

表 2

激光合金化试样	激光功率 (W)	扫描速度 (mm/s)	空化腐蚀失重 (mg)	备注
1#	2500	13.7	47.10	火焰喷涂
2#	3000	17.8	37.9	等离子喷涂
3#	3000	17.8	33.8	火焰喷涂
4#	3000	13.7	33.4	等离子喷涂
5#	2800	8.2	41.6	火焰喷涂
激光相变硬化试样			45.8	五个试样取平均
未经激光处理试样			108	三个试样取平均

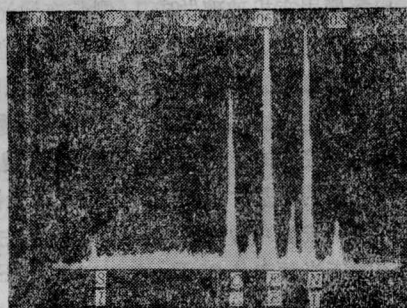
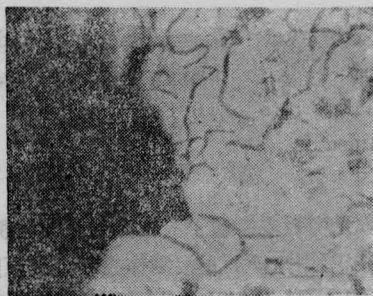


图 10 高磷铸铁激光合金区元素的能谱图
量子速率: 1463 CPS; 分析时间: 100 s; 00~20 keV;
10 eV/CH; 预置活时间: 100 s; FS=926

合金化的试样的空化失重比未处理试样大约小三倍。可见高磷铸铁经激光合金化后, 由于表面组织的改变和 Ni 等耐蚀元素的加入, 故具有较好的抗空化腐蚀性能。

空化腐蚀试验结果还表明, 在同一激光功率密度下, 较快的扫描速度的抗空蚀能力比慢扫描速强。

大量的空化腐蚀试验还表明, 抗空化腐蚀性除与材质有关外, 还与硬度有关, 材料表面的硬度越



(a) 未经激光处理试样(400×)



(b) 经激光合金化后的试样(400×)

图 11 高磷铸铁试样经空化腐蚀后的横截面照片

高, 抗空化效果越好。

无论是 45# 钢或是高磷铸铁的激光表面合金化, 均发现激光合金化区元素的含量与预先喷涂在试样表面的元素含量不大一致。产生这一现象的主要原因可能是: (1) 预先在材料表面喷涂的合金混合粉末不大均匀(个别甚至有杂质), 特别是手工涂层尤为如此; (2) 在激光熔化过程产生一定的飞溅, 这可能导致某些元素的损失。

在实验中, 我们还发现采用二次或多次重叠扫描(一般是先慢后快), 可增加激光合金区的厚度。

(1986 年 2 月 3 日收稿)

激光增强电镀铜

袁加勇 李士杰 王静环 王茂鑫 秦亮 陈琪

(浙江大学光仪系)

Laser enhanced copper plating

Yuan Jiayong, Li Shijie, Wang Jinghuan, Wang Maoxin, Qin Liang, Chen Qi

(Optical Engineering Department, Zhejiang University, Hangzhou)

Abstract: The mechanism and experimental method for laser enhanced plating are described. With this new technique we got spots and lines of copper plated on glass substrates. A plating rate of $0.1\sim 1\mu\text{m/s}$ and plating enhancement ratio on the order of 10^3 have been obtained.

1. 激光增强电镀属于液相激光化学沉积,它也是一种可以不用掩模而直接制作微细金属原图的新技术。美国 IBM 公司及其他一些研究部门从七十年代末开始在这一方向进行了一系列研究^[1-3]。近年来我们对激光增强电镀的机理和规律作了实验探讨,观察到电镀的激光增强效应,实验得到的激光电镀速率为 $0.1\sim 1\mu\text{m/s}$ 量级,比无激光照射时的常规电镀速率高 600~1200 倍。利用这一新技术我们得到了直径(宽度)为数十微米的铜镀点和镀线。

2. 常规电镀是在电解液中将镀工件作为阴极,在阴极和阳极间加以直流电压使电解液中的金属离子不断在阴极表面还原、沉积为金属镀层的电化学反应。沉积速率主要由传质速率和阴极处的电荷交换速率决定。提高电镀液的温度可以使金属离子在电解液中的活性增大,热运动加剧,并使平衡电位朝更正值方向移动;对溶液快速搅拌可使电解液中的离子扩散运动加快,提高传质过程速率。升温 and 搅拌都是常规电镀工艺中用来提高电镀速率的传统方法。

激光经光学系统聚焦后可在局部微小区域达到极高的功率密度($10^4\sim 10^5\text{ W/cm}^2$)。阴极表面吸收入射激光能量后,使光照区域附近的电解液温度骤升;陡峭温度梯度也会在电解液里产生强烈的对流和微搅拌。这些效应最终导致电化学反应在局部微小区域强烈地被增强,受光照区域的电镀速率比无光照区高出几个数量级。化学镀是不用外加电压而以氧化还原反应在待镀件上涂上金属镀层的方法。通常是把镀件浸入含还原剂的金属盐溶液,在一定条件下金属离子被还原并在镀件表面沉积出金属镀层。化学镀的电镀速率与镀液温度有一定关系,若将经过聚焦的激光束照射到浸没在镀液中的基片

上,受光照的微小区域会形成很高的温度,使该区域的反应平衡常数较室温下的值有较大变化,从而增加了化学镀的速率。

3. 激光增强电镀的实验装置如图 1 所示。从氩离子激光器输出的激光束经过透镜聚焦后照射到预先镀有镍膜的玻璃基片(做阴极)上,阳极用铂片制成。电解槽用有机玻璃做成,一侧装有通光窗口。电镀铜的电解液为硫酸铜的水溶液,对波长为 $0.5145\mu\text{m}$ 的氩激光有很好的透明度。光照时间用微机控制的电动快门来控制。为了得到铜镀线,我们采用微机控制的步进电机来驱动电解槽平台,使激光束能在阴极基片上扫描。还使用斩光器使连续波激光调制成脉冲激光后再照射到阴极上去,所用斩光器的斩光频率从 20 Hz 变化到 1000 Hz,用金相显微镜测量铜镀点和线的直径和宽度,并拍摄出镀点(线)的金相照片。镀点镀层的厚度及其分布则用轮廓仪来测量。

利用图 1 所示的实验装置,我们在阴极基片上获得了直径(或宽度)约为几十微米的铜镀点(和线),其金相显微照片如图 2 所示。

用轮廓仪测量当光照时间为 1s 时用连续激光和脉冲激光照射所得到的镀点厚度分别为 $0.8\mu\text{m}$ 和 $1.2\mu\text{m}$,相应于电镀速率分别为 $0.8\mu\text{m/s}$ 和

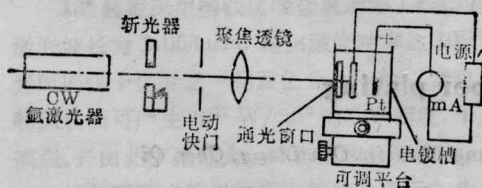


图 1 激光电镀实验装置图

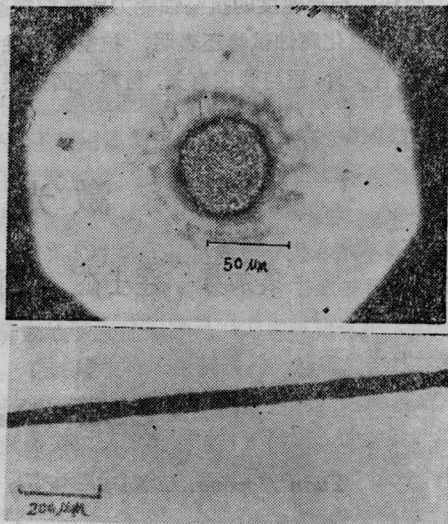


图 2 铜镀点(线)的金相显微照片

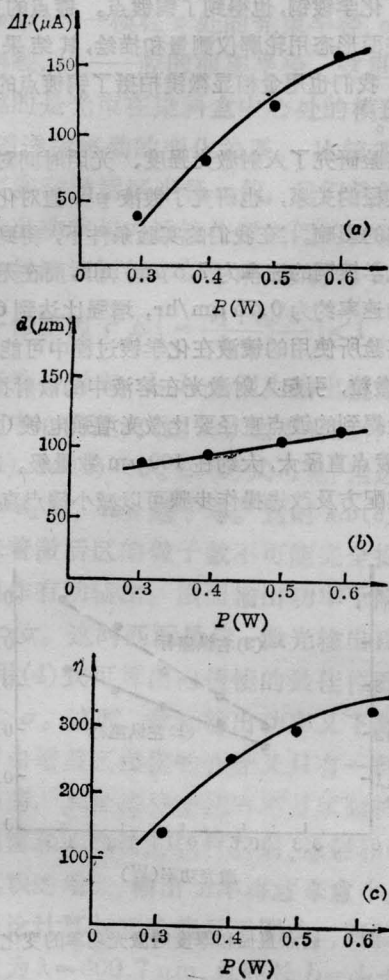


图3 电镀电流变化量 ΔI 、镀点直径 d 和增强比 η 随激光功率 P 的变化

1.2 $\mu m/s$ 。而无激光照射时背景电镀速率的典型数据为 $10^{-3} \mu m/s$ ，两者相比所得到的激光电镀增强比为 800~1200。

图3给出当光照时间一定时电镀电流变化量 ΔI 、镀点直径 d 和增强比 η 随入射光功率 P 的变化曲线。图4给出当激光功率一定时 ΔI 、 d 、 η 随光照时间 t 变化的曲线。

从图3、图4可以看出，在一定范围内，电镀量（镀点直径 d 、电镀电流变化量 ΔI 和增强比 η ）随激光功率 P 或光照时间 t 的增加而增加。从激光增强电镀的机理来考虑，激光入射功率越大或光照时间越长，阴极基片所吸收的激光能量就越多，造成的温升也越大，产生的电镀量（ ΔI 、 d 和 η ）相应地也越大。这一实验结果是与激光增强电镀的热模型相一致

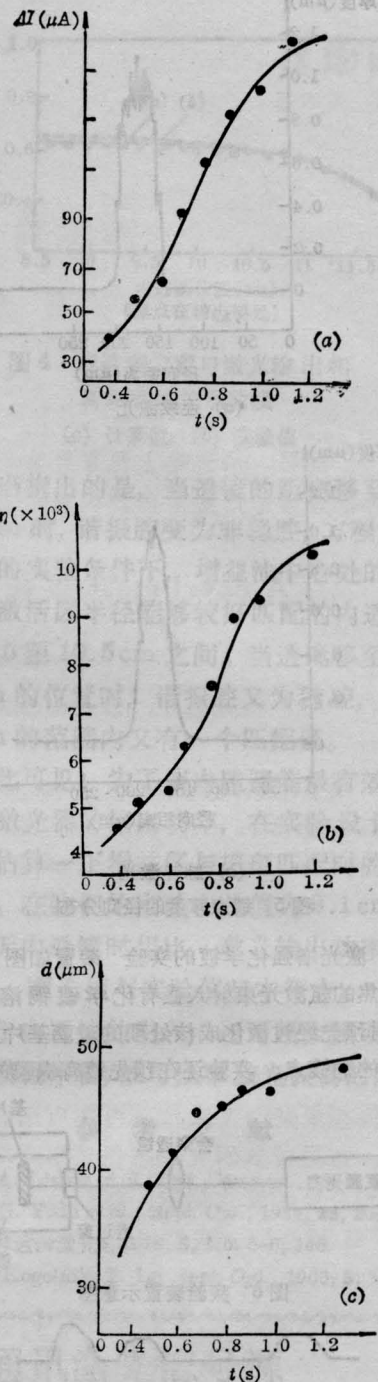


图4 电流增量 ΔI 、镀点直径 d 和增强比 η 随光照时间 t 的变化

的。

图5给出了镀点厚度的径向分布。从图可知当用脉冲光照射时，厚度起伏明显下降。显然脉冲光可以降低膜层孔隙度，改善镀层均匀性和牢固度。

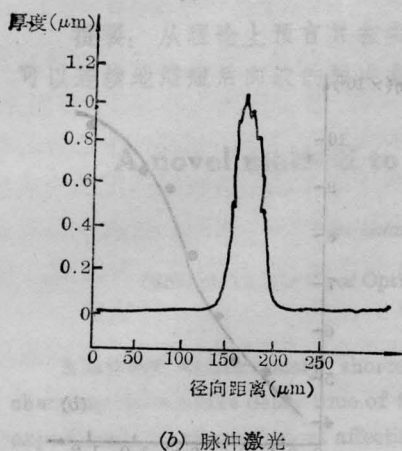
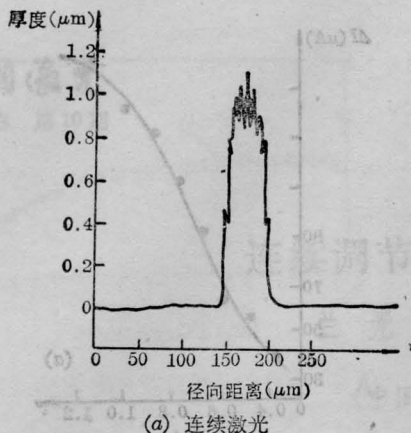


图5 镀点厚度的径向分布

4. 激光增强化学镀的实验 装置如图6所示。经过聚焦的氩激光束射入盛有化学镀铜溶液的容器，照射预先经过敏化成核处理的玻璃基片上，得到了微小的铜镀点。实验还在预先镀有镍膜的基片上

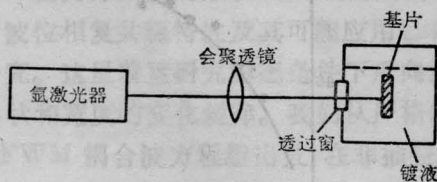


图6 实验装置示意图

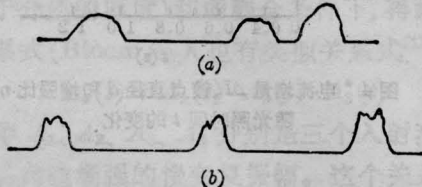


图7 镀点表面形态(放大倍数:垂直方向 $\times 5000$, 水平方向 $\times 25$)

(a) 无膜玻璃基片 (b) 预镀镍膜基片

进行了化学镀铜,也得到了铜镀点。镀点的直径、厚度及表面形态用轮廓仪测量和描绘,其结果如图7所示。我们也用金相显微镜拍摄了铜镀点的金相显微照片。

实验研究了入射激光强度、光照时间对镀点厚度和直径的关系,也研究了镀液 pH 值对化学镀沉积速率的影响。在我们的实验条件下,得到的激光增强化学镀铜的速率为 $7.5 \mu\text{m}/\text{min}$,而在无激光照射时的速率约为 $0.75 \mu\text{m}/\text{hr}$,增强比达到 600。

实验所使用的镀液在化学镀过程中可能会产生 Cu_2O 微粒,引起入射激光在溶液中的散射损失,因此实验得到的镀点直径要比激光增强电镀(加外电源)的镀点直径大,大约在 $100 \mu\text{m}$ 数量级。适当选择镀液配方及改进操作步骤可以减小镀点直径。

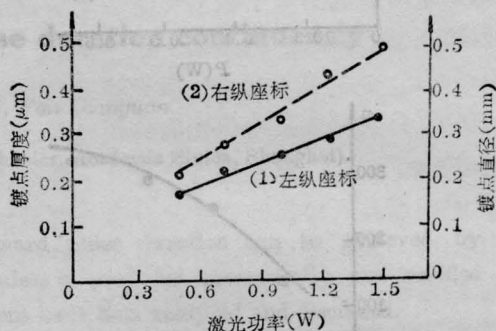


图8 镀点直径和厚度随激光功率的变化

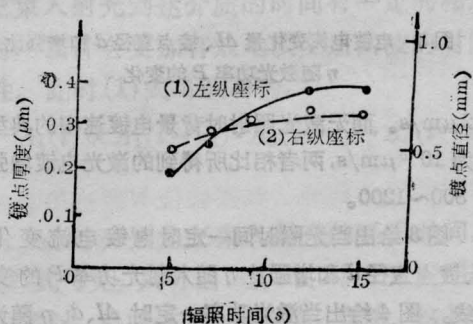


图9 镀点直径和厚度随辐照时间的变化

下面讨论影响化学镀铜的几个因素。

(1) 激光强度对镀点直径和厚度的影响

图8表明,当辐照时间固定时(光照时间为10s),在一定范围内镀点直径和厚度与激光强度呈线性关系。

(2) 辐照时间对镀点直径和厚度的影响

图9表明,当激光入射功率固定时(均为1.5 W),在一定范围内镀点直径和厚度随光照时间增加而增强,但逐渐出现饱和现象。

(3) 镀液 pH 值的影响

镀液的 pH 值对铜的沉积速率影响较大。实验表明,当镀液中含 NaOH 约为 4.0 g/l 时,得到几乎无背景的镀点;但当 NaOH 含量小于 3.5 g/l 时,不出现激光增强效应。

作者对浙江大学光仪系陈钰清副教授的有益建议和薄膜光学研究室的帮助表示感谢。本系王逸凡

、李振华、陆茵、边少华、张德顺和王建设诸同志在实验中做了许多工作,作者一并致谢。

参 考 文 献

- [1] R. J. Von Gutfeld *et al.*, *IBM J. Res. Develop* 1982, **26**, 136.
- [2] R. J. Von Gutfeld *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1983 **43**, 876.
- [3] R. J. Von Gutfeld *et al.*; *Apl. Phys. Lett.*, 1979, **35**, 651.

(1986年5月29日收稿)

激光脉冲转盘调制打孔的研究

孙 堃 富崇大 孙秀男 胡秉文 夏 卿 董清泉

(吉林工业大学)

(吉林柴油机厂)

Investigation on laser pulse drilling with disc-rotor modulation

Sun Kun, Fu Chongda, Sun Xiunan, Hu Bingwen, Xia Qing

(Jilin University of Technology, Changchun)

Dong Qingquan

(Jilin Diesel Engine Factory, Changchun)

Abstract: Laser pulse width can be narrowed and pulse number and the interval can be controlled with disc-rotor modulation. Laser drilling by disc-rotor modulation can further improve the accuracy, surface finishing and stability.

本文报道在不改变原来激光电源的基础上,为了能够灵活地按需要控制激光脉宽、脉冲个数、脉冲间隔、脉冲的重复频率以及切去较缓的脉冲后沿,采用了激光脉冲转盘调制法。下面是一些主要结果。

1. 激光转盘调制打孔参数计算

当激光脉冲通过高速旋转的带有一定长度孔槽的圆盘时(图1),激光脉冲便可根据要求得到调制:

(1) 改变孔槽的长度,就可以改变激光的脉冲宽度,切去激光脉冲较缓的后沿,可以得到脉宽窄后沿陡的激光脉冲。

(2) 将孔槽进行分割,就可以得到一定数目、脉宽及间隔的子脉冲,从而改变子脉冲的重复频率。

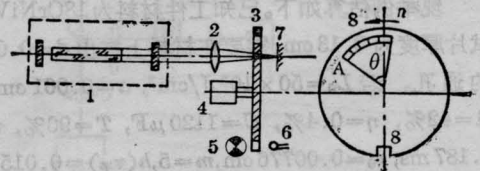


图 1

- 1—激光器; 2—聚焦透镜; 3—转盘; 4—电机;
- 5—灯泡; 6—光电管; 7—工件; 8—孔槽

激光脉冲宽度 τ 和转盘转速 n 之间有如下关系:

$$\tau = \frac{\theta}{2\pi n} \quad (1)$$