

蓝宝石晶片抛光过程运动仿真及实验分析

王 兵¹ 顾建峰¹ 何辉辉¹ 汤云霞¹ 周 海² 陈西府² 冶远祥³

(1. 盐城工学院 BD 机制 052 班, 盐城 224051; 2. 盐城工学院机械工程学院, 盐城 224051; 3. 兴化祥盛光电子材料公司, 兴化 225761)

摘 要: 本文分析了双面抛光机的抛光原理, 建立了晶片在抛光过程中运动的数学模型, 采用 VC 语言对双面抛光加工进行运动仿真, 分析了不同参数对抛光效果的影响, 获得了最合理的抛光运动参数, 并且在抛光机上得到了验证。

关键词: 蓝宝石 化学机械抛光 运动分析 计算机仿真

1 引言

氮化镓 (GaN) 基半导体是继硅单晶之后, 人类目前所发现的最重要的新型光电子材料^[1]随着发光二极管的问世, 全球正在进行着一场新的产业革命——固体照明革命^[2]。由于发光二极管是冷光源, 在同样亮度下, 固体照明灯耗电仅为普通白炽灯的十分之一, 而寿命却是白炽灯的 100 多倍, 同时它具有免维护、环保等优点。

目前氮化镓薄膜生长主要采用金属有机物化学气相沉积 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition, 简称 MOCVD) 工艺在蓝宝石 ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) 衬底基片上生长, 该工艺要求衬底基片表面是超光滑、无损伤表面^[3]。通常超光滑表面是指^[4]: 表面粗糙度小于 1nm(RMS) 的表面; 无损伤表面是指^[5]: 加工表面不能有加工变质层, 且表面晶格完整。如果衬底基片的质量稍差, 会使制造出来的发光二极管发光性能低劣, 甚至做不出管子来^[6]。

由于蓝宝石衬底材料的脆性大、硬度高 (是莫氏 9.3 级, 仅次于莫氏 10 级的金刚石), 对其进行机械加工已经十分困难, 无损伤超光滑表面抛光技术更加复杂。目前为止, 化学机械抛光是获得无损伤超光滑蓝宝石晶片表面的最好方法。

2 蓝宝石晶片化学机械抛光原理

蓝宝石晶片双面抛光的工作原理如图 1 所示。抛光垫固定在上抛光盘和下抛光盘的表面, 被加工晶片放在由中心轮和内齿齿轮组成的差动轮系内。抛光压力则由气缸加压上抛光盘实现。为减少抛光时晶片所受的作用力, 一般使上抛光盘和下抛光盘分别按照方向相反的角速度旋转。晶片的运动由行星轮带动, 同时在上、下抛光盘抛光压力的作用下产生自转, 因此晶片的运动是行星运动和自转运动的合成运动。

在蓝宝石晶片抛光过程中, 主要发生如下的水解反应、酸与碱的中和反应及盐的复分解反应^[7]。

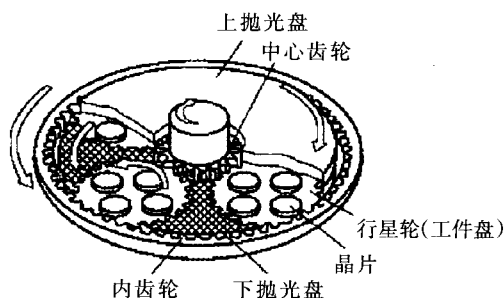
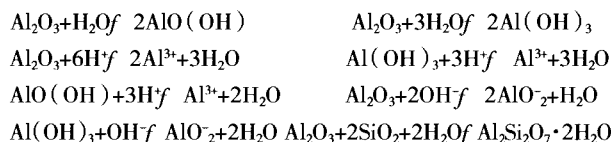


图 1 双面抛光机工作原理简图



化学机械抛光是一个复杂的多相反应, 它存在着两个动力学过程: (1) 抛光首先使吸附在抛光布上的抛光液中的化学物质与晶片表面进行化学反应, 即化学反应过程。(2) 抛光表面反应物脱离蓝宝石晶片表面, 即解吸过程, 使未反应的蓝宝石单晶重新裸露出来。

在整个化学机械抛光过程中, 化学反应作用是影响蓝宝石表面的晶格完整和表面粗糙度的主要因素, 而机械作用是影响表面粗糙度和平面度的主要因素。粗糙度和平面度与抛光的压力、抛光盘的运动轨迹有较大的关系, 本文重点对蓝宝石晶片抛光运动状况进行分析、仿真和实验研究。

3 晶片抛光运动分析

3.1 抛光运动轨迹方程

在晶片抛光过程中, 表面宏观形状的形成主要取决于工件盘和抛光盘之间的相对运动轨迹。在实际抛光过程

基金项目: 江苏省科技厅科技攻关项目 (BE2007077);

江苏省高校自然科学基金项目 (06KJB460119);

江苏省大学生实践创新训练计划项目 (07SSJXCX011);

盐城市科技局科技发展计划项目 (YK2007018)。

中,我们可以简化抛光盘和工件盘为两个做相对平面运动的平面。可以用下列三个坐标系表示^[8]:固结于抛光盘上的静坐标系 σ ;固结于抛光盘以 $(\omega_p - \omega_w)$ 做匀速运动的旋转坐标系 σ_1 ;固结于工件盘中心以角速度 ω_a 做匀速圆周运动的坐标系 σ_2 。

先只对坐标系 σ_2 上的运动进行分析,见图 2。

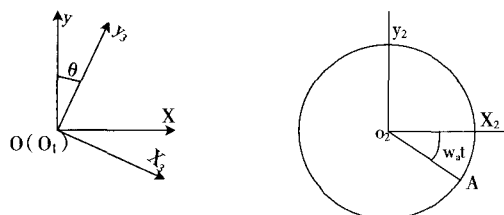


图 2 任意点 A 运动方程的建立

工件盘上任意取一点 A, A 点相对于工件表面上的坐标系 σ_2 做匀速圆周运动,其角速度为 ω_a ,半径为 r ,则可得 A 点在 σ_2 下的运动方程为:

$$\begin{cases} x_A = r \cos \omega_a t \\ y_A = -r \sin \omega_a t \end{cases} \quad (1)$$

根据奇次坐标变换原理,可先由 $\sigma_2 \rightarrow \sigma$ 进行平移变换,再由 $\sigma \rightarrow \sigma_1$ 进行旋转变换,可得 A 点相对于抛光盘的相对运动轨迹方程如下:

$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(90^\circ + \theta) & 0 \\ \cos(90^\circ - \theta) & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & e \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \cos \omega_a t \\ -r \sin \omega_a t \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

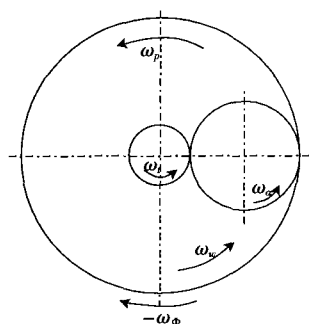
(2) 式中: θ 为经过时间 t 后坐标系之间的相对转角 $\theta = (\omega_p - \omega_w)t$; e 为抛光盘中心 o 与工件盘中心 o_2 之间的距离。

由双面抛光机的抛光原理分析得:抛光盘以一定的角速度 (ω_p) 与内齿圈 (ω_i) 以及工件盘组成一个周转轮系,运动原理如图 3 所示。

$$i_{ip}^w = \frac{\omega_i^w}{\omega_p^w} = \frac{\omega_i - \omega_w}{\omega_p - \omega_w} = -\frac{z_3}{z_1} \quad (3)$$

$$i_{ia}^w = \frac{\omega_i^w}{\omega_a^w} = \frac{\omega_i - \omega_w}{\omega_a - \omega_w} = -\frac{z_2}{z_1} \quad (4)$$

综合(1)式、(2)式、(3)式、(4)式,得:



ω_p 为抛光盘角速度, ω_i 为内齿圈角速度,
 ω_a 为工件盘自转角速度, ω_w 为工件盘公转角速度

图 3 周转轮系

$$\begin{cases} x_A = r \cos \left(\frac{(z_1 z_2 - z_1 z_3 - z_2 z_3) \omega_p - (2 z_1 z_2 - z_1 z_3) \omega_i}{z_2 (z_1 + z_3)} t + e \cos \frac{\omega_p - \omega_i}{z_1 + z_3} z_1 t \right) \\ y_A = r \sin \left(\frac{(z_1 z_2 - z_1 z_3 - z_2 z_3) \omega_p - (2 z_1 z_2 - z_1 z_3) \omega_i}{z_2 (z_1 + z_3)} t + e \sin \frac{\omega_p - \omega_i}{z_1 + z_3} z_1 t \right) \end{cases} \quad (5)$$

(5) 式中: z_1 为内齿圈齿数; z_2 为工件盘齿数; z_3 为抛光盘齿数; r 为工件盘上任意一点到工件盘中心的距离; t 为仿真运动时间。这就是 A 点相对于抛光盘的相对运动轨迹方程。

3.2 仿真结果及其轨迹线分析

从(5)式可以看出,影响抛光盘的相对运动轨迹的因素有:内齿轮齿数 z_1 、工件盘齿数 z_2 、抛光盘齿数 z_3 、抛光盘角速度 ω_p 、内齿轮角速度 ω_i 。当抛光机的型号确定之后,能够调整的参数只有 ω_p 和 ω_i ,我们在计算机上 VB 语言对抛光盘的相对运动轨迹进行了计算机仿真,其结果如图 4 所示。

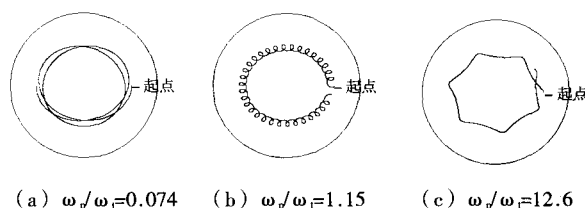


图 4 不同参数下的抛光轨迹形状

从图 4 的五幅图形对比中,我们可以看出:双面抛光轨迹线形状是由 ω_p/ω_i 的值决定的。当 ω_p/ω_i 值很小时,如 $\omega_p/\omega_i = 0.074$,轨迹形状如图 4(a)所示,其轨迹线形状为平滑的圆弧线。轨迹线形状相对比较简单,此时轨迹容易重复,不利于抛光加工;随着 ω_p/ω_i 值的增加,如 $\omega_p/\omega_i = 1.15$ 时,轨迹线形状如图 4(b)所示,相对于(a)图而言要复杂得多,在实际抛光过程中,希望轨迹线形状越复杂越好,轨迹不容易重复;随着 ω_p/ω_i 值的进一步增加,如 $\omega_p/\omega_i = 12.6$ 时,轨迹线形状又趋于简单,如图 4(c)所示,也并不利于实际抛光加工过程。

可见, ω_p/ω_i 取值的大小直接关系到双面抛光运动的轨迹线的形状。由上述 5 幅图比较可以得出:在其他参数不变的情况下, ω_p/ω_i 的值不能取太小,但是也不能取太大,为了能获得最理想的抛光效果,经过仿真实验, ω_p/ω_i 的值范围应该在 0.8~1.4 之间为宜。

4 晶片抛光实验分析

为了验证仿真结果,我们在 YP640 精密抛光机上 ($r=5$ 、 $z_1=46$ 、 $z_2=49$ 、 $z_3=144$),以角速度 $\omega_p=66$ 、 $\omega_i=60$,即 $\omega_p/\omega_i=1.1$ 。其他抛光条件是:以胶体 SiO_2 为抛光液,抛光液的浓度为 3%、粒子直径为 7nm、pH=10 时,在聚氨脂抛光布上,对蓝宝石晶片进行化学机械抛光,清洗后的晶片进行原子力显微镜 (AFM) 分析。

图 5 所示的是晶片抛光面的 AFM 检测结果,图 5(a)是放大十万倍后的蓝宝石晶片表面三维形貌;图 5(b)晶片表面微观粗糙度。可以看出:晶片表面光滑,表面粗糙度为 $\text{RMS}=0.462 \text{ nm}$ 。通过进一步宏观尺寸检测,平面度 $=4.5 \mu\text{m}$ 、翘曲度 $=2.6 \mu\text{m}$ 。

(下转第 25 页)

- [5] 田国富,孙书慧,程艳辉. 桥式起重机箱形梁的优化设计. 沈阳工业大学学报, 2000, 22(6): 462-465.
- [6] 杜克利斯基. 起重机设计手册. 北京: 机械工业出版社, 1966.
- [7] 马爱军, 周传月, 王旭. Patran 和 Nastran 有限元分析专业教程. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [8] 刘兵山, 黄聪. Patran 从入门到精通. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [9] Schmit L.A. Structural design by systematic synthesis. Proc. Of Conf. on Electronic Computation, ASCE. New York, 1990, 105-122.
- [10] MSC. Software, Homogenization Design Method (HMD).
- [11] Jie Shen, David Yoon. A New Scheme for Efficient And Direct Shape Optimization of Complex Structures Represented by Polygonal Meshes. Department of Computer Science, University of Michigan, Dearborn, MI 48128, USA 2003.
- [12] E. L. Cardoso, J. S. O. Fonseca. Complexity Control In the Topology Optimization of Continuum Structures. ABCM. Vol.

XXV, No. 3, July-September 2003

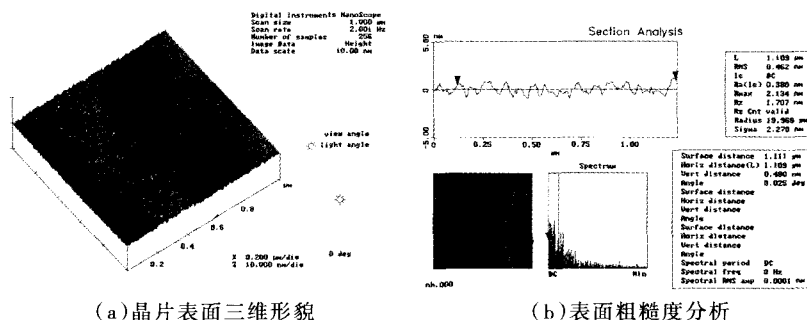
A Study for Structural Optimization Design of Bridge Crane Box Girder

YANG Menglin, QIN Dongchen, LIU Zhuli, WANG Yingjia

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Bridge crane is a type of hoisting machinery. Its performance depends largely on its box girder structure. Firstly, a comprehensive analysis to the box girder is given and an optimization model to the bridge crane girder structure is established. Secondly, the box girder is optimized with finite element software Patran/Nastran and MMA algorithm program. Finally, the satisfied results are obtained.

Key words: bridge Crane, box girder, optimization design, finite element, Patran/Nastran, MMA



(a) 晶片表面三维形貌

(b) 表面粗糙度分析

图5 蓝宝石晶片的 AFM 分析

(上接第 18 页)

5 结论

在蓝宝石晶片双面抛光中, 抛光盘角速度 ω_p 、内齿轮角速度 ω_i 之比 ω_p/ω_i , 直接关系到双面抛光运动的轨迹线的形状。 ω_p/ω_i 的值不宜太小, 也不宜太大, 为了能获得较理想的抛光效果, 的值范围应该在 0.8~1.4 之间为宜。

在 YP640 精密抛光机上, 取 $\omega_p/\omega_i=1.1$, 以胶体 SiO_2 为抛光液, 对蓝宝石晶片进行化学机械抛光, 获得了晶片表面粗糙度为 RMS 为 0.462 nm、平面度为 4.5 μm 、翘曲度为 2.6 μm 的超光滑蓝宝石晶片。

通过对蓝宝石晶片抛光过程的运动分析和计算机仿真, 能够有效的指导蓝宝石晶片的化学机械抛光实验, 优化蓝宝石晶片抛光工艺参数。

参考文献

- [1] 孙志君. 向商用市场阔步迈进的 GaN 紫色和蓝色激光二极管器件[J]. 今日电子. 2004, 1: 43-44.
- [2] 梁春广, 张翼. GaN 第三代半导体的曙光 [J]. 半导体学报. 2000, (2): 89-99.
- [3] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] 袁哲俊, 王先逵. 精密和超精密加工技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [5] P.A. McKeown, The Role of Precision Engineering in Manufacturing

of the Future[J], Annals of the CIRP, 2000(2): 495-501.

- [6] 刘玉岭. 超大规模集成电路衬底材料性能及加工测试技术工程. 北京: 电子工业出版社, 2002. 3
- [7] 王银珍, 周圣明. 蓝宝石衬底的化学机械抛光技术的研究. 人工晶体学报. 2004, 33(3): 441-447.
- [8] 金杨福, 李伟, 胡刚翔, 胡晓珍. 双面抛光加工运动过程分析与数学模型的建立 [J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(1): 92-95.

Analysis on the Kinematic Simulation and Experiment of Polishing for Sapphire Wafer

WANG Bin¹, GU Jianfeng¹, HE Huihui¹, TANG Yunxia¹, ZHOU Hai², CHEN Xifu², YE Yuanxiang³

(1. Class BD052, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051; 2. Department of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051; 3. Xinghua Xiangsheng Opto-electronic Material Co., Ltd, Xinghua 225700)

Abstract: This article has analyzed the two-sided buffing machine polishing principle, has established the chip in the polishing process the movement mathematical model, uses the Visual C++ language to carry on the movement simulation to the two-sided polishing processing, analyzed the different parameter to polish the effect the influence, has obtained the most reasonable polishing parameter of movement, and obtained the confirmation on the buffing machine.

Key words: sapphire, chemistry machinery polishing, movement analysis, computer simulation