

利用纳秒激光提高铜表面吸光率的研究

任乃飞¹ 林 康^{1,2} 张志研² 梁 浩² 高文焱² 王奕博² 林学春^{2*}

¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

²中国科学院半导体研究所全固态光源实验室, 北京 100083

摘要 利用纳秒脉冲激光对铜表面进行打黑处理, 并使用分光光度计、光学表面轮廓仪、扫描电子显微镜(SEM)等对试样进行反射率、粗糙程度的测量以及微观结构的观察。选用单向填充式扫描方式研究了不同扫描间距对打黑效果的影响, 发现在不同扫描间距条件下, 打黑后会形成不同的微观结构(光栅状、近似光栅状、珊瑚状等), 且减小扫描间距可以显著增加吸光率。其中, 当扫描间距为 10 μm 时, 打黑后的样品在 200~760 nm 波段的吸光率可达 97% 以上, 在 760~1110 nm 波段达到 90% 以上, 而在 1110~2500 nm 波段也保持在 85% 以上。此外, 研究了二次填充对打黑效果的影响, 发现打黑后样品的吸光率也较第一次打黑有一定提高, 且不同填充方向的二次打黑所造成的吸光率的差异随着扫描间距的减小而逐渐减小。

关键词 激光光学; 微纳米结构; 铜; 吸光率; 纳秒激光

中图分类号 TG146; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0303004

Research on Light Absorption Enhancement of Copper by Nanosecond Laser

Ren Naifei¹ Lin Kang^{1,2} Zhang Zhiyan² Liang Hao² Gao Wenyan²
Wang Yibo² Lin Xuechun²

¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

²Laboratory of All-Solid-State Light Sources, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100083, China

Abstract Nanosecond pulsed laser is used to blacken the surface of copper, and the reflectance and roughness of the samples are measured by a spectrophotometer and an optical surface profiler. The micro-nanostructure is observed by a scanning electron microscope (SEM), and the effect of scanning distance on blackening under unidirectional filling scan is investigated. The results show that different micro-nanostructures are formed after different scanning distances (grating-like, approximately grating-like, and coral-like, and so on), and the decrease of scanning distance can enhance light absorption obviously. When the scanning distance is 10 μm , the absorption of blackened area is over 97% in the wavelength band ranged from 200 nm to 760 nm, over 90% ranged from 760 nm to 1110 nm, and over 85% ranged from 1110 nm to 2500 nm. In addition, the effect of different filling directions at the second time under different scanning distances is also investigated. A certain enhanced absorption value is found after the second blackening compared to the first time, and the difference in absorption among different filling directions is diminished with the decrease in scanning distance.

Key words laser optics; micro-nanostructure; copper; light absorption; nanosecond laser

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 240.6700; 300.1030

收稿日期: 2015-07-06; 收到修改稿日期: 2015-10-12

基金项目: 国家 863 计划(2014AA032607)、江苏省高校自然科学研究项目(11KJA460003)

作者简介: 任乃飞(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光先进制造方面的研究。E-mail: rnf@ujs.edu.cn

*通信联系人。E-mail: xclin@semi.ac.cn

1 引言

利用脉冲激光辐照材料表面产生微纳米结构是表面工程领域的研究热点之一^[1-10],这种结构可以改变材料本身的物理、化学性质,如提高光电转换效率^[11]、LED的光提取效率^[12]以及表现出偏振散射特性^[13]。近年来,有关这种结构还可以提高材料表面吸光率的报道越来越多,如Vorobyev等^[14-16]对黄金和铂金表面一定区域进行激光处理,使两者在一定波段内的吸光率达到95%以上;Paivasaari等^[17]提出四光束干涉烧蚀的方法使钢表面形成一系列圆柱形孔,处理后的样品在一定波段内的吸光率达到90%以上;Yang等^[18]对镍钛合金进行了研究,发现不同的激光能量密度会使其表面产生不同的微观结构,并且不同的微观结构对应不同的吸光率;Tao等^[19-20]分别对平面和球面的铝进行激光处理,使两者吸光率在较宽的波段内都达到90%以上。但是,以上关于微纳米结构增加材料表面吸光率的研究^[14-26]用的都是飞秒激光,用纳秒激光的较少^[27],纳秒激光器相对于飞秒激光器不仅成本较低而且适应性强,更适用于工业应用。

铜具有高热导率、电导率以及耐腐蚀性等优点,因此应用非常广泛。然而,铜对光还具有很高的反射率,因此,在一些光学仪器、设备的关键部件中,经常需要对其表面进行发黑处理以增加其吸光、吸热能力。常见的传统发黑方法有直接喷黑漆法、化学发黑法和热喷涂法。与传统发黑方法相比,利用激光辐照材料表面生成微纳米结构的方法具有结构稳定、散热性能优越、发黑区域可控等特点,因而具有较广的发展前景。本文利用纳秒脉冲激光对紫铜表面进行激光打黑,研究不同扫描间距(打黑一次)以及不同的二次填充方向(打黑两次)生成的不同微纳米结构对吸光率的影响,使得打黑后铜表面的吸光率在很宽的波段范围内显著提高。

2 试验装置及方法

2.1 试验材料

试验所用的材料是含铜量为99.9%(质量分数)的T2紫铜,尺寸为25 mm×25 mm×2 mm。室温下,其电导率(σ)约为390 W/(m·K),热导率(k)和热扩散率(D)分别约为401 W/(m·K)和 1.1234×10^{-4} m²/s。所有试验都在室温及标准大气压下进行,打黑前后对样品分别进行乙醇及去离子水超声清洗,进而去除样品表面污染物。

2.2 试验装置

试验所用激光设备包含纳秒激光器、外光路系统以及位移平台。其中,纳秒激光器运行参数为:激光束的中心波长 $\lambda=1064$ nm,平均功率 $P=20$ W,脉宽 $\tau=100$ ns,重复频率 $f=20$ kHz,扫描速度 $v=10$ mm/s,光强近高斯分布($M^2<1.1$)。外光路系统包含 x 轴和 y 轴两个扫描振镜以及一个平场扫描透镜,其中 x 轴与 y 轴的扫描振镜系统实现激光束的移动,并通过焦距 $F=150$ mm的平场扫描透镜将激光束聚焦于样品表面,实验时样品置于位移平台上,焦点处的光斑直径 $\Phi \approx 40$ μ m。

用NT9100型光学表面轮廓仪(Veeco公司,美国)和P-6型台阶仪(KLA-Tencor公司,美国)测量样品打黑前后的粗糙程度,打黑后样品的反射率用Lambda 1050 UV/VIS/NIR型分光光度计(PerkinElmer公司,美国)进行测量,利用积分球进行测试,测试波长范围为200~2500 nm;用Scope.A1型数字材料显微镜(ZEISS公司,德国)和NOVA NANOSEM 650场发射扫描电镜(FEI公司,美国)观测打黑后样品的微观结构,同时进行能量色散X射线(EDX)分析和光谱元素分析。

2.3 试验方法

图1是三种不同扫描方式的示意图。其中图1(a)为光束先由指定图形(此处为直径15 mm的圆)底部从右向左扫描,到达左端之后光束迅速垂直向上移动30 μ m(图中虚线所示,此过程不出激光),接着开始从左向右进行扫描,以此类推,往复扫描直至填充整个指定图形,这种扫描方式为双向填充式扫描。图1(b)为光束先由底部从右向左扫描,然后光束迅速回到右端(图中虚线所示,此过程不出激光),并向上移动30 μ m继续向左扫描,以此类推直至填充整个图形,这种扫描方式为单向填充式扫描。图1(c)为光束由外向内,光束扫描半径依次减小30 μ m,直至填充整个图形(光束扫描半径减小过程中不出激光),这种扫描方式为收缩式扫描。

3 结果与讨论

为了选定一种效果较好的扫描方式进行后续试验,以30 μ m的扫描间距为例,分别用三种扫描方式进行激光打黑。表1显示了打黑前后样品的粗糙程度及氧含量。从表1可以看出,经三种扫描方式打黑后样品的粗

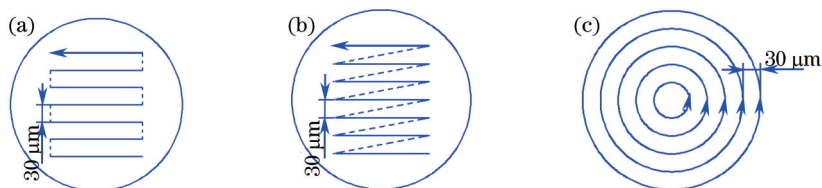


图 1 不同扫描方式示意图。(a) 双向填充式扫描; (b) 单向填充式扫描; (c) 收缩式扫描

Fig.1 Schematics of different scanning methods. (a) Bidirectional filling scan; (b) unidirectional filling scan; (c) retractable scan

糙程度和氧含量都较之前有所提高,表明打黑后样品表面结构发生了变化,同时,在激光处理过程中,铜受热在空气中发生了氧化,导致氧元素含量的增加。打黑前后样品的反射率图谱如图 2 所示,从图中可以看出与原始样品相比,经三种方式打黑后的样品反射率总体变化趋势接近,均发生明显的下降,尤其在 200~550 nm 波长范围内,三个样品的反射率降至 2% 左右。随着测试波长的增加,由于光的散射,样品的反射率逐渐增大。然而,仔细观察这三种方式打黑后的样品反射率图谱,可以看出在 200~830 nm 测试波长范围内,三者的反射率几乎相同;当波长增大到 830 nm 以后,单向填充式扫描和收缩式扫描打黑的样品反射率依然近乎相同,而双向填充式扫描打黑的样品反射率却比前两种扫描方式高 3% 左右,也就是说吸光率降低了约 3%。

表 1 原始样品和 30 μm 扫描间距下不同扫描方式打黑前后的样品粗糙程度和氧含量

Table 1 Roughness and oxygen content of the original samples and the blackened samples before and after laser blackening under different scanning methods with scanning distance of 30 μm

Scanning method	Original sample		Blackened sample	
	Roughness /μm	Oxygen content /%	Roughness /μm	Oxygen content /%
Bidirectional filling scan	1.303	0	9.717	7.12
Unidirectional filling scan	1.350	0	9.544	6.31
Retractable scan	1.399	0	10.350	7.30

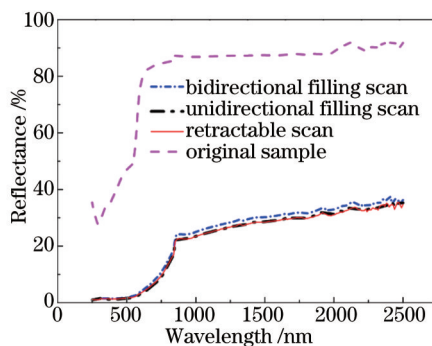


图 2 原始样品及 30 μm 扫描间距下不同扫描方式打黑后的样品反射率图谱

Fig.2 Reflectance spectra of the original samples and the blackened samples under different scanning methods with scanning distance of 30 μm

将三个样品放到 ZEISS 显微镜下观察其微观形貌(图 3),发现与填充式扫描(单向、双向)相比,收缩式扫描存在一个弊端,即其表面形貌会出现如图 3(a)所示的凹坑和缺陷,造成打黑后样品的微观结构不均匀。其中,凹坑是由于扫描直径缩小到一定程度之后相邻两圈扫描的时间间隔过短导致热量来不及释放造成的。另外,由于光束是一圈一圈进行扫描的,每圈的起始位置突然出激光,结束位置突然停止出光,导致起始点与结束点交界处的微观形貌与其他位置不同,即出现缺陷。因此,后续试验均采用单向填充式扫描方式。

3.1 扫描间距对打黑效果的影响

采用单向填充式扫描依次将扫描间距 d_0 设为 20 μm 和 40 μm,得到样品反射率图谱如图 4 所示,并与原始样品及扫描间距为 30 μm 的经同种扫描方式打黑的样品进行比较。可以看出,在 200~830 nm 测试波长区间内,经 40 μm 间距打黑后的样品反射率比 30 μm 时略高,而在 830~2500 nm 区间内却比 30 μm 时低,但随着波长的增加,两者之间的差距越来越小。经 20 μm 间距打黑后的样品反射率在 200~2500 nm 区间内均比 30 μm 时低,在 200~830 nm 区间内,随着测试波长的增加,两者之间的差值逐渐变大,而 830 nm 之后,两者之

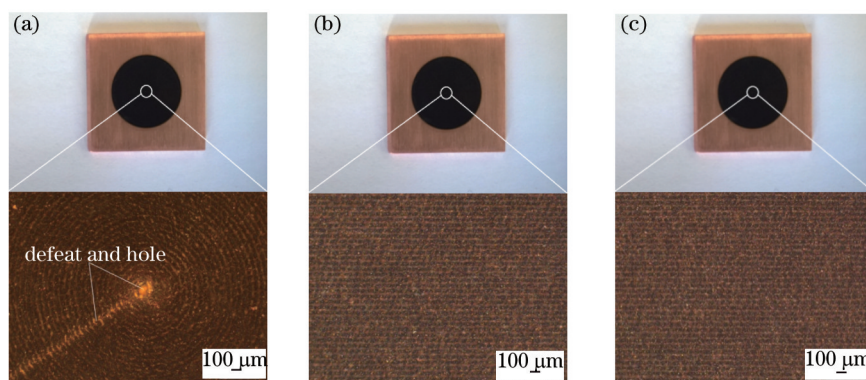


图3 30 μm扫描间距下不同扫描方式的打黑效果图及光学显微镜下的表面形貌图。(a) 收缩式扫描; (b) 单向填充式扫描; (c) 双向填充式扫描

Fig.3 Blackening photographs and surface morphologies of optical microscope under different scanning methods with scanning distance of 30 μm. (a) Retractable scan; (b) unidirectional filling scan; (c) bidirectional filling scan

间差值维持在5%左右。进一步缩小扫描间距到10 μm,样品反射率的变化趋势与20 μm间距类似,但整体的反射率进一步降低。在200~760 nm区间内,样品的反射率低于3%;在760~1110 nm区间内低于10%,而在1110~2500 nm区间内,其反射率为10%~14%。以上结果与文献[27]的结果相比,经激光打黑后样品的反射率都发生了明显的下降。其中,在200~500 nm区间内,两者的反射率均降至2%左右,且随着扫描间距的改变,反射率变化不明显。不同的是,在500 nm之后,随着扫描间距的改变,文献[27]中间距分别为50、60、70 μm时,反射率的改变平均只有1%左右,而本文样品的反射率变化比较显著,平均达到了8%左右。另外,打黑后样品的粗糙程度及氧含量同样增加,其中,随着扫描间距的减小,含氧量逐渐增大(表2)。

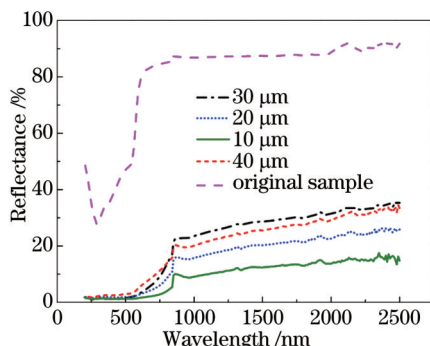


图4 原始样品及单向填充式扫描方式下不同扫描间距打黑的样品反射率图谱

Fig.4 Reflectance spectra of the original samples and the blackened samples with different scanning distances under unidirectional filling scan

表2 原始样品和单向填充式扫描方式下不同扫描间距打黑前后样品的粗糙程度及氧含量

Table 2 Roughness and oxygen content of the original samples and the blackened samples before and after laser blackening with different scanning distances under unidirectional filling scan

Scanning distance /μm	Original sample		Blackened sample	
	Roughness /μm	Oxygen content /%	Roughness /μm	Oxygen content /%
40	1.068	0	16.621	4.94
30	1.350	0	9.544	6.31
20	0.828	0	10.214	8.86
10	1.393	0	13.821	9.87

用扫描电子显微镜(SEM)观察打黑后样品的微观结构(图5),图5(a)~(d)所示的扫描间距 d_0 依次为40、30、20、10 μm,从图中可知不同扫描间距打黑后的样品存在不一样的微观结构。其中,图5(a)是由一系列锥形结构周期性排列组成的光栅状的微观结构,锥形结构表面布满了纳米尺度的颗粒物,这些颗粒物是由于激光烧蚀过程中的熔体流动以及从烧蚀坑中喷溅出来形成的;图5(b)与图5(a)类似,有近似光栅状的微观结构,但

栅距变小,栅格也不像图 5(a)所示的锥形,且颗粒物变大并聚集到一起;图 5(c)中栅格间距进一步缩小,颗粒物逐渐接触形成了珊瑚状的微观结构。随着扫描间距的减小,这种周期性的结构逐渐消失,取而代之的是图 5(d)所示的树皮状微观结构,这种结构表面出现了许多微型孔洞,孔洞周围是一些微小的凸起。

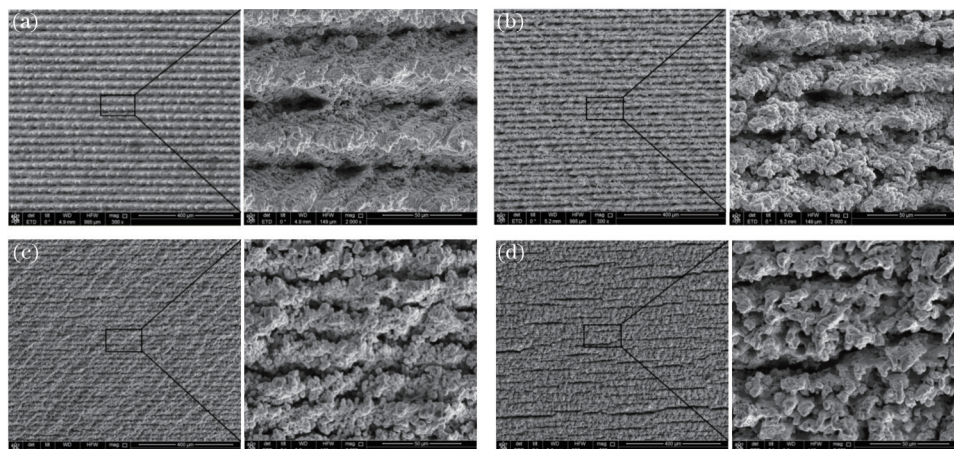


图 5 单向填充式扫描方式下不同扫描间距打黑样品的 SEM 图像。(a) $d_0=40\ \mu\text{m}$; (b) $d_0=30\ \mu\text{m}$; (c) $d_0=20\ \mu\text{m}$; (d) $d_0=10\ \mu\text{m}$

Fig.5 SEM images of blackened samples under unidirectional filling scan with different scanning distances.

(a) $d_0=40\ \mu\text{m}$; (b) $d_0=30\ \mu\text{m}$; (c) $d_0=20\ \mu\text{m}$; (d) $d_0=10\ \mu\text{m}$

在激光处理过程中,铜受热在空气中发生氧化,从而导致样品含氧量的增加;其次,样品的粗糙程度也明显增大,这是因为激光使样品瞬间熔化,熔体向四周流动和喷溅,形成凸起及凹坑导致的;再次,随着扫描间距的减小,即光斑搭接率的增大,打黑后样品的微观形貌也随之改变,由周期性的光栅状到近似光栅状,再到珊瑚状,最后变为树皮状。与此同时,随着扫描间距的减小,与之对应的样品反射率从总体上来说也越来越小,即样品的吸光率越来越高。

3.2 二次扫描对打黑效果的影响

扫描间距 d_0 分别为 40、30、20 μm 情况下经两次打黑前后样品的粗糙程度以及含氧量如表 3 所示,打黑前、打黑一次及打黑两次(不同填充方向)的反射率图谱如图 6 所示。其中,第二次扫描填充方向分别为:1)与第一次填充方向相同(记为 40 μm “=”、30 μm “=”和 20 μm “=”);2)与第一次填充方向垂直,如图 6(d)所示(记为 40 μm “+”、30 μm “+”和 20 μm “+”)。

表 3 原始样品以及单向填充式扫描方式下不同扫描间距和不同填充方向打黑两次样品的粗糙程度及氧含量

Table 3 Roughness and oxygen content of the original samples and the blackened samples under unidirectional filling scan with different scanning distances and different scanning directions after twice of blackening

Scanning distance and filling direction	Original sample		Blackened sample	
	Roughness / μm	Oxygen content /%	Roughness / μm	Oxygen content /%
40 μm “=”	1.191	0	18.706	4.72
40 μm “+”	1.309	0	18.165	4.01
30 μm “=”	1.429	0	13.612	5.88
30 μm “+”	1.355	0	10.578	5.47
20 μm “=”	1.108	0	18.246	8.66
20 μm “+”	1.280	0	14.017	7.52

从表 3 可以看出,经过两次激光处理的样品粗糙程度较激光扫描一次略有增加,且变化程度在两次填充方向相同的情况下比两次填充方向垂直的情况略为明显。激光扫描两次与扫描一次相比,含氧量的变化不是很明显。其次,由图 6 可以看出不论扫描间距多大,二次打黑后样品的反射率都有一定程度的降低,并且随着扫描间距的减小其二次填充方向对反射率的影响也随之减小。打黑后的微观形貌如图 7 所示,可以看出,同激光扫描一次类似,随着扫描间距的减小,微观形貌也由规则光栅状逐渐变为无序的树皮状或珊瑚状。

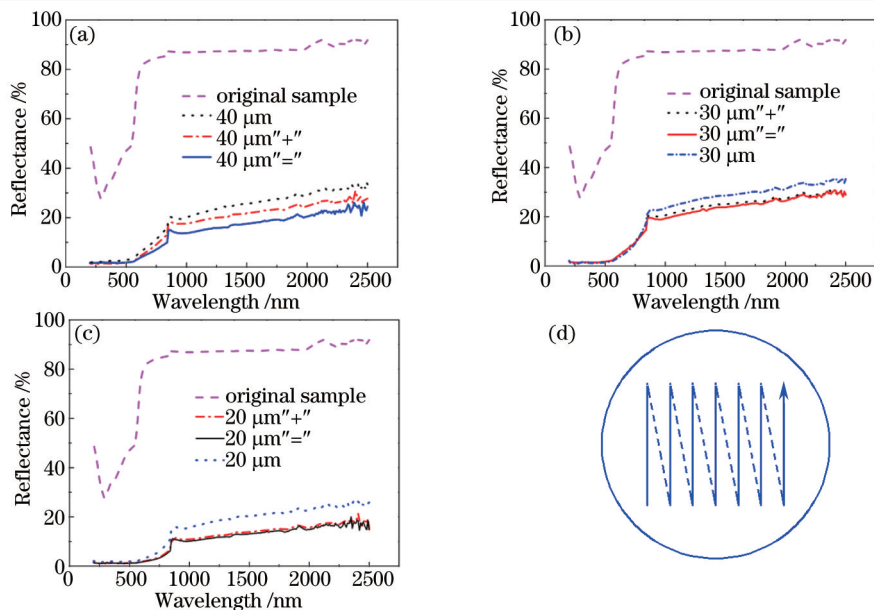


图 6 (a)(b)(c) 原始样品及单向填充式扫描方式下不同扫描间距打黑一次和不同填充方向打黑两次样品的反射率图谱; (d) 第二次垂直填充示意图

Fig.6 (a)(b)(c) Reflectance spectra of the original samples and the blackened samples under unidirectional filling scan with different scanning distances (once) and different scanning directions (twice); (d) schematic of the vertical filling for the second time

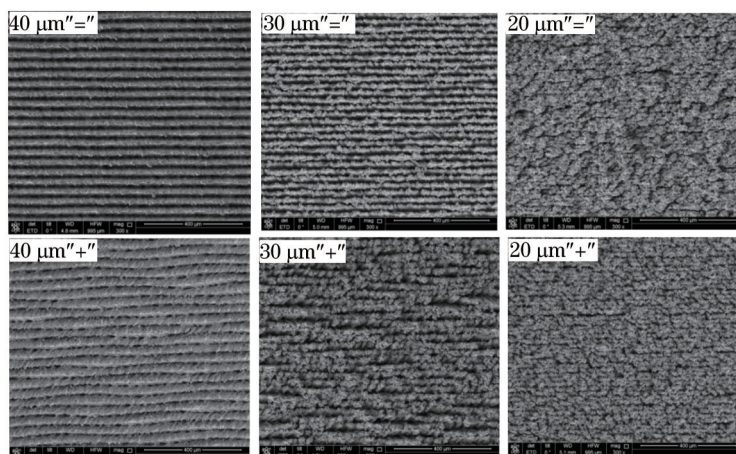


图 7 单向填充式扫描方式下不同扫描间距、不同填充方向打黑两次后样品的 SEM 图像

Fig.7 SEM images of the blackened samples under unidirectional filling scan with different scanning distances and filling directions

综上所述,以上所观察到的微观结构的形成,首先使得材料表面的粗糙程度增大,平均值由原来的 $1.259 \mu\text{m}$ 增大到打黑后的 $13.318 \mu\text{m}$;其次,与孤立的微小金属颗粒具有特定的等离子体共振频率不同,这些聚集在一起的颗粒群使得等离子体共振频带变宽,与随机分形金属的宽带光响应近似;再次,这些不同尺寸和形状的表面纳米结构也使得表面等离子体的吸收光谱变宽;从次,由于微型孔洞的存在,根据菲涅耳反射定律,外界入射光会在孔洞内部多次反射、散射,最终被这些孔洞捕获、吸收并转化为热能;最后,根据 EDX 分析,激光打黑后的样品表面产生了少量的氧元素(平均含氧量为 6.69%),即激光打黑后样品表面形成一些氧化铜,使得打黑后的样品表面呈现黑色,这也对增强材料表面的吸光率起到一定的作用。这些原因的综合作用使得样品的吸光率得到增强^[15,18,27]。

4 结 论

通过纳秒脉冲激光对紫铜表面进行打黑处理,选用单向填充式扫描,在扫描间距分别为 40、30、20、10 μm 的情况下进行打黑,处理后的样品在 200~2500 nm 波段内的吸光率均明显提高,且随着扫描间距的减小,激

光打黑的效果越来越显著。在相同的扫描间距、不同的二次填充方向情形下,二次打黑后的样品无论是哪种填充方向,其吸光率均较第一次打黑后有一定的提高,但随着扫描间距的减小,二次填充方向所造成的吸光率差异也逐渐减小。吸光率的增加是由于打黑后样品表面形成的纳米及微米尺度的微观结构、微型孔洞和表面氧化层共同作用导致的。另外,与飞秒激光打黑相比,虽然激光处理后材料表面微纳米结构的形貌略有不同,但其光学特性以及元素组成都非常接近^[17,28-30];并且纳秒激光器相对于飞秒激光器的一个显著优势就是其成本低且适应性强,因而更适用于工业应用。

参 考 文 献

- 1 Carey J E, Crouch C H, Shen M Y, *et al.*. Visible and near-infrared responsivity of femtosecond-laser microstructured silicon photodiodes [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(14): 1773-1775.
- 2 Shao Yunliang, Zhou Ming, Zhang Wei, *et al.*. Nanoscale period surface structure of graphite induced by femtosecond laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(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[J].*激光与光电子学进展*, 2009, 46(7): 41-44.
- 3 Murthy N S, Prabhu R D, Martin J J, *et al.*. Self-assembled and etched cones on laser ablated polymer surfaces[J]. *J Appl Phys*, 2006, 100(2): 023538.
- 4 Dong X M, Song H Y, Liu S B. Femtosecond laser induced periodic large-scale surface structures on metals[J]. *Chin Opt Lett*, 2015, 13(7): 071001.
- 5 Tang Yanfu, Nie Zhenwei. Study on periodic ripples on metallic surfaces induced by polarized lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0702022.
唐延甫,聂真威.偏振激光诱导金属表面周期条纹结构机理的研究[J].*中国激光*, 2015, 42(7): 0702022.
- 6 Ursu I, Popa A, Prokhorov A M, *et al.*. Studies of the change of a metallic surface microrelief as a result of multiple-pulse action of powerful UV laser pulses[J]. *J Appl Phys*, 1985, 58(10): 3909-3913.
- 7 Wang J C, Guo C L. Formation of extraordinarily uniform periodic structures on metals induced by femtosecond laser pulses[J]. *J Appl Phys*, 2006, 100(2): 023511.
- 8 Meng F T, Hu J, Han W N, *et al.*. Morphology control of laser-induced periodic surface structure on the surface of nickel by femtosecond laser[J]. *Chin Opt Lett*, 2015, 13(6): 062201.
- 9 Kazakevich P V, Simakin A V, Shafeev G A. Formation of periodic structures by laser ablation of metals in liquids[J]. *Appl Surf Sci*, 2006, 252(13): 4457-4461.
- 10 Tang G, Abdolvand A. Laser-assisted highly organized structuring of copper[J]. *Opt Mater Express*, 2011, 1(8): 1425-1432.
- 11 Hwang T Y, Vorobyev A Y, Guo C L. Enhanced efficiency of solar-driven thermoelectric generator with femtosecond laser-textured metals [J]. *Opt Express*, 2011, 19(S4): A824-A829.
- 12 Yin Zhengmao. Improving Light Extraction Efficiency of GaN-Based LEDs by Oxide Micro&Nano Structures[D]. Jinan: Shandong University, 2014: 35-109.
尹正茂.氧化物微纳米结构提高GaN基LED光提取效率的研究[D].济南:山东大学, 2014: 35-109.
- 13 Xue Jun, Yang Yong, Li Chen, *et al.*. Research on polarized scattering of self-organized nanogratings induced by femtosecond laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0432001.
薛军,杨勇,李晨,等.飞秒激光诱导自组织纳米光栅偏振散射特性研究[J].*光学学报*, 2014, 34(4): 0432001.
- 14 Vorobyev A Y, Guo C L. Enhanced absorptance of gold following multipulse femtosecond laser ablation[J]. *Phys Rev B*, 2005, 72(19): 195422.
- 15 Vorobyev A Y, Guo C L. Femtosecond laser blackening of platinum[J]. *J Appl Phys*, 2008, 104(5): 053516.
- 16 Vorobyev A Y, Guo C L. Effects of nanostructure-covered femtosecond laser-induced periodic surface structures on optical absorptance of metals[J]. *Appl Phys A*, 2007, 86(3): 321-324.
- 17 Paivasaari K, Kaakkunen J J J, Kuittinen M, *et al.*. Enhanced optical absorptance of metals using interferometric femtosecond ablation [J]. *Opt Express*, 2007, 15(21): 13838-13843.
- 18 Yang Y, Yang J J, Liang C Y, *et al.*. Ultra-broadband enhanced absorption of metal surfaces structured by femtosecond laser pulses[J]. *Opt Express*, 2008, 16(15): 11259-11265.
- 19 Tao H Y, Song X W, Hao Z Q, *et al.*. One-step formation of multifunctional nano- and microscale structures on metal surface by femtosecond laser[J]. *Chin Opt Lett*, 2015, 13(6): 061402.

- 20 Tao H Y, Lin J Q, Hao Z Q, *et al.*. Formation of strong light-trapping nano- and microscale structures on a spherical metal surface by femtosecond laser filament[J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 100(20): 201111.
- 21 Huang Yongguang, Liu Shibing. Preparation and reflection spectra response of Ti-6Al-4V alloy surface with ultrafast laser micro-nano-structuring[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(12): 3133-3137.
黄永光, 刘世柄. Ti-6Al-4V 合金表面微纳米结构的超快激光制备及其反射光谱响应[J]. *中国激光*, 2009, 36(12): 3133-3137.
- 22 Tang Wanyi, Zhou Ming, Ren Naifei, *et al.*. Surface morphology and optical absorption of femtosecond laser microstructured silicon coated with AZO film[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(12): 1207001.
唐万羿, 周 明, 任乃飞, 等. 飞秒激光微构造硅表面镀 AZO 膜的形貌及其光学吸收性能[J]. *中国激光*, 2011, 38(12): 1207001.
- 23 Sukmanowski J, Royer F X, Nölting B, *et al.*. Light absorption enhancement by nanoparticles[J]. *J Appl Phys*, 2005, 97(10): 104332.
- 24 Vorobyev A Y, Guo C L. Colorizing metals with femtosecond laser pulses[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92(4): 041914.
- 25 Vorobyev A Y, Topkov A N, Gurin O V, *et al.*. Enhanced absorption of metals over ultrabroad electromagnetic spectrum[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 95(12): 121106.
- 26 Vorobyev A Y, Guo C L. Antireflection effect of femtosecond laser-induced periodic surface structures on silicon[J]. *Opt Express*, 2011, 19(S5): A1032.
- 27 Tang G, Hourd A C, Abdolvand A. Nanosecond pulsed laser blackening of copper[J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 101(23): 231902.
- 28 Crouch C H, Carey J E, Warrender J M, *et al.*. Comparison of structure and properties of femtosecond and nanosecond laser-structured silicon[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(11): 1850-1852.
- 29 Bensaoula A, Boney C, Pillai R, *et al.*. Arrays of 3D micro-columns generated by laser ablation of Ta and steel: Modelling of a black body emitter[J]. *Appl Phys A*, 2004, 79(4): 973-975.
- 30 Kaakkunen J J J, Paivasaari K, Kuittinen M, *et al.*. Morphology studies of the metal surfaces with enhanced absorption fabricated using interferometric femtosecond ablation [J]. *Appl Phys A*, 2009, 94(2): 215-220.

栏目编辑: 吴秀娟