

工艺参数对氮化铝陶瓷表面激光 金属化层电阻的影响

徐帅^{1,2}, 赵兴科^{1,2}, 赵增磊¹

(1. 北京科技大学顺德研究生院, 广东 佛山 528399;
2. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: **目的** 提高氮化铝陶瓷表面激光金属化层的导电性能。**方法** 采用正交试验设计方案, 使用 30 W 纳秒光纤激光打标机制备了氮化铝陶瓷表面激光金属化试样, 测量了金属层的电阻。通过极差分析和方差分析方法分析了激光工艺参数及其交互作用对氮化铝陶瓷表面激光金属化层电阻值的影响规律。**结果** 在本研究激光工艺参数及其取值范围内, 激光功率对氮化铝表面激光金属化层电阻的影响最为显著, 增大激光功率有利于降低氮化铝表面激光金属化层的电阻值。采用优化工艺参数 (激光功率 30 W、频率 30 kHz、扫描速度 100 mm/s) 单次激光扫描制备激光金属化层的电阻为 2.25 Ω/mm 。随着重复扫描次数的增加, 功率不同的激光表面金属层的电阻值向相反方向转变: 小功率激光表面金属层电阻值随扫描次数增加而迅速减小, 大功率激光表面金属层电阻值随扫描次数增加而增大。经 10 次重复扫描后, 激光功率 3 W (相应的激光能量密度约为 15.3 J/cm^2) 激光金属化层的电阻值低于功率分别为 30 W 和 18.75 W 激光金属化层的电阻值。**结论** 采用 30 W 激光单次扫描, 或者采用 3 W 激光多次扫描, 有利于提高氮化铝表面激光金属化层的导电性。

关键词: 氮化铝; 陶瓷基板; 表面金属化; 电阻; 正交试验; 激光能量密度; 扫描次数

中图分类号: V261.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)05-0398-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.05.039

Effect of Process Parameters on Resistance of Laser Metallized Layer of AlN Ceramics

XU Shuai^{1,2}, ZHAO Xing-ke^{1,2}, ZHAO Zeng-lei¹

(1. Shunde Graduate School, University of Science and Technology Beijing, Guangdong Foshan 528399, China;
2. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: Aluminum nitride (AlN) ceramics are excellent materials for electronic packaging substrates. Selective surface

收稿日期: 2022-03-24; 修订日期: 2022-08-24

Received: 2022-03-24; Revised: 2022-08-24

基金项目: 广东省重点领域研发计划激光与增材制造专题 (2019B90907002); 佛山市科技创新专项 (BK21BE003)

Fund: The Key-Area Research and Development Program of Guangdong Province (2019B90907002); the Scientific and Technological Innovation Foundation of Foshan Government (BK21BE003)

作者简介: 徐帅 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光表面加工。

Biography: XU Shuai (1999-), Male, Postgraduate, Research focus: laser materials processing.

通讯作者: 赵兴科 (1966—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为材料加工。

Corresponding author: ZHAO Xing-ke (1966-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: materials engineering.

引文格式: 徐帅, 赵兴科, 赵增磊. 工艺参数对氮化铝陶瓷表面激光金属化层电阻的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(5): 398-404.

XU Shuai, ZHAO Xing-ke, ZHAO Zeng-lei. Effect of Process Parameters on Resistance of Laser Metallized Layer of AlN Ceramics[J]. Surface Technology, 2023, 52(5): 398-404.

laser metallization can simplify the manufacturing process of AlN substrates, shorten the manufacturing period and reduce the manufacturing cost. As conductivity of laser metallization layers cannot meet requirements for printed circuits of high-power devices, this paper carried out a systematic laser process experiment, aiming to find a way to improve the conductivity of the laser metallization layer on the surface of AlN ceramics. AlN ceramic samples used in this study was a commercially available ceramic sheet with a purity of 98wt.%, with a size of 25 mm×15 mm×1 mm. The laser scanning area was a rectangle with a size of 8 mm×1 mm. The ceramic test pieces were first rinsed with distilled water, then ultrasonically cleaned with absolute ethanol for 10 min, and dried in cold air for use. The laser equipment was a 30 W nanosecond fiber laser marking machine. The Taguchi method was adopted and a L16 (4³) orthogonal scheme was selected. Three process parameters were laser power (12-30 W), frequency (20-50 kHz) and scanning speed (100-700 mm/s), respectively. Resistance values of laser metallization area was measured through the four-terminal method. The laser scanning areas under the orthogonal test parameters all had lower resistances. The resistance value of T14 sample was the smallest, which was 18 Ω (line resistance 2.25 Ω /mm); the resistance value of T1 sample was the largest, which was 220 Ω (line resistance 27.5 Ω /mm). It showed that the combination of process parameters in this study could make AlN surface laser-metallized. Laser power had the most significant effect on the resistance of the laser metallization layers of AlN samples within the process parameters and their value ranged in this study. The optimized process parameters based on the minimum resistance value were: laser power 30 W, frequency 30 kHz, and scanning speed 100 mm/s. The resistance value of the metal layer on the aluminum nitride surface prepared by single laser scanning with the optimized process parameters was 2.25 Ω /mm. With laser scanning number increased, resistance value of the metallized layer changed to the opposite direction: resistance decreased rapidly for the low-power laser process, while resistance increased rapidly for the higher-power laser process. After laser scanning for 10 times, the resistance value of the laser metallized layer with a laser power of 3 W (corresponding to a laser energy density of about 15.3 J/cm²) was lower than those of with laser power of 30 W and 18.75 W. Under the experimental parameters of this study, the resistance of the laser-metallized layers decreased with the increase of the laser fluence. It is worth pointing out that as the laser energy density in this study is mainly concentrated in 30-100 J/cm², the optimum fluence and minimum achievable resistance cannot be determined. It suggests from this study that a single scan with a higher power laser or multiple scans with a lower power laser is beneficial to improve conductivity of laser laser-metallized surface layers of AlN substrates.

KEY WORDS: AlN; ceramic substrate; surface metallization; resistance; orthogonal test; laser fluence; scanning number

氮化铝陶瓷具有高绝缘性、高导热性、低线胀系数、耐腐蚀等性能,是制造功率电子器件基板和电路板的理想材料^[1-2]。表面金属化是氮化铝陶瓷在电子封装领域应用的关键^[3]。然而,氮化铝是强共价键化合物,化学惰性大、与其他物质的反应能力低,导致氮化铝陶瓷的表面金属化非常困难。传统的氮化铝陶瓷表面金属化方式主要有难熔金属烧结法、非难熔金属烧结法、活性金属烧结法和化学镀法等^[4-6]。这些方法都存在工艺复杂、效率低、成本高等缺点。近年来,氮化铝陶瓷表面的激光金属化方法受到关注^[7-8]。

氮化铝陶瓷表面的激光金属化是基于高能量密度激光产生的热效应,使氮化铝表面局部发生分解,从而形成一定厚度的金属铝沉积层^[9]。金属铝沉积层的形成主要取决于激光作用下氮化铝的热分解过程和氮化铝的烧蚀过程^[10]。由于氮化铝陶瓷的激光金属化过程短暂、反应复杂,其金属化效果的影响因素众多,造成了不同文献报道的试验研究结果相差较大。Pedraza 等^[11]使用不同波长的激光(193、248、351 nm)得到氮化铝的烧蚀阈值为 0.5 J/cm²。Preusch 等^[12]使用 1 064 nm 激光确定的氮化铝烧蚀阈值为 18 J/cm²。

Koziol 等^[13]使用 1 064 nm 激光确定的氮化铝烧蚀阈值为 200 J/cm²。Yang 等^[14]使用纳秒光纤激光(1 064 nm)研究发现,激光能量密度为 50 J/cm²时,表面金属化层的电阻最小,约为 6 Ω /mm。Takahashi 等^[15]使用 CO₂ 激光器(1 064 nm)在不同真空度下辐照氮化铝表面,其金属化表层的最小线电阻为 0.64 Ω /mm,这也是迄今为止报道的激光金属化层的最小电阻。该电阻值仍然低于普通印刷电路中的导体线电阻(0.2~0.4 Ω /mm)。随着大功率芯片器件的发展,对氮化铝激光基板电路导电性的要求也相应提高。为了实现氮化铝表面激光金属化的推广应用,需要广泛而深入地开展不同试验条件下氮化铝陶瓷表面激光金属化研究,积累更多的试验数据。为此,本研究选用纳秒光纤激光器,采用正交试验方法,系统研究激光工艺参数对氮化铝陶瓷表面金属化的影响,着重分析主要工艺参数及其交互作用对氮化铝陶瓷表面激光金属化层导电性能的影响规律。本研究旨在积累氮化铝陶瓷表面激光金属化层的相关试验数据,从而提高氮化铝表面激光金属化层的导电性、促进激光表面金属化铝陶瓷基板在电子封装领域的应用提供参考。

1 试验

试验用氮化铝陶瓷试样为商用高频绝缘陶瓷,购自深圳市佳日丰泰电子科技有限公司。陶瓷的纯度 $\geq 98\%$ (质量分数),微观结构为多晶与玻璃相,尺寸规格为 25 mm \times 15 mm \times 1 mm。先将陶瓷试片用蒸馏水冲洗,再使用无水乙醇超声清洗 10 min,冷风吹干备用。

试验用激光设备为便携式激光打标机(30 W,山东省聊城市绘天激光设备有限公司),主要性能参数为:激光波长 1 064 nm,最大功率 30 W,脉冲频率 1~60 kHz,脉冲宽度 80~140 ns,焦距 180 mm。

将清洁的氮化铝陶瓷试片放置在与激光束垂直的工作台面上,试片的上表面位于聚焦激光束的焦点平面。将聚焦激光束按设定路径选区扫描氮化铝陶瓷表面,从而在氮化铝陶瓷表面获得尺寸为 8 mm \times 1 mm 的激光金属化区域。激光扫描路径及形成的激光金属化样品如图 1 所示。

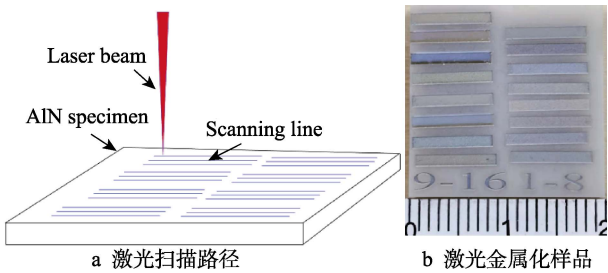


图 1 氮化铝陶瓷表面激光金属化工艺示意图
Fig.1 Schedule diagram of AlN ceramic surface laser metallization process: a) laser scan paths; b) laser-metallized samples

激光金属化工艺参数采用正交试验设计。结合激光器参数和前期探索试验,本研究采用正交试验以确定各主要工艺参数的影响主次顺序和优化工艺参数。正交试验设计为 L16 (4^3),选取的 3 个工艺参数分别为激光功率、频率和扫描速度;每个因素选取 4 个水平,见表 1。其他固定工艺参数为:激光束焦斑直径 50 μm ,扫描线间距 10 μm 。为了对正交试验结果进行方差分析,在正交试验设计中安排了空列。

氮化铝陶瓷激光金属化的效果采用测量电阻值评价,电阻值越小则激光金属化的性能越好。电阻值

表 1 正交试验的因素与水平
Tab.1 Factors and levels of orthogonal test

Levels	Laser power(A)/W	Frequency(B)/kHz	Scanning speed (C)/(mm \cdot s $^{-1}$)
1	12	20	100
2	18	30	300
3	24	40	500
4	30	50	700

测量仪器为四端子电阻测试仪(ST-2722,苏州晶格电子有限公司),测量长度为 8 mm。

2 结果与分析

2.1 正交试验结果

2.1.1 正交试验数据

表 2 列出了正交试验安排以及每种工艺参数下制备激光金属化区域的电阻测量结果。从表 2 可以看出,正交试验参数下的激光扫描区域都具有较低的电阻。T14 样品的电阻值最小,为 18 Ω (线电阻 2.25 Ω/mm);T1 样品的电阻值最大,为 220 Ω (线电阻 27.5 Ω/mm),表明上述所有激光工艺参数都可以在氮化铝陶瓷表面获得导电的铝金属层。

表 2 正交试验工艺参数与样品的电阻值测量结果
Tab.2 Orthogonal test process parameters and resistance measurements

Samples	A	B	C	Blank	Resistance/ Ω
T1	1	1	1	1	220
T2	1	2	2	2	120
T3	1	3	3	3	140
T4	1	4	4	4	192
T5	2	1	2	4	99
T6	2	2	3	3	88
T7	2	3	4	2	95
T8	2	4	1	1	103
T9	3	1	3	2	62
T10	3	2	4	1	68
T11	3	3	1	4	53
T12	3	4	2	3	158
T13	4	1	4	3	59
T14	4	2	1	4	18
T15	4	3	2	1	62
T16	4	4	3	2	90

2.1.2 正交试验极差分析

采用正交试验极差分析方法确定工艺参数对氮化铝表面激光金属化层电阻影响的主次顺序。正交试验的极差分析计算结果列于表 3。图 2 给出了 3 个因素影响的直观分析图。可以看出,激光功率(因素 A)对氮化铝表面金属线电阻的影响最大,增大激光功率有利于降低氮化铝表面激光金属化层的电阻。激光频率(因素 B)对氮化铝表面激光金属化层电阻也有明显影响。而激光扫描速度(因素 C)的极差低于空列的极差,说明在本研究方案设计的激光扫描速度范围内,激光扫描速度对氮化铝表面激光金属化效果的影响小。该结果同时也反映出本研究方案中两种因素之间存在一定的交互作用。事实上,扫描频率(因素 B)

和扫描速度 (因素 C) 共同对激光斑点分布有影响。激光斑点分布可以用激光斑点重叠率表示, 见式 (1)^[15]。

$$\Pi = \left(1 - \frac{V}{v\omega_0}\right) \tag{1}$$

式中: Π 为重叠率 (%); v 为激光频率 (Hz); V 为激光扫描速度 (mm/s); ω_0 为单脉冲激光作用斑点直径 (mm)。激光脉冲重复作用于某一点时, 会产生热累积效应。

根据极差分析得到的最优参数为 A4B2C3, 即: 激光平均功率为 30 W, 激光重复频率为 30 kHz, 激光扫描速度为 500 mm/s。采用优化工艺参数制备的氮化铝表面金属化样品, 测量的电阻值为 24 Ω (线电阻 3 Ω /mm)。与正交试验各样品相比, 优化工艺参数样品的电阻值略大于 T14 试样的电阻, 而比其他试样的电阻都小。忽略试验误差因素的影响, 优化工艺参数试样的电阻值可以证明本研究正交试验数据可靠和有效。

表 3 正交试验多因素方差分析结果
Tab.3 Variance calculations of multi-factors
in orthogonal test

	Laser power (A)	Frequency (B)	Scanning speed (C)	Blank
I	168	110	112.75	122.75
II	96.25	73.5	109.75	83.75
III	85.25	87.5	80.75	99.25
IV	57.25	135.75	103.5	101
R	110.75	62.25	32	39

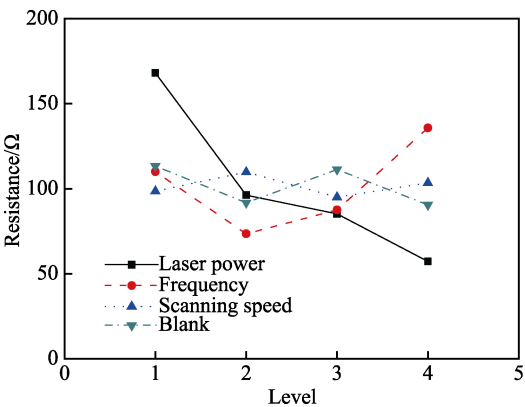


图 2 正交试验的极差分析直观显示
Fig.2 Visual display of range analysis
for orthogonal test

2.1.3 正交试验方差分析

采用正交试验极差分析方法确定激光工艺参数对氮化铝表面激光金属化层电阻的影响。计算结果列于表 4。从表 4 可以看出, 激光功率是显著因素, 重复频率和扫描速度不是显著因素。尽管重复频率和扫描速度存在可能的交互作用, 但是激光功率的 F 比值远高于其余各因素, 因此激光功率是最显著的因素。

方差分析结果与极差分析结果一致, 进一步佐证本正交试验设计合理、数据可靠。此外, 正交试验工艺参数的决定系数可以按式 (2) 计算确定, 即:

$$D = 1 - 3\,423.2 / (26\,687.2 + 8\,900.7 + 2\,516.2 + 3\,087.2 + 3\,423.2) = 0.923 \tag{2}$$

由决定系数计算可以得知, 在本研究正交试验参数选择区间, 激光功率、激光频率和扫描速度等 3 个工艺参数对氮化铝表面铝金属线电阻产生显著影响, 除此之外再无其他重要工艺参数。换言之, 本研究正交试验参数选择是全面合理的, 没有遗漏重要工艺参数。

表 4 正交试验多因素方差分析结果
Tab.4 Variance calculations of multi-factors
in orthogonal test

Source	Sum of squares of deviations S	Degree of freedom f	F ratio	Statistical significance
Laser power (A)	26 687.2	3	7.796	*
Frequency (B)	8 900.7	3	2.600	
Scanning speed (C)	2 516.2	3	0.735	
Blank	3 087.2	3	0.902	
Error	3 423.2	3	$*\alpha=0.1, F_{th}=5.39$	

2.2 分析讨论

2.2.1 交互作用与激光能量密度

在本研究正交试验条件下, 激光功率和激光频率都是氮化铝表面激光金属化的影响因素。从图 2 可以看出, 随着激光平均功率的增大, 氮化铝表面金属线电阻单调下降。而激光重复频率对氮化铝表面金属电阻的影响则是呈现先降后升的复杂关系。实际上, 对氮化铝表面金属化效果影响最大的工艺参数是激光能量密度, 激光作用下的氮化铝的热分解和氮化铝的烧蚀都与激光能量密度密切相关^[17-20]。激光能量密度可以通过式 (3) 计算^[21]。

$$\phi = \frac{8P}{\pi Fd^2} \tag{3}$$

式中: ϕ 为激光能量密度 (J/mm^2); P 为激光平均功率 (W); F 为激光重复频率 (Hz); d 是光斑直径 (mm)。按照本研究的正交试验设计, 激光平均功率与激光重复频率的交互作用见表 5。将表 5 中交互作用参数组合代入式 (3), 可以计算出交互作用参数组合的激光能量密度, 进一步绘制出氮化铝表面金属线电阻随激光能量密度的变化趋势, 如图 3 所示。从图 3 可以看出, 在本研究试验参数下, 氮化铝表面激光金属化层的电阻随激光能量密度的增加而减小。该结论与正交试验极差分析结果相符, 即增大激光功率有利于降低氮化铝表面激光金属化层电阻。激光能量密度为 100 J/cm^2 时, 样品具有最小的电阻。

值得指出, 本研究的激光能量密度主要集中在 30~100 J/cm²。由于激光能量密度高于 100 J/cm² 的样品数量较少, 尚不能确定最佳的能量密度和能达到的最小电阻。

表 5 激光平均功率与激光重复频率的交互作用下的线电阻

Tab.5 Resistance under interaction of laser power and frequency

	Ω			
	A1	A2	A3	A4
B1	220	99	62	59
B2	120	88	68	18
B3	140	95	53	62
B4	192	103	158	90

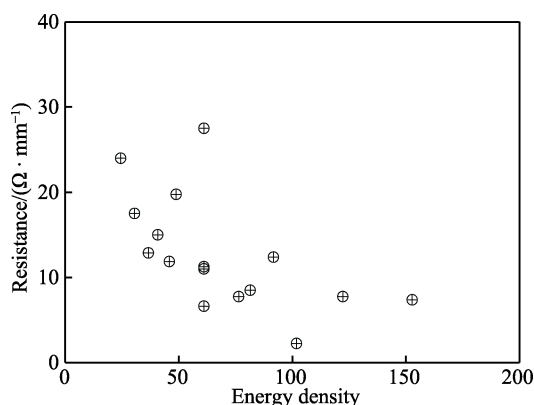


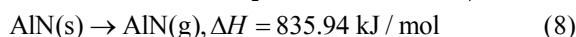
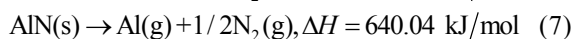
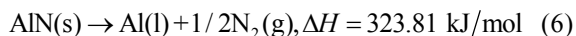
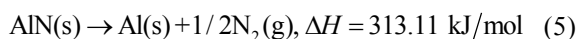
图 3 氮化铝表面金属线电阻随激光能量密度的变化趋势

Fig.3 Tendency of AlN metal wire resistance changing with laser fluence

氮化铝陶瓷表面激光金属化的基本原理是激光的热效应导致氮化铝发生热分解, 从而产生金属铝沉积层。氮化铝表面激光金属化层电阻的大小取决于激光热分解效应和激光烧蚀效应。常压下氮化铝的热分解温度为 2 200~2 700 °C^[22], 熔点为 2 797 °C^[23], 而金属铝的熔点和沸点分别为 660 °C 和 2 342 °C。当一定能量密度的激光作用在氮化铝表面时, 氮化铝表面同时发生氮化铝的热分解过程和汽化烧蚀过程。Nedyalkov 等^[24]系统地研究了氮化铝激光烧蚀过程, 认为对于所有波长的激光烧蚀都是通过陶瓷的分解来实现的。激光能量密度增加过程中, 氮化铝表面首先发生热分解过程, 随着激光能量密度的进一步提高, 才发生烧蚀过程。因此, 在氮化铝烧蚀过程之前, 激光作用氮化铝表面金属铝沉积量随激光能量密度的增大而增加; 当氮化铝开始烧蚀效应后, 氮化铝表面金属铝沉积量的增加趋势变缓, 甚至开始减少。理论上, 氮化铝烧蚀的激光能量阈值可以用式 (4) 计算确定^[24]。

$$\phi^{\text{th}} = \frac{(\rho \cdot C \cdot T_d)}{\alpha(1-r)} \quad (4)$$

式中: ϕ^{th} 为氮化铝激光烧蚀阈值 (J/mm²); ρ 为氮化铝的密度 (g/cm³); C 为氮化铝的比热容 (J/(kg·K)); T_d 为氮化铝汽化温度 (K); r 为氮化铝表面对激光的反射率 (%); α 为氮化铝表面对激光的吸收系数 (%)。氮化铝表面对激光的吸收和反射与激光波长有关。使用不同波长的激光器时, 氮化铝烧蚀阈值存在差异。即使是采用相同波长的激光, 不同研究得到的氮化铝烧蚀阈值也存在较大的差异。从图 3 的试验结果看, 本研究正交试验条件下, 氮化铝激光烧蚀阈值应当为 100 J/cm²。该激光烧蚀阈值试验结果介于 Koziol 等^[13]和 Yang 等^[14]的试验结果之间, 前者为 200 J/cm², 后者为 50 J/cm²。因此, 可以推测, 本研究工艺参数下, 氮化铝表面激光金属化层的形成机制源于激光的热作用。金属层的数量是激光热作用下氮化铝分解和分解出的铝金属汽化烧蚀的综合结果。高能激光作用在氮化铝表面可以引起的化学反应见式 (5) — (9)^[25]。



式中: s、l 和 g 分别代表固态、液态和气态; ΔH 为反应焓 (kJ/mol)。由式 (5) — (7) 可知, 随着能量的增加, 氮化铝陶瓷解析出的铝金属先从固态变为液态, 最后变为气态。当激光能量继续增加时则发生式 (8) 或式 (9) 的反应, 此时氮化铝直接分解为铝蒸气和氮原子, 甚至氮化铝直接气化。因此, 为了获得较高质量的金属铝层, 必须选择合适的能量密度, 这样才可以保证尽可能多的氮化铝分解成金属铝、而尽可能少的金属铝发生汽化烧蚀。留下的金属铝越多, 则氮化铝表面激光金属化层的电阻越小、激光金属化的效果也就越好。

2.2.2 提高氮化铝表面金属线导电性的措施

本研究正交试验参数下, 氮化铝陶瓷表面激光作用区均显示出良好的导电性, 电阻测量值分布在 18~220 Ω 之间。激光扫描区域为 8 mm×1 mm, 电阻值是对 8 mm 长度金属线的测量结果。因此, 绝对电阻可以换算成单位长度的相对电阻值。正交试验样品的绝对电阻范围换算成相对电阻范围为 2.25~27.5 Ω/mm , 而优化工艺参数样品的相对电阻为 3 Ω/mm 。

Hirayama 等^[27]使用波长 248 nm 的 KrF 准分子得到的氮化铝陶瓷表面激光金属化层的最小相对电阻为 34.5 Ω/mm 。Yang 等^[14]在空气中使用纳秒光纤激光器 (波长 1 064 nm) 辐射氮化铝陶瓷表面, 金属层的最小相对电阻接近 6 Ω/mm 。本研究得到的最小电阻为 2.25 Ω/mm , 显然优于上述文献。然而, 印刷电路中的常规导体线电阻为 0.2~0.4 Ω/mm 。减小激光金属化层的电阻是今后氮化铝陶瓷表面激光金属化研究的一项重要内容, 可以选择的方法包括但不限于:

采用不同类型的激光器并优化工艺参数, 在铝金属层表面电镀导电性更好的银、铜等金属等^[10]。

为了尝试进一步减小氮化铝陶瓷表面激光金属化层的电阻, 本研究还进行了多道次激光扫描试验研究。根据上述正交试验的研究结果, 多次扫描试验的工艺参数设计依据为: 取激光功率为变量 (分别取 30、18.75、3 W), 固定其他工艺参数 (激光频率 20 kHz、扫描速度 200 mm/s、激光束焦斑直径 50 μm 、扫描线间距 10 μm)。每种激光工艺参数下在氮化铝表面同一位置重复扫描 1~30 次。按照前述方法, 在每次扫描后测量激光金属化层的电阻。电阻测量结果如图 4 所示。

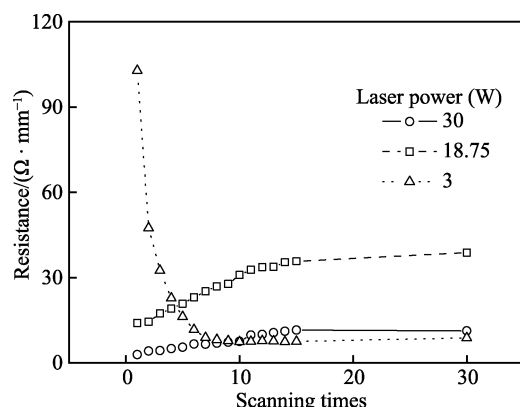


图 4 激光金属化氮化铝表面电阻与激光功率和扫描次数的关系

Fig.4 Resistance of laser metallized AlN ceramic surface as function of laser power and laser scanning times

由图 4 可以看出, 本试验中的 3 种功率的激光均可以实现氮化铝陶瓷表面的金属化。首次扫描金属层的电阻与激光功率呈正相关, 即激光功率越大, 表面金属层的电阻越小。该结果与上述正交试验的结论一致。然而, 随着扫描次数的增加, 功率不同的激光表面金属层的电阻值向相反方向改变。30 W 和 18.75 W (对应的激光能量密度分别为 152.8 J/cm² 和 95.5 J/cm²) 两种较大功率激光表面金属层电阻值随扫描次数的增加而增大; 3 W (对应的激光能量密度为 15.3 J/cm²) 小功率激光表面金属层电阻值随扫描次数的增加而迅速减小。经重复 10 次扫描后, 3 W 激光表面金属层电阻值已经低于 30 W 和 18.75 W 激光金属化层的电阻值, 三者的电阻分别为 7.38、7.5、30.88 Ω/mm 。继续增加扫描重复次数, 3 种功率激光金属化层的电阻都趋于稳定。有趣的是, 18.75 W 中等功率的激光金属化效果, 在单次扫描情况下不及 30 W 高功率, 而在多次重复扫描情况下不及 3 W 小功率。推测产生这种现象的原因与铝金属沉积数量在氮化铝分解总量的占比有关。3 W 时铝金属汽化烧蚀较轻, 沉积铝金属在氮化铝分解铝金属总量中的占比较高; 而高功率时铝金属汽化烧蚀较重, 沉积铝金属在氮化铝分解铝金属总量占比较大。随着扫描道次的增加, 激光能

量输入增大, 当两者的激光能量输入对应氮化铝分解总量达到饱和时, 小功率激光累积的沉淀铝金属量多于大功率激光累积的沉淀铝金属量。多次重复扫描情况下, 不同功率激光与氮化铝陶瓷表面的作用机制值得今后重点关注。

3 结论

1) 在本研究工艺参数范围内, 激光功率对氮化铝表面金属化层电阻的影响显著, 增大激光功率有利于降低氮化铝表面金属化层的电阻。激光频率和激光扫描速度的影响较小。

2) 在激光功率 30 W、频率 30 kHz、扫描速度 100 mm/s 的激光工艺参数 (对应的激光能量密度为 100 J/cm²) 下, 获得表面金属层相对电阻的最小值为 2.25 Ω/mm , 与现有文献相比处于领先水平。

3) 随着重复扫描次数的增加, 功率不同的激光表面金属化层的电阻值向相反方向转变: 小功率激光表面金属层电阻值随扫描次数的增加而迅速减小, 大功率激光表面金属层电阻值随扫描次数的增加而增大。

4) 经 10 次重复扫描后, 3 W (对应的激光能量密度为 15.3 J/cm²) 小功率激光表面金属层的电阻低于 30 W 和 18.75 W 激光表面金属层的电阻。多次重复扫描情况下, 不同功率激光与氮化铝陶瓷表面的作用机制值得关注。

参考文献:

- [1] LEE Ran-rong. Development of High Thermal Conductivity Aluminum Nitride Ceramic[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1991, 74(9): 2242-2249.
- [2] HUANG Dong, LIU Zheng, HARRIS J, et al. High Thermal Conductive AlN Substrate for Heat Dissipation in High-Power LEDs[J]. Ceramics International, 2019, 45(1): 1412-1415.
- [3] 胡向洋, 汪荣昌, 顾志光, 等. 以氮化铝陶瓷为基板的倒扣封装工艺研究[J]. 固体电子学研究进展, 2001, 21(2): 211-215.
HU Xiang-yang, WANG Rong-chang, GU Zhi-guang, et al. Study of He Process of the Flip Chip Package Based on Aluminum Nitride Substrate[J]. Research & Progress of Solid State Electronics, 2001, 21(2): 211-215.
- [4] 石强. 氮化铝瓷金属化方法研究进展[J]. 中国陶瓷, 1995, 31(1): 36-40.
SHI Qiang. The Advance of Study on Metallizing Method for Aluminum Nitride[J]. China Ceramics, 1995, 31(1): 36-40.
- [5] 夏章能, 徐洁. AlN 陶瓷化学镀法金属化机理[J]. 表面技术, 1999, 28(2): 20-22, 49.
XIA Zhang-neng, XU Jie. Mechanisms of Metallization of Aluminum Nitride Ceramics by Electroless Plating[J].

- Surface Technology, 1999, 28(2): 20-22, 49.
- [6] TERASAKI N, OHASHI T, NAGATOMO Y, et al. A New Method for Liquid-Phase Bonding of Copper Plates to Aluminum Nitride (AlN) Substrates Used in High-Power Modules[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2019, 30(7): 6552-6555.
- [7] ZHAO Jian, WANG Xiang-wang, SHU Feng-yuan, et al. Research on Microstructure of Copper Coatings on AlN Ceramic Surface by Laser Cladding and Brazing[J]. Materials Research Express, 2020, 7(7): 075104.
- [8] LUMPP J K. Excimer Laser Machining and Metallization of Vias in Aluminium Nitride[J]. Materials Science and Engineering: B, 1997, 45(1-3): 208-212.
- [9] 黄平奖, 王晓峰, 李琦, 等. AlN 陶瓷激光金属化的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 070002.
- HUANG Ping-jiang, WANG Xiao-feng, LI Qi, et al. Research Progress on Laser Metallization of AlN Ceramic[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 070002.
- [10] MORITA N, WATANABE T, YOSHIDA Y. Direct Formation of Conductor Films by Laser Sublimating of Ceramics [J]. Applied Physics Letters, 1989, 54(20): 1974-1975.
- [11] PEDRAZA A, ZHANG J Y, ESROM H. Surface Modification of Aluminum Nitride and of Aluminum by Excimer Laser[J]. MRS Proceedings, 1992, 285(1): 209.
- [12] PREUSCH F, ADELMANN B, HELLMANN R. Micromachining of AlN and Al₂O₃ Using Fiber Laser[J]. Micromachines, 2014, 5(4): 1051-1060.
- [13] KOZIOL P E, ANTOŃCZAK A J, SZYMCZYK P, et al. Conductive Aluminum Line Formation on Aluminum Nitride Surface by Infrared Nanosecond Laser[J]. Applied Surface Science, 2013, 287: 165-171.
- [14] YANG Qi-biao, CHEN Yang, LV Zhi-huai, et al. Nanosecond Laser Surface Processing of AlN Ceramics[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(22): 13874-13882.
- [15] BRIHMAT-HAMADI F, AMARA E H, KELLOU H. Characterization of Titanium Oxide Layers Formation Produced by Nanosecond Laser Coloration[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48(3): 1439-1449.
- [16] SHAO Jing, ZHANG Ruo-lan, HAN Su-li, et al. The Activation Threshold Evaluation of Metallization for Aluminum Nitride Ceramic under Nanosecond Laser Pulses in Air[J]. Ceramics International, 2021, 47(17): 24707-24712.
- [17] ANTOŃCZAK A J, KOZIOL P E, BOGUSZ S, et al. Direct Selective Metallization of AlN Ceramics Induced by Laser Radiation[J]. 2014, 8968: 896814.
- [18] BELYAKOV A V, KUZNETSOVA I G, KUFTYREV R Y, et al. Metallization of Aluminum Nitride Ceramic (Review) [J]. Glass and Ceramics, 2012, 69(7): 270-273.
- [19] YUNG K C, CHEN Cong, LEE C P. Laser Induced Activation of Circuit Lines and Via-Holes on AlN for Electroless Metal Plating[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(15): 6601-6606.
- [20] SUN Zhan-liang, LENZNER M, RUDOLPH W. Generic Incubation Law for Laser Damage and Ablation Thresholds[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(7): 073102.
- [21] 成健, 杨震, 廖建飞, 等. 氮化铝表面激光金属化研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(7): 77-86, 149.
- CHENG Jian, YANG Zhen, LIAO Jian-fei, et al. Research Progress on Laser Metallization of AlN Surface[J]. Surface Technology, 2022, 51(7): 77-86, 149.
- [22] MÁRQUEZ AGUILAR P A, VLASOVA M, KAKAZEY M, et al. Features of Formation of Channels during Laser Treatment of AlN Ceramics[J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(1): 172-179.
- [23] D'YACHKOV L G, ZHILYAKOV L A, KOSTANOVSKII A V. Melting of Aluminum Nitride at Atmospheric Nitrogen Pressure[J]. Technical Physics, 2000, 45(7): 928-930.
- [24] NEDYALKOV N, DIKOVSKA A, ALEKSANDROV L, et al. Nanosecond Laser Ablation of AlN Ceramic[J]. Applied Physics A, 2021, 127(12): 1-10.
- [25] HIRAYAMA Y, YABE H, OBARA M. Selective Ablation of AlN Ceramic Using Femtosecond, Nanosecond, and Microsecond Pulsed Laser[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 89(5): 2943-2949.
- [26] ANTONCZAK A J, KOZIOL P E, STEPAN B, et al. Direct Selective Metallization of AlN Ceramics Induced by Laser Radiation[C]// Conference on Laser-based Micro- and Nano-Processing VIII. San Francisco: [n. s.], 2014: 896814.
- [27] HIRAYAMA Y, OBARA M. Ablation of BN Ceramics by Femtosecond and Picosecond Laser Pulses[C]// XIII International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High-Power Laser Conference. Florence: SPIE, 2001: 586-589.

责任编辑: 万长清