<sup>[26]</sup>. 除了激光打孔<sup>[27,28]</sup>、切割<sup>[29,30]</sup>、焊接<sup>[31,32]</sup>、热处理<sup>[33,34]</sup>等这些人们已经比较熟悉的技术, 也可以应用于近年来非常热门的3D打印技术<sup>[35,36]</sup>. 例如, 在生物医学上, 我们可以用激光3D打印制造出与人体骨骼特征相似的多孔金属, 造福人类; 在军事上, 可以将打印设备运往战争前线进行军备修理, 直接降低了把军备来回运输进行修理的成本; 在航空航天上, 可以进行航空发动机零件的快速修复和航空用钛合金结构件的直接制造. 在欧美, 已经将快速制造技术视为提升航空航天、汽车及武器装备等核心领域水平的关键支撑技术之一.

与机械加工相比, 激光加工, 尤其是飞秒超短脉冲激光加工技术具有众多优势<sup>[37]</sup>, 如加工精度高, 热影响区域小, 材料变形微弱, 适用于多种材料, 加工系统灵活性好, 易于与计算机系统联合, 从而实现自动化操作等.

(1) 激光加工属非接触加工<sup>[38]</sup>: 激光加工时不用刀具, 切边无机械应力, 也无刀具磨损和替换、拆装问题, 为此可缩短加工时间; 激光焊接无需电极和填充材料, 再加上深熔焊接产生的纯化效应, 使得焊缝杂质含量低, 纯度高. 利用光的惯性, 在高速焊接或切割中可急停和快速启动.

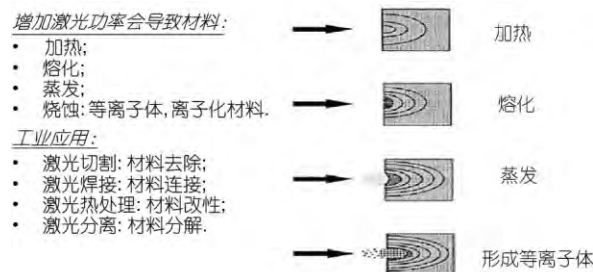


图3 激光加工过程  
Figure 3 Mechanism of laser processing.

(2) 加工质量好, 精度高<sup>[39]</sup>: 由于激光能量密度高, 加工时间短, 与传统机械加工相比, 工件受到热变形的影响小, 使得加工质量可以明显上升; 激光还能利用透镜进行聚焦, 使得激光加工光斑非常小, 加工精度很高.

(3) 加工效率高<sup>[39]</sup>: 激光能量密度高, 在很短的时间内就能熔化工件. 因此, 激光加工在很多工艺上的效率都比机械加工要高得多. 例如, 激光切割的效率可以提高几十倍甚至上百倍; 激光打孔的效率能提高几十倍至上千倍; 激光焊接也能提高几十倍的效率.

(4) 材料利用率高且经济效益高<sup>[40]</sup>: 激光加工与其他加工技术相比可节省材料10%–30%, 可直接节省材料成本费, 且激光加工设备操作维护成本低.

(5) 适用于多种材料<sup>[41]</sup>: 对于金属和禁带较小的半导体, 普通激光就可以进行加工; 对于绝缘体和禁带较大的半导体, 利用紫色激光或超快激光也可以进行加工. 因此, 几乎所有的材料都可以用激光加工.

(6) 加工的灵活性<sup>[39]</sup>: 激光易于聚焦、发散和导向, 可以方便地得到不同的光斑尺寸和功率大小, 以适应不同的加工要求, 并且通过调节外光路系统改变光束方向, 与数控机床、机器人进行连接, 构成各种加工系统, 实施对复杂工件进行加工. 激光加工不受电磁干扰, 可以在大气环境中进行加工.

(7) 热影响区域小<sup>[42]</sup>: 虽然加工部位的温度较高, 产生的热量很大, 但加工时的移动速度很快, 其热影响的区域很小, 对非照射的部位几乎没有影响. 在实际加工过程中, 加工工件基本上不产生变形.

## 6 精密工程领域应用

精密工程是塑造我们生活方式的重要生产支柱之一. 举个例子, IBM公司在1956年生产了世界上第

一个硬盘RAMAC 305, 价格昂贵(每月租金160000美元)、存储容量小(5 MB)、体积庞大(约有两个冰箱大, 一吨重). 但是现在, 只要几百元就可以很容易地购买到手机大小, 存储容量1 TB以上的硬盘. 这些都归功于先进的精密工程技术, 它可以低成本地制造出功能化的微纳米结构.

由于激光与物质相互作用相比于其他作用方式具有无可比拟的优势, 例如热影响区小, 加工精度高; 激光设备无需和材料相接触, 灵活稳定; 能够在空气、真空, 或者液体环境中实现高速加工; 各态物质瞬间熔化、蒸发和形成等离子体. 因而在过去几十年中, 激光与精密工程结合地越来越紧密, 我们见证了激光精密工程在各种生产线中的广泛应用.

结合其他先进的加工设备和技术, 不断往更微观的领域发展是现在激光精密工程的一个研究方向. 如何将精密工程推进到纳米特征尺寸的领域, 制造更小、更快和更功能化的器件; 如何克服纳米加工时速度慢, 产品数量少的缺点; 如何在激光加工时突破光学衍射极限, 这些都是现如今激光精密工程的研究热点, 吸引了大量的研究人员. 在这里, 对我们在这些方面所做的研究工作和进展做一些介绍.

第一: 超快激光直写. 激光直写对加工精度有很高的要求, 因此, 一般采用飞秒或皮秒激光减小热影响区, 提高精度. 图4表示激光热影响区域和激光脉冲时间即脉宽有密切的关系. 例如, 连续激光器发出的激光持续时间长, 在这段时间内, 连续激光能量被电子吸收、电子与晶格、晶格与晶格发生耦合等各种物理过程, 物质通过不断吸收光子能量持续增加受激电子数, 受激电子又不断将能量以热的形式传递给周围晶格, 使得固体物质发生相变, 其热影响区域在毫米数量级, 因此对精密加工要求的工件不够理想. 纳秒脉冲激光的热影响区域在100 nm左右, 因此它可以用作微米级别的精密加工. 而皮秒或飞秒超短脉冲激光的热影响区域更小, 激光脉冲持续时间远小于热扩散时间, 这是因为电子和晶格之间的弛豫过程在皮秒数量级, 脉冲激光能量被电子吸收的速度远大于其传递给晶格的速度<sup>[43]</sup>, 因此产生的热影响区域在10 nm左右, 可以做到纳米尺度的高精度加工.

举个例子, 我们可以用只有1–10 μm厚度的聚己内酯(PCL)薄膜制造人造皮肤, 而皮肤需要良好的呼吸功能, 这是人造皮肤能否代替真人皮肤的前提. 为

了达到这个要求, 可以在薄膜上扎孔. 在以往的研究中, 是用细针机械扎孔, 但用这样的方法获得的孔洞并不理想而且容易破坏薄膜. 采用飞秒超短脉冲激光器加工可以实现微米数量级的孔洞, 微孔的尺寸大小可以通过调节激光束的焦距和脉冲激光的能量来控制, 不仅可以实现穿孔还可以实现半穿孔, 最重要的是获得的孔洞形状完好, 孔洞周边没有损伤且一致性强的加工效果, 这在图5中可以清楚地观察到. 这项技术的成熟可以为更广阔的医学领域做支撑, 现下人造血管是一个很大挑战的课题, 医学上一般用动物血管代替, 人体内皮基膜是血管发育和稳定的关键<sup>[44]</sup>, 如果使用由飞秒超短脉冲激光加工后的特殊PCL薄膜可以代替血管内皮基膜, 在血管自我修复时发挥作用, 那么这将是医学领域的福音.

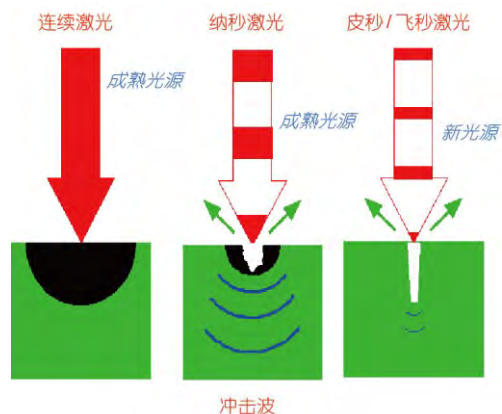


图4 (网络版彩图)激光热影响区域  
Figure 4 (Color online) Laser heat affected zone.

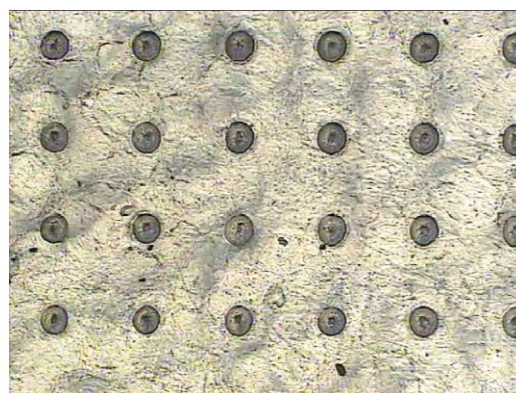


图5 (网络版彩图)激光加工的可降解薄膜  
Figure 5 (Color online) Laser processing of biodegradable thin film.

第二: 激光微透镜阵列印刷. 激光加工的尺寸越小, 精密度越高, 速度就越慢, 很难满足工业上大规模的快速生产的需求. 微透镜阵列的研发极大地提高了加工效率. 微透镜阵列是指尺寸在微米量级的光学透镜按一定方式排列而成的阵列, 每个子透镜都能聚焦和成像, 给定图案或结构经过微透镜成像可以得到周期性大面积微纳图案或结构<sup>[45]</sup>. 利用脉冲激光辅助光刻技术可以制备出一块 $2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$ 大小排列100万个微透镜阵列<sup>[46]</sup>.

图6是微透镜阵列的加工装置, 利用微透镜阵列可以并行加工在几分钟内成功制造百万个开口谐振环<sup>[47]</sup>, 首先飞秒超短脉冲激光器通过扩束器, 光束可覆盖全部微透镜阵列, 依靠7轴纳米平移台可以快速完成高精度的微纳结构加工. 同时也可以利用微透镜阵列在多层塑料上加工构造不同的开口谐振环, 不同的构造有不一样的谐振频率, 因此将它们叠加在一起可以得到太赫兹宽带滤波器, 带宽可达到 $0.38\text{ THz}$ .

第三: 超衍射极限的纳米光学加工. 除了加工的精度和效率外, 如何解决衍射极限问题, 也是一个重要的课题. 激光加工的精密程度由波长决定, 在远场衍射情况下一般最小只能达到波长一半的尺度, 比如使用 $500\text{ nm}$ 的绿光只能得到 $250\text{ nm}$ 左右的线宽<sup>[48]</sup>. 使用特殊的手段可以使得激光加工到 $20\text{ nm}$ 甚至更小, 突破衍射的极限. 衍射的极限由光的远场衍射造成, 图7使用脉冲激光和原子力显微镜配合可以到 $10\text{ nm}$

的超高分辨率, 但是这个方法的速度十分缓慢, 实际应用前景还不是很明朗. 后来经过改进, 使用二倍频飞秒超短脉冲激光器和近场显微镜组合如图8, 在空气中可以加工到 $20\text{ nm}$ 的尺度, 但是速度仍然不够快. 另外一种方法是使用激光扫描共聚焦显微镜, 将微透镜放在目标物表面上衍生出纳米尺度的中心斑, 将光聚焦的更小<sup>[48]</sup>, 但是目前的加工速度还是无法满足工业化生产的要求.

为了获得快速的超高分辨率的加工水平, 目前新加坡国立大学洪明辉教授的研究团队正致力于探索使用波长更小的EUV极紫外短脉冲激光以实现 $10\text{ nm}$ 尺度的加工以及用激光冷却的方法控制原子的沉积以实现 $5\text{ nm}$ 尺度的加工.

第四: 功能独特的微纳尺寸杂化结构. 前三个示例介绍了如何加工二维尺度的结构, 对于加工三维尺度的结构, 脉冲激光同样适用. 我们知道莲花出淤泥而不染正是因为其表面附着一层超疏水材料. 所谓超疏水材料, 是指表面稳定接触角要大于 $150^\circ$ , 滚动接触角小于 $10^\circ$ 的材料. 它在工农业生产和人们的日常生活中都有着极其广阔的应用前景, 例如它可以用来防雪、防污染、抗氧化以及防止电流传导等<sup>[49]</sup>.

一般来说制备超疏水材料主要有两种方法, 一种是在固体基底表面上利用低表面能物质进行修饰<sup>[49]</sup>, 另一种是模仿植物叶片表面在表面修饰微纳结构提高其疏水性能<sup>[50]</sup>. 纳米结构对得到具有高接触角的

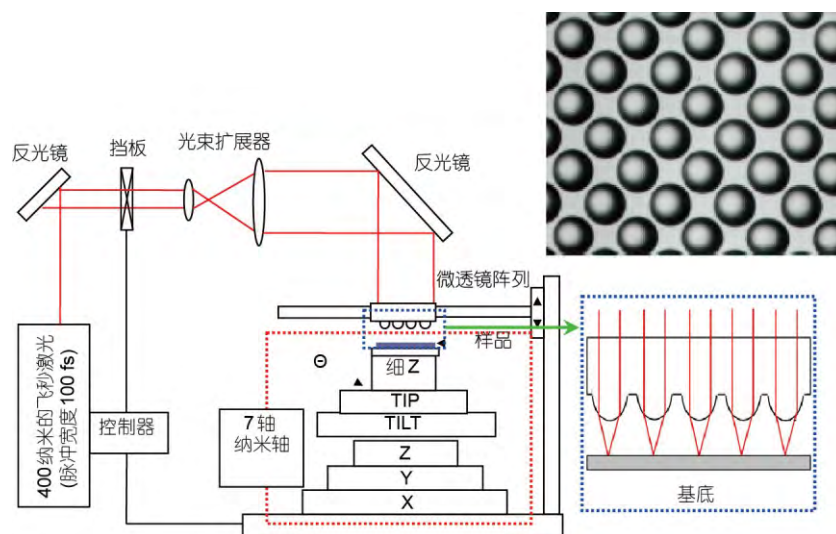


图6 (网络版彩图)微透镜阵列光刻装置  
Figure 6 (Color online) Laser micro-lens array lithography setup.

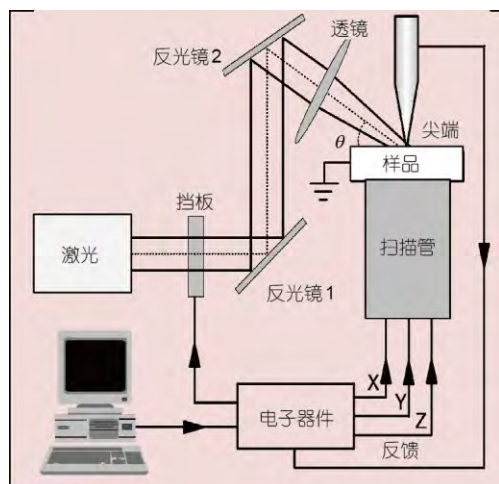


图7 (网络版彩图)激光和原子力显微镜组合  
Figure 7 (Color online) Combination of laser and atomic force microscope for nanolithography.



图8 (网络版彩图)激光和近场显微镜组合  
Figure 8 (Color online) Combination of laser and near-field microscope for nanolithography.

超疏水表面起着重要作用,而纳米与微米结构相结合的阶层结构可以有效地降低水滴在表面的滚动角<sup>[49]</sup>.图9就展示了一种短脉冲激光加工过的超疏水玻璃表面的水滴动力学过程.这个过程清楚地展示了水滴落在玻璃后依然保持着球形,而没有黏附在玻璃上,说明玻璃表面经过脉冲激光加工后表现出了超疏水性.

激光加工可以说是众多超疏水材料制备中难度最低且最经济的方法之一,激光加工过程不涉及机械运动,诸如材料的硬度和韧性并不会影响最终结果,并且激光加工可以减少材料产生裂痕和孔洞的可能性<sup>[50]</sup>.

## 7 结语

可以看出,激光与物质的相互作用具有重大科研价值和广阔的应用前景,不仅促进了学科的发展,也

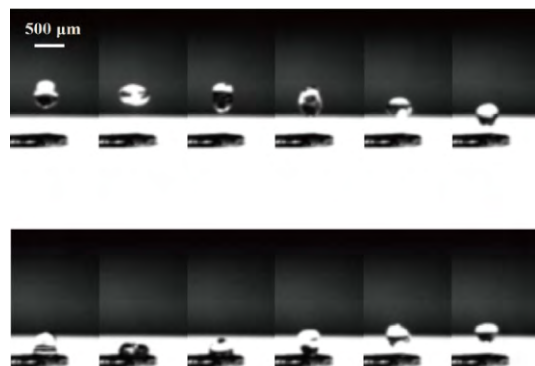


图9 激光加工的超疏水玻璃表面的水滴动力学过程  
Figure 9 Water droplet dynamics on super-hydrophobic glass surface made by laser micro/nano-processing.

推动了其他领域的进步.在医学上,可以进行研究、诊断、预防和治疗疾病;在军事上,可以用来激光制导、激光警戒和激光反潜;在航空上,可以用来发动机的制造和快速修复;电力、冶金、钢铁、机械工业等领域也开始越来越多地运用相关的技术.除此之外,在精密工程之中,激光的应用也越来越受到关注.例如,我们可以利用飞秒超短脉冲激光来减少激光热影响区域,做到纳米尺度的超精密加工;用微透镜阵列在非常小的区域中同时加工出成千上万的图形;我们甚至还用二倍频飞秒超短脉冲激光器和近场显微镜组合做到了超衍射极限的纳米光学加工.就连时下相当热门的3D打印技术,也与激光密切相关,例如,我们能够利用激光3D打印制造出微米级的纳米笼来捕捉分子,观察其物理特性.

在当今科研中,对于激光的研究主要集中在以下几个方面:第一,激光辐照效应和机理,包括激光照射效应诊断技术,激光诱导的超声及其应用等;第二,激光等离子体物理,包括等离子体的相互作用、产生机制和诊断等;第三,激光光谱技术及应用;第四,高功率激光器;第五,非线性光学,包括太赫兹源和其他变频转换;第六,激光加工,包括新设备研制和激光束转变等;第七,精密工程的应用,包括激光直写技术、超短脉冲激光加工和微纳尺寸的材料和构造的制造.这些方面的研究和突破将会给社会带来巨大的变革.

激光的出现,已经为社会的发展带来了诸多的影响,相信随着科学技术的快速发展,我们会越来越明显地感受到激光与物质的相互作用对于科学研究、国民生产和经济发展所带来巨大的推动作用.

## 参考文献

- 1 Fabbro R, Peyre P, Berthe L, et al. Physics and applications of laser-shock processing. *J Laser Appl*, 1998, 10: 265–279
- 2 Moncorgé R, Chambon B, Rivoire J Y, et al. Nd doped crystals for medical laser applications. *Opt Mater*, 1997, 8: 109–119
- 3 Rioux M, Tremblay R, Bélanger P A. Linear, annular, and radial focusing with axicons and applications to laser machining. *Appl Opt*, 1978, 17: 1532–1536
- 4 Chryssolouris G, Anifantis N, Karagiannis S. Laser assisted machining: An overview. *J Manuf Sci Eng*, 1997, 119: 766–769
- 5 Bass L S, Treat M R. Laser tissue welding: A comprehensive review of current and future. *Lasers Surg Med*, 1995, 17: 315–349
- 6 Ye P X, Zhang D Z. Study on laser interaction with materials (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 1986, 4: 302–306 [叶佩弦, 张道中. 激光与物质相互作用的研究. 中国科学院院刊, 1986, 4: 302–306]
- 7 Cui C P. Laser principle and application (in Chinese). *Sci Chin*, 2015, 36: 9 [崔春鹏. 激光原理及应用. 科学中国人, 2015, 36: 9]
- 8 Puseel A, Wetterauer U, Hess P. Photochemical hydrogen desorption from H-terminated silicon (111) by VUV photons. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 645–648
- 9 Perez D, Lewis L J. Ablation of solids under femtosecond laser pulses. *Phys Rev Lett*, 2002, 89: 255504
- 10 Link S, Burda C, Mohamed M B, et al. Laser photothermal melting and fragmentation of gold nanorods: Energy and laser pulse-width dependence. *J Phys Chem A*, 1999, 103: 1165–1170
- 11 Qiu R. Study on High Power Laser-Induced Damage of Optical Elements (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2013 [邱荣. 强激光诱导光学元件损伤的研究. 博士学位论文. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2013]
- 12 Chen S Y, Chen S J, Liang J, et al. Synthesis of Fe nanoparticles by pulsed laser gas phase evaporation-liquid phase collection (in Chinese). *J Northeastern Univ (Nat Sci)*, 2012, 7: 962–964, 974 [陈岁元, 陈双建, 梁京, 等. 铁纳米颗粒的脉冲激光气相蒸发-液相合成研究. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 7: 962–964, 974]
- 13 Liu P S, Cai W P, Luo X D, et al. Preparation and XPS study on rutile TiO<sub>2</sub> nanoparticles using pulsed laser ablation in aqueous solution (in Chinese). *J Nantong Univ (Nat Sci Ed)*, 2008, 4: 61–65 [刘培生, 蔡伟平, 罗向东, 等. 液相激光烧蚀合成TiO<sub>2</sub>纳米颗粒及其XPS研究. 南通大学学报(自然科学版), 2008, 4: 61–65]
- 14 Barcikowski S, Hahn A, Kabashin A V, et al. Properties of nanoparticles generated during femtosecond laser machining in air and water. *Appl Phys A*, 2007, 87: 47–55
- 15 Shao Y L, Zhou M, Zhang W, et al. Nanoscale periodic surface structure of graphite induced by femtosecond laser (in Chinese). *Laser Optoelectron Prog*, 2009, 7: 41–44 [邵云亮, 周明, 张伟, 等. 飞秒激光诱导石墨表面周期性纳米结构. 激光与光电子学进展, 2009, 7: 41–44]
- 16 Zhou D J. Application of nano-technology in electronic and military fields (in Chinese). *Electro-Mech Eng*, 2004, 6: 25–30 [周德俭. 纳米技术在电子与军事领域中的应用. 电子机械工程, 2004, 6: 25–30]
- 17 Fan P X, Long J Y, Jiang D F, et al. Study on ultrafast laser fabrication of UV-FIR ultra-broad-band antireflection surface micro-nano structures and their properties (in Chinese). *Chin J Laser*, 2015, 8: 234–241 [范培迅, 龙江游, 江大发, 等. 紫外-远红外超宽带高抗反射表面微纳结构的超快激光制备及功能研究. 中国激光, 2015, 8: 234–241]
- 18 Yatsui K, Yukawa T, Grigoriu C, et al. Synthesis of ultrafine  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders by pulsed laser ablation. *J Nanoparticle Res*, 2000, 2: 75–83
- 19 Gaertner G F, Lydtin H. Review of ultrafine particle generation by laser ablation from solid targets in gas flows. *Nanostruct Mater*, 1994, 4: 559–568
- 20 Xu B, Song R G, Dai L N, et al. Research status and development of pulsed laser ablation technology (in Chinese). *Optoelectron Tech*, 2006, 2: 138–142 [徐兵, 宋仁国, 戴丽娜, 等. 脉冲激光烧蚀技术的研究现状及进展. 光电子技术, 2006, 2: 138–142]
- 21 Gong L L, Li S. Application and research progress of laser ablation technology (in Chinese). *Sci Tech Inform*, 2014, 4: 19 [宫琳琳, 李爽. 浅谈激光烧蚀技术的应用及研究进展. 科技资讯, 2014, 4: 19]
- 22 Yang G. Laser ablation in liquids: Applications in the synthesis of nanocrystals. *Prog Mater Sci*, 2007, 52: 648–698
- 23 Zeng H, Du X W, Singh S C, et al. Nanomaterials via laser ablation/irradiation in liquid: A review. *Adv Funct Mater*, 2012, 22: 1333–1353
- 24 Ling C. Synthesis of various PbS nanostructures by pulsed laser ablation in liquids (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Tianjin: Tianjin University, 2010 [凌晨. 脉冲激光液相烧蚀法制备多种PbS纳米结构. 硕士学位论文. 天津: 天津大学, 2010]
- 25 Ren T Y, Wang Y, Xue Y. Analysis of long pulse laser-metal interaction (in Chinese). *Electro-Opt Tech Appl*, 2011, 6: 28–32 [任天宇, 王洋, 薛阳. 长脉冲激光与金属相互作用影响分析. 光电技术应用, 2011, 6: 28–32]
- 26 Dubey A K, Yadava V. Laser beam machining—A review. *Int J Mach Tools Manuf*, 2008, 48: 609–628
- 27 Yeo C Y, Tam S C, Jana S, et al. A technical review of the laser drilling of aerospace materials. *J Mater Proce Tech*, 1994, 42: 15–49
- 28 McNally C A, Folkes J, Pashby I R. Laser drilling of cooling holes in aeroengines: State of the art and future challenges. *Mater Sci Tech*, 2004, 20: 805–813



- 29 Babenko V P, Tychinskii V P. Gas-jet laser cutting (Review). *Quant Electron*, 1973, 2: 399–410
- 30 Di Pietro P, Yao Y L. An investigation into characterizing and optimizing laser cutting quality—A review. *Int J Mach Tools Manuf*, 1994, 34: 225–243
- 31 Bagger C, Olsen F O. Review of laser hybrid welding. *J Laser Appl*, 2005, 17: 2
- 32 Mackwood A P, Crafer R C. Thermal modelling of laser welding and related processes: A literature review. *Optics Laser Tech*, 2005, 37: 99–115
- 33 Mazumder J. Laser heat treatment: The state of the art. *J Metals*, 1983, 35: 18–26
- 34 Steen W M, Courtney C. Surface heat treatment of EnS steel using a 2 kW continuous-wave CO<sub>2</sub> laser. *Met Tech*, 1979, 6: 456–462
- 35 Liu F H, Lin W H, Lee R T, et al. Bioceramic scaffolds manufacturing by laser 3D printing. *Appl Mech Mater*, 2014, 628: 64–67
- 36 Huang H, Nie B, Wan P, et al. Femtosecond fiber laser additive manufacturing and welding for 3D manufacturing. In: Proceedings of International Society for Optics and Photonics. Los Angeles, 2015. 93530A-93530A-12
- 37 Meijer J, Du K, Gillner A, et al. Laser machining by short and ultrashort pulses, state of the art and new opportunities in the age of the photons. *CIRP Ann-Manuf Tech*, 2002, 51: 531–550
- 38 Sun H L, Lin S Z. Laser processing technology and its development trend (in Chinese). In: Proceedings of Tenth National Conference on Machine Tools. Wuhan: Chinese Mechanical Engineering Society, 2002. 12: 87 [孙会来, 林树忠. 激光加工技术及发展趋势. 见: 第十届全国机床学术会议. 武汉: 中国机械工程学会, 2002. 12: 87]
- 39 Kaldos A, Pieper H J, Wolf E, et al. Laser machining in die making—a modern rapid tooling process. *J Mater Proc Tech*, 2004, 155: 1815–1820
- 40 Lin S Z, Sun H L. Application & development of laser manufacturing technology (in Chinese). *J Hebei Univ Tech*, 2004, 2: 77–82 [林树忠, 孙会来. 激光加工技术的应用及发展. 河北工业大学学报, 2004, 2: 77–82]
- 41 Chen Q L, Huang S J, Zhang H C. Status and prospect of application of laser technology in the processing of material (in Chinese). *Mach Tool Hydraul*, 2006, 8: 221–223, 178 [陈绮丽, 黄诗君, 张宏超. 激光技术在材料加工中的应用现状与展望. 机床与液压, 2006, 8: 221–223, 178]
- 42 Shirk M D, Molian P A. A review of ultrashort pulsed laser ablation of materials. *J Laser Appl*, 1998, 10: 18–28
- 43 Tiaw K S, Tan P S, Hong M H, et al. Effect of nanosecond and femtosecond pulse duration of laser processing of thin biodegradable polymeric film. In: Proceedings of Fifth International Symposium on Laser Precision Microfabrication. Nara, 2004. 5662: 684–688
- 44 Wang Z, Teoh S H, Hong M, et al. Dual-microstructured porous, anisotropic film for biomimicking of endothelial basement membrane. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2015, 7: 13445–13456
- 45 Zhao H, Chen L, Yang Q. Femtosecond laser three dimensional micro/nano fabrication technology of large area micro lens array device (in Chinese). In: Proceedings of 2011 Western Photonics Conference Paper Sets. Xi'an: Shaanxi Provincial Institute of Optics, 2011 [赵恒, 陈刘, 杨青. 大面阵微透镜阵列器件的飞秒激光三维微纳加工技术. 见: 2011西部光子学学术会议论文摘要集. 西安: 陕西省光学学会, 2011]
- 46 Lim C S, Hong M H, Kumar A S, et al. Fabrication of concave micro lens array using laser patterning and isotropic etching. *Int J Machine Tools Manuf*, 2006, 46: 552–558
- 47 Chen Z C, Hong M H, Dong H, et al. Parallel laser microfabrication of terahertz metamaterials and its polarization-dependent transmission property. *Appl Phys A*, 2010, 101: 33–36
- 48 Yan Y, Li L, Feng C, et al. Microsphere-coupled scanning laser confocal nanoscope for sub-diffraction-limited imaging at 25 nm lateral resolution in the visible spectrum. *ACS Nano*, 2014, 8: 1809–1816
- 49 Jiang L. Nanostructured materials with superhydrophobic surface—from nature to biomimesis (in Chinese). *Chem Indust Eng Prog*, 2013, 22: 1258–1264 [江雷. 从自然到仿生的超疏水纳米界面材料. 化工进展, 2013, 22: 1258–1264]
- 50 Yilbas B S, Khaled M, Abu-Dheir N, et al. Laser texturing of alumina surface for improved hydrophobicity. *Appl Surface Sci*, 2013, 286: 161–170

## Laser interaction with materials and its applications in precision engineering

ZHOU Rui<sup>1††</sup>, LI FengPing<sup>2††</sup> & HONG MingHui<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> *School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;*

<sup>2</sup> *College of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China;*

<sup>3</sup> *Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore, Singapore 117576, Singapore*

In this paper, laser interaction with materials and its applications in precision engineering are mainly introduced. To further explore the physics behind laser interaction with materials, it is of much significance to investigate the mechanisms in the process. First of all, it is desired to understand the characteristics and principle of laser. Laser is generated by stimulated radiation, and has excellent physical properties, such as high monochromaticity, high brightness, high directivity and high coherence. Meanwhile, it benefits much to study the dynamic process of interactions and its mechanisms. There exist both photo-chemical and photo-thermal processes when laser and materials interact. Furthermore, developing laser application in nanomaterial synthesis is also a unique area. It is worth further studying the design and fabrication of nanostructured materials. Last but not least, it is interesting to explore the specific process and characteristics of laser processing, which play an important role in advanced manufacturing. In precision engineering, the tool of laser has also been more applicable considering its great advantages in microprocessing and nanofabrication. Several case studies are introduced, which have great potential and high impact applications, such as ultrafast laser direct writing, laser micro-lens lithography, laser nanofabrication to break through optical diffraction limit and hybrid micro/nanostructures with unique functions fabricated by laser. These studies have triggered intensive research interests due to their great application prospect.

**laser microprocessing, laser nanofabrication, laser ablation, micro-lens array, superhydrophobicity**

**PACS:** 42.30.Sy, 42.62.Be, 42.62.Cf

**doi:** [10.1360/SSPMA2016-00213](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00213)