

AlN 陶瓷激光金属化的研究进展

黄平奖¹, 王晓峰^{2,3}, 李琦¹, 张紫辰^{2,4}, 潘岭峰^{2,3}

¹桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004;

²中国科学院微电子研究所微电子设备技术研究室, 北京 100029;

³中国科学院半导体研究所半导体集成技术工程中心, 北京 100083;

⁴清华大学精密仪器系微纳制造器件与系统协同创新中心精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084

摘要 介绍了氮化铝(AlN)陶瓷激光金属化的进展和金属化过程中的问题以及主要解决方法。激光金属化利用激光的热效应使 AlN 表面发生热分解, 直接生成金属导电层, 该方法具有成本低、效率高、设备维护简单等优点。进一步介绍了激光器、光束质量、工艺参数等的优化方法以及 AlN 陶瓷金属化的应用, 并对 AlN 陶瓷激光金属化在未来的发展进行了展望。

关键词 激光光学; 金属化; 光束类型; AlN

中图分类号 TN205 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.070002

Research Progress on Laser Metallization of AlN Ceramic

Huang Pingjiang¹, Wang Xiaofeng^{2,3}, Li Qi¹, Zhang Zichen^{2,4}, Pan Lingfeng^{2,3}

¹College of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology,
Guilin, Guangxi 541004, China;

²Laboratory of Microelectronic Equipment Technology, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of
Sciences, Beijing 100029, China;

³Engineering Research Center for Semiconductor Integrated Technology, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

⁴State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Collaborative Innovation
Center for Micro/Nano Fabrication, Device and System, Department of Precision Instrument,
Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract The progress on laser metallization of aluminium nitride (AlN) ceramics and the problems in the process of metallization are introduced. The major solutions to these problems are proposed as well. Based on the laser thermal effect, the thermal decomposition occurs on the AlN surface by laser metallization, and the metal conductive layer is generated directly, which has the advantages of low cost, high efficiency, simple equipment maintenance and so on. The optimization methods of laser, beam quality and process parameters and the applications of AlN ceramic metallization are introduced. The development of AlN ceramic metallization in the future is prospected.

Key words laser optics; metallization; beam type; AlN

OCIS codes 140.3295; 140.3300; 140.3390

收稿日期: 2017-01-18; **收到修改稿日期:** 2017-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(61376083)、中国博士后科学基金特别资助(2015T80080)

作者简介: 黄平奖(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事功率器件与激光微加工方面的研究。

E-mail: 1101851132@qq.com

导师简介: 王晓峰(1976—), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光微加工方面的研究。

E-mail: wangxiaofeng@ime.ac.cn(通信联系人)

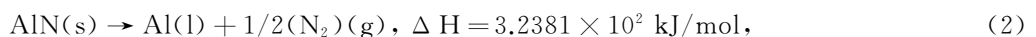
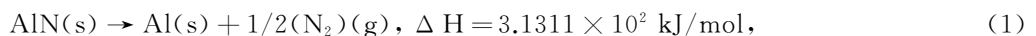
1 引言

近年来,随着大规模集成电路及电子设备向高速化、多功能、小型化、低功耗方向发展,相关应用对高性能、高密度电路的需求日益增加。其中,芯片制造业对芯片的封装测试也提出了要求,需要寻找更优异的材料用于封装制备。氮化铝(AlN)陶瓷具有导热系数高、膨胀系数低、介电常数低和高频下介电损耗低等优点,是理想的电子封装材料,可作为基板制成印制电路(PCB)板应用于高频电路中。另外,AlN陶瓷具有优越的传热性能,适用于大功率电路。AlN陶瓷在高频大功率场合的应用通常会遇到与金属或陶瓷进行连接的问题,由于AlN属于共价键较强的化合物,一般的钎料不能润湿陶瓷表面。因此,通常需将AlN表面改性,使其具有金属性质(即金属化),然后再采用常规的钎焊工艺实现AlN与金属的连接。

目前,已报道的AlN陶瓷金属化的方法主要有:薄膜金属化(如Ti/Pd/Au)、厚膜金属化(低温金属化、高温金属化)、化学镀金属化(如Ni)、直接覆铜法(DBC)及激光金属化。薄膜金属化法采用溅射镀膜等真空镀膜法使膜材料和基板结合在一起,由于是气相沉积,原则上任何金属都可以成膜,任何基板都可以金属化,而且沉积的金属层均匀,结合强度高^[1-2]。但薄膜金属化需要后续图形化工艺实现金属引线的图形制备,成本较高。厚膜金属化法是在陶瓷基板上通过丝网印刷形成封接用金属层、导体(电路布线)及电阻等,通过烧结形成钎焊金属层、电路及引线接点等。厚膜金属化的步骤一般包括:图案设计,原图、浆料的制备,丝网印刷,干燥与烧结。厚膜法的优点是导电性能好,工艺简单,适用于自动化和多品种小批量生产,但结合强度不高,且受温度影响大,高温时结合强度很低^[3-5]。化学镀金属化法是在没有外电流通过的情况下,利用还原剂将溶液中的金属离子还原在呈催化活性的物体表面上,在物体表面形成金属镀层。化学镀法金属化的结合强度很大程度上依赖于基体表面的粗糙度,在一定范围内,基体表面的粗糙度越大,结合强度越高^[6-8];另一方面,化学镀金属化法的附着性不佳,且金属图形的制备仍需图形化工艺实现。直接覆铜法利用高温熔融扩散工艺将陶瓷基板与高纯无氧铜覆接到一起^[9-10],所形成的金属层具有导热性好、附着强度高、机械性能优良、便于刻蚀、绝缘性及热循环能力高的优点,但是后续也需要图形化工艺,同时对AlN进行表面热处理时形成的氧化物层会降低AlN基板的热导率^[11-12]。在上述几种常见的金属化方法中,薄膜金属化、化学镀金属化法、直接覆铜法的工艺流程相对复杂,而且涉及到图形化工艺,增加了生产周期和生产成本。厚膜金属化虽然工艺简单,但是结合强度不高且易受温度影响。为了解决以上问题,近年来,激光金属化方法逐渐成为人们研究的热点之一。激光金属化利用激光的热效应使AlN表面发生热分解,直接生成金属导电层,具有成本低、效率高、设备维护简单等优点,在生产实践中得到了广泛的应用。

2 AlN激光金属化

激光照射到AlN陶瓷表面后,陶瓷表面吸收激光的能量,表面温度上升。当AlN表面温度达到热分解温度时,AlN表面就会发生热分解,析出金属铝。在不同能量下,AlN的分解有所不同^[13]:



式中s,l,g分别代表固态,液态和气态, ΔH 为反应焓。由(1)~(3)式可知,随着能量的增加,AlN陶瓷分解析出的铝金属先从固态变为液态最后变为气态。当能量继续增加时发生(4)、(5)式的反应,AlN陶瓷直接气化或直接分解为铝蒸气和氮原子。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,这样才能使AlN陶瓷表面形成固体铝层,同时氮原子以气体方式析出。此外,在激光金属化过程中,影响析出金属铝线品质的因素除了能量密度之外,还包括激光器、光束质量以及其他参数,下面对相关因素予以详细介绍。

3 激光器的选择

选用不同的激光器,激光金属化的效果也不相同,常见的激光器有:准分子激光器、CO₂激光器、固体激

光器等,选择合适的激光器是 AlN 陶瓷金属化的关键因素之一。

3.1 准分子激光器

准分子激光器是一种以准分子为工作物质的气体激光器。它的工作原理是利用电子束激励含有稀有气体和卤素气体的混合气体,当受激态准分子的不稳定分子键断裂而形成基态原子时,受激态的能量以激光辐射的形式放出,常见的准分子激光波长有 193,248,308,351 nm 等。准分子激光器具有方向性高、波长纯度高、单脉冲能量较高、热影响区小等优点^[14]。目前,已经有学者利用准分子激光器进行 AlN 激光金属化的相关实验。Pedraza 等^[15]选用三种波长的准分子激光器[ArF(193 nm)、KrF(248 nm)和 XeF(351 nm)],在空气中辐照 AlN 陶瓷表面时形成导电层的最小电阻率依次为 1.65×10^{-7} , 1.03×10^{-7} , $0.64 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$,比纯铝的 $2.83 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 大了一个数量级。此外,这三种波长的激光对 AlN 陶瓷的烧蚀速率也不相同,其中 KrF 激光的烧蚀速率比另外两种激光的高。在相同能量密度下,KrF 的烧蚀速率分别是 ArF、XeF 的 4~8 倍和 2~3 倍^[16-18],这是由 AlN 陶瓷对波长的吸收率决定的。刘文等^[19]对 AlN 陶瓷与波长透射率之间的关系进行了比较详细的分析,其中波长与透射率之间的关系如图 1(a)所示,可以看出,AlN 陶瓷在波长为 200~300 nm 范围内具有较强的吸收率,因此,KrF(248 nm)激光器的烧蚀速率高于 ArF(193 nm)和 XeF(351 nm)激光器的。Hirayama 等^[20]在真空环境下,利用 KrF 准分子激光器辐照 AlN 陶瓷表面,得到最小线电阻为 $34.5 \Omega \cdot \text{mm}^{-1}$ 。Toenshoff 等^[21]在实验中利用 XeCl 准分子激光器辐照 AlN 陶瓷表面,形成的金属层的最小线电阻为 $7.2 \Omega \cdot \text{mm}^{-1}$,线电阻较 Hirayama 等^[20]的减小了约 4/5,但还未达到布线的线电阻 ($0.2 \sim 0.4 \Omega \cdot \text{mm}^{-1}$,线宽为 $500 \mu\text{m}$)的要求。其中,AlN 烧蚀的扫描电镜(SEM)图如图 1(b)所示,可以看出,金属化过程中形成了凹槽和两个侧壁,且边缘不规整,在中心区域出现了液体冻结的形态。这是由于激光金属化过程中的温度比较高,AlN 陶瓷分解产生的金属铝呈液态形式,之后冷却固化形成液体冻结^[16]。金属化导线电阻偏大,金属化边缘不规整,以及准分子激光器价格昂贵、维修保养费用高等缺点,使得准分子激光器进行的 AlN 陶瓷金属化实验无法直接应用于工业 PCB 布线。

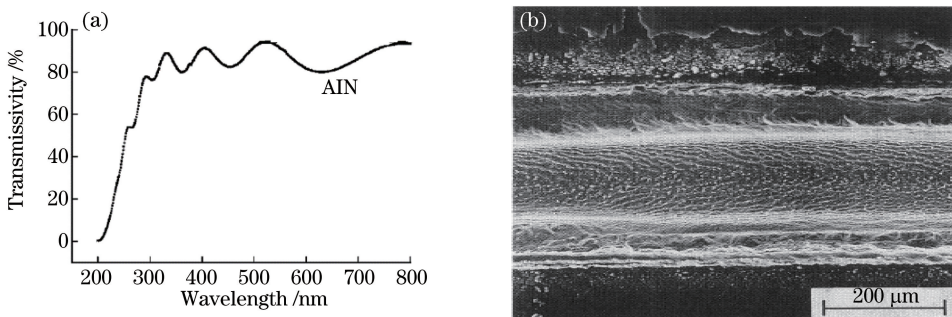


图 1 (a) AlN 透射光谱^[16]; (b) AlN 烧蚀的 SEM 图片^[16]

Fig. 1 (a) Transmission spectrum of AlN^[16]; (b) SEM image of AlN ablation^[16]

3.2 CO₂ 激光器

CO₂ 激光器也是一种分子激光器,其工作原理是通过内部的放电管产生电子,电子与内部气体分子(如 N₂、He)发生碰撞将能量传递给 CO₂ 分子,CO₂ 分子发生跃迁出现粒子数反转并发出激光。CO₂ 激光器具有光束质量高、输出稳定、光束相干性好等特点^[22]。与准分子激光器相比,CO₂ 激光器的功率高、价格相对便宜、工业化成熟,因此学者们也开展了使用 CO₂ 激光器进行 AlN 陶瓷金属化的研究。Hirayama 等^[20]使用 CO₂ 激光器在真空条件下辐照 AlN 陶瓷表面,得到厚度为 $1 \mu\text{m}$ 、最小线电阻约为 $0.1 \Omega \cdot \text{mm}^{-1}$ 的铝导线。CO₂ 激光器和 KrF 激光器的作用效果对比图如图 2 所示。与 KrF 激光辐照 AlN 陶瓷表面形成的铝层相比,CO₂ 激光器得到的铝导线厚度为 $1 \mu\text{m}$,扩大了 10 倍,最小线电阻也从 $34.5 \Omega \cdot \text{mm}^{-1}$ 减小到 $0.1 \Omega \cdot \text{mm}^{-1}$,这是由于 AlN 陶瓷对不同波长具有不同的吸收系数。吸收系数是表明单位厚度物质对光的吸收程度的系数,数值越高表示物质对光的吸收能力越强,光的穿透深度也越低,其中穿透深度与吸收系数呈倒数关系。AlN 陶瓷对 CO₂ 激光器(波长为 $10.8 \mu\text{m}$)和 KrF 激光器(波长为 248 nm)的吸收系数分别为 $7 \times 10^2 \text{ cm}^{-1}$ 和 $1.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$,对应的穿透深度分别为 $14.28 \mu\text{m}$ 和 $0.67 \mu\text{m}$ 。因此,采用 CO₂ 激光器能达

到布线的电阻要求。随着激光能量密度的增加,生成的铝导线的平坦性和电导率都有所改善。与其他工艺相比,AlN 与金属材料界面间的附着强度较好。但是,采用 CO₂ 激光器时,AlN 陶瓷金属化边缘处形成的金属化层疏松、金属粘附性不强,且能量过高会使表面发生微结构裂变,造成电导率下降。此外,CO₂ 激光器具有体积大、结构复杂、维修保养费用高等缺点,目前还无法应用于 AlN 金属化的工业生产中。

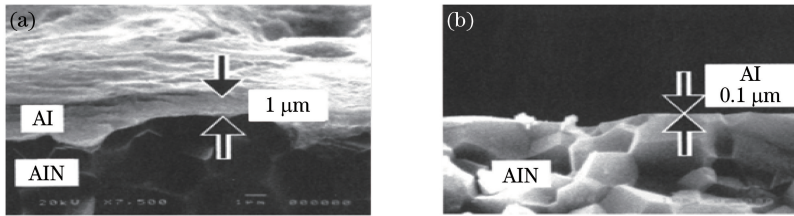


图 2 (a) CO₂ 激光器对应的 Al 层截面图^[20]; (b) KrF 激光器对应的 Al 层的截面图^[20]

Fig. 2 (a) Cross section of Al layer corresponding to CO₂ laser^[20];

(b) cross section of Al layer corresponding to KrF laser^[20]

3.3 固体激光器

固体激光器由工作物质、抽运系统、谐振腔和冷却、滤光系统构成。抽运系统辐射光能,经过聚焦腔辐照固体工作物质,工作物质中的激活粒子有效吸收光能,形成粒子数反转,通过谐振腔输出激光。固体激光器具有以下优点:1) 输出能量大,峰值功率高;2) 结构紧凑耐用,价格适宜;3) 晶体材料种类数量多。固体激光器工作物质的种类非常多,目前已有一百多种,而且有增长的趋势。随着大量高性能材料的出现,固体激光器的性能得到进一步提高^[23]。与准分子激光器以及 CO₂ 激光器相比,固体激光器具有波长范围广、体积小、寿命长、免维护、维修费用低以及功率高等优点,是适用于 AlN 陶瓷金属化的激光器。Arkadiusz 等^[13,15]在空气、氮气和氩气条件下,使用 Nd:YAG 激光器辐照 AlN 陶瓷表面,形成的金属化层厚度可达 3~10 μm;但金属化层表面会生成团聚物,金属化层具有多孔性,随着能量的增加,空气中生成的金属化层甚至会发生微裂变,而氮气和氩气保护下团聚物的尺寸变大,多孔性更加突出,如图 3 所示,这些都是由激光器本身的光束质量造成的。因为固体激光器的出射光束为圆形高斯光束,中间能量高,边缘能量低,导致边缘金属致密性差、附着性低以及厚度小。增加能量后,中间能量太高会使金属化层产生裂变,电阻增加,附着性下降。

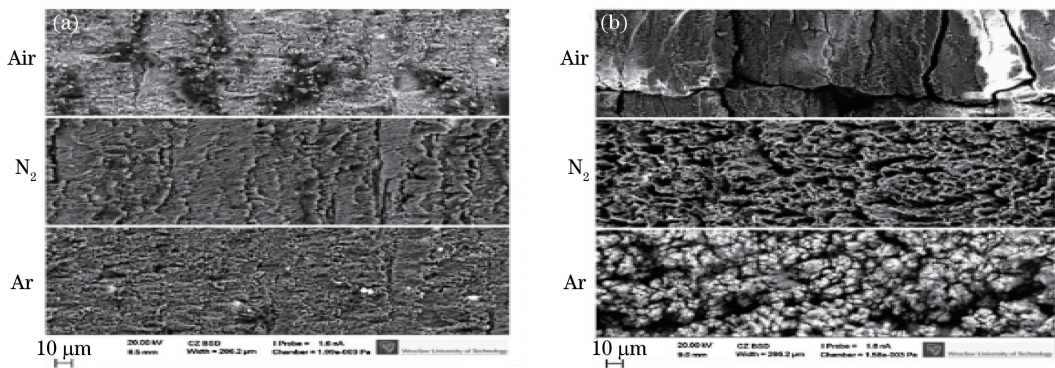


图 3 不同气氛下的表面 SEM 图^[15]。(a)激光通量低于烧蚀阈值;(b)激光通量高出烧蚀阈值

Fig. 3 SEM images of surfaces under different atmospheres^[15].

(a) For laser fluence close to ablation threshold; (b) for laser fluence higher than ablation threshold

综上所述,由准分子激光器直接图形化 AlN 陶瓷表面,形成的金属层厚度较小,电阻率较高,同时准分子激光器具有体积大、价格昂贵、维护费用高等缺点,不太适合用于 AlN 陶瓷金属化的大规模工业生产。CO₂ 激光器照射形成的导电层厚度适中,在一定的条件下电阻能达到布线要求,但金属层边缘的质量不理想。固体激光器最适于工业化生产,形成的金属层厚度最大,但是固体激光器的高斯光束特性使得金属化铝导线的质量不高,为此对用于 AlN 陶瓷金属化的固体激光器进行光束整形成为研究热点。

4 光束的选择

4.1 高斯光束

如前所述,激光光斑的能量分布及形状对 AlN 金属化有重要影响,因此,要得到良好的 AlN 陶瓷金属化结果,必须对激光光斑的能量分布进行优化调整。激光器的出射光束为圆形高斯光束,光束中心能量高边缘能量低,直接使用高斯光束进行活化处理会带来本征的不均匀性问题,主要表现为:活化获得的金属铝层厚度不均匀,光斑中心区域对应的铝层厚度大于光斑边缘的。此外,与边缘铝层相比,光斑中心的铝层致密度大,基底 AlN 层的粘附性好。为了保证所获得铝层的连续性,需要激光光斑有足够的重叠,但是这会降低处理的速度,并影响边缘的均匀性。随着重叠率的增加,方块电阻减小且边缘均匀性有所改善,然而,重叠率的增加导致单位面积的能量也增加,容易引起 AlN 的烧蚀。Bischoff 等^[24]对高斯光束和平顶光束在激光微加工方面的优缺点进行了分析。高斯光束与平顶光束加工效果的对比图如图 4 所示,可知高斯光束不是理想的选择。

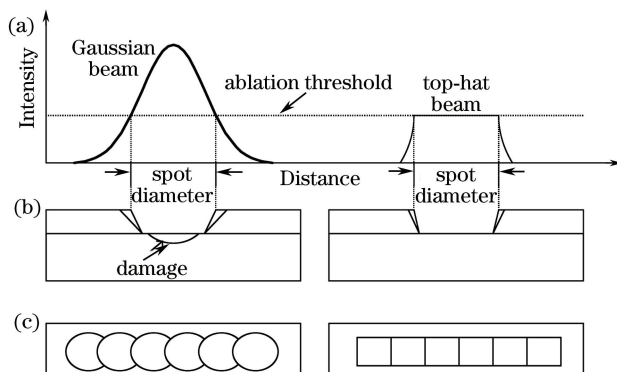


图 4 高斯光束与平顶光束对比图。(a)光强分布;(b)加工物体截面;(c)加工物体表面

Fig. 4 Comparison of Gaussian beam and top-hat beam. (a) Light intensity distribution;

(b) cross section of object to be machined; (c) surface of object to be machined

4.2 平顶光斑

平顶光斑具有能量分布均匀的特性,能较好地解决激光金属化 AlN 陶瓷形成的铝导线不均匀的问题。当平顶光斑为方形时,不仅能从根本上消除高斯光束导致的活化不均匀现象,而且可以减小光斑的重叠率,并保证边缘的均匀性。因此,平顶光斑是 AlN 陶瓷激光金属化的最佳选择。获取平顶光斑的方法一般有三种:微透镜阵列、非曲面光学、二元光学。其中,微透镜阵列主要通过灰度微纳加工得到,具有效率高、无中心亮点等优点,但是它的加工难度大,光斑形状的可调性弱,能量分布的调控能力差;非曲面光学则是通过折射整形的方式得到光斑,它同样具有效率高、无中心亮点等优点,但加工难度更大,对光斑的调控能力也存在不足;二元光学的方法是目前实验常用的方法,它利用台阶拟合连续曲面,微纳加工相对容易,而且光斑形状及尺寸灵活可控,可以通过优化设计及加工工艺消除中心衍射零级亮斑,从而得到良好的平顶光束。利用二元光学的方法,将高斯光束的能量进行重新分布,得到能量分布均匀的平顶光束,如图 5 所示。从图 5(a)可以看出高斯光束的特点,中间能量高边缘能量低,通过自行设计加工的整形元件可以得到图 5(b)所示的能量

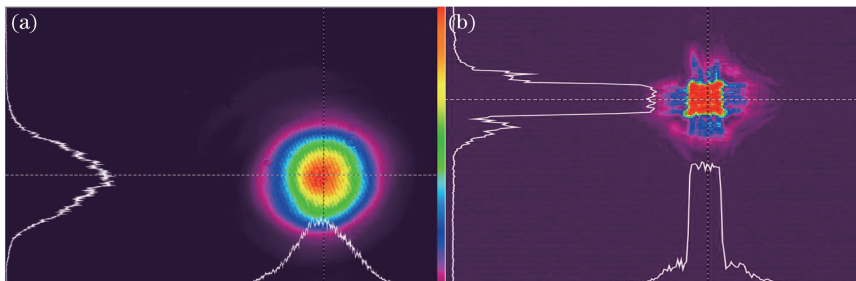


图 5 能量分布图。(a)高斯光束;(b)平顶光束

Fig. 5 Energy distributions. (a) Gaussian beam; (b) top-hat beam

分布均匀的方形光斑。从图 5(b)中可以看出,通过二元光学元件的高斯光束变成了能量分布均匀的方光斑,光斑顶部较光滑,上升沿和下降沿陡降,是较为理想的方光斑。因此,可以通过二元光学的方法解决激光器光束能量分布不均匀的问题。

5 工艺参数的选择

5.1 烧蚀阈值

固体材料的激光烧蚀本质上是一种光热现象。通常把引起材料烧蚀的最低激光能量密度(固体材料表面单位面积上的激光能量)称为激光烧蚀阈值 $F_{th}^{[25]}$ 。AlN 陶瓷金属化的过程,其本质也是一种光热现象。AlN 陶瓷金属化的烧蚀阈值表达式^[20]为

$$F_{th} = \frac{\rho \cdot C \cdot T_d}{\alpha(1-R)}, \quad (6)$$

式中 ρ 为材料密度, C 为材料的比热容, α 为吸收系数, R 为材料的光学反射系数, T_d 为最小分解温度。由(6)式可知,材料的烧蚀阈值与材料特性有密切联系,不同材料的烧蚀阈值不同。因此,在进行 AlN 陶瓷激光金属化实验时,首先要确定 AlN 陶瓷的激光烧蚀阈值。Pedraza 等^[9]在实验中已经确定了 193, 248, 351 nm 激光下 AlN 陶瓷的烧蚀阈值约为 $0.5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。但是,AlN 陶瓷对不同波长光的吸收系数不同,因此,在选用其他波长的激光器进行金属化实验时,需重新寻找对应波长的烧蚀阈值。

5.2 激光光斑重叠率

激光光斑重叠率是指两个光斑重叠部分的大小,重叠率越高则重叠部分越大。AlN 陶瓷激光金属化时,重叠率的高低直接影响金属化效果。然而,重叠率的选取根据实验结果确定,其数值具有一定的分布区间,而且不同种类的激光器加工样品的最优重叠率不相同。因此,为了能得到合适的重叠率,必须通过实验选择。重叠率的计算公式^[26]为

$$O_v = 1 - \frac{v}{d \cdot f} \times 100\%, \quad (7)$$

式中 v 为扫描速率, d 为表面光束直径, f 为脉冲重复频率。Arkadiusz 等^[13]利用 Nd:YAG 激光器和 Yb:glass 激光器对 AlN 陶瓷表面进行了激活实验,发现氩气和氮气条件下电阻随着激光重叠率的变大呈下降趋势;而在空气环境下,当脉冲重叠率为 86%~92%时,出现电阻为无穷大的现象,如图 6 所示。造成以上现象的原因是高斯光束的能量不均匀。激光器的出射光束为圆形高斯光束,中间能量高,边缘能量低,从而导致边缘金属致密性差、附着性低、厚度小。增加能量后,中间能量太高会使金属化层产生裂变,电阻增加,且附着性下降。为了保证金属层均匀性,光束之间的重叠率必须选择一个合适的值。

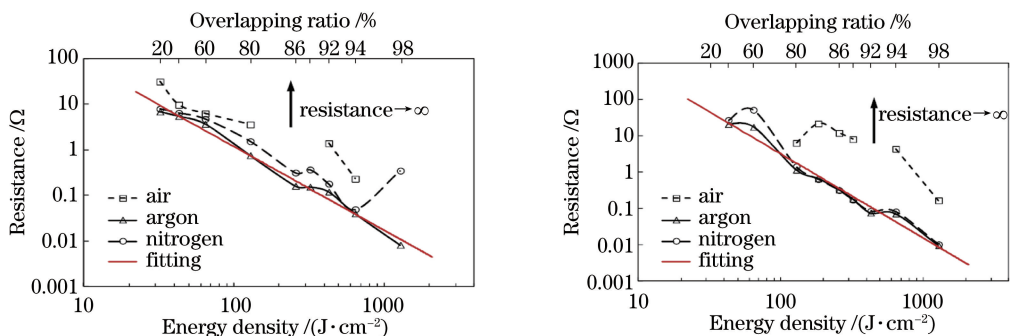


图 6 激光照射下的电阻变化趋势^[13]。(a) Nd:YAG 激光器;(b) Yb:glass 激光器

Fig. 6 Change trend of resistance under laser radiation^[13]. (a) Nd:YAG laser; (b) Yb:glass laser

5.3 气体氛围

AlN 陶瓷的激光金属化实质是一个热分解反应,对气体氛围比较敏感。Pawel 等^[13, 20]分别在空气、氮气、氩气三种气体环境下进行了 AlN 陶瓷的激光金属化实验。将空气、氮气、氩气这三种气氛下的实验结果进行对比分析可知,氩气环境下的金属化结果最好,如图 7 所示。可以看出,随着能量密度从 $10 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 增

加到 $1000 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$, 空气环境下的方块电阻从 33Ω 减至 0Ω , 相同条件的氮气和氩气环境下的方块电阻也从 8Ω 减至 0Ω 。在上述三种气体氛围中, 方块电阻都随着能量密度的增加而减小, 这是由于随着能量密度的增加, AlN 的分解更加彻底, 形成的金属铝层更致密, 从而减小了方块电阻。在这三种气体氛围中, 空气环境下的方块电阻最大; 当能量密度为 $30 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, 空气环境下的方块电阻是氮气和氩气环境下的 5 倍左右。导致这一现象的原因是, 在空气环境下, 空气中的氧气会与生成的金属铝发生二次反应生成氧化铝, 从而增加了电阻。而在相同能量密度下, 氮气环境下的阻值只是稍高于氩气环境下的, 这是由于这两种气体环境都可以有效抑制金属铝的氧化, 从而获得阻值比较小的方块电阻。但是, 在氮气氛围中, AlN 热分解产生的氮气不易扩散, 且容易发生二次反应生成氮化铝, 因此金属化效果不理想。而在氩气环境下, 氩气稀释 AlN 分解出的氮气, 减弱了铝和氮气发生的二次反应, 故在氩气环境下的金属化效果最佳。因此, 在进行 AlN 金属化实验中, 选择一种合适的气体氛围也是获得良好金属的关键因素之一。

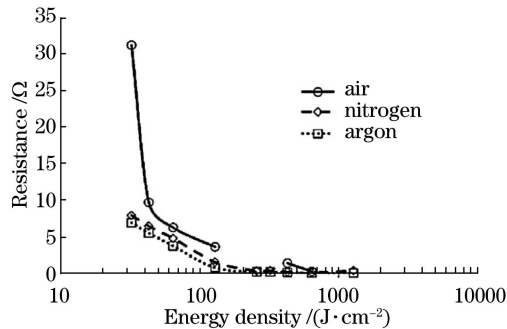


图 7 不同气氛下 AlN 金属化方块的电阻^[15]

Fig. 7 Resistances of AlN metallization blocks under different atmospheres^[15]

6 结束语

AlN 陶瓷的金属化方法有许多, 包括薄膜金属化、厚膜金属化、化学镀金属化、直接覆铜法及激光金属化等。每种金属化方法都有其各自的优缺点, 其中激光金属化具有工艺步骤少、成本低、效率高、设备维护简单等诸多优点。但是, 激光金属化也同样面临着许多问题, 如: 金属化层表面生成团聚物并呈多孔性, 金属化层的附着性差和金属厚度不均等。针对这些问题, 许多学者进行了相关研究并提出了解决的办法, 如选用不同种类的激光器, 选用平顶光束来改善能量分布以及改变实验的气体氛围。通过这些方法, 激光金属化的效果得到了明显的改善。因此, 随着研究的深入, AlN 陶瓷激光金属化的问题有望逐一得到解决, 激光金属化在生产实践中的应用也会越来越广泛。

参 考 文 献

- [1] Lu Yanping, Gao Longqiao. Surface metallization and welding of aluminum nitride ceramic[J]. Vacuum Science & Technology, 2000, 20(3): 190-193.
鲁燕萍, 高陇桥. AlN 陶瓷的薄膜金属化及其与金属的焊接研究[J]. 真空科学与技术学报, 2000, 20(3): 190-193.
- [2] Zhan Yujuan, Zhou Lingping, Zhu Jiajun, *et al.* Influence of AlN ceramic surface state on adhesion of Ti/Ni metallized thin films[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(1): 152-158.
占娟娟, 周灵平, 朱家俊, 等. AlN 陶瓷表面状态对 Ti/Ni 金属化薄膜粘结性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(1): 152-158.
- [3] Zheng Honglei, Yang Dean. Advances in research of thick film metallization for AlN[J]. Electronic Components & Materials, 2006, 25(12): 5-7.
郑洪雷, 杨德安. AlN 陶瓷厚膜金属化研究进展[J]. 电子元件与材料, 2006, 25(12): 5-7.
- [4] Zhou Lingping, Chen Daorui, Peng Kun, *et al.* Stress control of metallized copper thin film on AlN ceramic surface[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2010, 37(11): 55-59.
周灵平, 陈道瑞, 彭坤, 等. 陶瓷表面金属化 Cu 薄膜应力调控[J]. 湖南大学学报(自科版), 2010, 37(11): 55-59.

- [5] Wang Lili. Study on the preparation of Au/Pt powder used for thick film metallization of AlN[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
王莉莉. AlN厚膜金属化浆料用 Au/Pt 粉体的制备[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [6] Xia Zhangneng, Xu Jie. Mechanism of AlN ceramic electroless plating metallization[J]. Surface Technology, 1999, 28(2): 20-22.
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.
- [7] Zhong Xiaojing, Qin Mingli, Li Hui, *et al.* The technology research of electroless nickel plating on AlN ceramic surface[J]. Vacuum Electronics, 2011, 3: 14-17.
钟小婧, 秦明礼, 李慧, 等. AlN陶瓷表面化学镀镍工艺[J]. 真空电子技术, 2011, 3: 14-17.
- [8] Wang Xiaohong, Zhang Jinqiang, Feng Peizhong, *et al.* Optimization of bath composition for electroless copper plating on aluminum nitride ceramic surface[J]. Electroplating & Finishing, 2009, 28(12): 25-27.
王晓虹, 张金强, 冯培忠, 等. 氮化铝陶瓷表面化学镀铜溶液组成的优化[J]. 电镀与涂饰, 2009, 28(12): 25-27.
- [9] Jiang Pan. Preparation and properties of copper metallized aluminum nitride substrate by direct bonding copper method[D]. Hunan: Hunan University, 2015.
蒋盼. 氮化铝陶瓷直接覆铜基板的制备及性能研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2015.
- [10] Li Lei, Wu Jijun, Li Guogang, *et al.* Manufacturing technologies and applications of AlN DBC substrates[J]. Vacuum Electronics, 2015, 6: 50-53.
李磊, 吴济钧, 李国刚, 等. 氮化铝基陶瓷覆铜板的制作及其应用[J]. 真空电子技术, 2015, 6: 50-53.
- [11] Liu Zhen. Study on growth and surface metallization of AlN films[D]. Shanghai: Shanghai University, 2014.
刘震. 氮化铝膜的生长及表面金属化工艺的研究[D]. 上海: 上海大学, 2014.
- [12] Zhang Shanshan, Yang Huisheng, Yan Luchun, *et al.* Research on metallization and interface behavior of direct plated copper ceramic substrates[J]. Vacuum Electronics, 2016, 5: 1-6.
张珊珊, 杨会生, 颜鲁春, 等. 直接覆铜陶瓷板界面及其高温行为研究[J]. 真空电子技术, 2016, 5: 1-6.
- [13] Antończak J A, Kozioł P E, Stępek B, *et al.* Direct selective metallization of AlN ceramics induced by laser radiation[C]. SPIE, 2014, 8968: 896814.
- [14] Fan Yuanyuan, Zhou Yi, Liu Guangyi, *et al.* Compound cavity ArF excimer laser with high efficiency[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(2): 0202001.
范元媛, 周翊, 刘广义, 等. 高效率 ArF 准分子激光复合腔技术研究[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0202001.
- [15] Kozioł 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(2): 165-171.
- [16] Pedraza A J, Esrom J Y, Esrom H. Surface modification of aluminum nitride and of aluminum by excimer laser[J]. Mrs Proceeding, 1992, 285: 209.
- [17] Tsetsekou A, Zampetakis T, Stournaras C J, *et al.* Excimer laser treatment of aluminum nitride[C]. SPIE, 1993, 1810: 615-619.
- [18] Esrom H, Pedraza J Y, Pedraza A J. Excimer laser-induced decomposition of aluminum nitride[J]. Mrs Proceeding, 1991, 236: 383.
- [19] Liu Wen, Wang Zhiwu, Yang Qingdou, *et al.* Optical properties of aluminum nitride thin film[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2007, 35(5): 616-618.
刘文, 王质武, 杨清斗, 等. 氮化铝薄膜的光学性质[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(5): 616-618.
- [20] 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.
- [21] Toenshoff H K, Hesse D, Gedrat O. Gas assisted microstructuring of ceramic materials irradiated with excimer lasers[C]. SPIE, 1993, 1810: 572-576.
- [22] Shao Mingzhen, Shao Chunlei, Chen Fei, *et al.* Effect of gas flow uniformity in discharge chamber of TEA CO₂ laser on laser output[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(7): 0701005.
邵明振, 邵春雷, 陈飞, 等. TEA CO₂激光器放电区气流均匀性对激光输出的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0701005.
- [23] Li Yuanji, Zhao Xin, Feng Jinxia, *et al.* Stable all-solid-state single-longitudinal-mode pulse laser[J]. Laser &

Optoelectronics Progress, 2016, 53(6): 061411.

李渊骥, 赵鑫, 冯晋霞, 等. 稳定输出的全固态单纵模脉冲激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 061411.

[24] Bischoff C, Rädle U, Umhofer U, *et al.* Process optimized beam profiles for laser micromachining[C]. SPIE, 2013, 8600: 860024.

[25] 戚诒让, 许龙江. 金属材料的激光烧蚀阈值[C]. 全国声学学术会议, 1998.

[26] Gilbert T, Krstic V D, Zak G. Machining of aluminium nitride with ultra-violet and near-infrared Nd:YAG lasers[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 189(1): 409-417.