

文章编号: 1672-8785(2025)02-0020-06

红外组件封装电极板旋光激光加工中的热损伤及其控制

张忆南

(上海济物光电技术有限公司, 上海 201815)

摘 要: 红外组件封装中使用各种电极板, 在激光加工中需避免对其金属电极造成热损伤。基于对薄圆盘样品的热传导分析, 在合理假设下得出了激光加工过程中样品上稳态温度分布的简明清晰的解析表达式。据此, 结合电极板常用基底材料和电极材料的热学参数, 得到稳态下金电极蓝宝石电极板的热损伤距离为 3.3 mm, 并计算了不同厚度的样品所需的激光加工平均功率。此种方法适用于采用不同基底和电极材料的电极板或芯片等的激光加工中相关参数的设定以及热损伤区域大小的估计, 避免了复杂的有限元模拟, 可指导电极板设计、匹配以及设定激光加工参数。

关键词: 激光加工; 旋光切割; 热分布; 热损伤; 蓝宝石片

中图分类号: TB942 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.02.003

Thermal Damage and Its Control in Helical Laser Processing of Infrared Module Electrode Plates for Packaging

ZHANG Yi-nan

(Shanghai Jiwu Optoelectronic Technology Co., Ltd., Shanghai 201815, China)

Abstract: Various electrode plates are used in infrared module packaging, and thermal damage to their metal electrodes must be avoided during laser processing. Based on the thermal conduction analysis of thin disk samples, a concise and clear analytical expression for the steady-state temperature distribution on the sample during laser processing is obtained under reasonable assumptions. Based on this, combined with the thermal parameters of the commonly used substrate materials and electrode materials of the electrode plate, the thermal damage distance of the sapphire electrode plate with the gold electrode in the steady state is obtained to be 3.3 mm, and the average laser processing power required for samples of different thicknesses is calculated. This method is suitable for the setting of relevant parameters and the estimation of the size of the thermal damage area in the laser processing of electrode plates or chips based on different substrates and electrode materials, avoiding complex finite element simulations, and can guide the design and matching of electrode plates and the setting of laser processing parameters.

Key words: laser processing; helical cutting; thermal distribution; thermal damage; sapphire wafer

收稿日期: 2024-09-25

作者简介: 张忆南(1987-), 女, 上海人, 工程师, 主要研究方向为红外探测器组件封装。

E-mail: 666shelley@sina.com

0 引言

红外焦平面组件封装中常会用到一些电极板类零件, 其基底为绝缘介质材料薄片, 上面再制作所需的金属电极等图形; 这样的“零件”也可包括半导体芯片等。受制作工艺和成本等限制, 这些电极板上的金属电极图形一般都是在更大的薄片基底材料上采用光刻或丝印等方法批量重复制作的, 然后再通过切割、打孔、划片等方式加工成所需的电极板单元零件。由于这些电极板零件一般具有异型结构, 基底材料脆(常为高硬度材料), 难以采用常规方法进行加工。而采用激光进行加工则具有一系列优点^[1], 因此受到人们的青睐。

此类零件的激光加工中会用到振镜扫描^[2]或旋光两种模式。其中, 振镜扫描模式的激光扫描速度快, 加工中热量不易积累。但由于激光束本身形状和热消融特性的限制, 加工边缘通常不够陡直, 振镜的扫描范围也受到限制。扫描范围较大时光束本身会带有一定倾角, 使其在对样品边缘形貌有较高要求时受到限制。在旋光模式下, 由于其激光束是带有一个小角度旋转的, 类似于旋切或铣切方式, 可以通过调节来加工正锥、倒锥、直孔的边缘形状^[3]。但其激光束通常采用机械扫描的方式, 扫描速度低, 加工中产生的热量更容易积累, 导致被加工样品有更显著的温升。

在红外焦平面组件封装所用电极板的激光加工中, 有时对样品的边缘陡直度有较高要求, 因此也采用旋光模式。对于电极板常涉及的两类材料, 基底材料常具有极高的沸点或气化温度, 表观上认为激光加工区域要达到此温度方可有效地进行加工; 相对于基底材料, 电极材料则具有较低的熔点, 一般认为电极所在非加工区域的温度应维持在此熔点以下, 方可避免对电极产生热损伤; 而热损伤不仅影响美观, 也会影响性能, 严重时甚至造成失效。因此, 针对此特殊加工条件的限制, 必须对激光加工中热量的产生及其传导过程有所了解, 方可对其进行有效的控制。当前常规热分析经常

针对特例采用基于特定软件的数值计算和有限元分析等方法, 虽可具有较高精度, 但不易看出与相关参数的直观联系, 也不利于普适的理解, 且过程较为繁琐。

本文基于对薄片状样品的热传导过程分析, 得出描述激光加工中样品上温度分布的易于理解的解析表达, 并据此结合电极板所用的实际基底材料和电极材料, 对避免热损伤的条件进行定性和半定量的考量和讨论, 以期对实际工作有所指导。

1 红外组件封装电极板激光加工中的热场分析

激光加工中激光作用区的尺寸一般远小于样品尺寸; 封装电极板一般采用薄片状基底材料, 其厚度也远小于样品尺寸。为不失一般性, 采用图 1 所示的圆盘模型进行样品的传热分析。激光加工中打微孔为其基本操作, 激光束固定作用于半径为 R_s 的微小区域而形成高温热源, 热量沿径向传导; 圆盘的半径为 R_d , 稳态下其边缘的温度为 T_0 。由于圆盘的对称性, 实际二维 $T(x, y)$ 分布在极坐标 $T(r, \theta)$ 下可以按准一维径向分布 $T(r)$ 更方便地进行处理。

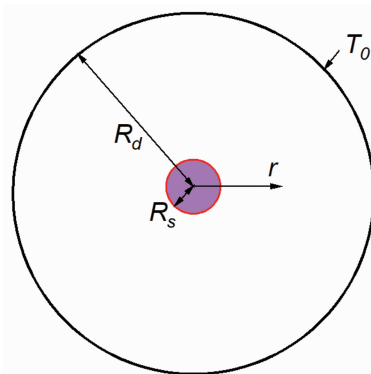


图 1 薄片样品在激光加工中的热传导的几何参数示意图

根据傅里叶传热公式^[4-5]和此情形下的边界条件, 有

$$\begin{cases} \nabla \cdot (-\gamma \nabla T) = f(r) & (\text{在薄圆盘区域中}) \\ T = T_0 & (\text{在薄圆盘边界上}) \end{cases} \quad (1)$$

考虑到激光只对 $r < R_s$ 的区域进行均匀加

热, 在此区域外并无热源, 而只是进行热传导。因此定义热源的径向分布函数 $f(r)$, 即发热区中单位体积的发热量为

$$f(r) = \begin{cases} \frac{Q}{\pi R_s^2}, & r < R_s \\ 0, & r > R_s \end{cases} \quad (2)$$

设定 γ 为薄圆盘基底材料的热导率, P 为激光平均加热功率, Q 为体积热源, d_z 为薄圆盘厚度, 即 $Q = P/d_z$ 。对于常用的激光加工波长 (如 515 nm、355 nm 等), 常用材料的吸收效率都很高, 一般在 90% 以上, 因此近似认为加热功率 P 就是激光的平均功率。相对于材料热导率, 空气的热导率极低, 因此按绝热条件作近似处理。

在此边界条件下得出径向温度分布 $T(r)$ 的解析解:

$$T(r) = \begin{cases} T_0 - \frac{Q}{2\pi\gamma} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{r^2}{R_s^2} - 1 \right) + \ln \left(\frac{R_s}{R_d} \right) \right], & r < R_s \\ T_0 - \frac{Q}{2\pi\gamma} \ln \left(\frac{r}{R_d} \right), & r > R_s \end{cases} \quad (3)$$

将相关几何尺寸、材料参数以及激光平均加热功率等代入式(3), 可进一步将其改写为温升 $(T - T_0)$ 的表达形式:

$$T - T_0 = \begin{cases} \frac{P}{2\pi\gamma d_z} \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{r^2}{R_s^2} \right) + \ln \left(\frac{R_d}{R_s} \right) \right], & r < R_s \\ \frac{P}{2\pi\gamma d_z} \ln \left(\frac{R_d}{r} \right), & r > R_s \end{cases} \quad (4)$$

这里 T_0 可以理解在所加工样品的边缘温度或最低温度 (而非室温)。定义与激光加热功率、材料热导率及其厚度相关且具有温度量纲的样品特征温度 T_c :

$$T_c = \frac{P}{2\pi\gamma d_z} \quad (5)$$

则有

$$T - T_0 = \begin{cases} T_c \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{r^2}{R_s^2} \right) + \ln \left(\frac{R_d}{R_s} \right) \right], & r < R_s \\ T_c \ln \left(\frac{R_d}{r} \right), & r > R_s \end{cases} \quad (6)$$

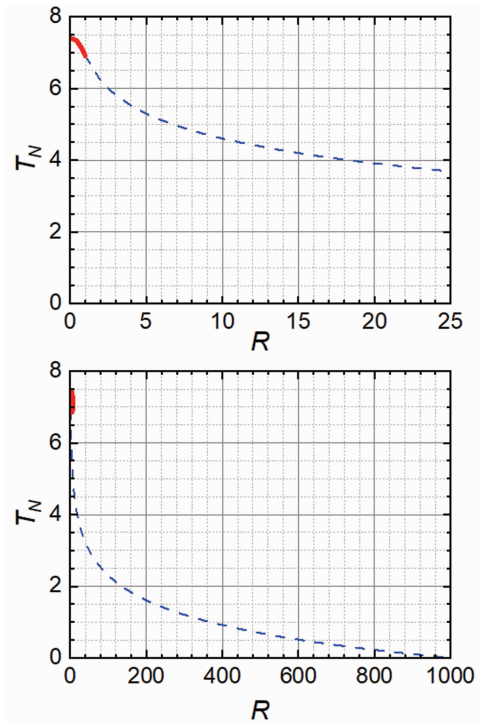


图 2 薄圆盘样品的归一化径向温度分布计算结果 (其样品直径与激光加热区直径之比 n 为 1000)

设薄圆盘半径是加热区域半径的 n 倍 (即 $R_d = nR_s$), 按 R_s 归一化的无量纲的相对半径为 $R = r/R_s$, 定义无量纲的归一化温度为 $T_N = (T - T_0)/T_c$, 则归一化无量纲的温度径向分布的简洁表达式为

$$T_N = \begin{cases} \left[\frac{1}{2} (1 - R^2) + \ln(n) \right], & R < 1 \\ \ln \left(\frac{n}{R} \right), & R > 1 \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)得到的薄圆盘样品的归一化径向温度分布计算结果如图 2 所示。为不失一般性, 设样品直径与激光加热区直径之比 n 为 1000。由式(7)可知, 此温度分布及其温度变化率在 $R=1$ 处是连续的, 符合实际情况。

2 旋光模式下电极板激光划片中的热损伤及其控制

制作电极板所涉及的材料大致有三类: 作为基底的蓝宝石或陶瓷类绝缘材料、作为电极的金属类材料以及半导体类芯片材料。它们的热学特性相差较大^[6-7]。表 1 列出了电极板可能涉及的常用材料的热学参数。其中热导率除

特别说明外均为近室温数据。由表 1 可见, 陶瓷类绝缘材料一般具有很高的熔点; 金属和半导体材料要相对低一些, 个别除外。例如, 金属钨和钼的熔点高达 3422 °C 和 2617 °C; 半导体碳化硅和氮化镓的熔点也达到 3103 °C 和 2500 °C。在热导率方面则金属较高。这些材料的沸点变化范围也较大, 单质大多具有确定的沸点或气化温度, 一些化合物则由于分解和升华等原因不具有确定的沸点或气化温度。表 1 还列出了干燥空气的热导率, 其数值要比加工材料低数个量级, 因此绝热近似是合理的。前面已经提到, 电极板加工中表观上认为激光作用区的温度要达到材料的沸点或气化温度以上才能有效地进行加工, 同时电极所在非作用区的温度要维持在金属材料的熔点以下才能避免热损伤。

以红外组件封装中常用的蓝宝石电极板为例, 其基底成分为 Al_2O_3 单晶, 熔点为 2053 °C,

沸点约为 3500 °C; 电极材料常为 Cr-Au 或 Ti、Pt、Au 等组合, 均以 Au 为主, 其他插入的薄层则起到改善黏附等作用。其导电层仍为较厚的金层, 因此电极材料一般只需考虑金(熔点为 1062 °C)。蓝宝石的沸点与金的熔点之间约有 2450 K 的差距, 这是考虑激光加工中避免热损伤的基本出发点和判据。随着温度的升高, 蓝宝石的热导率下降较快, 但高于约 700 °C 后趋于平稳。实际加工时中心区域又处于较高的温度, 因此采用其在 1000 °C 下的数值 0.1 W/(cm·K) 作为计算时的平均值。

考虑最基本的打微孔或小孔激光加工操作, 根据前面的稳态热分析, 脉冲激光的平均功率均作用于 $R \leq 1$ 的区域而形成温度的稳态分布, 这与实际基本相符。这时由于激光束在很小区域内有较长时间的停留, 最接近稳态情况, 因此可能产生热损伤的区域也最大, 可作

表 1 电极板涉及常用材料的热学参数

序号	材料种类	熔点 $T_m/^\circ\text{C}$	沸点 $T_b/^\circ\text{C}$	热导率 $\gamma/\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
1	Sapphire 蓝宝石 (Al_2O_3 单晶)	2053	≈ 3500	0.4@25 °C 0.25@400 °C 0.1@1000 °C
2	99.5% Al_2O_3 陶瓷	2054	2980	0.35
3	AlN 单晶	3273	/	2.85
4	AlN 陶瓷	3273	/	1.6
5	SiO_2 气炼石英	≈ 1700	/	0.0138
6	Si_3N_4 陶瓷	≈ 1900	≈ 3100	0.29
7	Au 金	1062	2966	3.18
8	Ag 银	961	2210	4.18
9	Pt 铂	1744	4530	0.714
10	Ag 银	961	2210	4.18
11	Cr 铬	1907	2679	0.939
12	Ti 钛	1675	3530	0.156
13	Zn 锌	419	907	1.12
14	Be 铍	1278	2970	1.75
15	In 铟	157	2060	0.830
16	Si 硅	1412	3320	1.3
17	Ge 锗	937	2830	0.58
18	GaAs 砷化镓	1240	/	0.55
19	InP 磷化铟	1060	/	0.68
20	干空气	/	/	0.000259

为最差条件进行热损伤评估。根据式(7)和图2, 加工中 $R=0$ 处达到峰值归一化温度 $T_N=7.4$; 而 $R=1$ 处的归一化温度 $T_N=6.9$, 一般认为此点温度恰好达到加工材料的沸点或气化温度为最佳。假设 T_b 为所需加工材料的沸点或气化温度, 所需的激光平均功率为

$$P = \frac{2\pi\gamma(T_b - T_0)}{\ln(n)}d_z \quad (8)$$

在实际操作中平均功率过高会引起熔融区扩大, 进而引起喷溅等; 过低则加工效率降低。

按归一化温度 $T_N=(T-T_0)/T_C$, 假设样品边缘温度 T_0 为 $200\text{ }^\circ\text{C}$, 分别以蓝宝石的沸点 $3500\text{ }^\circ\text{C}$ 和金的熔点 $1062\text{ }^\circ\text{C}$ 为参数, 针对蓝宝石片厚度为 0.4 mm 和 0.8 mm 两种情况计算出不同激光平均功率下所能达到的归一化温度 T_N 值(见图3)。根据图3也可估计出稳态近似下加工时所需的激光平均功率, 对厚度为 0.4 mm 和 0.8 mm 的蓝宝石片分别约为 12 W 和 24 W 。同时由图3还可以得出, 在前述条件下对于不同厚度的样品, 达到金电极熔点对应的归一化温度也是相等的($T_N=1.80$)。根据式(7)和图2, 此处对应的归一化半径 R 为 165 。在旋光模式下, 如果激光作用区的半径为 $20\text{ }\mu\text{m}$, 那么电极图形到作用区中心的最近距离不应小于 3.3 mm , 否则就有可能引起电极图形的热损伤。此区间即为热损伤区域。由此可见, 基底材料的沸点或气化温度与电极材料的熔点差别越小, 可能造成热损伤的区域就越小。对于其他种类的基底材料和电极材料显然也可用相同方法进行评估, 只需代入表1中相关的材料热学参数, 利用式(7)和式(8)即可对不同的材料组合进行估算。因此, 该方法对红外组件电极板设计中避免热损伤条件的设定、匹配以及激光加工等具有一定的指导作用。

3 讨论

对于采用旋光模式的激光加工, 由于一般采用步进电机传动的机械扫描方式, 加工中光束移动速度较慢, 激光停留在加工区的等效时

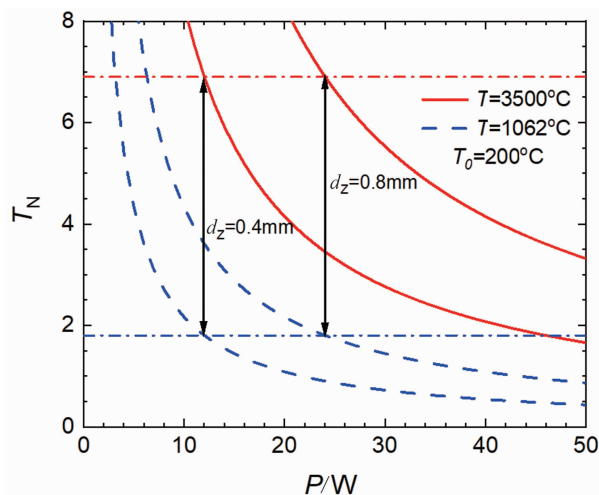


图3 厚度分别为 0.4 mm 和 0.8 mm 的蓝宝石样品在不同的激光平均功率下所能达到的归一化温度: 实线(红色)对应蓝宝石的沸点温度, 虚线(蓝色)对应金电极的熔点温度, 其中假设薄圆盘样品的边缘温度为 $200\text{ }^\circ\text{C}$

间较长, 因此光束扫描时前述的稳态热场计算是可以定性或半定量符合的。在加工中采用尽量快的机械扫描速度进行重复扫描有助于减小热损伤区域。此外, 合理规划切割路径的方式也有助于缓解局部的热损伤。相比较而言, 对于采用振镜扫描模式的激光加工, 由于加工中光束扫描的移动速度要快得多(一般比旋光模式高两个量级), 这时稳态热场计算就不适用了, 而应该结合相关时间参数进行瞬态热分析。但一般不易得到解析表达式, 可以采用有限元等方法进行数值计算^[8]。然而, 在此情况下光束的扫描速度很快, 也使得热量不易积累, 可能造成热损伤的区域大大减小。应指出的是, 实际电极板类激光加工中还会产生难以预计的“光损伤”。激光加工中所用光束对加工材料可能产生预计外的反射或折射等, 而反射或折射光束仍具有较高能量。当这些不希望存在的反射或折射光束重新照射到电极板上的金属电极区域时, 无论在正面或反面均会对电极图形产生损伤, 甚至刻断电极。这种“光损伤”只能通过校准光路、改进夹具和固定样品以及在特定区域增加吸光材料等方式加以避免。

4 结束语

本文在假设样品尺寸远大于激光作用区域及样品厚度的前提下,对激光加工过程中薄圆盘样品的热传导过程进行了分析,得出了样品上稳态温度分布的易于理解的简洁解析表达式。据此结合组件封装中所用的实际基底材料和电极材料等的热学参数,以蓝宝石电极板为例计算了不同条件下所需的激光平均功率以及可能产生热损伤区域的大小等,并对旋光模式和振镜扫描模式两种加工方法可能产生热损伤的情况进行了比较。计算结果很好地反映了激光打孔操作时热损伤区域的大小,而旋光模式下进行激光切割时采用尽量快的机械扫描速度进行重复扫描有助于减小热损伤区域。此种方法可以适用于基于不同基底和电极材料的电极板或芯片等的激光加工中相关参数的设定以及热损伤区域大小的估计,对红外组件电极板的设计、匹配以及激光加工等具有一定的指导作用。后续工作中,结合实际激光加工的参数设置,功率可根据材料厚度进行匹配,而切割速度等则需要进一步调试,以期与热损伤区域计算建立联系;同时也会尝试在样品下方垫加适宜的散热材料来缓解热影响。

参考文献

- [1] Rahim K, Mian A. A Review on Laser Processing in Electronic and MEMS Packaging [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2017, **139** (3): 030801.
- [2] Schulz W, Eppelt U, Poprawe R. Review on laser drilling I. Fundamentals, modeling, and simulation [J]. *Journal of Laser Applications*, 2013, **25**(1): 012006.
- [3] 阿占文,陈玲玲,吴影,等. 超快激光旋光钻孔孔径和锥度的控制 [J]. *中国激光*, 2021, **48** (8): 0802017.
- [4] Hurley M J, Gottuk D, Hall J R, et al. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [M]. Berlin: Springer Nature, 2016.
- [5] Bergman T L, Lavine A S, Incropera F P, et al. Fundamentals of Heat and Mass Transfer [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018.
- [6] 王中旺,汪帮富,卢金斌,等. 超快激光制备单晶硅光栅结构的热积累效应和实验研究 [J]. *激光与红外*, 2019, **49**(11): 1292—1298.
- [7] 李隆,薛彪,张春玲,等. 连续激光辅助热加工氧化铝陶瓷热效应分析 [J]. *激光与红外*, 2020, **50**(1): 13—16.
- [8] 崔智铨,管迎春. 超快激光加工过程主要数值模型研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, **57**(11): 111408.