

Progress in Applications and Physical Mechanisms of Laser Ablation in Material Processing I: Application in Materials Processing, Surface Modification and Nanograting

Minhua He^{1,2}, Li Guan^{1,3}, Duanming Zhang¹

¹School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan

²School of Science, Wuhan Institute of Technology, Wuhan

³College of Physical Science and Technology, Hebei University, Baoding

Email: zhangduanming@163.com

Received: Jan. 20th, 2013; revised: Feb. 23rd, 2013; accepted: Mar. 6th, 2013

Copyright © 2013 Minhua He et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: In the paper, the evolution of the pulse laser technology and its physical mechanism is described briefly, and the new progresses in applications of laser ablation in traditional material processing fields, such as laser drilling, cutting and welding, are focused on. Moreover, the latest developments of laser ablation technology used to the preparation of the surface modification and nanograting are introduced.

Keywords: Laser Ablation; Nanograting; Surface Modification; Pulsed Laser Deposition

激光烧蚀在材料加工中的应用及其机理研究进展 I: 在加工领域和表面改性纳米光栅方面应用

何敏华^{1,2}, 关丽^{1,3}, 张端明¹

¹华中科技大学物理学院, 武汉

²武汉工程大学理学院, 武汉

³河北大学物理科学与技术学院, 保定

Email: zhangduanming@163.com

收稿日期: 2013年1月20日; 修回日期: 2013年2月23日; 录用日期: 2013年3月6日

摘要: 本文简要介绍脉冲激光技术的演化和物理基础, 激光烧蚀技术在材料加工在传统领域激光打孔、切割、焊接等传统领域方面的应用及其最新发展。同时介绍了该技术在材料表面改性和飞秒激光诱导材料表面周期性结构(纳米光栅)的制备领域的应用及其最新发现。

关键词: 激光烧蚀; 纳米光栅; 表面改性; 脉冲激光沉积

1. 引言

激光烧蚀在现代材料加工中有广泛的应用。它利用强激光束与物质相互作用的热效应或者其他物理效应(例如直接切断分子或原子结合键), 从固体中去除物质原子, 从而实现对于材料的形貌和性质的改

变。例如, 激光烧蚀金属或者金刚石产生孔洞, 制备薄膜、纳米颗粒材料, 以及材料表面的微纳加工等等。

飞秒激光烧蚀技术有如下特点: 1) 加工过程的非热溶性, 因此减弱或消除了传统长波激光加工过程中存在的许多负面影响(烧蚀边缘的粗糙度和裂痕较

大); 2) 加工尺寸的高度精确性。热传导效应、流体力学效应的抑止, 极大地提高了激光加工的精度; 3) 三维空间加工能力。激光聚焦强度接近材料损伤阈值的飞秒激光射向透明材料的内部, 除了聚焦部分, 其他位置较低的光束强度无法满足材料的多光子非线性吸收的要求。光束几乎可以毫无衰减地到达材料内部的聚焦区域。入射激光只有该点位置才能获得较高的功率密度, 使得材料发生多光子吸收和电离, 从而实现透明材料内部三维空间上任意部位的超精细加工, 使得飞秒激光加工过程具有严格的空间选择和定位能力; 4) 材料加工的广泛性。飞秒激光在烧蚀中, 其超高的峰值使得材料只能进行多光子吸收, 使得过程高度依赖于激光强度的变化, 具有确定的阈值特性。另外, 由于多光子吸收程度和电离阈值仅依赖于材料中原子的特性, 而与其中的自由电子浓度无关, 因此脉冲飞秒激光理论上可以实现对任何材料的精细加工、修复和处理, 而与材料的种类和特性无关。

激光打孔、切割、焊接和表面改性是激光在材料加工中传统的应用领域, 随着激光技术的突飞猛进, 这些技术也在不断发展和更新。在此我们主要介绍这些技术在世纪之交与 21 世纪的新发展。同时我们在本文中介绍飞秒激光诱导表面周期性结构, 制备纳米光栅等新领域的最新发展。

2. 激光烧蚀技术的演化和物理基础

用于烧蚀材料的激光分为连续激光和脉冲激光两种形式。连续激光是指无间歇的激光输出, 而脉冲激光则为每间隔一定时间的周期性的激光输出^[1]。

一般来说, 连续激光或较长脉冲激光(例如纳秒脉冲激光)烧蚀靶材是利用热熔性效应。靶材吸收激光束的能量, 有一部分靶材的粒子热运动极为剧烈, 以致摆脱周围粒子的束缚, 从靶面逃逸出去, 形成气态粒子, 即所谓升华。从宏观来看, 靶材物质有一部分被“烧蚀”了。激光对靶材的烧蚀率定义为单位时间内单位面积靶材气化的烧蚀粒子的总量:

$$\dot{N} = \rho d / \tau m \quad (1)$$

式中: τ ——激光脉冲持续时间, s; ρ ——靶材的密度, kg/m^3 ; d —— τ 时间内烧蚀靶材的厚度, m; m ——被蒸发粒子的平均质量, kg。

但是, 对于短脉冲激光(例如飞秒脉冲激光), 由

于激光注入材料的时间极短, 能量来不及扩散就能使被加工区域的材料快速达到汽化温度, 并从材料表面喷出。从微观机制来看, 其脉冲持续时间远小于材料中受激分子、原子、电子等通过移动和转动等形式的能量释放时间(即电-声相互作用弛豫时间), 避免了激光的线性吸收、热扩散的存在和影响。此类加工过程表现为非热熔性。

激光烧蚀技术是伴随激光技术的发展而迅速普及到材料加工的各个领域。1960 年, 第一台红宝石激光器由美国休斯顿实验室 T. H. Maiman 研制成功。1965 年, 人们就利用激光烧蚀原理实现在金刚石材料上打孔^[2]。1967 年, 利用氧气辅助激光束实现金属钛的切割。在 20 世纪 60~70 年代, 主要利用红外和近红外波段输出激光系统, 如 CO_2 和 Nd:YAG 等连续波与长脉冲激光器等的热效应, 实现激光加工, 如图 1 所示。

与此同时, 人们还发现激光束照射固体材料时, 有电子、离子和中性原子从固体表面跑出来, 并且在固体表面附近形成一个发光的等离子体区, 其温度为 $10^3 \sim 10^4$ K。这些激光烧蚀的产物在基片上凝结, 可以得到薄膜, 这就是激光镀膜的原理^[3,4]。1965 年, Smith 和 Turner 等人第一次尝试用红宝石激光沉积光学薄膜^[5], 这就是现在广泛应用的脉冲激光沉积(PLD)技术制备薄膜的萌芽。由于激光波长较长, 烧蚀中靶材的熔融液体层较深, 易产生溅射, 使得沉积过程中出现较多的微滴, 由此得到的薄膜质量较差。

20 世纪 80 年代到 90 年代, 伴随着激光能量不断提高, 溅射效应不断减少, 制备的薄膜质量不断提高, PLD 技术已经成为最成功的薄膜制备技术之一^[6,7]。PLD 实验的典型装置如图 2 所示。

二十世纪 70 年代, 激光的功率和能量密度足以使金属熔融, 激光焊接技术出现^[8]。1973 年, 美国的 Avco Everett Research Laboratory 成功实现利用激光对金属进行热处理(heat treatment)^[9]。80 年代和 90 年代, 激光熔覆(cladding)技术应运而生, 同时 PLD 技术得到进一步的成熟和发展。激光熔覆技术是利用激光将预置在基体上的涂层原料熔化, 同时使基体表层发生熔化, 形成冶金结合的涂层方法。

20 世纪 80 年代, 激光加工开始出现以紫外波段输出的准分子纳秒、皮秒激光系列, 实现对聚合物、

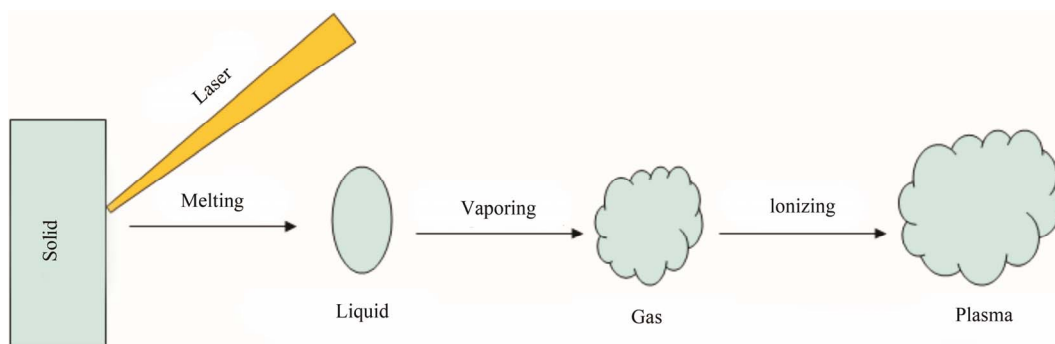


Figure 1. The process of laser ablation by thermal effect
图 1. 激光通过热效应进行烧蚀的过程

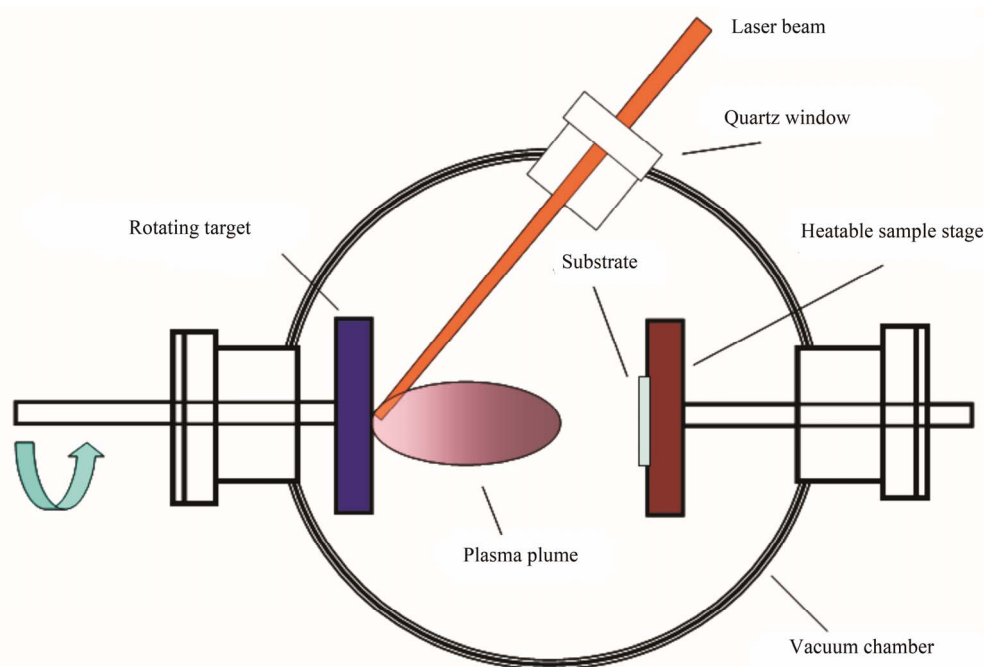


Figure 2. A typical experimental setup of pulsed laser deposition technique
图 2. 激光沉积薄膜实验装置示意图

陶瓷等非金属材料进行的钻孔、光刻与表面处理等多种微细加工^[10,11]。与此同时,激光烧蚀在材料加工中的应用逐渐由热效应转为非热物理效应,加工精度得到了相应的提高。准分子激光波长短,光束容易聚焦到很小的范围,高能单个光子可直接切断分子或原子结合键,在材料表面生成等离子体,本质上属于光化学反应,而不是热熔化过程,如图 3 所示。

1976 年,人们首次在染料激光器中实现了飞秒量级的激光脉冲输出^[12],1981 年, Fork 等采用碰撞脉冲锁模技术(Colliding pulse mode lock, CPM)在染料激光器上产生了 100 fs 的短脉冲激光^[13]。1993 年, Asaki 等利用掺钛蓝宝石自锁模技术获得了 11 fs 的脉冲激

光^[14]。2000 年,光子晶体光纤的问世标志飞秒激光技术发展的新阶段。飞秒激光有以下两个特点^[15]:第一,脉冲宽度非常短,可达几个飞秒,是人眼所能分辨时间极限(0.05 s)的十万亿分之一;第二,激光瞬时功率非常高。采用多级啁啾脉冲放大(Chirped pulse amplification, CPA)技术的应用,进一步提升了最大脉冲峰值功率,达到 10^{12} W,甚至 10^{15} W^[16],其可聚焦强度的峰值功率密度目前可高达 10^{21} W/cm² 甚至更高^[15,17]。

飞秒激光技术是制备纳米颗粒材料和大面积规整的纳米光栅的有效途径,开创了激光加工材料的崭新时代^[18,19]。飞秒激光能够在靶材的表面诱导出周期

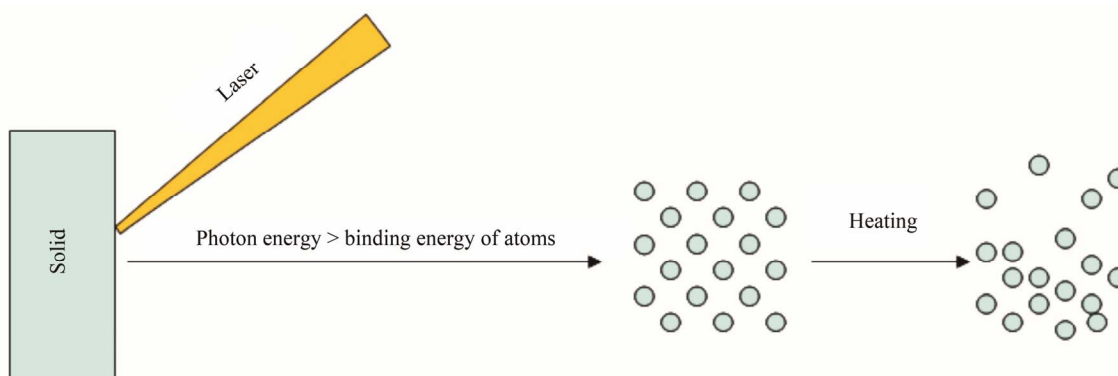


Figure 3. The process of laser ablation by photochemistry effect
图 3. 激光通过光化学效应进行烧蚀的过程

性结构在光电子学、热辐射源、生物光学器件等方面都有很大应用潜力^[20]。例如制备所谓的“黑金属”，这种材料可以毫无选择性的吸收各种波段的光。

3. 激光打孔和切割

实现高质量的孔洞结构，要求材料具有较低的热传导率(以保持孔洞附近的热能不被过多的耗散)，以及低反射率和高吸收率(以保证靶材内部吸收更多的激光能量)。图 4 表明相同波长、不同脉宽的激光在钢板上激光打孔的效果。其中图(c)为飞秒激光打孔，边缘清晰，形状规整，效果最好。图(b)为皮秒激光打孔，效果较差。图(a)为纳秒激光打孔，效果最差。可见飞秒激光的打孔质量最高。

目前，利用脉冲激光进行打孔的材料包括金属、半导体、陶瓷和聚合物介电材料等。金属打孔易采用准分子激光^[21]。陶瓷材料一般导热性较差，对于红外激光的反射率也比较低。对于聚合物材料打孔，其中除发生固相到液相再到气相的物理过程，还会在高温下引起聚合物的化学降解^[22]。同时，Lawrence 的实验证实，聚合物材料热传导渗透性比较好(对于 CO₂ 激光，Al₂O₃ 基难熔材料的吸收长度比大部分金属材料大 3 个数量级^[23,24])。因此陶瓷和聚合物打孔宜用 CO₂ 激光^[23,25]。一般来说，聚合物和陶瓷都具有较好的热渗透性，因此要描述陶瓷和聚合物材料的激光打孔过程中热输运过程，必需建立三维体传热方程来研究，不能只研究表面的传热过程^[26-28]。

激光切割最初用于切割金属，后来逐渐扩展到切割玻璃、木头和聚合物等多种材料。典型的切割用的激光束的功率为 1000~2000 W。在切割过程中，激光

的输出模式(连续激光还是脉冲激光)功率密度、脉冲重复频率，切割速率、气流种类和压强以及工件的形状和厚度都会对切割的质量产生不同长度的影响^[29]。

激光切割最常用的激光为 Nd:YAG 激光和 CO₂ 激光^[30]。CO₂ 激光具有平均功率高、光束质量好且可切割较厚材料，但其输入波长较长，不适合具有高反射率的工件如纯金属或者金属合金，适合于切割玻璃。Nd:YAG 激光的平均功率低，输出波长较短，通常用于高反射率材料的切割，例如钛和钛合金等^[31,32]。Lv. Shanjin 等研究了在切割时，不同脉冲激光的工艺参数(如能量密度、脉冲重复频率，切割速率、气流种类和压强)的条件下，钛合金片的热影响区域(HAZ, Heat-affected zone)及切割表面形貌的变化^[32]。

目前，激光切割玻璃主要有两种的方法：激光控制裂纹切割法和熔融蒸发切割法，其工艺关键是，提高切割的控制精确度；降低玻璃制品冷却后产生的内应力，避免出现不可控裂纹。

近年出现利用双光束加工切割技术是一种先进的有效切割技术，尤其适用于对玻璃等脆性材料的加工。其基本原理是：一束聚焦的光束来对材料进行加工，另一束非聚焦光束来控制加工时的温度梯度，减小热应力，避免裂纹的出现^[33,34]。如图 5 所示。

近年来采用高压强的氮气或其他惰性气体来辅助切割以解决切割中产生的渣滓(molten dross)，是提高切割光滑度的有效措施。2009 年，Hong Lei 等利用 CO₂ 激光(功率为 1800~4000 W)来切割硅钢(silicon steel)片^[35]，他们采用了旋风除渣器(a cyclone slag separator)有效减小了工件表面的渣滓，提高切割面的光滑度，如图 6 所示。

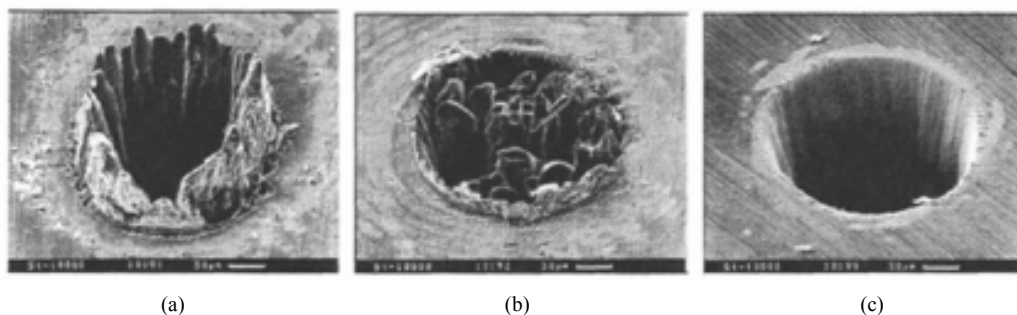


Figure 4. Microphotos of the laser drilled holes on steel. The wavelength is 780 nm. The pulse widths are (a) 3.3 ns; (b) 80 ps; (c) 200 fs^[21]
 图 4. 激光在钢铁上打孔的微观图片。激光波长为 780 nm, 脉冲宽度分别为(a) 3.3 ns; (b) 80 ps; (c) 200 fs^[21]

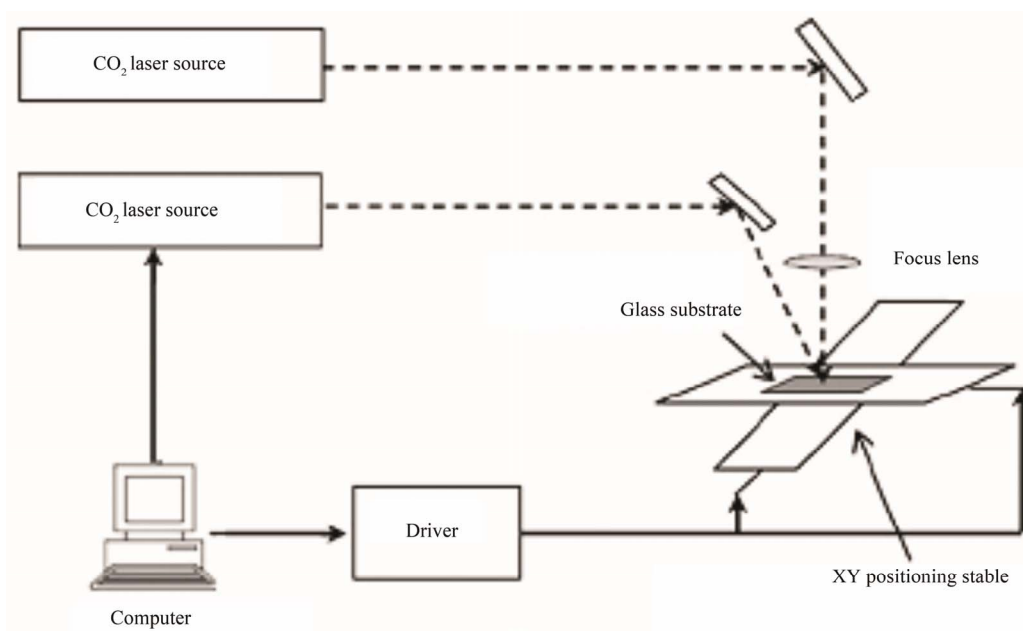


Figure 5. Configuration of laser cutting system with the dual-laser-beam method^[14]
 图 5. 双光束激光切割实验装置示意图^[14]

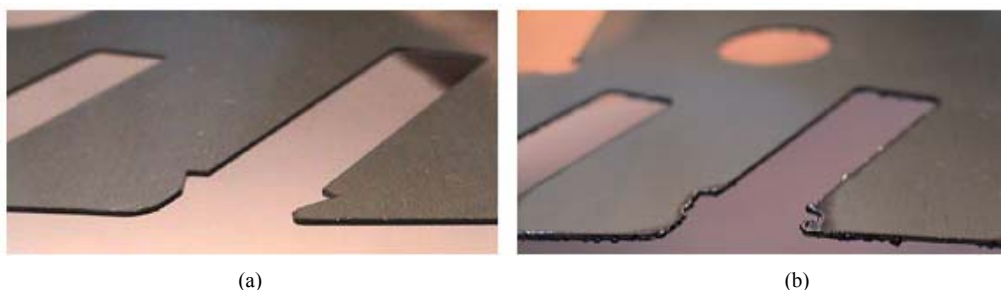


Figure 6. Photography of the cutting kerfs: (a) By using a cyclone slag separator; and (b) By traditional laser cutting technology^[35]
 图 6. 使用旋风除渣器(a)和传统技术(b)切割硅钢的切口图片^[35]

4. 激光焊接和激光辐照改性

影响激光焊接的工艺参数是：激光脉冲宽度、激光功率密度、激光辐照点的面积、材料的吸收系数以及材料的厚度等。传统的激光焊接容易出现的问题是

在材料表面产生空洞，以及工件的热损伤，产生的原因是金属对激光的吸收系数很低而反射率却很高，并且对激光的吸收系数随着金属表面温度的上升而下降^[25,26]，从而导致激光能量不能被有效吸收，在金属

表面容易产生不必要热损伤,降低焊接的效率。2010年有人提出在激光焊接之前,先对金属工件表面进行预热,可以保证焊接效率和焊接面的牢固^[36]。如图7所示。

焊接过程中的熔融效率 ε 定义为:

$$\varepsilon = [\nu d W \Delta H_m / P] \quad (2)$$

这是 P 表示入射的激光功率, ν 表示焊接速度, d 表示工件的厚度, W 表示光束的宽度以及 ΔH_m 表示金属在熔点时热焓。对于热渗透焊接而言,熔融效率 ε 可以到达 0.48,而对于热传导焊接而言, ε 为 0.37^[37]。

20世纪90年代,人们发现利用激光辐照可以改变材料的物理性能。表1列出了最近功能材料(半导体材料、导电材料、高温超导材料和磁性材料)在激光辐照下电、光、磁等物理性能改善的情况。

5. 飞秒激光诱导表面周期性结构和纳米光栅

进入21世纪以来,飞秒激光与固态材料相互作用在材料表面会诱导纳米结构,目前已经成为研究的热点问题^[20,38,39]。诱导表面周期性结构表现出入射激光波长大小的凹槽结构,并垂直于入射激光的极化方向。关于激光诱导材料表面周期性结构的机理,目前存在许多不同的模型。例如,能量的不均匀分布模型^[40,41],表面散射波模型^[42,43],库仑爆炸模型^[44],光子

Table 1. Applications of physical properties modification of materials by laser irradiation
表 1. 激光辐照在改善材料物理性能领域的应用

被辐照的材料	改善物理性能	波长(nm)	文献
Al ₂ O ₃	增加表面电阻率	10,640	[38]
YBCO	提高电导率	248	[39]
ITO	增加晶粒平均尺寸、降低电阻率	248	[40]
n-GaAs	降低光电导和电阻率	694	[41]
SnO ₂	提高霍尔迁移率和折射率	1064	[42]
Mg-doped GaN	提高蓝光的荧光强度	10,640	[43]
Doped ferrite	提高磁光效应	632.8	[44]
ZnO	减小紫外发射强度	248	[45]
n-type ZnO	提高电导率	248	[46]
Ta ₂ O ₅ 陶瓷	提高介电常数	10,640	[47]
La _{0.67} Ca _{0.33} MnO ₃	提高电学和铁磁性质	10,640	[48]
ZnO	提高紫外发射强度	248	[49]

共振吸收模型^[45],玻色子凝聚模型^[46]和能量累积效应模型^[47],等等。但各种模型都存在局限性。其中最有名的是表面散射波模型。

1982年多伦多大学 H. M. VanDriel 等提出,部分入射激光经表面缺陷散射形成切向波,并沿着材料表面传播,与入射波相互干涉形成表面周期性结构。该模型物理图像鲜明,可以解释长波脉冲激光诱导周期性结构的原因,但无法合理解释飞秒激光诱导表面周期性结构。1992年, M. Bonch-Bruевич 等对该模型进行修正,认为金属表面周期性结构的形成是由于入射飞秒激光与表面激发的等离子体相互干涉的结果^[48]。修正模型给出,对于线性极化的激光,周期性结构的间距为

$$d = \frac{\lambda}{\eta \pm \sin \theta} \quad (3)$$

其中 $\eta = \text{Re}[\varepsilon/(\varepsilon + 1)]^{1/2}$,是在金属与空气接触面表面等离子体有效折射系数的实数部分, ε 为金属的介电常数。

2002年德国 Jurgen Reif 等提出了库仑爆炸模型^[44](coulomb explosion),认为在低于靶材烧蚀阈值下,飞秒激光作用形成的新结构,是靶材表面库仑爆炸后,由自组织引起的表面驰豫现象导致的。这种模型能够解释介电材料在低于烧蚀能量密度阈值多脉冲

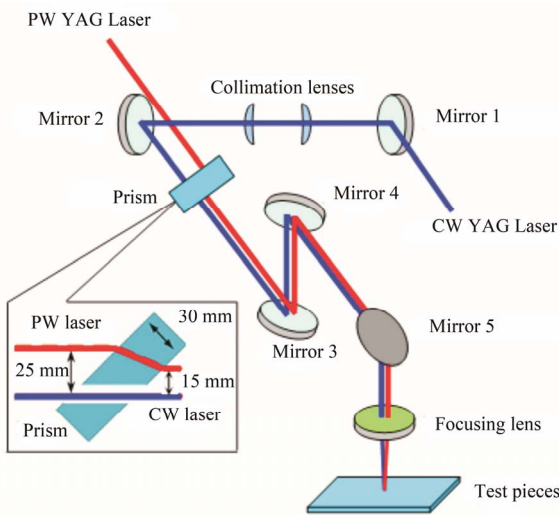


Figure 7. Schematic diagram of experimental setup of the dual-beam laser welding technique^[35]
图 7. 双光束激光焊接技术实验装置示意图^[35]

作用下产生周期小于波长的周期性结构, 但无法解释金属靶材表面产生的周期性结构。

1999年, A. M. Ozkan 等人实现了飞秒激光脉冲在金刚石团簇上的三维周期性结构和在单晶与多晶金刚石表面三维规则周期性结构的刻写, 如图 8。周期性结构的大小都小于入射激光的波长^[49]。2006年, B Tan and K Venkatakrisnan^[50]将飞秒激光作用于抛光的晶体硅表面, 产生了规则的周期性结构, 发现周期性结构的大小与飞秒激光的入射角、重复频率无关; 而结构的取向垂直于激光束的极化方向。

2005~2006年, Wang 和 Guo^[51,52]研究贵金属 Cu、Ag、Au 的表面飞秒激光诱导的周期性结构, 发现电声耦合系数 g 大的金属, 在相同的能量密度下诱导的周期性结构锐度越大; 并且给出了该周期性结构的大小对入射角、表面等离子体和入射激光的波数的依赖关系; 指出结构形成的原因是入射激光和表面激化的等离子体极化子相互干涉。

2008年, A. Y. Vorobyev 等人在金属材料的近损伤阈值范围内, 将水平极化的激光垂直照射在金属钨表面, 发现了表面纳米周期性结构^[53], 如图 9 所示。

H. L. Ma 等人在 ZnSe 表面发现飞秒脉冲激光诱导的自组织纳米光栅周期性结构, 依赖于激光束移动的速度和极化方向。当激光极化方向垂直于移动方向时, 产生规则的大面积的周期性结构^[54], 如图 10 所示。Huang 和 Xu 等采用 800 nm 波长, 125 fs 的脉冲激光多束扫描法在氧化锌单晶表面诱导出了规整大面积的自组织纳米光栅结构^[18]。

2009年哈佛大学 Eric Mazur 教授组, 采用 800 nm 飞秒激光在透明的二氧化硅单晶体上诱导出了周期为 40 nm 宽、500 nm 深的光栅结构^[19]。L. Sudrie 等人用重复频率为 200 KHz 的飞秒激光在熔融石英中制造了透射式相位光栅, 发现飞秒激光照射后的熔融石英发生折射率的改变, 并伴随双折射现象^[55]。S. H. Cho 等人利用 790 nm, 150 fs 的飞秒激光在平面硅片内部

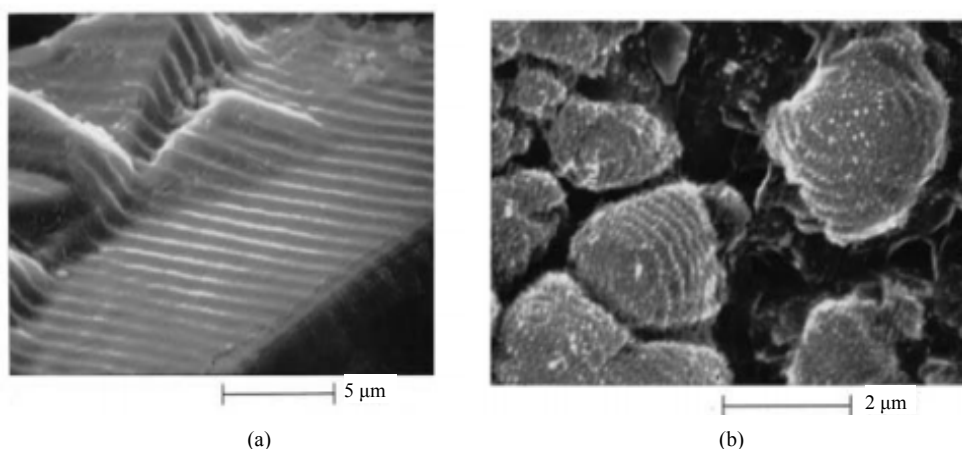


Figure 8. Three-dimensional periodic ripples induced by femtosecond laser on single-crystal (a) and polycrystalline diamond (b) surfaces^[49]
图 8. 飞秒激光在单晶体(a)和多晶体(b)表面诱导的三维周期性波纹^[49]

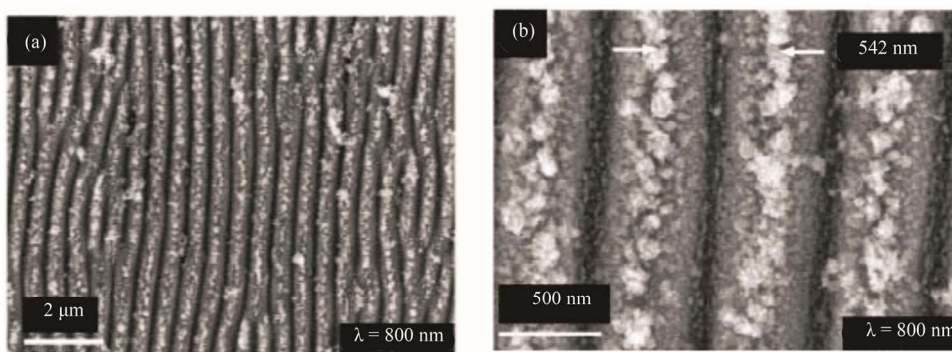


Figure 9. Femtosecond laser-induced periodic surface structures on W surface^[53]
图 9. 飞秒激光在金属 W 表面诱导周期性结构^[53]

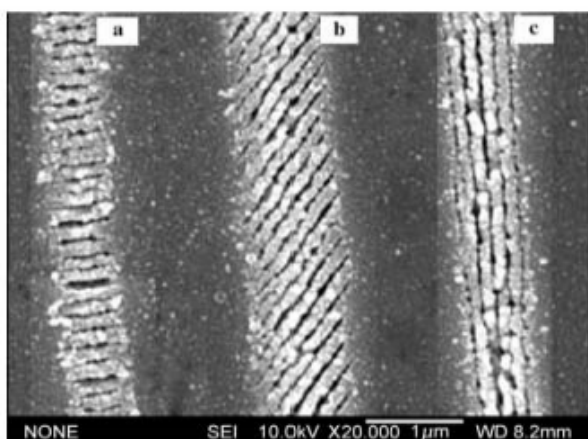


Figure 10. SEM images of gratings at the angle 0° (a), 45° (b) and 90° (c) of the moving direction of laser and its polarization direction^[54]

图 10. 激光束以 0° (a), 45° (b)和 90° (c)方向移动诱导光栅的 SEM 图及其极化方向^[54]

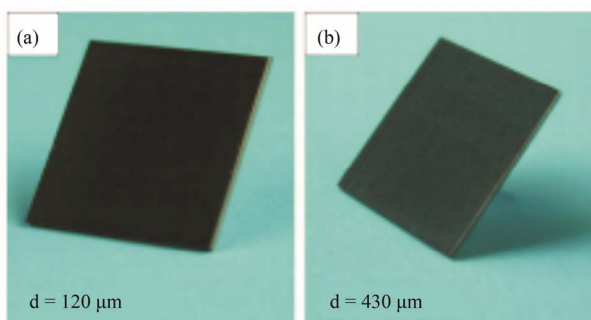


Figure 11. Photographs of the titanium samples: (a) The sample with a groove period of $120\ \mu\text{m}$; (b) The sample with a groove period of $430\ \mu\text{m}$ ^[57]

图 11. 金属钛样品图片: (a) 沟槽周期 $120\ \mu\text{m}$; (b) 沟槽周期 $430\ \mu\text{m}$ ^[57]

制作了衍射光栅,发现在折射率改变,同时出现低密度等离子体^[56]。

超短强脉冲激光在金属表面诱导出的自组织纳米光栅周期结构,能够有效改变金属表面对入射电磁波的吸收和反射特性。罗切斯特大学的 Guo 教授小组采用飞秒脉冲激光在金属钛表面诱导不同周期大小的表面光栅结构^[38,39,57];发现周期为 $120\ \mu\text{m}$ 的光栅结构几乎对频率范围从紫外到太赫兹的入射电磁波表现出强烈的吸收效应,即“黑金”现象,如图 11 所示。这种黑晶现象可以用在军事武器的金属外壳表面,实现武器的有效隐身。

6. 结语

本文是本系列综述的第一部分,主要介绍了激光

烧蚀在材料加工中的应用及其机理研究最新进展。本部分概述激光烧蚀技术在材料加工传统领域打孔、切割、焊接等方面的应用,重点在阐述其最新发展;同时比较详细地阐述了该技术在材料加工的新领域表面改性和纳米光栅的制备方面的应用。

参考文献 (References)

- [1] 杨建军. 飞秒激光超精细“冷”加工技术及其应用(I)[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(3): 47-52.
- [2] J. Bromberg. The laser in America, 1950-1970. Cambridge: MIT Press, 1991: 202.
- [3] R. H. Hohig, J. R. Woolston. Laser-induced emission of electrons, ions and neutral atoms from solid surfaces. Applied Physics Letters, 1963, 2(7): 138-139.
- [4] J. F. Ready. Development of plume of material vaporized by giant-pulse laser. Applied Physics Letters, 1963, 3(1): 11-13.
- [5] H. M. Smith, A. F. Turner. Vacuum deposition thin film using a ruby laser. Applied Optics, 1965, 4(1): 147-148.
- [6] R. K. Singh, J. Narayan. Pulsed-laser evaporation technique for deposition of thin films: Physics and theoretical model. Physical Review B, 1990, 41(13): 8843-8859.
- [7] D. P. Norton. Pulsed laser deposition of complex material: Progress towards applications. In: R. Eason, Ed., Pulsed laser deposition of thin films. New York: Wiley-Interscience, 2007: 3.
- [8] S. J. Maddox. Fracture mechanics applied to fatigue in welded structure. British Welding Inst. Report E, 1970: 36-70.
- [9] E. V. Locke. Apparatus for heat treating a surface. United States Patent 3848104, 1974.
- [10] G. Y. Liu, D. J. Toncich and E. C. Harvey. Evaluation of excimer laser ablation of thin Cr film on glass substrate by analysing acoustic emission. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 42: 639.
- [11] S. K. Lee, S. J. Na. KrF excimer laser ablation of thin Cr film on glass substrate. Applied Physics A, 1999, 68(4): 417-423.
- [12] I. S. Ruddock, D. J. Bradley. Bandwidth-limited subpicosecond pulse generation in mode-locked cw dye lasers. Applied Physics Letters, 1976, 29(5): 296-297.
- [13] R. L. Fork, B. I. Greene and C. V. Shank. Generation of optical pulses shorter than 0.1 psec by colliding pulse mode locking. Applied Physics Letters, 1981, 38(9): 671-672.
- [14] M. T. Asaki, C. P. Huang, D. Garvey, et al. Generation of 11-fs pulses from a self-mode-locked Ti: Sapphire laser. Optics Letters, 1993, 18(12): 977-979.
- [15] U. Keller. Recent developments in compact ultrafast lasers. Nature, 2003, 424(6950): 831-838.
- [16] D. Stevenson, B. Agate, X. Tsampoula, et al. Femtosecond optical transfection of cells: Viability and efficiency. Optics Express, 2006, 14(16): 7125-7133.
- [17] T. Tajima, G. Mourou. Special topics-accelerators and beams. Physical Review, 2002, 5: 03130121.
- [18] M. Huang, F. L. Zhao, Z. Z. Xu, et al. Large area uniform nanostructures fabricated by direct femtosecond laser ablation. Optics Express, 2008, 16(23): 19354-19365.
- [19] M. Shinoda, R. R. Gattass and E. Mazur. Femtosecond laser-induced formation of nanometer-width grooves on synthetic single-crystal diamond surfaces. Journal of Applied Physics, 2009, 105: Article ID: 053102.
- [20] A. Y. Vorobyev, C. L. Guo. Enhanced absorptance of gold following multipulse femtosecond laser ablation. Physical Review B, 2005, 72: Article ID: 195422
- [21] B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. Applied Physics A, 1996, 63(2): 109-115.
- [22] Y. K. Godovsky. Thermophysical properties of polymers. New

- York: Spring-Verlag, 1992: 28.
- [23] J. Lawrence, K. Minami, L. Li, et al. Effect of processing gas in high power diode laser ablation of tile grout. *Applied Surface Science*, 2002, 186(1): 264-270.
- [24] J. Lawrence, L. Li. The influence of shield gases on the surface condition of laser treated concrete. *Applied Surface Science*, 2000, 168(1): 25-28.
- [25] L. G. Hector, R. B. Hetnarski. *Thermal stresses in materials due to laser heating, thermal stresses IV*. Amsterdam: Elsevier, 1996: 453-531.
- [26] J. F. Li, L. Li and F. H. Stott. A three-dimensional numerical model for a convection-diffusion phase change process during laser melting of ceramic materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(25): 5523-5539.
- [27] C. Zhang, I. A. Salama and N. R. Quick. One-dimensional transient analysis of volumetric heating for laser drilling. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99: Article ID: 113530.
- [28] C. Zhang, N. R. Quick and A. Kar. A model for self-defocusing in laser drilling of polymeric materials. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103: Article ID: 014909.
- [29] I. A. Choudhury, S. Shirley. Laser cutting of polymeric materials: An experimental investigation. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(3): 503-508.
- [30] A. Sharma, V. Yadava. Modelling and optimization of cut quality during pulsed Nd:YAG laser cutting of thin Al-alloy sheet for straight profile. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(1): 159-168.
- [31] B. S. Yilbas, S. Z. Shuja and M. S. J. Hashmi. A numerical solution for laser heating of titanium and nitrogen diffusion in solid. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 136(1-3): 12-23.
- [32] S. J. Lv, W. Yang. An investigation of pulsed laser cutting of titanium alloy sheet. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(10): 1067-1077.
- [33] D. Triantafyllidis, L. Li and F. H. Stott. Crack-free densification of ceramics by laser surface treatment. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(6): 3163-3173.
- [34] Y. Zhao, Y. J. Jiang. Effect of KrF excimer laser irradiation on the properties of ZnO thin films. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103: Article ID: 114903.
- [35] J. K. Jiao, X. B. Wang. Cutting glass substrates with dual-laser beams. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(7-8): 860-864.
- [36] S. Yan, Z. Hong, T. Watanabe, et al. CW/PW dual-beam YAG laser welding of steel/aluminum alloy sheets. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(7-8): 732-736.
- [37] W. W. Duley. *Laser welding*. New York: John Wiley & Sons, 1999: 1.
- [38] Y. Vorobyev, C. L. Guo. Femtosecond laser structuring of titanium implants. *Applied Surface Science*, 2007, 253(17): 7272-7280.
- [39] Y. Vorobyev, C. Guo. Spectral and polarization responses of femtosecond laser-induced periodic surface structures on metals. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(4): Article ID: 043513.
- [40] J. E. Sipe, J. F. Young, J. S. Preston, et al. Laser-induced periodic surface structure, I. Theory. *Physical Review B*, 1983, 27(2): 1141-1154.
- [41] J. F. Young, J. S. Preston, H. M. Driel, et al. Laser-induced periodic surface structure. II. Experiments on Ge, Si, Al, and brass. *Physical Review B*, 1983, 27(2): 1155-1172.
- [42] M. Oron, G. Sorensen. New experimental evidence of the periodic surface structure in laser annealing. *Applied Physics Letters*, 1979, 35(10): 782-784.
- [43] D. J. Ehrlich, S. R. J. Brueck and J. Y. Tsao. Time-resolved measurements of stimulated surface polariton wave scattering and grating formation in pulsed-laser-annealed germanium. *Applied Physics Letters*, 1982, 41(7): 630-932.
- [44] J. Reif, F. Costache, M. Henyk et al. Ripples revisited: Non-classical morphology at the bottom of femtosecond laser ablation craters in transparent dielectrics. *Applied Surface Science*, 2002, 24(4): 197-198, 891-895.
- [45] R. M. Walser, M. F. Baecker, J. G. Ambrose, et al. *Laser and electron beam solid interactions and materials processing*. New York: Elsevier, 1981: 177-184.
- [46] J. A. Van Vechten. Experimental tests for boson condensation and superconductivity in semiconductors during pulsed beam annealing. *Solid State Communications*, 1981, 39(12): 1285-1291.
- [47] Z. H. Li, P. N. Li, J. Q. Fan, et al. Energy accumulation effect and parameter optimization for fabricating of high-uniform and large-area period surface structures induced by femtosecond pulsed laser. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(1): 64.
- [48] M. Bonch-Bruевич, M. N. Libenson, V. S. Makin, et al. Surface electromagnetic waves in optics. *Optical Engineering (Bellingham)*, 1992, 31: 718.
- [49] A. M. Ozkan, A. P. Malshe and T. A. Railkar. Femtosecond laser-induced periodic structure writing on diamond crystals and microclusters. *Applied Physics Letters*, 1999, 75(23): 3716-3718.
- [50] B. Tan, K. Venkatakrishnan. A femtosecond laser-induced periodic surface structure on crystalline silicon. *Journal of Micro-mechanics and Microengineering*, 2006, 16(5): 1080-1085.
- [51] A. Y. Vorobyev, V. S. Makin and C. L. Guo. Periodic ordering of random surface nanostructures induced by femtosecond laser pulses on metals. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101: Article ID: 034903.
- [52] J. C. Wang, C. L. Guo. Formation of extraordinarily uniform periodic structures on metals induced by femtosecond laser pulses. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100: Article ID: 023511.
- [53] A. Y. Vorobyev, C. L. Guo. Femtosecond laser-induced periodic surface structure formation on tungsten. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104: Article ID: 063523.
- [54] H. L. Ma, Y. Guo, M. J. Zhong, et al. Femtosecond pulse laser-induced self-organized nanogratings on the surface of a ZnSe crystal. *Applied Physics A*, 2007, 89(3): 707-709.
- [55] L. Sudrie, M. Franco, B. Prade and A. Mysyrowicz. Writing of permanent birefringent microlayers in bulk fused silica with femtosecond laser pulses. *Optics Communications*, 1999, 171(4-6): 279-284.
- [56] S. H. Cho, H. Kumagai and K. Midorikawa. Fabrication of internal diffraction gratings in planar silica plates using low-density plasma formation induced by a femtosecond laser. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 2002, 197(1): 73-82.
- [57] A. Y. Vorobyev, A. N. Topkov, O. V. Gurin, et al. Enhanced absorption of metals over ultrabroad electromagnetic spectrum. *Applied Physics Letters*, 2009, 95: Article ID: 121106.