

文章编号: 0258-7025(2010)12-3196-05

脉冲光纤激光直写金属薄膜电阻实验研究

李晓刚 陈继民 刘富荣

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 目前激光直写膜电阻时,所加入的辅料容易造成杂质污染,膜的厚度和粗糙度难以降低。为减少杂质污染,降低膜厚和表面粗糙度,改善激光直写微电路性能,进行了透射式激光直写金属薄膜电阻的实验研究,分析了薄膜线宽与激光光斑能量分布特点的关系,获得了线宽低于光斑直径的导电薄膜。实验表明,扫描速度的增加或离焦量的降低会导致光斑重叠率和导线宽度减小。同时,过高的功率会使薄膜受到烧蚀破坏,功率过低则难以将靶材充分熔化附着在玻璃基板上。相比之下,锌膜颗粒尺寸较为均匀,而 Al/Zn 混合膜的颗粒尺寸不一致。

关键词 激光技术;薄膜导线;微电路;激光直写;金属粉末

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103712.3196

Study on Direct Writing Thin Film Conductive Line Using Pulse Fiber Laser

Li Xiaogang Chen Jimin Liu Furong

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract When thin film resistors are directly written by laser, auxiliary material can cause impurity pollution. Thickness and roughness of the film cannot be reduced easily. To reduce impurity pollution, film thickness, roughness and improve the performance of microcircuit directly written by laser, the research of metallic film resistors directly written by transmissive laser is carried out. The characteristic relation of laser spot energy distribution and film line width is analyzed. The conductive film of line width less than spot dimension can be obtained. The experimental results show that the increase of scanning speed or the decrease of defocusing amount can lead to the decline of overlapping coefficient of spot and line width decline. Meanwhile, excessively high laser power can lead to abliative damage to thin film; excessively low laser power cannot melt the powder on the glass substrate. With different powders in the process, it is known that Zn powder can form a uniform thin film while Al/Zn powder cannot form a uniform thin film.

Key words laser technique; thin conductive line; microcircuit; laser direct writing; metal powder

1 引 言

激光直写布线是用激光束直接扫描置于绝缘基板表面的导电材料,使其在基底生成导电薄膜。这种方法设备简单,价格低廉,制备周期短,柔性化程度高,可以很方便地在绝缘基板表面生成形状极其复杂的微电阻,很适合多样化生产。近年来围绕激光直写导线工艺和膜性能的改进做了大量工作,如

激光直写 AlN 还原 Al 电阻^[1]、玻璃基板激光辐照生成掺杂 NaNbO₃ 导电膜^[2]、脉冲激光辐照附着导电材料的带子沉积导电膜^[3]、激光直写预置涂层形成膜导线^[4]、去除法生成导电膜结构^[5]和激光辐照承载液生成纳米薄膜^[6]等。国内的华中科技大学激光技术国家重点实验室在导电浆料的配制、厚膜电阻的直写和线路板的制作方面也进行了深入的研

收稿日期: 2010-06-07; 收到修改稿日期: 2010-08-18

基金项目: 北京市教委重点项目(KZ200910005006)资助课题。

作者简介: 李晓刚(1985—),男,硕士研究生,主要从事激光微加工方面的研究。E-mail: s200813026@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 陈继民(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事激光微加工方面的研究。

E-mail: jimin@bjut.edu.cn (通信联系人)

究^[7~11]。然而,激光柔性布线还存在种种技术难题,为了改善导电靶材与绝缘基底之间的吸附性和相容性,激光直写导电膜时往往还需要粘结剂或其他辅料的加入,并进行后续处理,这些过程必然会带来大量薄膜污染物。薄膜的厚度在激光直写中也很难以控制,表面粗糙度难以降低。此外,激光的作用容易使基板过度损伤,使得薄膜与基板间形成低导电性能的过渡区,这些不利因素在很大程度上制约了激光直写布线技术优势的发挥。因此创新研究激光直写布线新思路,尽可能降低基板损伤和污染物的介入,控制膜厚,降低表面粗糙度,提高导线电学性能是推动激光直写微电路发展的重点所在。近年来,光纤激光器以其小型化、良好的光束质量和高柔性化程度等特点得到越来越广泛的应用。本文采用脉冲光纤激光进行了直写薄膜的研究,实验的金属粉末不加入粘结剂或辅料,用 Zn /Al 混合制出了具有良好表面质量和导电性能的薄膜导线,获得了平均膜厚 447 nm,粗糙度 15.1 nm 的金属薄膜电阻,布线速度可达 1000 mm/s。

2 实验方法

为克服辅料带来的污染,采用的是直接将金属粉末紧密均匀铺于玻璃基板底面,激光光束穿过玻璃作用在底部的粉末靶材上(如图 1 所示),激光束聚焦面位于基板和粉末的接触面,粉末熔化后在玻璃基底生成导线^[12]。靶材为 Al /Zn 金属粉末按 0.95/0.05 质量比例均匀混合,Zn 纯度 99.9%,平均粒径 6 μm ,Al 纯度 99.79%,平均粒径 74 μm 。基板采用 1.02 mm 厚的普通玻璃。实验用美国 IPG 公司脉冲光纤激光器辐照,中心波长 1064 nm,光斑直径 50 μm ,脉冲频率可在 20~80 kHz 范围内调节;微观形貌使用光学显微镜连接视频 CCD 进行图

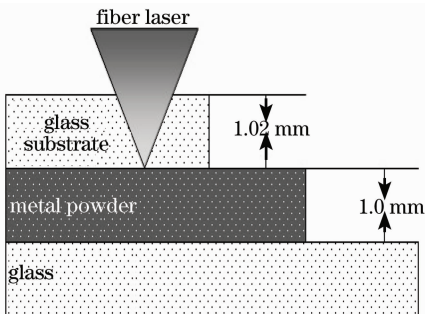


图 1 激光直写金属薄膜电阻实验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment of laser direct writing thin film conductive line

像摄取,使用美国 Veeco 公司三维表面形貌仪和扫描电子显微镜(SEM)观察,使用霍尔测试系统 van der Pauw 法测试样品导电性能。

3 结果与讨论

3.1 光斑能量分布的影响

能量密度的定义式为

$$E_D = \frac{P}{v \cdot \Phi}, \quad (1)$$

(1)式给出了整个光斑的平均能量密度与功率 P ,扫描速度 v ,光斑有效作用尺寸 Φ 的关系,而光斑各点的能量密度还与焦点位置的能量分布情况有关。实验中使用的脉冲光纤激光能量按高斯分布,在靶材上可以分成 A, B, C 三个区域(如图 2 所示)。处于光斑中心的 A 区由于能量密度高,足以使形成的薄膜气化破坏,在该区域内很少有薄膜保留下来;B 区域内的激光能量使靶材形成薄膜又不被破坏,在玻璃基底形成一个环形薄膜区域;C 区域激光能量密度要略小于 B 区域,但也能使少量的靶材附着在基板上。正是由于激光光斑的这种能量分布,造成薄膜在光斑径向上的不均匀性。利用这一特点,可以获得线宽比激光焦点直径更小的薄膜,目前实验所得最小线宽为 34.55 μm ,趋近光斑 B 区域所在圆的直径。

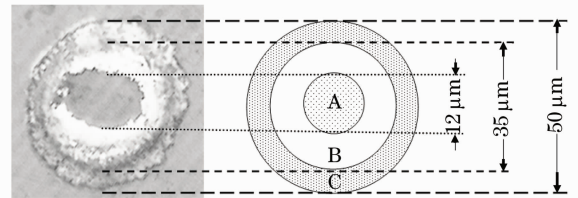


图 2 光斑能量密度分区图。A: 高能量密度区, B: 中能量密度区, C: 低能量密度区

Fig. 2 Distribution map of beam energy density.

A: high energy density area, B: medium energy density area, C: low energy density area

3.2 离焦量的影响

经过聚焦透镜的出射光束腰半径的大小和束腰离透镜距离之间的关系为

$$\omega(z) = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

从图 3 和(2)式可以看到,在激光束束腰处光斑直径最小,能量密度最大,相同的频率和扫描速度搭配下,离焦量的改变会使光斑重叠率发生变化。如图 4(a)所示,在焦点位置进行直写导线时,光斑之间形成相切关系,整个导线呈链状延伸。当调整离焦量为 2, 4 和 5 mm 时[如图 4(b)所示],光斑之间不再是相切关系,

而是具有了一定的搭接率,离焦量越大作用在粉末上的光斑尺寸越大,搭接程度越高,在靶材熔化的能量密度阈值范围内导线线宽随之变大。通过离焦量与导线平均线宽曲线图(如图 5 所示)可以直观地看到正负离焦量下的线宽变化趋势。离焦时,激光光束在轴向不同位置对靶材进行作用,由于光束轴向不同位置与焦点(束腰)有一段距离,其能量分布也与焦点不同,光斑尺寸的增大将导致平均能量密度的降低,因此离焦时需要升高激光输出功率才能达到熔化的能量阈值。

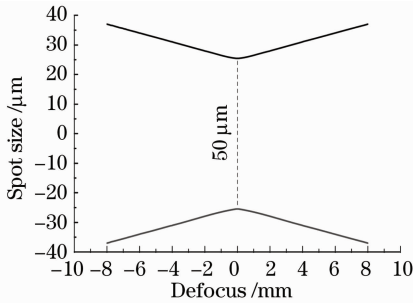


图 3 激光光束尺寸与离焦量的关系

Fig. 3 Relation between laser beam size and defocusing amount

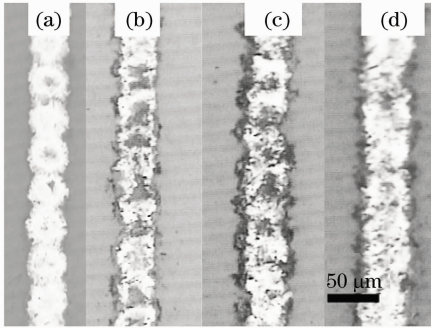


图 4 不同离焦量下的导线线形。离焦量 0 mm (a), 2 mm (b), 4 mm (c), 5 mm (d)

Fig. 4 Conductive line shapes in different defocusing amounts. Defocus amount of 0 mm (a), 2 mm (b), 4 mm (c), 5 mm (d)

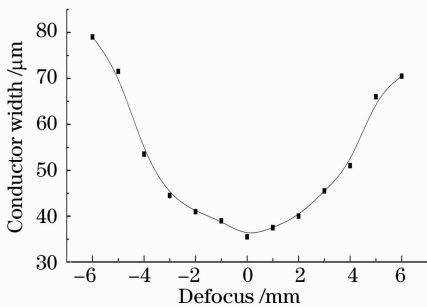


图 5 离焦量与导线平均线宽的关系

Fig. 5 Relation between defocusing amount and line width

3.3 扫描速度的影响

由于激光脉冲式的连续扫描,光斑中心之间的距离随频率和扫描速度的组合而变化,热传导的作用使得临近光斑之间热量累加。图 6 为不同扫描速度所生成的薄膜导线,当扫描速度为 500 mm/s 时,光斑之间有很高的重叠率,热量的过度积累严重恶化了薄膜的表面质量,所产生的烧焦现象对薄膜的导电性造成不良影响。在扫描速度为 1000 mm/s 时可以清楚看到光斑之间刚好相切的效果,而继续增大扫描速度将拉开光斑间距,相互之间的热影响逐渐降低。从扫描速度与导线宽度曲线图(如图 7 所示)也可得知光斑的能量积累对导线生成有很大影响,低速扫描时能量不断积累并向扫描线两侧扩散,致使周围的金属粉末熔化附着在基板上形成宽导线。随着扫描速度提高,能量积累效应减弱,导线宽度减小。但是即使是在光斑刚好相切的时候所形成的导线宽度也略高于 B 区直径 35 μm ,这是由于热传导使得扫描线前作用区域对后作用区域仍有预热作用。当扫描速度达到 1200 mm/s 以上时,预热作用几乎可以忽略,线宽趋近于 35 μm 。

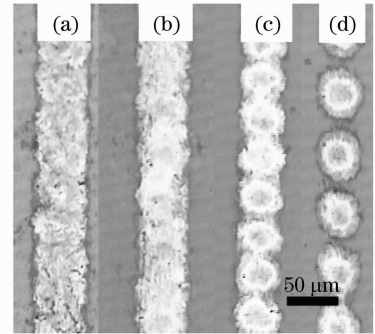


图 6 不同扫描速度下的导线线形。 $P=4\text{ W}$, $f=20\text{ kHz}$, $d=0.02\text{ mm}$, $v=500\text{ mm/s}$ (a), 800 mm/s (b), 1000 mm/s (c), 1500 mm/s (d)

Fig. 6 Conductive line shapes in different scanning speeds. $P=4\text{ W}$, $f=20\text{ kHz}$, $d=0.02\text{ mm}$, $v=500\text{ mm/s}$ (a), 800 mm/s (b), 1000 mm/s (c), 1500 mm/s (d)

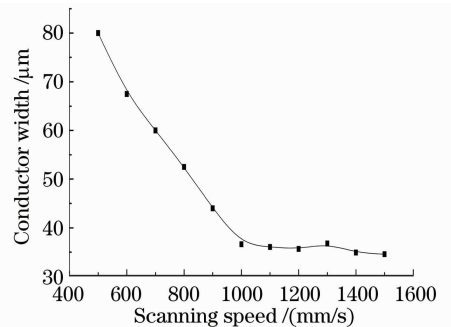


图 7 扫描速度与导线线宽的关系

Fig. 7 Relation between scanning speed and line width

3.4 多道扫描制备宽膜电阻

对于多道扫描制备宽膜电阻,扫描速度和扫描间隔共同决定了光斑重叠率的大小,此时需要考虑光斑在整个面上的叠加作用造成的能量积累效果。当 $P=4\text{ W}$, $f=20\text{ kHz}$, $d=0.02\text{ mm}$, 扫描速度过低 ($v<800\text{ mm/s}$), 光斑之间搭接率超过 70% 时, 薄膜将被过多局部能量的积累损坏, 产生烧焦和因气化留下的空洞, 继续降低扫描速度将会导致玻璃基板的过度损坏。

图 8 为激光直写导电薄膜的三维表面形貌, 图片保留了激光扫描后光斑作用留下的痕迹, 相邻光斑形成薄膜紧密连接形成导电带, 断续的微凹陷和微凸起相接成波状薄膜。薄膜的表面平均粗糙度为 15.1 nm , 平均膜厚 447 nm , 而薄膜的凹陷的最低值和凸起的最高值之和是 $2.44\text{ }\mu\text{m}$, 大大高于其平均粗糙度。而高达微米级的凸起和凹陷由粉末在玻璃板表面排列, 由激光能量分布特点所造成, 最终附着粉末较多的区域在玻璃基底形成凸起, 而附着粉末少的区域形成凹陷。从薄膜导电效果分析来看, 凹陷和空洞会对载流子的定向运动起阻碍作用, 从而增大薄膜电阻率。对减少凹陷和空洞的出现来说, 激光参数合理调整非常重要。调整激光参数时, 由于在过高功率作用下薄膜受到烧蚀破坏, 而过低功率又难以将靶材熔化附着在玻璃基板上, 因此应先进行单个脉冲打点实验, 并在显微镜下观察点状薄膜生成情况, 逐次调整功率、频率、扫描速度与扫描间隔, 不断优化加工参数, 得到平整度较好的薄膜 (平均粗糙度低于 20 nm), 此时膜表面凹陷和空洞的形成得到有效控制。

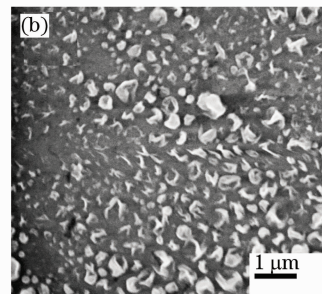
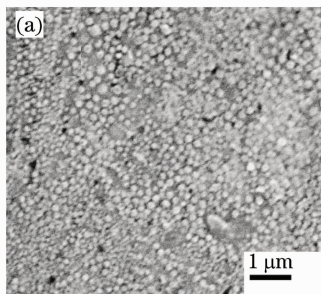


图 9 薄膜表面显微照片。(a)激光直写 Zn 薄膜表面, (b)激光直写 Zn/Al 混合膜表面

Fig. 9 Micrographs of conductive film surfaces. (a) Zn film, (b) Zn/Al film

3.6 实 例

使用激光直写布线技术时导线形状通过计算机载入控制激光出光的软件, 通过振镜扫描可以直写出形状复杂的导线, 在柔性加工上具有很大优势, 有

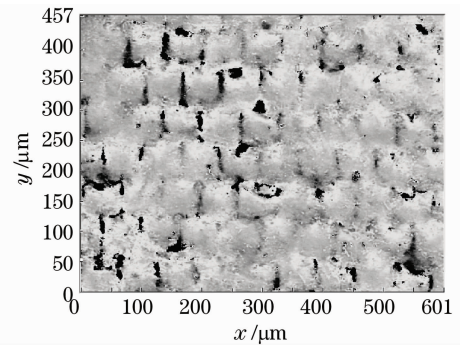


图 8 薄膜表面三维形貌。 $P=4\text{ W}$, $f=20\text{ kHz}$, $d=0.02\text{ mm}$, $v=1000\text{ mm/s}$

Fig. 8 Three-dimensional surface topography of conductive film. $P=4\text{ W}$, $f=20\text{ kHz}$, $d=0.02\text{ mm}$, $v=1000\text{ mm/s}$

3.5 显微分析

为了对比说明掺铝锌膜和锌膜特点, 使用相同工艺参数 ($P=4\text{ W}$, $f=20\text{ kHz}$, $d=0.02\text{ mm}$, $v=1000\text{ mm/s}$) 做了直写 Zn/Al 混合薄膜和直写锌膜实验, 两者从宏观上并没有明显区别, 但在扫描电子显微镜放大 20000 倍观察时 (如图 9 所示), 锌膜和混合膜在颗粒度上有明显区别, 激光直写 Zn 薄膜表面颗粒尺寸在 $10\sim 150\text{ nm}$ 范围, 而混合膜颗粒尺寸在 $50\sim 500\text{ nm}$ 范围。从实验情况来看, Zn 与基板的吸附性和相容性要好于 Al, 用纯铝粉末进行直写薄膜时难以得到连续的导线。以此可以说明在直写混合膜时, Zn 相对于 Al 充当了粘结剂的作用, 使 Al 在熔融后与 Zn 充分地接触并在玻璃基板上生成薄膜。在显微图中可以清晰地看到, 锌膜颗粒尺寸较为均一 [如图 9(a) 所示], 而混合膜由于靶材的多元性和区域热量积累效应造成了颗粒尺寸的不一致 [如图 9(b) 所示], 这些大小不一但紧密相接的颗粒形成了多晶混合物导电膜。

望在布线、欧姆触点制造和电路修复等领域得到更广泛的应用。图 10 为激光在普通玻璃表面直写 Zn/Al 金属薄膜电阻实例, 分别为螺旋状 [如图 10(a) 所示] 和棱角状 [如图 10(b) 所示], 所使用工艺参数均是

$P=4\text{ W}$, $f=20\text{ kHz}$, $v=1000\text{ mm/s}$ 。实验通过霍尔测试仪测得未经退火等后续处理的薄膜电阻率为

$7.705634\ \Omega\cdot\text{cm}$, 载流子浓度 $3.68\times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 。

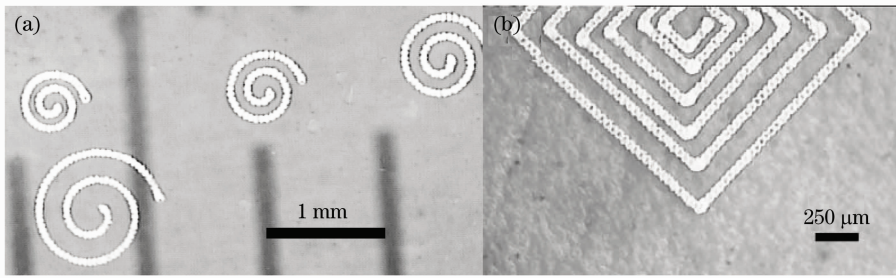


图 10 激光直写薄膜导线照片。(a)螺旋状, (b)棱角形

Fig. 10 Photo of laser direct-writing line. (a) spiral line, (b) angular-shaped line

4 结 论

在不加粘结剂和辅助材料条件下用脉冲光纤激光在玻璃基板上成功直写金属(Zn/Al)电阻, 优化参数后可以得到较小线度和粗糙度的薄膜, 膜厚在亚微米级。激光光斑能量分布的特点会造成薄膜在光斑径向的不均匀性; 在粉末靶材的熔化阈值范围内, 通过改变离焦量或扫描速度可以调节光斑重叠率大小, 从而改变薄膜线宽。锌粉与玻璃基底的吸附性要好于铝粉; 锌膜和 Zn/Al 混合膜的颗粒尺寸有较大差别, 与 Zn/Al 混合膜相比, 锌膜颗粒分布较为均匀。

参 考 文 献

- 1 H. Yabe, A. Takahashi, T. Sumiyoshi *et al.*. Direct writing of conductive aluminum line on aluminum nitride ceramics by transversely excited atmospheric CO₂ laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(19): 2758~2760
- 2 M. Pang, R. Suzuki, M. Saito *et al.*. Formation of NaNbO₃-based conductive crystal lines on glass surface by Yb fiber laser irradiation [J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **103**(1): 013112
- 3 A. Piqué, R. C. Y. Auyeung, K. M. Metkus *et al.*. Laser decal transfer of electronic materials with thin film characteristics [C]. *SPIE*, 2008, **6879**: 687911
- 4 W. J. Wang, M. Seufed, A. Lenhart *et al.*. Laser induced writing of conductive copper lines for electronic devices [C]. International IEEE Conference on Asian Green Electronics, 2004, 174~176
- 5 G. Raciukaitis. Laser structuring of conducting films on transparent substrates for electronics devices [C]. *SPIE*, 2008, **7142**: 714207
- 6 N. R. Bieri, J. Chung, D. Poulikakos *et al.*. Manufacturing of

nanoscale thickness gold lines by laser curing of a discretely deposited nanoparticle suspension [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2004, **35**(3-6): 437~444

- 7 Li Huiling, Zeng Xiaoyan. Effect of overlapped spaces on structure property of thick-film resistors flexibly and directly fabricated by laser micro-cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1554~1560
李慧玲, 曾晓雁. 搭接量对激光微细熔覆柔性直写厚膜电阻组织性能的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1554~1560
- 8 Li Huiling, Zeng Xiaoyan, Li Xiangyou *et al.*. Research on structure property of thick-film conductive lines fabricated by laser micro-fine cladding and flexibly direct writing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7): 1001~1005
李慧玲, 曾晓雁, 李祥友等. 激光微细熔覆柔性直写厚膜导带组织性能的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7): 1001~1005
- 9 Li Huiling, Zeng Xiaoyan. Effect of subsequently sintered processing on properties of thick-film resistor directly fabricated by laser micro-cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 571~576
李慧玲, 曾晓雁. 后续烧结工艺对激光微细熔覆制备厚膜电阻性能的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 571~576
- 10 Cai Zhixiang, Li Xiangyou, Hu Qianwu *et al.*. Study of laser sintering of thick-film positive temperature coefficient thermistor paste [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 1011~1015
蔡志祥, 李祥友, 胡乾午等. 激光烧结厚膜正温度系数热敏电阻浆料的研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 1011~1015
- 11 Zhang Fei, Zeng Xiaoyan, Li Xiangyou *et al.*. Laser etching and cutting printed circuit board by 355 nm and 1064 nm diode pumped solid state lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1637~1643
张 菲, 曾晓雁, 李祥友等. 355 nm 和 1064 nm 全固态激光器刻蚀印刷线路板 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1637~1643
- 12 Chen Jimin, Li Xiaogang, Yang Wei *et al.*. A Method of Laser Coating with the Transparent Material Substrate: Chinese, A, CN101575695 [P], 2009. 11. 11
陈继民, 李晓刚, 杨 威等. 一种基于透明材料的激光镀膜装置和方法: 中国, A, CN101575695 [P], 2009. 11. 11