

文章编号: 1672-8785(2020)12-0018-06

蓝宝石片的皮秒激光划片工艺研究

张忆南^{1,2} 莫德锋^{1,2} 洪斯敏^{1,2} 李 雪^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 由于具有硬度高、热导低及脆性大的特点, 蓝宝石材料的精细加工较为困难。对皮秒脉冲激光用于蓝宝石片划片的特点进行了分析和讨论。在此基础上, 对用于红外焦平面组件封装的蓝宝石片的皮秒激光划片参数进行了研究, 并得到了一系列优化参数。对于红外焦平面阵列封装中常用的厚度为 0.4 mm 的蓝宝石过渡电极板, 在组合划片参数为 P(100)X(0.01/20)Y&Z(12)Z(0.1/3)时达到了最佳划片效果。分析了激光功率参数变化对划片的影响, 并对实际划片操作中的一些问题进行了探讨。

关键词: 蓝宝石片; 激光划片; 皮秒脉冲激光; 材料特性

中图分类号: TB942 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.12.003

Study on Picosecond Laser Dicing Process of Sapphire Substrates

ZHANG Yi-nan^{1,2}, Mo De-feng^{1,2}, HONG Si-min^{1,2}, LI Xue^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Devices, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Fine processing of sapphire material is quite difficult because of its high hardness, low thermal conductance and fragility. Through analyzing and discussing the features of picosecond pulse laser for dicing of sapphire substrates, the parameters of the laser dicing have been researched in the process of sapphire components and parts for infrared focal plane array packaging, and a series of optimized parameters have been obtained. For the sapphire transition electrode plate with a thickness of 0.4 mm commonly used in infrared focal plane array packaging, the best dicing effect is achieved when the combined dicing parameter is P(100)X(0.01/20)Y&Z(12)Z(0.1/3). The influence of the change of laser power parameters on dicing is analyzed, and some problems in the actual dicing operation are discussed.

Key words: sapphire; laser dicing; picosecond pulse laser; material property

收稿日期: 2020-08-16

作者简介: 张忆南(1987-), 上海人, 工程师, 主要从事红外探测器组件封装工作。

E-mail: 666shelley@sina.com

0 引言

随着大功率脉冲激光技术的不断进步以及相关光机电系统的逐渐成熟, 激光加工方法日益受到青睐, 已被广泛应用于切割、划片、焊接、打孔、打标以及表面处理等加工工艺^[1-3]。

激光划片技术利用激光束的极高能量密度使所加工物质产生熔融、气化、升华等过程, 此时产生的局部高压会使被加工物质喷射出去, 从而实现加工效果。采用皮秒短脉冲激光的主要目的是最大程度地减小由工件上局部热量积累产生的温升。实验中使用的皮秒脉冲激光器的平均输出功率为 15 W, 聚焦面的平均功率面密度可高达 10^{12} W/cm², 对高斯光束的局部密度会更高。在如此高的功率密度下, 激光作用区的加工材料会瞬间蒸发或气化升华, 并喷出、抛射到四周。然而对于蓝宝石这样的低热导、硬质脆性材料, 如此高的瞬态功率密度有可能会使其局部超快速升温, 导致样品开裂。加工区可能存在的微龟裂等也会对零部件的质量产生影响。因此, 有必要根据皮秒脉冲激光的特点选用合适的工艺策略, 并对相关加工组合参数进行优化。

1 蓝宝石片皮秒激光划片组合参数试验

红外焦平面组件封装中常用到一些由蓝宝石材料制作的薄片状零部件。基于皮秒脉冲激光的加工方法已得到了应用。人工合成的蓝宝石也称白宝石, 其化学成分均为三氧化二铝。实际中使用单晶片, 加工后用于组件封装中的过渡电极板、窗口、电路基板、材料衬底等部件。常用的厚度是 0.4 mm, 也

可根据零部件的要求采用更厚或更薄的过渡电极板。蓝宝石材料的绝缘性能好、透明波段宽, 但热导率较低, 约为硅片的五分之一。由于其硬度很高(莫氏硬度高达 9), 采用其他机械划片方法(如金刚石锯片旋切等)都不太适合, 而采用激光加工方法则可取得较好的效果。

在宝石片划片中使用波长为 515 nm 的皮秒脉冲激光器。515 nm 光与物质间有较好的作用效果, 其可见特性也使得操作较为方便。515 nm 激光由波长为 1030 nm 的掺镱 YAG 激光器二倍频得到。与 1064 nm 的掺钕 YAG 激光器相比, 其泵浦波长和激光波长更接近, 因而效率更高。实验中采用的 515 nm 皮秒脉冲激光器的脉冲宽度小于 10 ps, 每个脉冲的最大能量约为 75 μ J, 最大平均功率约为 15 W, 实际操作时可在 0.1%~100% 内调节。作用在过渡电极板上的激光为高斯光束, 焦点上的光斑直径约为 20 μ m。激光脉冲的重复频率是可调的, 实际加工时一般固定在 200 kHz。此激光器的加工光束由三维振镜运动控制, 因此可在 X、Y、Z 三个方向上进行操控(控制精度约为 2 μ m)。激光束在 X、Y 方向的扫描范围约为 40 mm, 扫描速度可在 50~300 mm/s 范围内调节, 满足了小尺寸零部件的加工要求。使用时, 一般将 Y 方向定义为激光束的主扫描方向, 并将扫描速度固定为 200 mm/s。于是在 200 kHz 的重频下, 相邻两次激光脉冲在样品上的印迹只错开 1 μ m, 基本重合。X 方向为激光束的平移方

表 1 蓝宝石片划片加工中设定的主要参数

主要划片参数		设定范围	备注
激光功率	$P/\%$	0.1~100	常设在 80~100
激光重频	f/kHz	200~400	常固定为 200
XY 扫描速度	$v/(\text{mm/s})$	50~300	常固定为 200
X 参数	线间距 d/mm	任意设定	根据加工线宽要求及材料特性
	线数 L		
Y&Z 参数	切割总层数 C	任意设定	根据材料厚度及激光功率等
Z 参数	补偿参数(t/m)	任意设定	根据材料厚度及激光功率等

向, 由其控制 Y 方向上每条扫描线的平移量, 以满足加工要求; Z 方向则控制激光束焦点的上下移动。

根据以上特点, 蓝宝石片激光划片加工中需要设置和优化的主要激光参数及扫描参数见表 1。其他一些激光器参数如皮秒脉冲宽度、加工激光束光斑直径、光束质量等则是固定的。为方便记录, 文中对这些组合参数采用简化记法。例如: 激光功率 P 记为 100%; 对于 X 参数, 每条切割线的平移量 d 记为 0.01 mm (线间距), 加粗 L 次至 20 条线(线数 L), 即切割缝宽或锯路为 0.2 mm; 对于 Y&Z 参数, 切割总层数 C 记为 20 层, 反复切割方向为 Y 方向, 下焦切割方向为 Z 方向; 对于 Z 参数, 补偿参数(t/m)即每切割 m 层后的焦点下降量为 t (如切割 5 层后焦点下降 0.1 mm)。这样切割组合参数就可记为 $P(100)X(0.01/20)Y\&Z(20)Z(0.1/5)$ 。

蓝宝石片的厚度都在数百微米。我们的实验表明, 此激光器的皮秒激光束扫描一次对蓝宝石的作用厚度仅在 10 μm 量级, 因此仅靠一次扫描显然无法将其划开。这是因为: 一方面, 此激光束的光斑直径约为 20 μm , 实验表明此宽度太窄, 不利于激光作用后产生粉末的喷出(易于粘结); 另一方面, 在此窄条上极快速积累的能量过大, 瞬态热效应会使宝石片产

生不规则开裂。实验发现, 对于厚度为 0.4 mm 的蓝宝石片, 当加粗切割线由 20 条减至 10 条时, 就会对切割质量产生影响; 从 10 条减至 5 条时, 即使切割次数增加一倍, 也不能切断, 且会发生裂片。对于 20 μm 的激光束直径, 考虑到激光的高斯光束特性及其与材料的充分作用, 扫描线需有必要的重叠, 因此每次平移距离定为 0.01 mm, 前后光束印迹有二分之一的重叠。对厚度为 0.4 mm 的蓝宝石片共扫描 20 线, 即 X 方向上的参数定为 $X(0.01/20)$ 。如果蓝宝石片的厚度增加, 那么扫描线数 L 也要相应增加, 且维持总深宽比在 2 左右, 以利于粉尘喷出。

切割总层数 C 主要取决于蓝宝石片的厚度。实验表明, 在高功率条件下, 每扫一层, 激光作用厚度在 10 μm 左右。这种简单的方法将激光束的焦点位置始终固定在蓝宝石片表面, 因此直接由蓝宝石片的厚度决定切割层数 C 。例如, 对于厚度为 0.4 mm 的蓝宝石片, 在 100% 功率下, 直接设定切割层数 C 为 40, 即 $Y\&Z(40)$ 。该方法虽然可行, 但由于过度切割, 划片效率降低。因为高斯激光束在焦点位置上的功率密度最高, 所以随着作用区沿 Z 方向向下推进, 焦点也应向下推进, 这样可取

表 2 两组蓝宝石过渡电极板样品的线条切割实验参数及结果

样品编号	切割补偿	切割层数	是否切断(Y/N)	粗糙度
1	0.1/10	40	Y	稍粗糙
2	0.1/5	20	Y	稍粗糙
3	0.1/4	16	Y	稍粗糙
4	0.1/3	14	Y	中等
5	0.1/3	12	Y	光滑
6	0.1/1	4	N	/
7	0.01/1	40	Y	稍细腻
8	0.02/1	20	Y	稍细腻
9	0.03/1	14	Y	中等
10	0.04/1	12	Y	中等
11	0.04/1	10	N	/
12	0.05/1	8	N	/

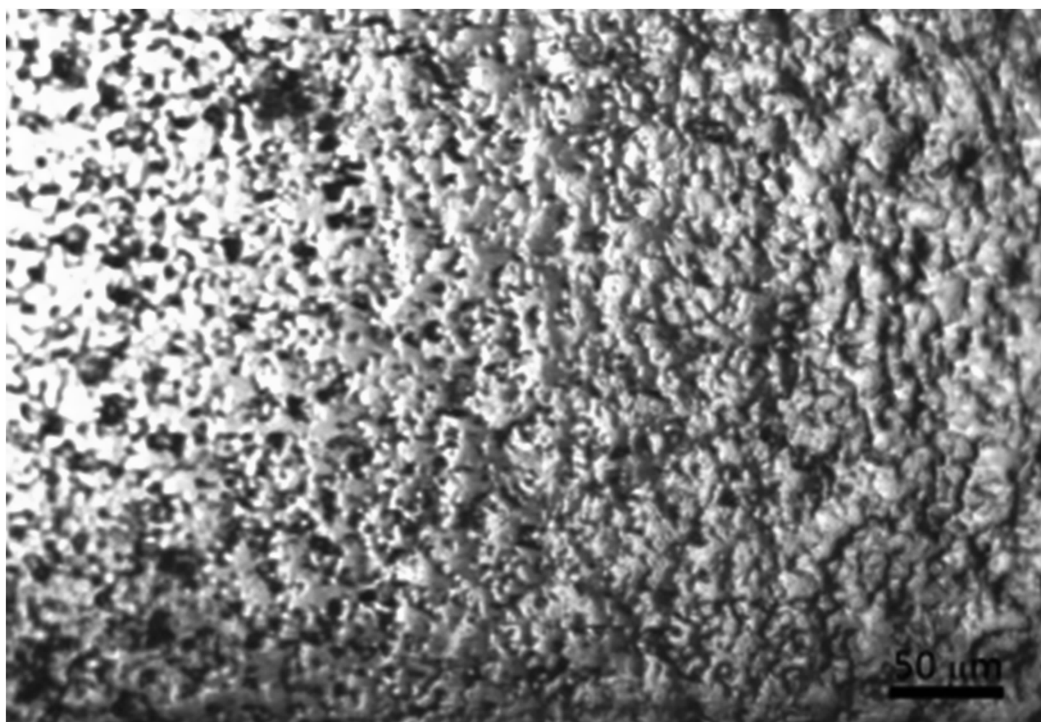


图 1 厚度为 0.4 mm 的蓝宝石片的皮秒激光划片侧壁形貌显微照片。所用划片参数为 P(100) X(0.01/20) Y&Z(12) Z(0.1/3)

得更高的划片效率。这就需要设定 Z 参数, 即切割补偿。实验表明, 适当设定切割补偿后, 切割层数明显减小, 划片效率显著提高。

表 2 列出了采用不同切割补偿参数对厚度为 0.4 mm 的蓝宝石过渡电极板进行线条切割的实验结果(实验中激光功率设为 100%)。样品被分为两组: 一组将焦点每步推进量固定为 0.1 mm, 改变切割层数, 观察样品是否自然划开; 另一组使焦点始终跟随每层扫描推进, 即每扫描一层, 焦点向下推进一步。由表 2 可见, 第一种方案扫描 12 层时可以划开, 第二种方案扫描 12 层时也可划开, 形貌差别不大, 因此采用这两种方案都可行。

蓝宝石片皮秒激光划片中关心的另一问题是要避免出现裂片及微龟裂, 并有较佳的侧壁形貌。图 1 是厚度为 0.4 mm 的蓝宝石过渡电极板在 P(100)X(0.01/20)Y&Z(12)Z(0.1/3) 的划片参数设置下(即样品 5) 的侧壁形貌显微照片。由图 1 可见, 在此设置对应的激光功率密度下, 侧壁呈典型的熔融后烧结微观形貌, 顶部至底部形貌较均匀, 且无宏观裂纹和微龟

裂现象。对这两组样品的显微形貌进行观察, 未发现宏观裂纹和微龟裂现象, 只是粗糙度稍有差别但并不显著。

图 2 是采用皮秒激光划片对厚度为 0.4 mm 的透明蓝宝石片过渡电极板进行加工后的实际效果微距照片, 所用划片参数为 P(100)X(0.01/20) Y&Z(12) Z(0.1/3), 左上角拼图为其侧壁形状。由图 2 可见, 在此划片参数设置下, 样品切割面平整光洁, 达到了良好的划片质量。由左上角的侧壁形状微距照片可见, 此时的侧壁呈倾斜状, 倾斜角约为 13° 。这与 0.2 mm 的划片槽宽度相对应, 深宽比约为 2.2。注意到此时侧壁是内凹的, 这是划片时在 X 方向推进 20 次后产生的宏观综合效果, 有别于只切割一次而产生的典型外凸形状^[4-5]。据此特点, 在对侧壁形状有特殊要求时也可进一步改变参数。

2 蓝宝石片皮秒激光划片功率参数试验

表 3 和图 3 所示为采用不同激光功率在厚度为 0.6 mm 的蓝宝石片过渡电极板上打孔的划片实验参数及结果。实验中设置的 X

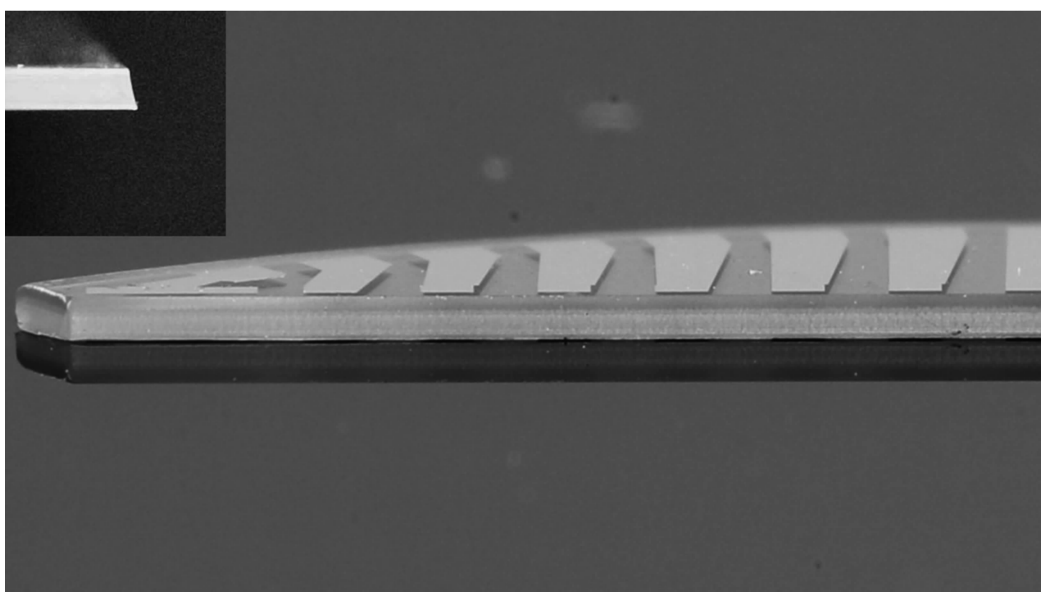


图 2 对厚度为 0.4 mm 的蓝宝石片过渡电极板进行皮秒激光划片后的效果微距照片。左上角为其侧壁形状，所用划片参数为 P(100) X(0.01/20) Y&Z(12) Z(0.1/3)

表 3 蓝宝石片过渡电极板的打孔实验参数及结果

样品 编号	激光功 率/%	切割补偿 参数	样品切透(自然 下落)所需扫描层数	备注
1	100	0.1/5	25	打孔成功
2	90	0.1/5	31	打孔成功
3	80	0.1/5	37	打孔成功
4	70	0.1/5	42	打孔成功
5	60	0.1/5	51	打孔成功
6	50	0.1/5	61	打孔成功
7	40	0.1/5	100	未下落
8	40	0.1/10	98	打孔成功

参数为(0.01/30)，切割总层数为 100，观察划片过程中切割区自然下落打孔成功所需的扫描层数。由表 3 和图 3 可知，在此设定下随着激光功率的降低，所需的扫描层数相应增加。注意到在 40%功率下扫描层数为 100，切割补偿

为 Z(0.1/5)时，尚未划开；但将补偿参数修改为 Z(0.1/10)后则可划开。

3 试验结论

通过对划片效率和划片形貌进行评估可知，对于厚度为 0.4 mm 的蓝宝石过渡电极

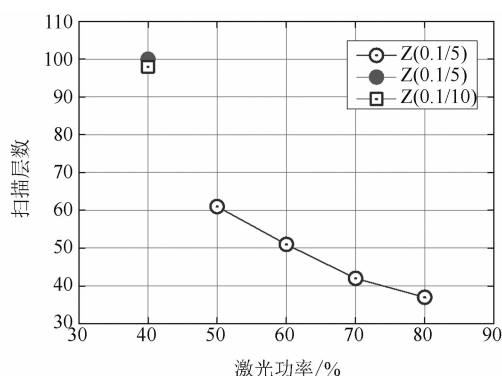


图 3 采用不同激光功率对厚度为 0.6 mm 的蓝宝石片过渡电极板进行皮秒激光打孔所需的扫描层数与激光功率的关系(切割补偿参数分别为 0.1/5 (圆点)和 0.1/10 (方块), 实心点表示未能划透)

板, 在 $P(100)X(0.01/20)Y\&Z(12)Z(0.1/3)$ 的组合划片参数设置下达到了最佳划片效果。

随着激光功率的降低, 每次切割所能作用的材料厚度相应减小, 进而影响切割效果。当激光功率降至 40% 及以下时, 如采用 $P(40)X(0.01/20)Y\&Z(100)Z(0.1/5)$ 组合参数, 则打孔失败, 样品未能划透; 将 Z 参数修改为 $Z(0.1/10)$, 即采用 $P(40)X(0.01/20)Y\&Z(98)Z(0.1/10)$ 的组合参数, 则打孔成功。

4 结束语

采用 515 nm 脉冲激光对红外焦平面组件

封装中常用的薄片状蓝宝石零部件进行了划片加工试验。结合基本原理和设备情况, 优化了划片组合参数, 分析了功率的影响。对于其他可能的加工需求(如要求更窄、更陡直的划片槽等), 就改变其他参数和引入其他方法等进行了探讨。其他类型的陶瓷或金属零部件由于材料特性的差异较大, 不能采用与蓝宝石相同的激光加工策略, 因此对其参数进行优化将是下一步的工作重点。

参考文献

- [1] Lawrence J. Advances in Laser Materials Processing [M]. Duxford: Woodhead Publishing, 2018.
- [2] 张德慧, 魏铭, 王明月. 激光切割技术简介 [J]. 工业技术, 2018, 28: 60.
- [3] 刘敏, 夏长伢. 激光切割常见问题分析与解决办法 [J]. 技术应用, 2018, 25(3): 66-68.
- [4] Mingareev I, Fornaroli C, Gillner A. Laser Dicing of Silicon and Electronics Substrates [M]//Lawrence J. Advances in Laser Materials Processing. Duxford: Woodhead Publishing, 2018.
- [5] 郭琛, 肖娜. LED 用蓝宝石晶体过渡电极板激光划片工艺 [J]. 中国照明电器, 2010, 3: 26-29.