

GaN 基 LED 衬底材料化学机械抛光研究进展

熊伟, 储向峰, 白林山, 董永平, 叶明富

(安徽工业大学 化学化工学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘要: 概述了化学机械抛光作用机制, 着重阐述了 3 种常见衬底($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, SiC, Si) 的化学机械抛光现状, 主要从抛光工艺参数和抛光液组成(不同磨料、磨料粒径、氧化剂、络合剂、pH 值等)对晶片抛光效果的影响展开研究, 并指出了目前化学机械抛光存在的问题, 进一步展望了 LED 衬底化学机械抛光的发展前景。

关键词: 衬底材料; 化学机械抛光; 抛光工艺; 抛光浆料

中图分类号: TN305.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2014)01-0125-06

Research Progress of Chemical Mechanical Polishing of Substrates Used in GaN-based LED

XIONG Wei, CHU Xiang-feng, BAI Lin-shan, DONG Yong-ping, YE Ming-fu

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

ABSTRACT: In this paper, the mechanism of chemical mechanical polishing (CMP) was summarized. The development of chemical mechanical polishing of three kinds of substrates ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, SiC, Si) were introduced. The study was mainly focused on the effects of the polishing process parameters and the composition of the polishing slurry (different abrasive, abrasive particle size, oxidizing agent, chelating agent and pH value, etc) on wafer polishing, and the existing problems of CMP were pointed out. Finally, the future prospect of CMP of LED substrate was outlined.

KEY WORDS: substrate materials; chemical mechanical polishing; polishing process; polishing slurry

LED 是由 III-IV 族化合物, 如 GaN, GaAs, GaAsP, GaP 等半导体制成, 其核心发光部分为 pn 结管芯, 它是通过外延生长形成得到的(将衬底基片加热至适当的温度, 然后将气态物质 Ga, In, P 等输送至衬底表面, 从而生长出对应的单晶薄膜^[1])。不同的半导体材料能发出不同颜色的光线, 在这些颜色中蓝色光尤为重要, 它是白光中不可缺少的单色光, 而蓝色光 LED 使用的半导体材料主要是 GaN。目前用于 GaN

薄膜外延生长的衬底主要有 3 种: 蓝宝石、碳化硅和硅^[2]。研究表明^[3-6], 衬底表面的加工工艺是决定器件质量的重要因素之一, 而异质结构生长技术对 LED 衬底材料的表面也提出较高的要求——原子级平滑理想表面, 即衬底表面为单晶形态且不能有机机械损伤^[7]。

目前化学机械抛光几乎是唯一可以提供全局平坦化的技术^[8-9]。影响 CMP 的主要因素有抛光工艺

收稿日期: 2013-10-14; 修订日期: 2013-11-22

Received: 2013-10-14; Revised: 2013-11-22

基金项目: 安徽工业大学研究生创新基金(2012029)

Fund: Supported by Graduate Innovation Fund of AHUT(2012029)

作者简介: 熊伟(1989—), 男, 湖北仙桃人, 硕士研究生, 主要研究方向为蓝宝石化学机械抛光。

Biography: XIONG Wei(1989—), Male, from Xiantao, Hubei, Master, Research focus: sapphire chemical mechanical polishing.

参数(抛光压力、抛光盘转速、抛光流量、磨料浓度、pH 值、温度等)与抛光浆料(磨料种类、粒径大小、氧化剂、添加剂等),文中主要围绕这两个方面进行了综述。

1 化学机械抛光简介

化学机械抛光技术是化学腐蚀和机械研磨的组合技术,它借助纳米粒子的机械研磨与抛光液的化学腐蚀来完成晶片表面的平坦化^[10]。它通过化学和机械的综合作用,克服了由单一机械抛光造成的表面刮痕及亚表面损伤和由单一化学抛光造成的材料去除速率低、工作温度高以及易导致抛光雾斑等缺点^[11]。

化学机械抛光装置的示意如图 1 所示^[11]。在 CMP 过程中,将旋转的晶片以一定的压力作用在与其同方向旋转的抛光垫上,抛光液均匀分布在在晶片与抛光垫之间,并在晶片与抛光垫之间形成一层液体薄膜,薄膜中的化学成分与晶片发生化学反应,生成一层比原材料硬度小的反应层(化学过程),然后通过磨料的机械作用将这些反应物从晶片表面去除(机械过程),从而实现化学机械抛光^[12]。

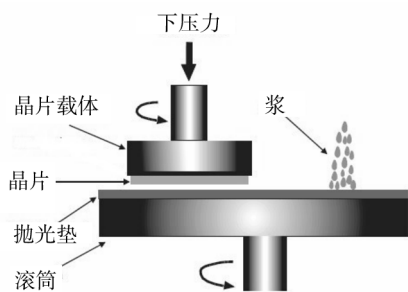


图 1 化学机械抛光装置示意

Fig. 1 Schematic representation of CMP equipment

2 常见 LED 衬底的 CMP 研究现状

2.1 Al_2O_3 衬底化学机械抛光技术的发展现状

蓝宝石晶体具有良好的力学性能(硬度高)、光学性能(透光性好)和化学稳定性(可以在接近 2000 °C 高温条件下工作)等优点。正由于蓝宝石具有这些优异的性能,且制造技术成熟、价格便宜,其性能方面的不足已经通过各种技术得到了改善和克服^[13],因而是目前 GaN 生长最普遍的衬底材料。蓝宝石作为衬底材料时要求其表面粗糙度小于 0.8 nm,且表面必须达到超光滑无损伤的程度^[14—15]。

王银珍等^[16]重点描述了抛光液 pH 值、抛光压力及不同磨料对蓝宝石晶片材料去除速率的影响,得出最佳 pH 值为 12,抛光压力为 48.27 kPa,最佳磨料为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。NIU 等^[17]分析了蓝宝石晶片化学机械抛光的化学动力学过程,概述了磨料、表面活性剂、pH 值、压力以及温度对蓝宝石晶片化学机械抛光的影响。ZHANG 等^[18]研究了转速、抛光压力、摩擦力对蓝宝石晶片化学机械抛光去除速率的影响,得出材料去除速率随转速、抛光压力、摩擦力的增大而增大。

刘金玉等^[19]研究了不同粒径 SiO_2 磨料对蓝宝石晶片材料去除速率的影响,得出磨料粒径越大去除速率越大,而粒径太大又不利于降低晶片表面粗糙度;ZHU 等^[20]研究了 Al_2O_3 , Mono-diamond, Poly-diamond 等磨料对蓝宝石晶片化学机械抛光的影响,得出 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 抛光后获得的表面粗糙度最低,去除速率最大。近年来随着 CMP 技术的发展,混合磨料逐渐成为学者研究的热点,有学者提出混合磨料有利于提高晶片材料去除速率以及表面质量^[21—22]。于江勇^[23]等分析了混合磨料对蓝宝石衬底 CMP 作用机理,并对比了单一 SiO_2 磨料与 SiO_2 和 Al_2O_3 混合磨料对蓝宝石晶片材料去除速率的影响。结果表明:在主磨料 SiO_2 中加入 20 mL/L 同粒径的 Al_2O_3 可以使抛光过程中的化学作用与机械作用达到平衡,使材料去除速率得到明显提高,而调整抛光液组分与工艺参数,可以使蓝宝石表面粗糙度由 2.32 nm 降至 0.236 nm。

目前有不少新的抛光方法被提出, XU 等^[24]比较了蓝宝石晶片 UFV (ultrasonic flexural vibration)-CMP 与传统 CMP,得出 UFV-CMP 比传统 CMP 材料去除速率大 2 倍,并能获得好的表面质量。ZHANG 等^[25]采用两步法对蓝宝石晶片进行化学机械抛光,首先采用超细氧化铝进行粗抛,然后再用纳米 SiO_2 进行精抛,并研究了抛光压力、抛光转速对材料去除速率与表面粗糙度的影响。结果表明:在抛光压力为 48.27 kPa,抛光转速为 150 r/min 时,获得最大材料去除速率为 14 nm/min;在抛光压力为 34.48 kPa,抛光转速为 100 r/min 时,获得最低的表表面粗糙度 ($R_a=0.68$ nm)。王吉翠^[26]等提出向 SiO_2 磨料加入 MgF_2 微粉(固相反应催化剂),利用晶片与 SiO_2 之间的固相反应,有效地去除软质反应层,从而对蓝宝石晶片进行 CMP 加工,最终获得较低的表面粗糙度。

2.2 SiC 衬底化学机械抛光技术的发展现状

碳化硅材料具有导电性能好、导热性能好、化学

性质稳定以及硬度高等优点^[27-28],其晶格失配率比蓝宝石小, SiC 衬底上外延生长的 GaN 薄膜具有更低的位错缺陷密度。这意味着 SiC 衬底的 GaN 基 LED 可以在大电流密度下工作^[29-30],而且可以通过上下电极结构解决功率型 GaN 基 LED 器件的散热问题^[13],所以是目前除蓝宝石外用于氮化镓(GaN)外延生长的主要商品化衬底材料。SiC 材料作为衬底要求其表面超光滑、无缺陷、无损伤,其任何表面损伤都影响工件的性能^[31-32]。

SU^[33]等采用氧化铝微粉对 SiC 晶片进行化学机械抛光,研究了 pH 值、磨料粒径、磨料浓度、分散剂浓度、氧化剂浓度、抛光转速、抛光压力等对 SiC 晶片材料去除速率的影响,得出最优配方:磨料粒径为 W3.5、分散剂(丙三醇)体积分数为 2.8%、氧化剂(H_2O_2)为体积分数 4%、磨料质量分数为 1.6%、pH 值为 11,抛光压力为 13.79 kPa、载物盘转速为 65 r/min、抛光盘转速为 60 r/min。Neslen^[34]等采用硅溶胶做磨料对 SiC 晶片进行化学机械抛光,研究了抛光温度、pH 值、抛光转速与抛光压力对 SiC 晶片材料去除速率的影响。结果表明:抛光温度与 pH 值对 SiC 晶片材料去除速率的影响较低,抛光转速和抛光压力对 SiC 晶片材料去除速率的影响较大,材料去除速率随着抛光转速与抛光压力的增大而增大,但抛光压力过高会导致抛光垫的损坏。

ZHOU^[35]等分别采用高浓度硅溶胶与三氧化二铬做磨料对 SiC 晶片进行化学机械抛光,实验表明在抛光温度为 55 °C, pH>10 时,采用硅溶胶抛光后获得较好的表面质量。他们认为较高的 pH 值可以提高抛光液中 OH^- 浓度,从而破坏 Si—C 键,达到提高材料去除速率的效果。LEE^[36]等采用混合磨料(硅溶胶与金刚石)对 SiC 晶片进行化学机械抛光,实验结果表明:与单纯的硅溶胶相比,混合磨料可以获得更高的材料去除速率和更低的表面粗糙度,且 SiC 晶片的材料去除速率随着混合磨料中金刚石的浓度增加而增大。当金刚石浓度增至 35 g/L 时获得最佳材料去除速率为 550 nm/h;当金刚石的浓度达到 25 g/L 时获得的表面质量最好,表面粗糙度为 0.27 nm。ERYU^[37]等采用离子注入技术与 CMP 技术相结合的方法对 SiC 晶片进行抛光,离子注入技术可以在 SiC 晶片表面产生的缺陷层,能够被 CMP 技术选择性的去除。当使用传统的 CMP 时,材料去除速率较低,而当结合离子注入技术之后,材料去除速率值可以增加至 1.6 nm/min。CHEN^[38]等采用两步法对 6H-SiC 衬

底进行化学机械抛光,首先使用金刚石抛光液进行粗抛,然后使用纳米二氧化硅溶胶进行精抛,最终获得表面粗糙度为 0.12 nm、高透射率和损伤层极小的表面。

2.3 Si 衬底化学机械抛光技术的发展现状

硅材料具有晶体高品质、低成本、大尺寸、导热导电性能好等优点^[39],且 Si 衬底 GaN 基 LED 器件的研制将有利于促进光电子的集成^[40],被认为是目前最具有前途的 GaN 衬底材料,因此使得在 Si 衬底上生长 GaN 薄膜受到广泛的关注,目前已经有学者成功的制制备了 GaN 基紫色 LED 以及蓝色 LED^[41-44],而用于 GaN 薄膜生长的硅衬底需具备超光滑无损伤表面^[45]。

宋晓岚^[46]等研究了抛光液 pH 值、氧化剂(H_2O_2)浓度、磨料浓度以及抛光转速、抛光压力和抛光时间等对硅片(100)和(111)晶面化学机械抛光去除速率的影响。结果表明:材料去除速率随 SiO_2 浓度、抛光压力及抛光转速的增加而增大,随抛光时间的增加而减小,在相同抛光条件下(100)晶面的材料去除速率(425 nm/min)大于(111)晶面(375 nm/min)。实验所获得优化工艺参数: SiO_2 质量分数为 10%, pH=10.5, H_2O_2 体积分数为 1%,抛光压力为 40 kPa 及抛光转速分别为 200 r/min(111 晶面)和 100 r/min(100 晶面)。在该条件下抛光 30 min 得到的 100 晶面表面粗糙度为 0.70 nm,111 晶面的的表面粗糙度为 0.71 nm。

陈建清^[47]等分别采用了 5 μm 、0.3 μm 以及 10 nm 的 CeO_2 对硅片进行化学机械抛光,结果表明:微米级的 CeO_2 磨料切削深度比较深,材料的去除是以机械作用为主,随着磨料粒径的减小,切削深度随之减小,材料主要以塑性流动的方式去除,最终在 2 μm 的范围内获得表面粗糙度 $Ra=0.12$ nm。LIU^[48]等提出采用小粒径的 SiO_2 做磨料对硅片进行化学机械抛光。小粒径磨料可以有效降低硅片表面损伤,获得较低的表面粗糙度,同时也可以获得较高的材料去除速率(200 nm/nm),并采用有机碱调节 pH 值,可以避免金属离子的污染,同时在抛光液中加入表面活性剂使得抛光后的硅片容易清洗。

WANG^[49]等分别采用纳米 CeO_2 与纳米 Al_2O_3 磨料对硅片进行化学机械抛光,讨论了抛光液 pH 值、氧化剂浓度、抛光液流量对硅片(100 晶面)材料去除速率的影响。得出纳米 CeO_2 抛光最佳工艺参数:抛光

液流量为 70 mL/min, H_2O_2 体积分数为 1%, pH 值为 10; 纳米 Al_2O_3 抛光最佳工艺参数: 抛光液流量为 70 mL/min, H_2O_2 体积分数为 0.4%, pH 值为 11, 且纳米 CeO_2 磨料的材料去除速率 (500 nm/min) 高于纳米 Al_2O_3 (200 nm/min)。Estragnat^[50] 等分别采用纳米 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 与 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 对硅片进行化学机械抛光, 主要研究了 pH 值对硅片材料去除速率与表面质量的影响。得出 Al_2O_3 的晶型对材料去除速率的影响不大, 硅片表面的化学反应起主导作用, 虽然高的 pH 值可以获得较高的材料去除速率, 但较好的表面质量是在相对较低的 pH 值下获得的结论。

3 结 语

简要介绍了 3 种常见 LED 衬底的化学机械抛光技术, 主要围绕提高衬底材料去除速率及其表面质量优化工艺参数和抛光液的组成开展工作。在抛光工艺相对成熟的基础上, 磨料的选择是学者研究的重点之重, 因为选择合适的磨料对提高材料去除速率与抛光表面质量尤为重要。如今大部分 CMP 技术被国外垄断, 我国要借助国内外成果进一步加强 CMP 技术的研究, 并可以从以下 2 个方面着手: 一方面在 CMP 设备上添加计算机监控以及在线检测终端, 尽量避免人为误差; 另一方面在抛光后处理上, 晶片清洗工艺、抛光液能否经过特殊处理后回收利用等, 并拥有自主知识产权的抛光液和工艺, 有利于提高 LED 衬底表面质量, 从而提高 LED 发光效率。

参考文献

- [1] 张雪平. 蓝宝石晶体生长与 LED 应用研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
ZHANG Xue-ping. Study of Sapphire Crystal Growth and Its Application on LED [D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [2] PENG D S, JIN K, ZHENG R S, et al. Comparative Study of GaN-based LED Grown on Different Substrates. In: Advanced Materials Research [M]. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2011: 2241—2244.
- [3] KELLER S, KELLER E P, WU Y F, et al. Influence of Sapphire Nitridation on Properties of Gallium Nitride Grown by Metal Organic Chemical Vapor Deposition [J]. Applied Physics Letters, 1996, 68(11): 125—129.
- [4] ROSNER S J, CARR E C, LUDOWISE M J, et al. Correlation of Cathodoluminescence Inhomogeneity with Microstruc-

- tural Defects in Epitaxial GaN Grown by Metal organic Chemical Vapor [J]. Applied Physics Letters, 1997, 70(1): 420—422.
- [5] HANSEN M, FINI P, CRAVEN M, et al. Morphological and Optical Properties of InGaN Laser Diodes on Laterally overgrown GaN [J]. Journal of Crystal Growth, 2002, 234(4): 623—630.
- [6] SASAOKA C, SUNAKAWA H, KIMURA A, et al. High-quality InGaN MQW on Low-dislocation-density GaN Substrate Grown by Hydride Vapor Phase Epitaxy [J]. Journal of Crystal Growth, 1998, 189(15): 61—66.
- [7] PUNAM P. Characterization of the Nucleation Layer in GaN Sapphire Hetero Structures [M]. USA: North Carolina State University, 2005, 7.
- [8] RAHUL J, JANOS F, HUANG C K, et al. Chemical Mechanical Polishing: Process Manufacturability [J]. Solid State Technology, 1994, 37(7): 71—75.
- [9] 彭进, 夏琳, 邹文俊. 化学机械抛光液的发展现状与研究方向 [J]. 表面技术, 2012, 41(4): 95—98.
PENG Jin, XIA Lin, ZOU Wen-jun. Research Status and Prospect of Chemical Mechanical Polishing Slurry [J]. Surface Technology, 2012, 41(4): 95—98.
- [10] 宋晓岚, 李宇煜, 江楠, 等. 化学机械抛光技术研究进展 [J]. 化工进展, 2008, 27(1): 26—31
SONG Xiao-lan, LI Yu-yi, JIANG Nan, et al. Recent Development of Chemical Mechanical Polishing [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2008, 27(1): 26—31.
- [11] XU J, LUO J B, WANG L L, et al. The Crystallographic Change in Sub-surface Layer of the Silicon Single Crystal Polished by Chemical Mechanical Polishing [J]. Tribology International, 2007(40): 285—289.
- [12] HOMMA Y, FURUSAWA T, KUSUKAWA K, et al. Selectivity Mechanism of Silicon Oxide CMP for Global Planarization [C]// Proceedings of the Sixth International Symposium on ULSI Science and Technology. Journal of the Electrochemical Society, 1997: 385—394.
- [13] 高慧莹. 国内 LED 衬底材料的应用现状及发展趋势 [J]. 电子工业专用设备, 2011, 198: 1—6.
GAO Hui-ying. The Trends and the State of China's LED Substrate [J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2011, 198: 1—6.
- [14] 张克华, 文东辉, 袁巨龙. 高亮度 LED 衬底材料研究 [J]. 功能材料, 2009, 40(5): 709—712.
ZHANG Ke-hua, WEN Dong-hui, YUAN Ju-long. A Study on Eco-environmental Mineral Material [J]. Journal of Functional Materials, 2009, 40(5): 709—712.
- [15] HADER B. Super polishing of Sapphire: a Method to Produce Atomically Flat and Damage Free Surfaces [J]. Sur-

- face Science, 1989, 220(1): 118—130.
- [16] 王银珍, 周圣明, 徐军, 等. 蓝宝石衬底化学机械抛光的研究[J]. 人工晶体学报, 2004, 33(3): 441—447.
WANG Yin-zhen, ZHOU Sheng-ming, XU Jun, et al. Research of Chemical Mechanical Polishing Technique of Sapphire Substrate [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2004, 33(3): 441—447.
- [17] NIU X H, LIU Y L, TAN B M, et al. Method of Surface Treatment on Sapphire Substrate [J]. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China, 2006, (16): S732—S734.
- [18] ZHANG Z F, LIU W L, SONG Z T, et al. Effect of Mechanical Process Parameters on Friction Behavior and Material Removal during Sapphire Chemical Mechanical Polishing [J]. Microelectronic Engineering, 2010, 87: 2168—2172.
- [19] 刘金玉, 刘玉玲, 项霞, 等. 磨料对蓝宝石衬底去除速率的影响[J]. 半导体技术, 2010, 35(11): 064—066.
LIU Jin-yu, LIU Yu-ling, Xiang Xia, et al. Effects of Abrasive on Removal Rate of Sapphire Substrate [J]. Semiconductor Technology, 2010, 35(11): 064—066.
- [20] ZHU H L, TESSAROTO L A, SABIA R, et al. Chemical Mechanical Polishing (CMP) Anisotropy in Sapphire [J]. Applied Surface Science, 2004(236): 120—130.
- [21] PARK S W, SEO Y J, LEE W S. A Study on the Chemical Mechanical Polishing of Oxide Film Using a Zirconia (ZrO_2) Mixed Abrasive Slurry (MAS) [J]. Microelectronic Engineering, 2008, 85(4): 682—688.
- [22] JINDAL A, HEGDE S, BABU S V. Chemical Mechanical Polishing using Mixed Abrasive Slurries [J]. Electrochemical and Solid-State Letters, 2002, 5(7): G48—G50.
- [23] 于江勇, 刘玉岭, 牛新环, 等. 混合磨料对LED用蓝宝石衬底CMP质量的影响[J]. 功能材料, 2012, 43(s1): 84—86
YU Jiang-yong, LIU Yu-ling, NIU Xin-huan, et al. Effect of Mixed Abrasives on the CMP Quality of Sapphire Substrate [J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(s1): 84—86.
- [24] XU W H, LU X C, PAN G S, et al. Ultrasonic Flexural Vibration Assisted Chemical Mechanical Polishing For Sapphire Substrate [J]. Applied Surface Science, 2010(256): 3936—3940.
- [25] ZHANG Z F, LIU W L, SONG Z T, et al. Two-Step Chemical Mechanical Polishing of Sapphire Substrate [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2010, 157(6): H688—H691.
- [26] 王吉翠, 邓乾发, 周兆忠, 等. 蓝宝石晶片机械化学研磨抛光新方法研究[J]. 表面技术, 2011, 40(5): 101—103.
WANG Ji-cui, DENG Qian-fa, ZHOU Zhao-zhong, et al. The Study on the Method of Mechano-chemical Polishing about the Grinding Polishing of Sapphire [J]. Surface Technology, 2011, 40(5): 101—103.
- [27] LI C H, WANG R J, SEILER J, et al. Electro-Chemical Mechanical Polishing of Silicon Carbide [J]. Materials Science Forum, 2004, 457—460: 801—804.
- [28] LEE K S, LEE S H, KIM M, et al. Surface Preparation of 6H-Silicon Carbide Substrates for Growth of High-quality SiC Epilayers [J]. Materials Science Forum, 2004, 457—460: 797—800.
- [29] ENGL K, BEER M, GMEINWIESER N, et al. Influence of an In Situ-deposited SiN_x Intermediate Layer inside GaN and AlGaN Layers on Substrates [J]. Journal of Crystal Growth, 2006, 289(1): 6—13.
- [30] LESTER S D, PONCE F A, CRAFT M G, et al. High Dislocation Densities in High Efficiency GaN-Based Light-Emitting Diodes [J]. Applied Physics Letters, 1995, 66(10): 1294—1296.
- [31] AKIHISA K, KEITA Y, MURATA J, et al. A Study on a Surface Preparation Method for Single-Crystal SiC Using an Fe Catalyst [J]. Journal of Electronic Materials, 2009, 38(1): 159—163.
- [32] QIAN W, SKOWRONSKI M, AUGUSTINE G, et al. Characterization of Polishing-Related Surface Damage in (0001) Silicon Carbide Substrates [J]. The Journal of The Electrochemical Society, 1995, 142(12): 4290—4294.
- [33] SU J X, DU J X, ZHANG Z Q, et al. Material Removal Rate of 6H-SiC Crystal Substrate CMP using an Alumina (Al_2O_3) Abrasive [J]. Journal of Semiconductors, 2012, 33(10): 1—7.
- [34] NESLEN C L, MICHEL W C, HENGHELD R L. Effects of Process Parameter Variations on the Removal Rate in Chemical Mechanical Polishing of 4H-SiC [J]. Journal of Electronic Materials, 2001, 30(10): 1271—1275.
- [35] ZHOU L, AUDURIER V, PIROUZ P, et al. Chemomechanical Polishing of Silicon Carbide [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1997, 144(6): L161—L163.
- [36] LEE H S, KIM D I, AN J H, et al. Hybrid Polishing Mechanism of Single Crystal SiC Using Mixed Abrasive Slurry (MAS) [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010(59): 333—336.
- [37] ERYU O, ABE K, TAKEMOTO N. Nanostructure Formation of SiC Using Ion Implantation and CMP [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2006(242): 237—239.
- [38] CHEN X F, XU X G, HU X B, et al. Surface Treatment of 6H-SiC Substrates [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2007, 36(5): 962—966.
- [39] SZWEDA R. Successors to Sapphire in the GaN Market [J]. III-Vs Review, 2002, 15(7): 26—30.

- [40] SÁNCHEZ-GARCÍA M A, NARANJO F B, PAU J L, et al. Ultraviolet Electroluminescence in GaN/Algan Single-Heterojunction Light-Emitting Diodes Grown on Si(111)[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(3): 1569.
- [41] TRAN C A, OSINSKI A, KARLICEK R. F, et al. Growth of InGaN/GaN Multiple-quantum-well Blue Light-emitting Diodes on Silicon by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy[J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(11): 1494—1496.
- [42] GUHA S, BOJAREZUK N A. Ultraviolet and Violet GaN Light Emitting Diodes on Silicon[J]. Applied Physics Letters, 1998, 74(4): 415—417.
- [43] YANG J W, LUNEV A, SHATALOV M C, et al. Selective Area Deposited Blue GaN-InGaN Multiple-quantum Well Light Emitting Diodes Over Silicon Substrates[J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(3): 273—276.
- [44] DADGAR A, CHRISTEN J, RIEMANN T, et al. Bright Blue Electroluminescence from an InGaN/GaN Multiquantum-well Diode on Si(111): Impact of an AlGaIn/GaN Multilayer[J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(15): 2211—2213.
- [45] 周兆忠, 袁巨龙, 文东辉, 等. 蓝宝石衬底的超光滑表面加工进展[J]. 航空精密制造技术, 2009, 45(3): 8—13.
- ZHOU Zhao-zhong, YUAN Ju-long, WEN Dong-hui, et al. Survey on the Progress of Ultra-smooth Sapphire Wafer Surface[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2009, 45(3): 8—13.
- [46] 宋晓岚, 刘宏燕, 杨海平, 等. 纳米 SiO₂ 浆料中半导体硅片的化学机械抛光速率及抛光机理[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(8): 1187—1193.
- SONG Xiao-lan, LIU Hong-yan, YANG Hai-ping, et al. Chemical Mechanical Polishing Removal Rate and Mechanism of Semiconductor Silicon with Nano-SiO₂ Slurries[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(8): 1187—1193.
- [47] 陈建清, 陈杨, 陈志刚, 等. 超细 CeO₂ 磨料对硅片的抛光性能研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(8): 743—745.
- CHEN Jian-qing, CHEN Yang, CHEN Zhi-gang, et al. Study on Polishing Property of Silicon Wafer Using Ultra Fine Cerium Dioxide Abrasive[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(8): 743—745.
- [48] LIU Y L, ZHANG K L, WANG F, et al. Investigation on the Final Polishing Slurry and Technique of Silicon Substrate in ULSI[J]. Microelectronic Engineering, 2003, 66: 438—444.
- [49] WANG Y G, ZHANG L C, BIDDUT A. Chemical Effect on the Material Removal Rate in the CMP of Silicon Wafers[J]. Wear, 2011, 270: 312—316.
- [50] ESTRAGNAT E, TANG G, LIANG H, et al. Experimental Investigation on Mechanisms of Silicon Chemical Mechanical Polishing[J]. Journal of Electronic Materials, 2004, 33(4): 335—338.

(上接第 80 页)

- YING Hua-gen, LUO Wei, YAN Mi. Anti-corrosion Properties of Electroless Ni-Cu-P Ternary Deposits on Sintered NdFeB Magnets[J]. Journal of University of Science and Technology, 2007, 29(2): 162—167.
- [14] 孟亚丽, 代明江, 侯慧君, 等. 15CrMnMoVA 钢磁控溅射镀铝防护层耐腐蚀性能[J]. 中国表面工程, 2012, 25(3): 28—32.
- MENG Ya-li, DAI Ming-jiang, HOU Hui-jun, et al. Corrosion Resistance of Aluminum Film on 15CrMnMoVA Steel by Magnetron Sputtering[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(3): 28—32.
- [15] MAO S D, YANG H X, SONG Z L, et al. Corrosion Behavior of Sintered NdFeB Deposited with an Aluminum Coating[J]. Corrosion Science, 2011, 53(5): 1887—1894.

(上接第 108 页)

- LI Bing-zhong. The Development of Near Net Size Coating Which Preparation by Thermal Spray and Frontier Scientific Issues[J]. China Surface Engineering, 2008, 21(2): 7—10.
- [15] 苟国庆, 陈辉, 涂铭旌. 热喷涂 NiCr/Cr₃C₂, NiCrCoAlY 涂层的微观组织结构及抗震性能[J]. 电焊机, 2005, 35(11): 36—39.
- GOU Guo-qing, CHEN Hui, TU Ming-jing. Microstructure and Thermal Shock Properties of Thermal Sprayed Coatings NiCr/Cr₃C₂, NiCrCoAlY[J]. Electric Welding Machine, 2005, 35(11): 36—39.
- [16] 赵辉, 王优强. 不同供油条件下粗糙度对啮合齿轮摩擦行为的影响[J]. 表面技术, 2012, 41(5): 77—80.
- ZHAO Hui, WANG You-qiang. The Influence of Roughness on the Friction Behavior of Meshing Gear under Different Oil Condition[J]. Surface Technology, 2012, 41(5): 77—80.