

文章编号: 1001-3806(2003)04-0352-05

## 射频激光对氧化铝陶瓷基片划片的研究

侯廉平 陈培峰 陈清明

(华中科技大学激光技术与工程研究院, 武汉, 430074)

摘要: 分析了 RF CO<sub>2</sub> 激光陶瓷基板划片的机理及工艺参数选择的原则。通过数值模拟和实验, 分析了脉冲频率、脉冲宽度、划片速度、辅助气压大小、离焦量等工艺参数对激光划片质量的影响。

关键词: RF CO<sub>2</sub> 激光器; 划片; 氧化铝陶瓷基片; 数值模拟

中图分类号: TN249; TG665 文献标识码: A

### Study on laser scribing of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic substrate with RF CO<sub>2</sub> laser

Hou Lianping, Chen Peifeng, Chen Qingming

(Institute of Laser Technology & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** The mechanism of scribing ceramic substrate with RF CO<sub>2</sub> laser and fundamental choice law of technical parameters are analyzed. Through numerical simulation and experiment, the influences of factors such as frequency of pulse, pulse width, scribing speed, pressure of assistant air on the quality of laser scribing are investigated.

**Key words:** RF CO<sub>2</sub> laser; scribing; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic substrate; numerical simulation

### 引 言

高性能的氧化铝陶瓷基片因其硬度、强度、绝缘性、导热性的特殊性能, 在电子工业中已大量用来作为 IC 基板、多层陶瓷基板等, 是 IT 产业的新宠。近年来, 随着国家 IT 产业的迅速发展, 我国每年对氧化铝陶瓷基片的需求量已超过 10<sup>7</sup> m<sup>2</sup>, 并以每年 10% ~ 20% 的幅度递增。由于氧化铝陶瓷基片的使用形状日趋复杂, 在陶瓷基片初胚成形后进行划片、钻孔、切割等工作也更加重要。但氧化铝陶瓷材料的高硬度极其脆性使得加工极为困难, 严重地阻碍了氧化铝陶瓷材料的应用发展。传统的氧化铝陶瓷的加工方法很多, 常用的有刻蚀法、金刚砂轮切割法、敷以磨料的高速旋转圆盘或钢丝切割法、超声波切割法和金刚石划片法等。用上述各种方法切割 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷基片时, 会出现很多问题。例如: 刻蚀法刻蚀速度慢, 且随材料结晶方位而变, 此外, 能刻蚀的基片厚度也有限。金刚砂轮切割法的缝宽大, 且在加工区附近材料的变质层大, 这将严重影响材料的物理性能。高速旋转圆盘敷以磨料切割时, 对加

工表面造成污染, 且有加工精度不高, 切缝大等问题。超声波切割情况也是如此。金刚石划片速度快, 设备简单, 但其精度差, 切割边缘不易成直角; 且加工表面破碎严重, 生产成品率低<sup>[1]</sup>。激光陶瓷划片具有划缝细, 划缝速度快, 断面光滑、不损伤基板等优点, 为陶瓷加工开辟了一个全新的领域。作者用 RF 激光陶瓷基板划片机对陶瓷划片工艺进行了研究, 从理论和实践上解决了工艺上的主要问题。这种工艺加工的陶瓷样品具有划缝细、断面光滑、表面光洁、热影响区小等技术优势。

### 1 激光陶瓷划片的机理及工艺难点

由于陶瓷是脆性材料, 不需要完全切透, 采用脉冲激光在陶瓷上沿直线打一系列互相衔接的盲孔 (见图 1), 孔的深度只需要陶瓷厚度的 1/3 ~ 1/4

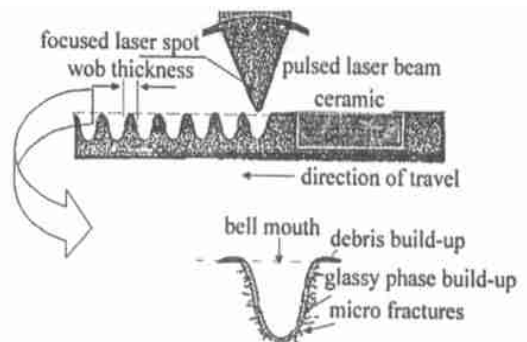


Fig. 1 How laser scribing works

作者简介: 侯廉平, 男, 1969 年 1 月出生。硕士。现主要从事激光光学及其应用研究。

收稿日期: 2002-08-29; 收到修改稿日期: 2002-12-09

(见图 2), 由于应力集中, 稍加力, 陶瓷材料很容易准确地沿此线折断, 这就是所谓的陶瓷激光划片<sup>[2]</sup>。

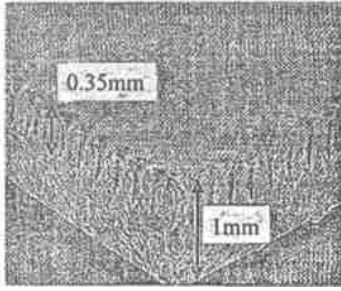


Fig. 2 The transverse face of laser scribing substrate

划缝宽、划缝深及划缝的热影响区是划片质量的 3 个主要参数。好的划片质量的评判标准是: 切缝入口处轮廓清晰、明显; 切缝窄; 切边热损伤最小; 切边平行度好; 切割表面光洁; 无切割粘渣与熔融物。影响划缝质量的参数有激光平均功率、重复频率、脉宽、划片速度、保护气体压力及种类、离焦量的大小等。

陶瓷划片要克服 2 个技术难题, 即“飞溅物”及不定向断裂。“飞溅物”堆积将使划线表面毛糙; 不定向断裂是在划片后受到很小的外力或高温烘烤后出现的无规则断裂或炸裂。这两种现象都会对厚膜电路的制造带来困难和损失。

造成飞溅物堆积的原因主要有以下 3 个<sup>[3]</sup>: (1) 划片所选的功率密度超过了最佳范围(如平均功率过大, 划片速度过慢), 被汽化的陶瓷材料在饱和蒸气压下结霜而形成熔凝层; (2) 在同一划线区重复刻划, 第 1 刀留在缝隙中的粉尘被第 2 刀的高温烧结形成熔凝层; (3) 由于激光模式造成光斑尺寸变大, 光斑能量不均匀, 使划线区既有汽化又有显著的融化, 结果在划线表面覆盖有熔凝玻璃化变质层, 表现为“飞溅物”并造成不定向微裂纹。以上 3 个原因同样会造成不定向断裂的结果, 因为它们都会引起破坏性的不定向裂痕性缺陷, 因此, 有效避免上述 3 种现象的发生, 是划片质量不可忽视的重要保证。

解决的办法有 3 个: (1) 加保护气体, 在工艺实验中, 作者分别使用了压缩空气、氩气、氮气和氧气作为保护气体, 结果发现使用氧气划片的划缝质量最好, 辅助气体的作用是产生放热化学反应, 增加能量强度; 从划缝区吹掉溶渣, 清洁划缝; 冷却划缝邻近区域, 减小热影响区尺寸; 保护聚焦透镜, 防止飞溅物玷污光学镜片; (2) 在同一频率下, 尽量选择较小的激光脉宽进行划片, 脉宽越小, 峰值功率越大, 陶瓷的汽化比例越大, 加热时间越短, 热影响区越

小; (3) 使用扩束镜压缩光束的发散角, 减小聚焦镜焦平面处的光斑尺寸, 同时应尽量使激光束垂直照射到陶瓷加工表面, 减小像差, 使激光照射能量更加均匀。

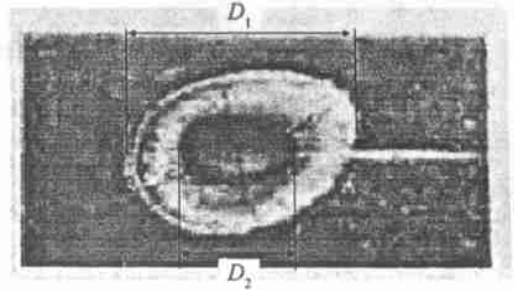


Fig. 3 The melting and crack diffusion zone on the substrate surface shaped by single laser pulse

划片速度的选择应遵循下列原则: 划片的成败, 关键在于每一脉冲能量所造成的热扩散面积上的裂痕是否能互相结合<sup>[4]</sup>。图 3 为激光陶瓷划片时单脉冲激光作用于陶瓷表面的情形。其中,  $D_1$  为单脉冲激光能量作用在陶瓷基片时, 材料表面热扩散裂痕面积的直径,  $D_2$  表示材料表面热扩散区中材料表面溶解区的直径。 $D_1/D_2$  表示扩散直径比, 此值越大, 裂痕扩散的机会越大, 并可以此扩散面积的重叠推算出控制断裂切割速度的快慢。其最大连结模式为两裂痕扩散区相切, 而最小连结模式为两裂痕扩散区半径重叠。并可预估其切割速度关系如下: 最大切割速度  $v_{\max} = D_1 \times$  脉冲频率; 最小切割速度  $v_{\min} = (D_1/2) \times$  脉冲频率。

试验中发现,  $D_1$  的范围为 0.135mm ~ 0.35mm, 若取重复频率为 250Hz, 则划片最大速度  $v_{\max} = 33.75\text{mm/s} \sim 87.5\text{mm/s}$ 。试验结果证明上述速度的预估值是正确的。

## 2 热传导理论与实验结果之对照

### 2.1 理论预测

根据射频激光输出能量的形态, 其功率密度近似高斯分布, 假设每一脉冲能量为一点光源, 瞬间作用在材料上时, 其热传导公式为:

$$T(r, 0, t) = T_a + c \cdot \frac{E_0}{2\rho_p(\pi\alpha t)^{1/2}(4\alpha + \omega^2/2)} \times \exp\left[-\frac{r^2}{4\alpha t + \omega^2/2}\right] \quad (1)$$

式中,  $\alpha = k/\rho_p$ ;  $T_a$  为环境温度, 单位是  $^{\circ}\text{C}$ ;  $E_0$  为激光每一脉冲的能量, 单位是 J;  $c$  为辅助吹气时的冷却系数;  $\rho$  为材料密度, 单位是  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_p$  为比热容, 单位是  $\text{J}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$ ;  $\alpha$  为热扩散率, 单位是  $\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $t$  为

作用在材料上的时间, 单位是  $s$ ;  $k$  为材料的导热系数, 单位是  $W/(m \cdot K)$ ;  $\omega$  为光斑半径, 单位是  $cm$ ;  $r$  为热扩散半径, 单位是  $cm$ 。

射频激光器的输出功率和脉冲宽度、脉冲重复频率的函数关系见图 4。

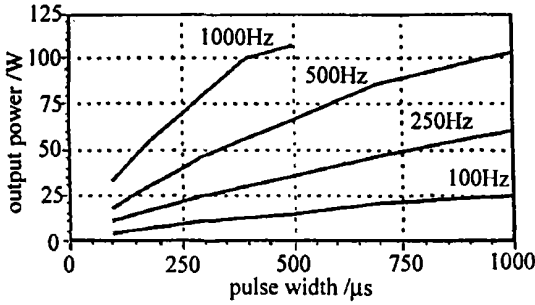


Fig. 4 Output power as function of pulse frequency and pulse width

根据(1)式, 以脉冲重复频率为 250Hz, 辅助空气吹气压力为 0.1MPa 为例(冷却系数  $c$  值取 0.95), 用 Matlab 作数值模拟得到每一脉冲能量作用在氧化铝陶瓷基片时热量分布状况, 见图 5。由

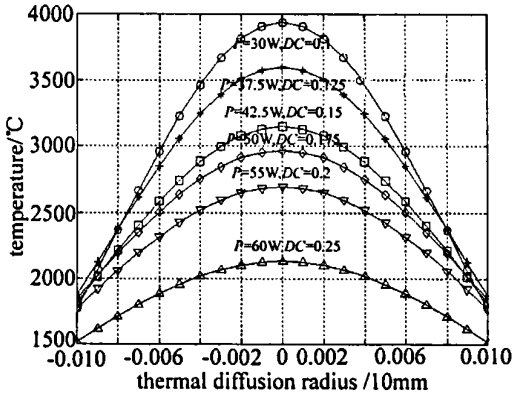


Fig. 5 At pulse frequency = 250Hz, computer simulated temperature distribution versus thermal diffusion radius at different laser average power

图可见, 当激光的占空比越小, 热扩散半径越小, 但中心点的温度却显著升高, 达到甚至超过汽化点温度(2850°C), 材料的汽化比例显著增加, 激光划片逐渐由汽化机制控制, 向内层和圆周方向的热扩散不再起显著作用。当平均功率  $P = 30W$ , 占空比为 10% 时, 其在中心点的温度最高。随着平均功率和占空比的增加, 中心点的温度却下降, 热扩散半径却增大。因此在实际激光划片的过程中, 在同一频率下, 一味地提高占空比不但不能提高中心点的温度, 而且还会增加热影响区, 使划缝深度减小, 划缝宽度增大, 产生脆性断裂, 影响划片效果。在试验和实际划片中, 在同一频率下, 应尽量选用较小的占空比, 一般采用 10%~12.5% 的占空比。

在激光划片过程中, 激光束相对试件表面以一定的速度移动, 随着切速的增加, 先后而至的 2 个脉

冲的作用点间距显著增大。图 6 是在  $f = 250Hz$ ,  $DC = 10%$ , 对应激光功率为 30W 的条件下模拟划片速度对热扩散半径的影响。由图可见, 对试件上的某一点, 随着划片速度的增加, 作用光点快速离开, 其吸收的功率密度逐渐下降, 热扩散半径也逐渐减小, 这对消除裂纹是非常有利的。

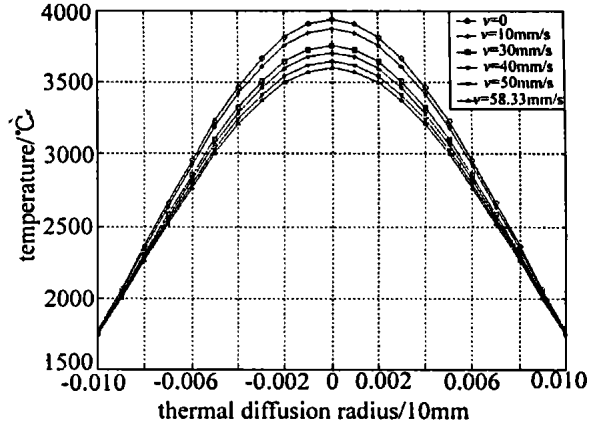


Fig. 6 At laser average power = 30W, temperature distribution versus thermal diffusion radius at different scribing velocity

另一方面, 随着切速的增加, 每一个脉冲倾向于单独从室温加热工件至升华点, 而不能依赖前期脉冲所积累的热量, 因而分离单位切口面积所需激光能量(比能)必增加, 这对激光能量利用是不利的。

### 2.2 实验结果与分析

实验中选用的试片是为电子工业用, 纯度为 96%, 厚度为 1mm 的氧化铝陶瓷基片。试样尺寸为: 50mm × 10mm × 1mm, 除了研究离焦量对划片的影响外, 激光光束焦点均调至试片表面, 频率在 (200~1000) Hz 范围, 脉冲宽度在 200μs~1ms 范围, 激光加工头喷嘴吹气压力在 (0.1~0.6) MPa。为了避免人为操作误差以确保实验结果的可信度, 以上条件均以 CNC 程式控制。用工具显微镜测量每次划片后的刻槽宽度、刻槽深度和热影响区宽度 (heat affected zone)。

2.2.1 脉冲重复频率对划片的影响 图 7 是切缝深度、宽度和热影响区宽度随着脉冲重复频率变化的测量结果。其中脉宽为 400μs, 划缝速度  $v = 2.5m/min$ 。当脉冲重复频率从 250Hz 增加到 350Hz 时, 刻缝深度有较大的增加, 当脉冲重复频率在 (350~500) Hz 的范围时, 随着频率的增加刻槽深度减小, 脉冲重复频率在 (500~600) Hz, 刻槽深度又开始增加。随着脉冲重复频率的增加, 刻槽宽度逐渐减小, 热影响区逐渐增大, 但两者变化的幅度并不大。上述结果和理论预测完全一致。

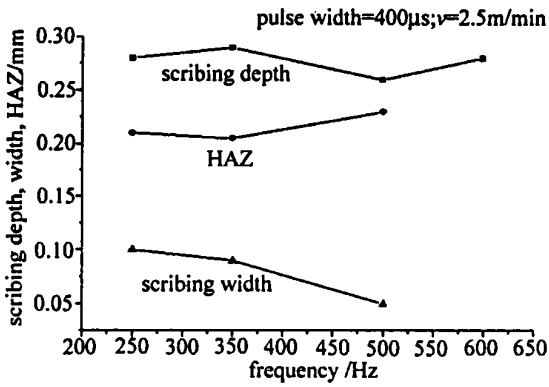


Fig. 7 The influence of frequency to scribing parameter

2.2.2 划片速度对划片的影响 图8是刻槽的深度、宽度和热影响区随激光划片速度的测量结果(脉宽  $250\mu\text{s}$ , 重复频率  $250\text{Hz}$ )。划片速度对划片结果的影响实质上就是激光束和材料相互作用时间的影响。由图可见,刻槽的深度和热影响区宽度随着速度的增大而减小,这是因为随着速度的增大,激光束和材料相互作用的时间缩短,使得材料的汽化量减小,从而刻槽深度和热影响区减小。但是,当速度很小时,刻槽中会出现堆积物,而且速度越小,堆积物越多。这些堆积物不仅影响材料对激光的吸收,有时还会使刻槽的深度减小。在对氧化铝陶瓷基片的划片过程中,由于改变激光扫描速度不能使脉冲能量和光斑的大小改变,所以激光束的扫描速度对刻槽的宽度影响不大。

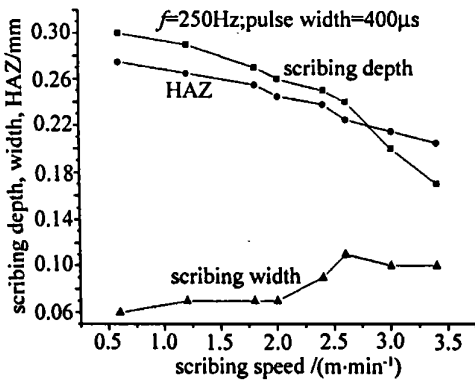


Fig. 8 The influence of velocity to scribing parameter

2.2.3 脉冲宽度对划片的影响 由图9可见,随着脉冲宽度从(0.4~0.8)ms,刻槽宽度逐渐增大,刻槽深度却逐渐减小;当脉宽大于0.8ms时,刻槽宽度逐渐减小,刻槽深度却又逐渐增大。热影响区宽度变化趋势和刻槽宽度一样。这是因为,当重复频率不变( $250\text{Hz}$ ),当脉宽在(0.4~0.8)ms范围时随着脉宽的增加,激光平均输出功率增长幅度小于脉宽增长幅度,因此峰值功率相对减小,材料汽化量减小,刻槽深度减小,但激光作用材料的时间增长,故

刻槽宽度和热影响区逐渐增大。当脉宽大于0.8ms时,峰值功率反而增大,因此刻槽深度增大,刻槽宽度和热影响区宽度减小。

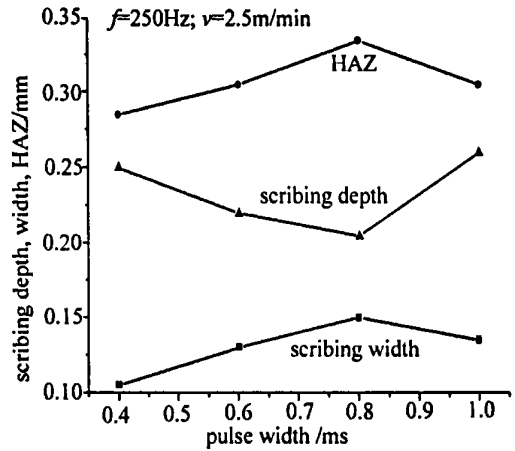


Fig. 9 The influence of pulse width to scribing parameter

2.2.4 保护气体压力对划片的影响 保护气体的压力对划片的影响见图10。由图可见,保护气体压力大小对刻槽宽度和深度影响不大,而热影响区宽度总的趋势却是逐渐减小。这是因为保护气体压力大小并不影响激光脉冲能量和激光光斑大小,因此不影响激光划片的刻槽深度和宽度,但却能降低热影响区的热量,因此可减小热影响区宽度。但是过高的吹气压力会造成裂痕异常扩散而破裂,因此应考虑运用低压辅助空气吹气。

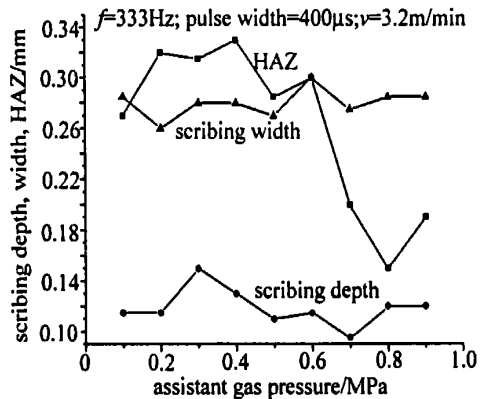


Fig. 10 The influence of assistance gas pressure to scribing parameter

2.2.5 离焦量对划片的影响 图11是离焦量对划片结果的影响。由图可见,当离焦量为(-0.25~0.25)mm时,刻槽深度最大,热影响区最小。这很容易理解,当正负离焦量过大时,超过高斯光束的准直距离,激光束的光斑直径显著增大,作用于材料表面上的功率密度减小,材料汽化量减小,故刻槽深度减小,热影响区增大。离焦量对划缝宽度影响不大。

2.2.6 保护气体种类对划片的影响 分别采用了氧气、氩气、氮气、压缩空气等作实验,结果表明,使

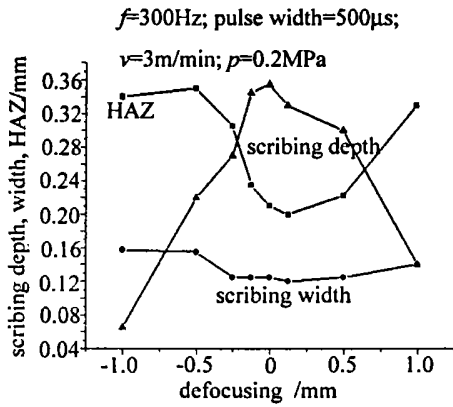


Fig. 11 The influence of defocusing to scribing parameter

用氩气和氮气,划缝发黑,而使用氧气,划缝颜色和氧化铝材料的颜色一样,使用压缩空气,划缝颜色介于上述两种气体之间。从经济的角度,一般使用过滤干燥的压缩空气即可达到所需的表面颜色。

图12是作者研制的RF CO<sub>2</sub>激光陶瓷划片机所加工的氧化铝陶瓷基片样品。



Fig. 12 The processed samples of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic by RF CO<sub>2</sub> laser

### 3 总结

应根据所使用的激光器的性能及到达陶瓷表面的激光束性能选择陶瓷划片的工艺参数。由于激光

(上接第351页)

上,分析了分布式和集总式FRA的PCE与放大器参数和工作状态的关系,可得出以下结论:(1)在小信号增益下,分布式喇曼放大器的功率转化效率小于5%,比EDFA和TDFA低。(2)当工作于饱和状态,分布式FRA的 $\alpha_{PCE}$ 可到达34%,比C带EDFA略高,远高于TDFA。(3)集总式FRA在饱和下的 $\alpha_{PCE}$ 只能到达16%,原因在于放大器内数公里长的光纤损耗。(4)喇曼放大器的功率转换效率主要依赖其饱和程度,放大器饱和越深, $\alpha_{PCE}$ 越高。要提高光纤喇曼放大器的功率转换效率,须使FRA尽量接近饱和工作状态,当输入信号功率较小,需要较大的泵浦功率。(5)分布式FRA的增益光纤只要大于有效长度,都能使其 $\alpha_{PCE}$ 最大。当超过有效长度,再增加增益光纤长度,喇曼增益和功率转换效率都基本保持不变。对于集总式FRA,有一最佳长度,使其 $\alpha_{PCE}$ 最大。

### 参考文献

器的特性以及激光束和材料相互作用的过程的复杂性决定了刻槽深度、宽度和热影响区和工艺参数的变化并非是简单的线性关系。对不同的RF激光器和不同的激光束有不同的划片工艺参数。但RF激光器对氧化铝陶瓷划片工艺还是有一些规律可循:

(1)根据氧化铝陶瓷材料的特殊物理性质,若以激光为主要加工方式时,应以脉冲模式为最佳;(2)控制断裂切割是以裂痕连结对向为加工的主要方式,因此低功率、短脉冲是可行的加工模式;(3)为避免过高的吹气压力造成裂痕异常扩散而破裂,应考虑运用低压辅助空气吹气;(4)利用平均功率、脉冲频率、占空比、划片速度和辅助空气压力等的正交实验可优化陶瓷划片的工艺参数;(5)用RF激光器进行陶瓷划片时,脉冲频率比其他加工参数有较大的选择空间;(6)划片速度根据单脉冲激光能量作用在陶瓷基片时,在材料表面造成的热扩散裂痕面积的直径及相邻两脉冲所造成的热扩散裂痕面积的重叠率和脉冲频率而定。

### 参考文献

- [1] 朱企业. 激光精密加工. 北京: 机械工业出版社, 1990: 125.
- [2] 李力钧. 现代激光加工及其装备. 北京: 北京工业大学出版社, 1993: 164.
- [3] 汪秀琳, 姜兆华, 吴宾初. 上海交通大学学报, 1997, 31(10): 80~82.
- [4] 张铭峰, 郑邵家, 张胜雄 *et al.* 中国激光, 2000, 27(11): 1045~1049.
- [1] Shimojoh N, Naito T, Tanaka T *et al.* 2.4Tbit/s WDM transmission over 7400 km using all Raman amplifier repeaters with 74nm continuous single band. European Conf. Optical Communication, 2001, TuA2. 4: 162~163.
- [2] Kinjo K, Mizuochi T, Kajiya S. Electron Lett, 2002, 38: 579~580.
- [3] Myslinski P, Szubert C, Bruce A J *et al.* IEEE Photon Technol Lett, 1999, 11: 973~975.
- [4] Myslinski P, Nguyen D, Chrostowski J. J Lightwave Technol, 1997, 15: 112~114.
- [5] Muro R D, Jolley N E, Mun J. Measurement of the quantum efficiency of long wavelength EDFAs with and without an idler signal. European Conf. Optical Communication, 1998, Post Deadline Paper: 20~24.
- [6] Sakamoto T. S-band Fiber Optic Amplifiers. OFC' 2001, 2001, Paper TuQ1: 1~4.
- [7] Lewis S A E, Chemikov S V, Taylor J R. Electron Lett, 1999, 35: 923~924.
- [8] Kagi N, Oyobe A, Nakamura K. IEEE Photon Technol Lett, 1990, 2: 559~561.
- [9] Aozasa S, Masuda H, Sakamoto T *et al.* Electron Lett, 2002, 38: 361~363.
- [10] Kao M S, Wu J. J Lightwave Technol, 1991, 9: 394~398.