

文章编号: 0258-7025(2010)01-0068-06

能量累积效应对飞秒激光诱导表面周期结构的影响

李智华 范敬钦 李普年 房然然 张端明

(华中科技大学物理学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 为揭示激光诱导金属表面周期结构的阈值现象及规律的物理本质, 实验研究了飞秒脉冲激光在不同实验参数条件下烧蚀铜、铝、银 3 种金属靶材表面产生的形貌变化, 提出激光能量累积效应机制来定量解释激光诱导表面周期结构(LIPSSs)存在单脉冲能量密度阈值与脉冲数阈值的原因及其变化规律。基于激光脉冲能量时空上高斯分布假设和能量累积效应, 定量讨论了飞秒激光动态扫描速度和激光脉冲能量密度对产生的表面周期性结构质量的影响, 理论和实验结果符合较好。

关键词 激光技术; 脉冲激光烧蚀; 周期性表面结构; 剩余能量; 扫描速度; 束间间距

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103701.0068

Effect of Laser Energy Accumulation on Surface Periodic Structures Induced by Femtosecond Laser

Li Zhihua Fan Jingqin Li Punian Fang Ranran Zhang Duanming

(School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract In order to investigate threshold phenomena of laser induced periodic surface structures (LIPSSs), experimental study was carried out of energy density threshold and pulse number threshold of laser induced periodic surface structures on bulk copper, aluminum, and silver samples under different experimental parameters. The laser energy accumulation effect was then explored to explain the evolutions and threshold phenomena of laser-induced surface periodic structures. In addition, based on the laser energy accumulation and the assumption of Gaussian energy distribution of pulsed laser, scanning velocity, distance of two adjacent scan lines and pulsed laser energy density were optimized in order to fabricate high-uniform and large-area period surface structures, which were in good agreement with present experimental results.

Key words laser technique; pulsed laser ablation; periodic surface structure; remnant energy; scanning velocity; distance of adjacent scanning lines

1 引 言

脉冲激光诱导表面周期结构(LIPSSs)有广泛的应用前景, 如可用于超高密度纳米光栅、热光电元件、纳米尺度增强热传输、红外传感器、光学生物传感器等^[1~8], 而且随着激光的脉冲宽度的超短化和能量密度的超高能化, 激光与材料的相互作用出现了一些新奇的物理现象, 蕴含了更复杂有趣的物理过程^[9~13], 使得激光诱导的表面周期结构的实验和理论研究日益成为国际研究者们研究的热点。早在 1965 年, Birnbaum 等^[14]首次在线偏振的脉冲激光

烧蚀靶材的实验过程中观察到类似于光栅结构的表面周期纳米结构(SPS, 又称 nanoripples 或 nanogrooves)。随后有很多研究者分别在不同的靶材表面和不同的激光脉冲烧蚀条件下得到了 SPS 结构^[1~8]。关于这种周期结构产生的理论解释的经典模型, 是 1982 年多伦多大学 H. M. van Driel 组提出的干涉理论模型, 又称表面扩散波模型^[15, 16], 该模型的优点是定量地给出了诱导周期结构的周期大小与波长和激光入射角度间的关系, 但没有对 SPS 形貌特征如何受脉冲激光其他工作参数如激光

收稿日期: 2009-02-19; 收到修改稿日期: 2009-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(10604017)和华中科技大学 2009 年理科基金资助课题。

作者简介: 李智华(1976—), 女, 博士, 副教授, 主要从事激光与材料相互作用方面的研究。E-mail: lily.lzh@263.net

能量密度、重复频率、脉冲宽度等实验条件的影响作出定量的解释。目前也有一些实验研究者试图通过激光的单束扫描或多束同时扫描来实现激光诱导表面周期结构的大面积化^[1,2,5,6],但仅仅限于实验上的摸索,定量和半定量的规律性描写很少。激光诱导表面周期结构的规整和大面积化是这种结构能实现广泛应用(尤其是高密度纳米光栅应用)的关键。

为揭示激光诱导金属表面周期结构的阈值现象及规律的物理本质,本文在长期实验和理论研究工作的基础上^[12,13,17,18],研究了脉冲激光烧蚀铜(Cu)、铝(Al)和银(Ag)3种靶材产生表面周期结构的能量密度阈值和脉冲数阈值现象,然后基于激光脉冲能量空间高斯分布假设和激光能量累积效应,定量分析了飞秒激光动态扫描速度和激光脉冲能量密度对产生的表面周期性结构质量的影响,并定量给出了扫描速度和激光能量密度如何进行优化选择的规律。

2 实 验

分别采用波长为 800 nm,脉冲持续时间为 60 fs 的飞秒强脉冲激光和波长为 248 nm,频率可调的氟化氪(KrF)准分子脉冲激光辐照 Al, Cu, Ag 等靶材,用 EPM 2000 laser Energy/Power Meter (Moltron)测量单脉冲激光能量,测量误差估计在 5%以内。通过改变激光能量密度(通过改变单脉冲的能量和激光束斑辐照到靶材表面的尺寸来实现)、激光脉冲的重复频率以及激光脉冲数来诱导金属表面产生纳米周期结构,用扫描电子显微镜(SEM)观察激光诱导靶材表面形貌的改变。

3 实验结果

实验结果表明,无论是飞秒激光还是纳秒激光,在单脉冲烧蚀的情况下,随着激光能量密度逐渐的增加,靶材表面观察到的形貌变化规律是:能量密度较小时无明显烧蚀形貌,继续增加激光能量密度到某个值 $E_{\text{mono-th}}$ (称为单脉冲烧蚀诱导表面周期结构的能量密度阈值),在光学显微镜(OM)下可以看到出现初步诱导产生的 SPS,而随着激光能量密度的逐渐增加,激光束斑中心处的周期结构逐渐恶化,并逐渐演化成烧蚀弹坑,而在激光束斑边缘能看到较明显的周期结构。实验得到了 Al, Cu, Ag 3 种靶材的单脉冲纳秒脉冲激光烧蚀阈值 $E_{\text{mono-th}}$ 分别约为 0.0343, 0.115 和 0.121 J/cm²。该阈值是指在单脉冲

激光的烧蚀作用下,SEM 能观察到靶材形貌发生变化所需要的最小能量密度。一般而言,单脉冲激光烧蚀靶材能产生表面周期结构的能量密度阈值 $E_{\text{mono-th}}$ 略高于 E_{th} (脉冲激光烧蚀阈值)^[10]。如图 1 所示,在入射激光能量为 0.46 mJ/pulse 时,铜靶材表面已经有烧蚀形貌出现,但没有诱导出周期结构。当能量增加到 0.8 mJ/pulse 时可以发现诱导出的明显的周期结构。

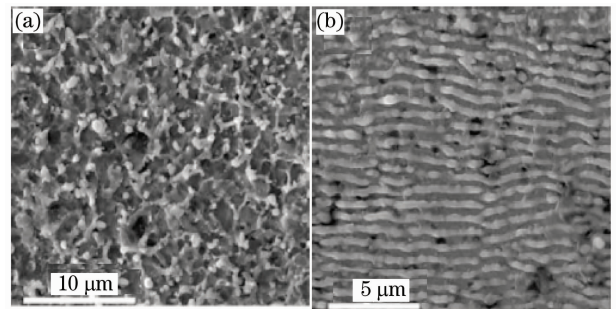


图 1 飞秒激光诱导块状铜靶材的表面结构

(a) 0.46 mJ/pulse; (b) 0.8 mJ/pulse

Fig. 1 Surface structures on bulk copper induced by femtosecond laser. (a) 0.46 mJ/pulse; (b) 0.8 mJ/pulse

当能量密度选取较低($E \leq E_{\text{mono-th}}$),采用多个脉冲辐照靶材表面时,对不同的靶材,在一定的能量密度 E 下,都存在着产生表面周期结构的脉冲数阈值 $N_{\text{th-E}}$,脉冲数达到阈值后如继续入射多余的脉冲,激光束斑中心位置的周期结构会逐渐恶化,并逐渐出现烧蚀弹坑,而边缘可以观察到明显的周期结构。实验过程中,还发现对同样的靶材,在相同的单脉冲能量密度下,采用的激光脉冲频率越高时,脉冲数阈值越小。

目前很多研究组已经在不同的靶材(包括陶瓷靶材、半导体靶材、其他金属靶材)表面用脉冲激光诱导得到了类似的周期结构^[1,2,5~8],而且这种周期表面结构形貌随能量密度变化和脉冲数的变化规律与本文在实验中用 Al, Cu, Ag 等作为靶材得到的规律非常近似,只是不同的靶材的脉冲数阈值和单脉冲能量密度阈值不同。但对表面周期结构形貌随脉冲数和能量密度的变化,目前只有少数的定性解释,定量和半定量的描写甚少。

4 分析与讨论

4.1 能量累积效应

通过考虑激光脉冲在时空中的实际分布,提出脉冲激光能量累积效应机制来解释脉冲激光诱导表

面周期结构随激光能量密度和脉冲数变化而演化的规律。飞秒激光脉冲束经过汇聚透镜汇聚后入射到靶材表面,激光束圆斑照射区的能量分布并不是均匀的,采用 CCD 成像或热敏纸可观察到激光束斑辐照区能量的空间分布近似为高斯型。另外,激光脉冲的时域分布也近似为高斯型。因此,对飞秒脉冲激光入射到靶材表面的能量空间分布和时间分布,可以用高斯分布来近似描写

$$E(t, r) = E_0 \exp\left[-\left(\frac{x}{x_0}\right)^2\right] \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_0}\right)^2\right], \quad (1)$$

其中 x_0 为激光脉冲照射到靶材表面的束斑半径,此处激光脉冲能量为中心位置能量的 $1/e$; τ_0 为一个激光脉冲的持续时间; E_0 为激光脉冲的峰值能量; x 为距离激光束斑中心点的距离。这种高斯型飞秒脉冲激光诱导表面结果可用图 2 来表示 ($E_0 > E_{\text{mono-th}}$)。中心的圆形灰色区域是烧蚀产生的弹坑区域,对应于能量密度远远高于单脉冲诱导表面周期结构的能量密度阈值 $E_{\text{mono-th}}$ 的情况;而斜条纹区域对应于能量密度略高于 $E_{\text{mono-th}}$ 能产生表面周期结构的区域和能量密度范围; $0 \leq E \leq E_{\text{mono-th}}$ 是没有产生表面周期结构的能量密度区域,但此区域在靠近产生表面周期结构区域,能发现不太明显的烧蚀形貌。

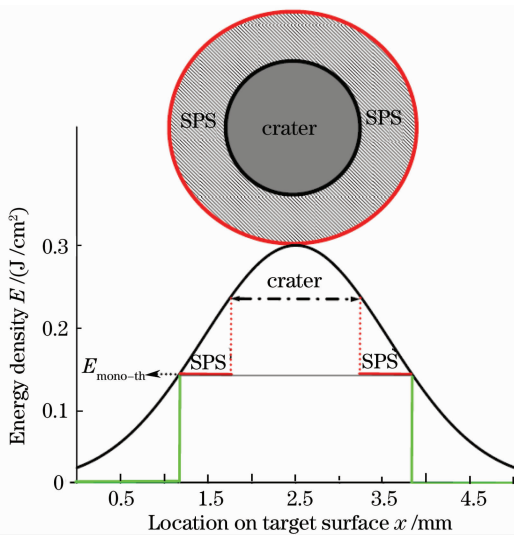


图 2 高斯飞秒激光脉冲烧蚀靶材表面形貌示意图

Fig. 2 Schematic illustration of surface structures on bulk targets induced by Gaussian femtosecond laser

假设激光能量向靶材纵深的热扩散、热辐射等可以忽略,单脉冲数能量密度阈值应该等于一定能量密度与相应的脉冲数阈值的乘积,即: $E_{\text{mono-th}} = N_{\text{E-th}} \cdot E$ 。对于高重复频率的超短强飞秒激光辐照导热性能差的靶材,这种假设引入的误差是非常小的。对于低重复频率长脉冲激光辐照导热性能好的靶材(如金属靶

材),应该考虑导热系数对能量累积效应的影响,这种情形下单脉冲诱导表面周期结构的能量密度阈值 $E_{\text{mono-th}}$ 与能量密度 E 下产生 SPS 的脉冲数阈值 $N_{\text{E-th}}$ 之间应该可由近似关系进行表示

$$E_{\text{mono-th}} = \sum_{n=1}^{N_{\text{E-th}}} \left[E - A_0 \cdot \frac{(N_{\text{E-th}} - n) \cdot k}{f} \right], \quad (2)$$

其中 k 为靶材的常数导热系数, f 为激光脉冲重复频率, n 为激光脉冲序数。当 $N_{\text{E-th}} = 1$ 时,显然有 $E = E_{\text{mono-th}}$, 即 E 对应单脉冲烧蚀产生 SPS 的能量密度阈值。不同脉冲序数的脉冲对靶材表面能量密度累积的贡献是不同的,见图 3 所示。第一个脉冲的能量贡献最小,而最后一个脉冲的能量贡献最大,原因是第一个脉冲要向靶材纵深传递导致的热损失最大。实验中采用的 Al, Cu 和 Ag 等不同靶材的导热系数分别为 237, 401 和 439 W/(m·K)。根据方程(2),靶材的导热系数 k 将直接影响脉冲激光能量的累积效应,材料的导热系数越大,导热性能越好,先入射的脉冲对靶材表面能量的贡献越小。这将直接影响一定能量密度下产生 SPS 的脉冲数阈值。同样由方程(2),在其他实验参数相同的条件下,减小入射激光脉冲频率,将导致脉冲数阈值的增加,这和实验中观察到的现象是一致的。此外,如果不考虑其他物理参数的影响,根据能量累积效应可以预言,对导热系数越大的靶材,激光脉冲的重复频率对脉冲数阈值的影响应该越明显,这有待实验进一步验证。

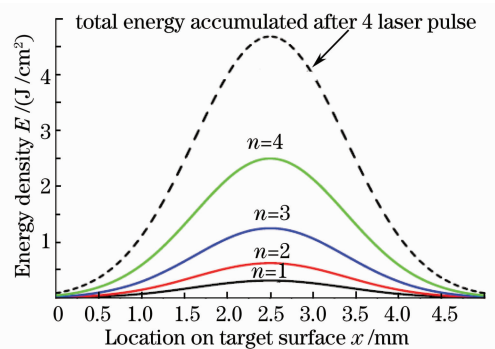


图 3 多脉冲静态辐照的能量密度累积示意图

Fig. 3 Schematic illustration of energy density accumulation by static multi-pulse femtosecond laser irradiation

采用能量累积效应机制,不仅能解释本实验采用飞秒激光在金属靶材诱导出的表面周期性结构随激光能量密度以及脉冲数变化而演化的规律,而且能解释文献在介电陶瓷靶材、半导体靶材以及其他金属靶材等表面激光诱导的表面周期结构^[2,7,8,10]。因此能量累积效应机制在解释激光诱导表面周期性

结构上具有普适性。

4.2 飞秒激光动态扫描诱导大面积表面周期结构

激光诱导表面纳米周期结构的规整化和大面积化将是这种表面结构得以广泛应用的前提。目前一些研究者采用飞秒激光动态扫描辐照靶材表面,在一定的实验条件下诱导大面积的 SPS^[1,2,5,6],诱导出的表面周期结构形貌会随着扫描速度的改变而有很大的不同:在一定的能量密度下,当扫描速度过高时,在靶材表面会产生分离区域的表面周期结构,而逐渐降低扫描速度,可以形成较规则的大面积周期结构,如图 4 所示。但如果扫描速度逐渐减小,形成的周期结构会逐渐恶化消失,甚至在靶材表面产生弹坑和大量的团簇。而目前现有的文献仅仅对实验现象作了简单定性的解释,没有进行半定量甚至定量的解释。本文提出的能量累积效应可以很好地定量解释这些实验现象。

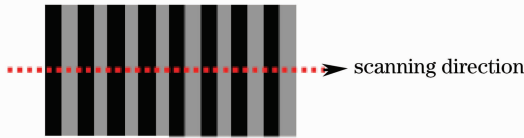


图 4 单束激光动态扫描诱导表面周期结构示意图

Fig. 4 Schematic illustration of surface periodic structures induced by scanning single-beam femtosecond laser

4.2.1 束斑尺寸与诱导规整表面周期结构允许的最快扫描速度

激光扫描速度大小直接决定了相邻激光脉冲序列间能量空间叠加的比例,根据能量累积效应,这将直接影响激光诱导的 SPS 的质量。图 5 给出了扫描过程中激光脉冲能量叠加的示意图。如果不考虑能量热损失,能量叠加后的总能量分布如图 5 中最上面的曲线所示,仍然显示类高斯型能量分布,如果考虑热损失,总能量分布将显示非对称的近似高斯

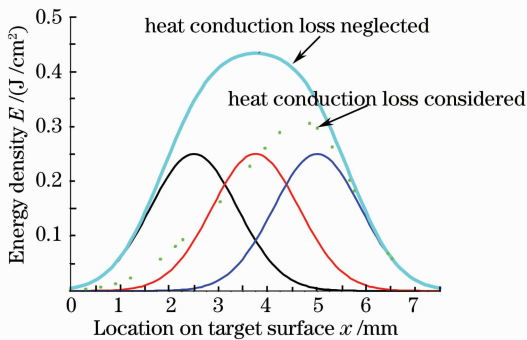


图 5 激光脉冲扫描过程中能量累积示意图

Fig. 5 Schematic illustration of energy accumulation during scanning processes of laser pulses

分布,如图 5 中虚线所示。

设激光扫描速度为 v ,激光脉冲的重复频率为 f ,辐射到靶材表面的激光束斑半径为 r_0 ,则激光扫描过程中一个束斑尺度内的脉冲数 n 可以表示为:

$$n = \frac{2r_0}{v} \cdot f. \text{ 当激光束斑半径为 } 20 \mu\text{m}, \text{ 激光重复频率为 } 250 \text{ kHz}, \text{ 如果扫描速度为 } 500 \text{ mm/s}, \text{ 则一个束斑内受 } 10 \text{ 个激光脉冲辐照.}$$

如不考虑能量损失,激光扫描过程中扫描区域的能量密度空间分布可以表示为

$$E(x) = \sum_n E_0 \exp \left\{ \left\{ \frac{-[x - v \cdot (n-1)\tau]}{r_0} \right\}^2 \right\}, \quad (3)$$

其中 τ 为脉冲间隔时间, $\tau = 1/f$ 。在 $E_0 = 5 \text{ J/cm}^2$, 激光束斑半径 $r_0 = 5 \mu\text{m}$, $f = 1 \text{ kHz}$ 时,则不同扫描速度 8, 7, 6 和 5 mm/s 下扫描区域的激光能量密度分布如图 6 所示。图中 E_s 为靶材表面扫描区的均匀能量密度。可见,激光束的扫描速度将影响靶材表面扫描区能量密度分布的均匀性。如图 6 中曲线 a 和 b 所示,如果激光束扫描过快,靶材表面扫描区的激光能量不均匀,而呈现周期分布;扫描速度低于曲线 c 的扫描速度时,靶材表面扫描区沉积的能量都能形成均匀分布,但如果扫描速度过慢,会使得扫描区沉积的能量密度过高。可见,在激光束斑尺寸和 SPS 产生的能量密度阈值一定的情况下,要在靶材表面烧蚀形成规整的 SPS,可以通过优化激光束扫描速度选择激光峰值能量密度(调节单激光脉冲能量的输出大小)来实现。采用低能量密度和慢扫描速度,长时间激光束扫描,在忽略热传导损失的情况下,仍然能形成一定面积规整的 SPS,但 SPS 产生的效率低。而采用相对较高的能量密度和较快扫描速度,能高效率烧蚀产生 SPS,而且在优化的较高

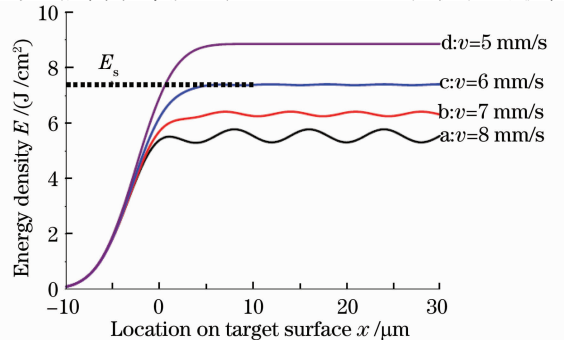


图 6 不同扫描速度下靶材表面扫描区的激光能量密度分布

Fig. 6 Energy density distributions on target surface for different scanning velocities

速扫描下,能量热传导损失也小。

在一定的激光脉冲重复频率 f (脉冲时间间隔 τ) 下,束斑尺寸大小不同,激光扫描后扫描区域能形成均匀能量密度分布的最大扫描速度会不同。根据(3)式可求出不同束斑尺寸不同扫描速度下的能量密度分布,通过数值拟合可得到激光脉冲在靶材表面扫描区域能形成均匀能量密度分布的最快扫描速度的大小与激光束斑尺寸的关系

$$v\tau = 0.15 + 1.2r. \quad (4)$$

根据(4)式,对于给定的激光束斑半径和激光脉冲周期,可以得到激光脉冲扫描能产生规则 SPS 的最快允许扫描速度。研究结果给出了激光束斑尺寸对扫描速度的约束的定量规律,为实验诱导规整、大面积周期结构提供了理论依据。

4.2.2 单束激光束扫描速度的选取

根据(3)式,通过做不同扫描速度靶材表面扫描区的激光能量密度分布图,可得到不同扫描速度下被扫描区域的均匀能量密度的大小。在一定的激光束斑尺寸和激光脉冲能量密度分布下,激光束扫描形成的靶材表面扫描区均匀能量密度 E_s 。随着扫描速度增加而呈现指数衰减规律,并可以用指数函数拟合为

$$E_s = E_0 \left[1.54 + 17.47 \times \exp\left(\frac{-v}{1.16}\right) \right], \quad (5)$$

由(3)式可知, $E_s \propto E_0$, 而靶材的单脉冲烧蚀产生 SPS 的阈值能量密度 $E_{\text{mono-th}}$ 是一定的,如果单脉冲烧蚀产生 SPS 的阈值能量密度 $E_{\text{mono-th}}$ 取 E_s , 则可以得到激光脉冲烧蚀不同靶材诱导 SPS 的优化能量密度和扫描速度的变化规律为

$$E_{\text{mono-th}} = E_0 \left[1.54 + 17.47 \times \exp\left(\frac{-v}{1.16}\right) \right]. \quad (6)$$

在脉冲激光扫描制备 SPS 的过程中,如果选定了激光脉冲的频率,并通过实验测量得到了激光束斑尺寸,可以由(4)式来优化扫描速度。为了让能量密度能达到 SPS 产生的单脉冲烧蚀阈值 $E_{\text{mono-th}}$, 可以根据(6)式来选取产生 SPS 的最优化激光脉冲能量密度。方程(4)和(6)给出的优化范围与文献[6]得到规整的表面周期结构选取的速度是相符的。不过需要注意的是,实验过程中实际还存在靶材的热传导损失和其他方式的能量损失。

4.2.3 多束激光同时扫描束间间距的选取

上述是采用单束激光扫描来诱导规整表面周期结构的优化,对于已知的激光束斑尺寸与激光脉冲的重复频率,通过优化激光束的扫描速度,可以实现

入射激光束能量在靶材表面某个方向(x 轴方向)的均匀分布。当采用多束激光同时扫描以扩大激光诱导表面周期结构的面积时,同样可以通过适当选择激光束间的间距来实现入射激光束能量在靶材表面 y 轴方向的均匀分布^[6],从而有望诱导出大面积高质量的表面周期结构。多束激光同时扫描诱导大面积 SPS 的示意图如图 7 所示。

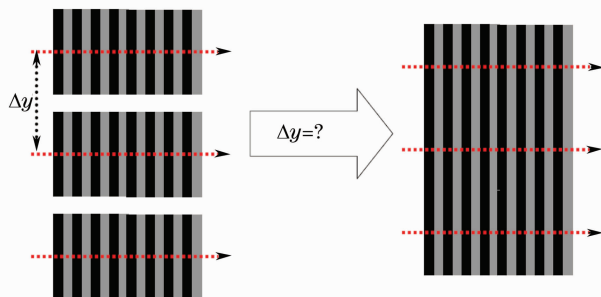


图 7 多束激光同时扫描诱导表面周期结构示意图

Fig. 7 Schematic illustration of surface periodic structures induced by scanning multi-beam femtosecond laser

根据(6)式,可以得到激光束间间距选取与激光束扫描速度的关系

$$\Delta y = v\tau, \quad (7)$$

如果得到了优化的激光束扫描速度,就可以由(7)式选择最优化的激光束间间距。如在 $E_0 = 5 \text{ J/cm}^2$, 激光束斑半径 $r_0 = 5 \text{ }\mu\text{m}$, $f = 1 \text{ kHz}$, 在扫描速度 5 mm/s 下,可实现激光束能量密度在 x 方向的均匀分布。根据(7)式,当激光束间间距选取 $\Delta y = 5 \text{ }\mu\text{m}$, 脉冲激光能量在靶材表面能形成二维均匀能量分布。根据能量累积效应,在靶材表面形成的均匀的二维能量密度分布,是能形成规整大面积表面周期结构的重要条件。也就是说,通过方程(4), (6), (7)优化选取激光束扫描速度、脉冲激光能量密度和扫描束间间距,有望在靶材表面实现诱导规整和大量的表面周期结构。

5 结 论

实验研究了脉冲激光诱导表面周期结构存在单脉冲能量密度阈值 $E_{\text{mono-th}}$, 以及在一定的能量密度存在诱导表面周期结构的脉冲数阈值 $N_{\text{E-th}}$, 并提出能量累积效应,定量描述了在能量密度低于 $E_{\text{mono-th}}$ 时脉冲数阈值 $N_{\text{E-th}}$ 的演化规律;基于能量累积效应,在激光脉冲的时空分布的高斯近似下,考虑脉冲间的空间叠加累积效应,得到了脉冲激光诱导规整、大面积表面周期结构的优化实验参数条件。设计了如何用脉冲激光诱导规整大面积的表面周期结构,

理论上给出了实现表面周期激光规整和大面积化产生的实验参数的优化规律。

致谢 感谢国家光电实验室激光科学与技术研究部陆培祥教授课题组在激光脉冲烧蚀实验过程中给予的热情帮助。所有表征均在华中科技大学分析测试中心完成。

参 考 文 献

- 1 A. Y. Vorobyev, Guo Chunlei. Spectral and polarization response of femtosecond laser-induced periodic surface structures on metals [J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **103**: 043513
- 2 A. Y. Vorobyev, Guo Chunlei. Femtosecond laser induced periodic surface structure formation on tungsten [J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **104**: 063523
- 3 Guo Zhongyi, Qu Shiliang, Han Yanhua *et al.*. Multi-photon fabrication of two-dimensional periodic structure by three interfered femtosecond laser pulses on the surface of the silica glass [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **280**: 23~26
- 4 M. Guillermin, F. Garrelie, N. Sanner *et al.*. Single and multi pulse formation of surface structures under static femtosecond irradiation [J]. *Applied Surface Science*, 2007, **253** (19): 8075~8079
- 5 Ralph Wagner, Jens Gottmann, Alexander Horn *et al.*. Subwavelength ripple formation induced by tightly focused femtosecond laser radiation [J]. *Applied Surface Science*, 2006, **252**(24): 8576~8579
- 6 Max Groenendijk, Johan Meijer. Microstructuring using femtosecond pulsed laser ablation [J]. *Journal of Laser Applications*, 2006, **18**(3): 227~235
- 7 Wang Jincheng, Guo Chunlei. Formation of extraordinarily uniform periodic structures on metals induced by femtosecond pulses [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**: 023511
- 8 T. Q. Jia, H. X. Chen, M. Huang *et al.*. Formation of nanogratings on the surface of a ZnSe crystal irradiated by femtosecond laser pulsed [J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **72**: 125429
- 9 Lin Zhibin, Leonid V. Zhilei, Vittorio Celli. Electron phonon coupling and electron heat capacity of metals under conditions of strong electron phonon nonequilibrium [J]. *Phys. Rev. B*, 2008, **77**: 075133
- 10 Lin Zhibin, Leonid V. Zhigilei. Temperature dependences of the electron phonon coupling electron heat capacity and thermal conductivity in Ni under femtosecond laser irradiation [J]. *Applied Surface Science*, 2007, **253**(15): 6295~6300
- 11 Yu. V. Petrov, S. I. Anisimov. Thermal conductivity and electron-phonon relaxation in a metal heated by a subpicosecond laser pulse [J]. *J. Opt. Technol.*, 2006, **73**(6): 368~370
- 12 Fang Ranran, Zhang Duanming, Li Zhihua *et al.*. A new unified thermal model of pulsed laser ablation with pulse durations from nanosecond to femtosecond [J]. *European Physical Journal: Applied Physics*, 2008, **42**: 229~234
- 13 Fang Ranran, Zhang Duanming, Li Zhihua *et al.*. Effect of pulse width and fluence of femtosecond laser on the electron-phonon relaxation time [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, **25** (10): 3716~3719
- 14 M. Birnbaum. Semiconductor surface damage produced by ruby lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1965, **36**: 3688~3689
- 15 H. M. Van Driel, J. E. Sipe, Jeff F. Young. Laser-induced periodic surface structure on solids: a universal phenomenon [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, **49**(26): 1955~1958
- 16 Heff F. Young, J. S. Preston, H. M. Van Driel. Time resolved evolution of laser induced periodic surface structure on germanium [J]. *Phys. Rev. B*, 1983, **27**(2): 1424~1427
- 17 Li Li, Zhang Duanming, Li Zhihua *et al.*. Metal absorptivity in femtosecond pulsed laser ablation [J]. *Front. Phys. China*, 2007, **2**(3): 322~326
- 18 Zhang Duanming, Fang Ranran, Li Zhihua *et al.*. A new synthetical model of high-power pulsed laser ablation [J]. *Commun. Theor. Phys.*, 2007, **48**: 163~168