

硅基 AlGaInP 发光二极管激光加工工艺研究

肖和平 陈亮 马祥柱 杨凯

扬州乾照光电有限公司, 江苏 扬州 225101

摘要 采用半导体激光器制备了硅基 AlGaInP 发光二极管,研究了激光能量密度、重复频率及平台加工速度对加工效果的影响,利用电子显微镜等测试工具分析了经激光加工后的硅基 LED 芯片表面和侧面形貌等结构特性,获得了较优的加工参数。

关键词 激光技术; LED 芯片; 固体激光器; 激光加工; 加工参数

中图分类号 O434 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.101401

Research on Laser Processing Technology of Silicon Substrate AlGaInP LED

Xiao Heping Chen Liang Ma Xiangzhu Yang Kai

Yangzhou Changelight Co. Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225101, China

Abstract With semiconductor laser, a silicon substrate AlGaInP LED is prepared, and the effects of laser energy density, repetition rate, and processing speed of the platform on the processing results are studied. By means of electron microscope and other test tools, the structural characteristics of the surface and side morphologies of silicon substrate AlGaInP LED chips are analyzed, and the superior processing parameters are obtained.

Key words laser technique; LED chip; solid-state laser; laser processing; processing parameter

OCIS codes 140.3390; 350.3850; 120.6810

1 引言

激光加工是一个复杂的过程,影响激光加工质量的因素有激光光束质量、激光模式、脉冲宽度、光斑大小、能量密度、焦距、重复频率、平台移动速度以及材料特性等^[1]。当前用于加工发光二极管(LED)的激光器以纳秒级脉宽激光器为主,其中 Sapphire 基板蓝光 LED 以其显著的加工效果得到 LED 加工领域的广泛认可。然而,对于硅基板,其与 Sapphire 基板材料在特性上存在差异,这使得纳秒级脉宽激光器在加工硅基板过程中产生了热作用,从而影响了加工质量。本文通过实验研究了激光输出功率、能量密度、重复频率和加工平台速度等参数对硅基 LED 芯片加工品质的影响,为硅基 LED 芯片加工提供了一定的指导。

2 激光与物质作用机理

固体激光器主要的发展方向为短脉宽和短波长,超短脉宽(皮秒、飞秒)量级激光与物质的作用机理现在还没有明确定论^[2],在此不作讨论。激光能量被物质中的电子吸收,其吸收机制分为线性吸收和非线性吸收,其中非线性吸收过程主要有多光子离子化以及崩落离子化^[3]。紫外激光与材料的相互作用过程如下^[4]:

- 1) 通过热激发或光激发(包括单光子和多光子电离)产生导带电子;
- 2) 导带电子通过焦耳加热和雪崩电离过程在光场中吸收能量,形成等离子体;
- 3) 等离子体通过电子声子耦合过程,把能量传递给晶格;

收稿日期: 2016-04-18; 收到修改稿日期: 2016-05-12; 网络出版日期: 2016-09-19

作者简介: 肖和平(1984—),男,硕士,工程师,主要从事 LED 晶圆激光切割、激光与材料关系方面的研究。

E-mail: ietgu@163.com

4) 晶格被加热,物质发生熔化和升华;

5) 物质的热扩散和声子冲击波引起周围物质结构呈波状变化,其中包括激光能量的吸收、表面局部快速升温、热扩散、热膨胀、蒸发、腐蚀或化学键断裂等现象。

紫外激光与材料相互作用过程中主要有以下三种机制。

1) 孵化作用。当照射在材料表面的激光能量相对较低,材料吸收的能量尚未达到材料破坏的起始能量时,这些能量会对材料进行加热和预熔。此时材料表面缺陷密度迅速增加,这些缺陷再吸收一定的能量就会达到材料破坏的起始能量而造成材料表面破坏,该现象称为孵化作用^[5],此时的激光能量称为材料的孵化能量。

2) 光热作用。当激光照射在材料表面时,材料将吸收能量转化成热能,材料温度上升。当温度到达材料熔点或沸点时,材料表面产生升温、熔融、气化和喷溅等现象。受到空气冷却的作用,加工区域受热熔化后又很快冷却,在材料的加工区域出现重建的晶体结构,这些重建的晶体结构与材料本身的晶体结构不同,从而导致回熔应力缺陷的产生,形成热响应区。

3) 光化学作用。光化学作用又分为光机械效应和光化学效应。光机械效应是指当激光照射在材料表面时,材料将吸收的能量一部分转化为热能,材料表面温度上升,材料活性增加并伴随部分的光热作用;材料吸收的另一部能量由于大于材料的原子键结能,导致原子间键结断裂从而完成对材料的移除。这种复合作用机制除了对材料加工点进行破坏外,也会对被加工点邻近区域造成一些结构性破坏^[6],并在材料表面产生一些光热机械震波。光化学效应是指当入射材料表面的激光能量密度足够高时,入射能量密度大于材料的破坏临界值,直接引起材料的键结破坏与原子移除,分子键被切断的速率远高于再结合速率,从而产生局部的气压升高,使得气化分解的材料被高速排除。此过程属于冷加工作用,可大幅抑制再铸造层、热影响区和裂缝的产生,故可以得到平整的加工截面,加工精度较高。

这三种作用机制与激光脉宽、激光波长、激光辐射时间、能量密度以及被加工材料本身的性质有关,在加工过程中三种机制哪种占主导地位,需视激光参数特性和材料特性而定。本文使用的 355 nm 波长的紫外激光的脉宽在纳秒量级(5~200 ns),在与硅基半导体材料反应中光热作用机制占主导地位^[7]。

3 硅基 AlGaInP 发光二极管芯片的制备

采用金属有机物化学气相沉积技术(MOCVD)在 GaAs 衬底上生长出多量子阱结构的发光层,其外延结构大致包括 n-GaAs 缓冲层、n-GaInP 腐蚀层、n-GaAs 欧姆接触层、n-AlGaInP 下限制层、MQW 有源区、p-AlGaInP 上限制层、p-GaP 电流扩展层以及 p-GaP 欧姆接触层。发光层生长后的工艺大致分为如下几步:在 p 面生长一定厚度的 SiO₂ 层并蚀刻成一定孔径的介质孔,蒸镀 AuZnAu 层;通过合金工艺形成 p 面欧姆接触层,与蒸镀上 Au 层的 p 型 Si 材料进行键合形成 GaAs 衬底,并在 n-GaAs 面蒸镀 Au/AuGe/Au 层;通过光刻腐蚀、合金工艺形成 n 面电极,在 Si 层的另一面蒸镀上 Ti/Au 形成 p 面导通的底金属,结构如图 1 所示,其中 MQWs 表示发光有源层。加工材料为 Au 与 30~50 μm 厚度的硅。

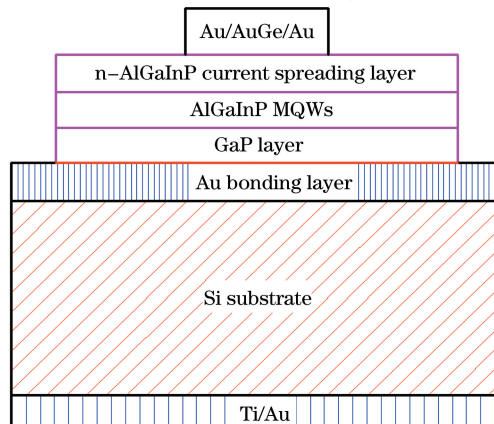


图 1 硅基 AlGaInP 发光二极管芯片

Fig. 1 LED chip of silicon substrate AlGaInP

4 测试结果与分析

4.1 激光器内部参数选择

此处研究的激光器是固态激光器,在激光器内部通过调 Q 技术将连续发射的激光变成具有一定脉冲宽度的脉冲激光,再通过倍频技术将激光器的波长从 1064 nm 变至 355 nm。激光加工的质量与激光参数的选择、被加工材料特性及加工平台的移动速度相关,此处相关数据均在最佳焦点情况下测得。

4.2 激光器平均输出功率与重复频率的关系

激光器每秒发出的脉冲个数 N 称为重复频率,一个激光脉冲输出的能量为 E ,定义 $P = NE$ 为该脉冲激光的平均输出功率。 $P_p = E/T$ 称为脉冲峰值功率,其中 T 为激光脉冲的半峰全宽,脉冲宽度越窄,峰值功率就越高,加工过程中热效应的影响就会越小。在其他参数不变的情况下,随着重复频率的上升,单脉冲峰值功率下降。在相同的激光转换效率下(80%),测得不同重复频率与激光平均输出功率的关系如图 2 所示。

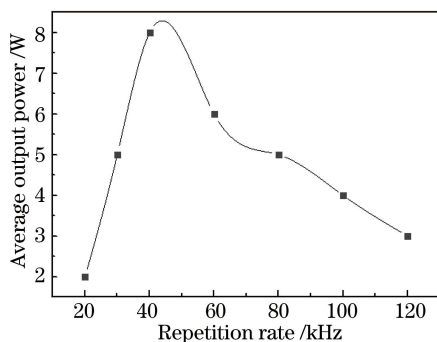


图 2 激光器平均输出功率与重复频率的关系

Fig. 2 Relationship between laser average output power and repetition rate

4.3 加工深度与激光能量密度的关系

激光器输出功率在 60%~90% 范围内为最佳工作模式。在激光器输出功率为 80% 的条件下,40, 80, 110 kHz 三种不同重复频率下加工深度与能量密度的关系分别如图 3~5 所示。

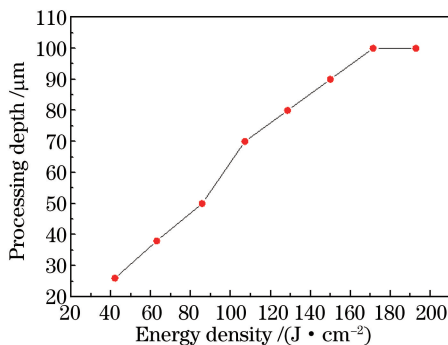


图 3 激光重复频率为 40 kHz 时加工深度与能量密度的关系

Fig. 3 Relationship between processing depth and energy density at laser repetition rate of 40 kHz

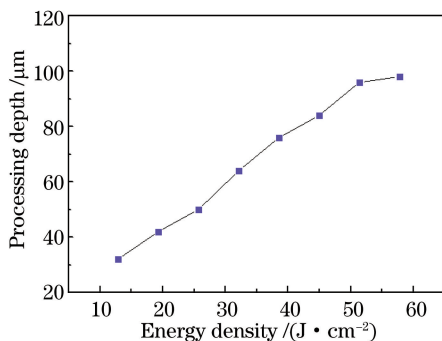


图 4 激光重复频率为 80 kHz 时加工深度与能量密度的关系

Fig. 4 Relationship between processing depth and energy density at laser repetition rate of 80 kHz

由图 3~5 可知,加工深度随激光能量密度的增加而上升,当激光能量密度增加到一定值后,加工深度随激光能量密度的增加逐渐变缓。这可能是因为材料与激光作用达到气化温度后被直接移除,蒸气粒子继续吸收能量,产生蒸气分子电离而形成等离子体。等离子体继续吸收激光剩余的能量^[8]并迅速向外膨胀,形成等离子体冲击波。在膨胀过程中,等离子体持续吸收激光能量,这种效应称为等离子体屏蔽效应^[9-10],即等离子体阻止了激光到达材料表面,切断了激光与材料的能量耦合,从而导致切割深度随激光能量的增加而逐渐变缓^[11]。

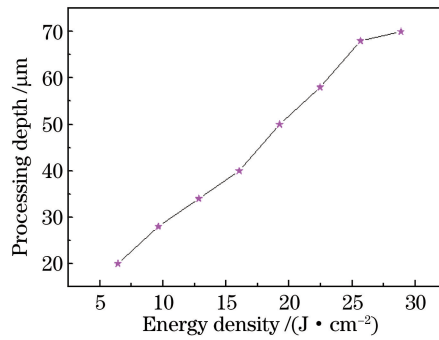


图5 激光重复频率为 110 kHz 时加工深度与能量密度的关系

Fig. 5 Relationship between processing depth and energy density at laser repetition rate of 110 kHz

4.4 加工质量与重复频率的关系

各材料都有加工的临界起始能量,当激光能量大于材料起始能量且激光密度越大时,加工深度也越深。在同一激光能量密度下进行连续脉冲击发,随着脉冲发数的增加,加工深度上升(图6),但被加工材料的移除速率受等离子体屏蔽效应的影响而出现下降的趋势(图7)。

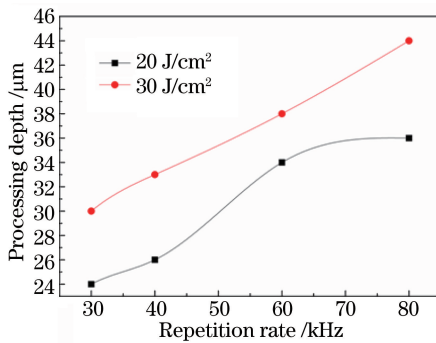


图6 不同激光能量密度下加工深度与重复频率的关系

Fig. 6 Relationship between processing depth and repetition rate at different laser energy densities

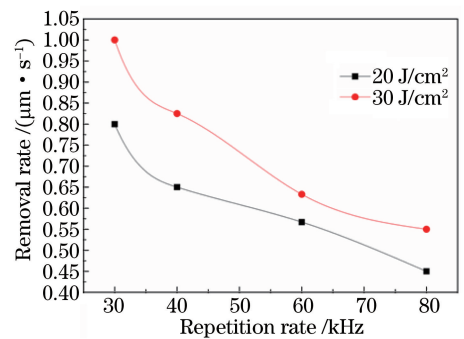


图7 不同激光能量密度下加工材料移除速率与重复频率的关系

Fig. 7 Relationship between workpiece removal rate and repetition rate at different laser energy densities

使用 110 kHz 重复频率的激光脉冲连续轰击材料,焦点附近的被加工材料温度急速上升,导致热量累积过多而扩散到聚焦范围以外形成热影响区,被加工材料切割道边缘出现崩裂、熔渣重结晶、堆积等现象^[12],如图8所示。这些问题会降低加工精度,导致二极管在后续封装过程中出现表面形状辨识不良以及漏电等问题。

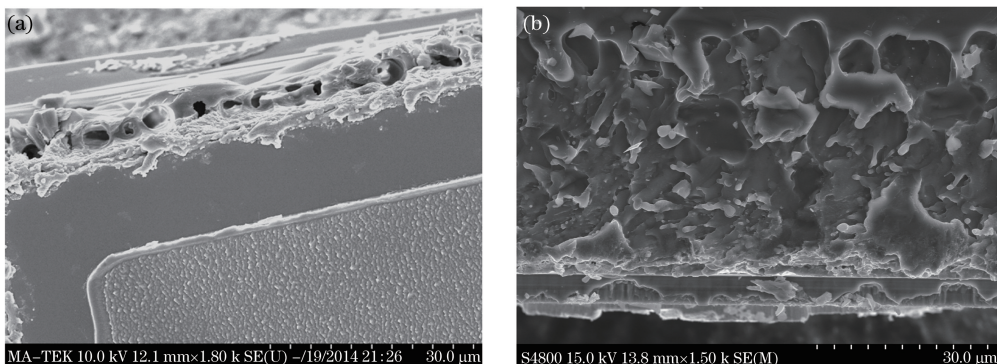


图8 高重复频率激光加工后的材料形貌。(a)正面;(b)侧面

Fig. 8 Morphology of workpiece by laser machining with high repetition rate. (a) Front view; (b) side view

使用 80 kHz 的中等重复频率时,材料的热量扩散与吸收达到动态平衡,不会累积过多热量而产生大量的热应力,切割道两侧熔渣残留相对较少,切割深度均匀,如图9所示,裂片和分割良率相对较高。

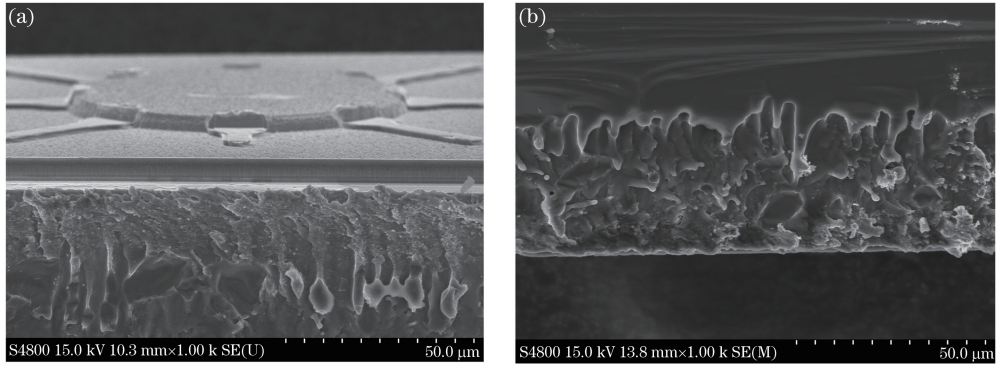


图9 中重复频率激光加工后的材料形貌。(a)正面;(b)侧面

Fig. 9 Morphology of workpiece by laser machining with moderate repetition rate. (a) Front view; (b) side view

使用 40 kHz 的重复频率时,被加工的硅基发光二极管切割道边缘出现较多的残留熔渣,影响硅基发光二极管的外观并导致漏电。切割道沟槽内出现非连续加工的形貌,在某些区域加工能量高,切割深度较深,熔化、喷溅作用强,形成回熔的火山口形貌。切割道沟槽内形成明显波浪状,沟槽内回熔拉扯引起硅基发光二极管正面崩裂,如图 10 所示。

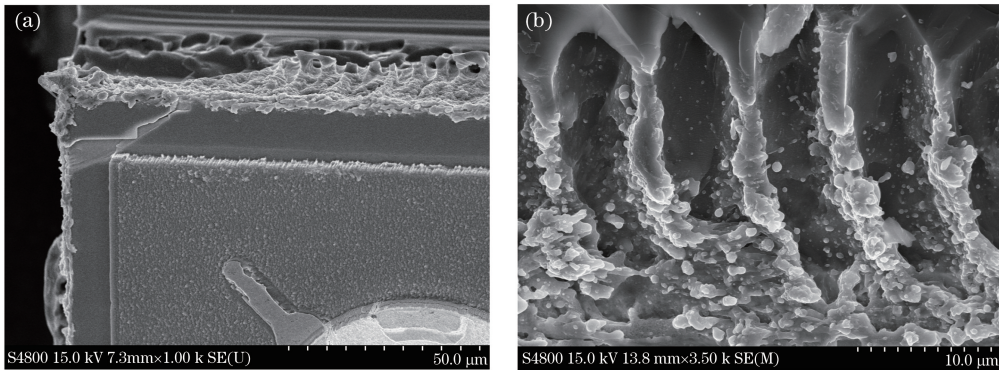


图10 低重复频率激光加工后的材料形貌。(a)正面;(b)侧面

Fig. 10 Morphology of workpiece by laser machining with low repetition rate. (a) Front view; (b) side view

在相同激光能量密度下,加工效率与重复频率成反比,中等重复频率下激光加工具有速率快、精度高、热影响区小以及加工表面形貌佳等特点,故选择 80 kHz 为加工频率。

4.5 加工深度与加工平台速度的关系

相邻激光脉冲作用点距离与激光实时作用点能够达到的预热温度直接相关,也直接影响到产生的等离子氛围的大小。加工深度和材料的吸光率有关,单位时间内材料对激光的吸收率受激光波长、材料表面粗糙度、表面涂层和材料种类等多种因素影响^[13]。在相同能量密度(25 J/cm²)下,加工平台速度越高,激光照射

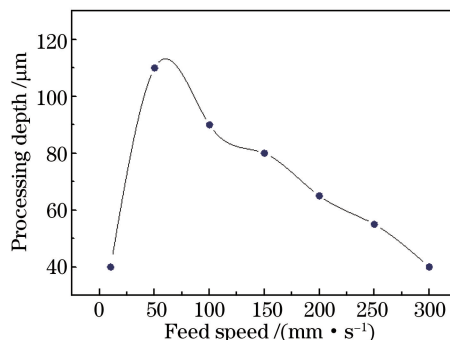


图11 激光能量密度 25 J/cm² 下加工深度与加工速度的关系

Fig. 11 Relationship between processing depth and feed speed at laser energy density of 25 J/cm²

材料的时间越短,材料在单位面积上得到的能量越少,加工深度越浅;加工平台速度降低,激光与材料的作用时间变长,加工深度加深;但当加工平台速度降至很低时,激光加工过程中的热效应会增强,切割沟槽内的残渣与回熔物增加,导致有效的加工深度变浅,如图 11 所示。在加工深度为 40~50 μm 范围内,选择 300 mm/s 作为加工平台速度较为合适。

5 结 论

对激光工艺参数条件进行了研究。研究表明,355 nm 固态激光器在最佳焦距条件下,选择重复频率为 80 kHz、能量密度为 25 J/cm^2 、加工平台速度为 300 mm/s 时,可获得切割道边缘残留熔渣少、边缘热效应低、切割沟槽深度均匀、切割形貌佳的硅基 AlGaInP 发光二极管,提高了激光加工硅基 AlGaInP 发光二极管的加工品质。

参 考 文 献

- 1 Huang Huan. The technology study on UV laser dicing high brightness LED wafer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
黄欢. 高亮度 LED 晶圆紫外激光划片技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- 2 Lai Gengyang. The principle of laser technology practice[M]. Taiwan: Complex Chinese Press, 2000.
赖耿阳. 激光技术原理实务[M]. 台湾: 复汉出版社, 2000.
- 3 Stafe M, Vladiou I, Popescu I. Impact of the laser wavelength and fluence on the ablation rate of aluminium[J]. Open Physics, 2008, 6(2): 327-331.
- 4 Bäuerle D. Laser processing and chemistry[M]. Berlin: Springer, 2012.
- 5 Cain S R, Burns F C, Otis C E, *et al.* Photothermal description of polymer ablation: Absorption behavior and degradation time scales[J]. Journal of Applied Physics, 1992, 72(11): 5172-5178.
- 6 Abdellaoui N, Pillonnet A, Berndt J, *et al.* Growth process of nanosized aluminum thin films by pulsed laser deposition for fluorescence enhancement[J]. Nanotechnology, 2015, 26(11): 115604.
- 7 Fishburn J M, Withford M, Coutts D, *et al.* Method for determination of the volume of material ejected as molten droplets during visible nanosecond ablation[J]. Applied Optics, 2005, 43(35): 6473-6476.
- 8 Basting D, Marowsky G. Excimer laser technology[M]. Berlin: Springer, 2005.
- 9 Cremers D A, Knight A K. Laser-induced breakdown spectrometry[M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2015.
- 10 Hong M H, Koh M L, Zhu S, *et al.* Steam-assisted laser ablation and its signal diagnostics[J]. Applied Surface Science, 2012(197): 911-914.
- 11 Han Fengming, Xu Shizhen, Song Wenliang, *et al.* Study of nanosecond laser ablation on aluminum and stainless steel targets[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(2): 0203005.
韩丰明, 徐世珍, 宋文亮, 等. 纳秒激光对铝合金和不锈钢的烧蚀特性研究[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0203005.
- 12 Zhang Wei, Li Guozhu, Wang Chunming, *et al.* Process optimization and design of fiber laser cutting aluminium-lithium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0203003.
张威, 李国柱, 王春明, 等. 铝锂合金光纤激光切割的工艺优化与设计[J], 中国激光, 2015, 42(2): 0203003.
- 13 Chen Hua, Xue Shoulong, Hu Hong. Experimental and theoretical analysis of cutting packaging materials by laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 011404.
陈华, 薛守龙, 胡泓. 包装材料激光切割数学建模与实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 011404.