

激光冲击处理对 ZnO 薄膜性能的影响

花银群^{1,2} 季平² 陈瑞芳¹ 赵杉月²

¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

²江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 采用射频磁控溅射技术在 Si(111)衬底上制备了多组分 ZnO 基陶瓷薄膜,利用 Nd:YAG 激光器对多组分 ZnO 基陶瓷薄膜进行了激光冲击处理,研究了激光冲击处理对多组分 ZnO 基陶瓷薄膜压敏电性能的影响。结果表明,激光冲击处理后,薄膜的晶粒尺寸显著减小,表面更加平整致密。薄膜的压敏电性能得到了不同程度的改善,其中非线性系数的提高幅度最大为 65.2%,压敏电压降低幅度最大为 38.92%,漏电流密度降低幅度最大为 30.51%。薄膜中晶粒细化,晶格畸变加强,晶界处的界面态密度激增,导致薄膜非线性系数激增,从而有效改善了多组分 ZnO 基陶瓷薄膜的压敏电性能。

关键词 薄膜; 激光冲击; ZnO 基陶瓷薄膜; 射频磁控溅射; 界面态密度; 非线性系数

中图分类号 TB43

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0507001

Effect of Laser Shock on the Electrical Property of ZnO-Based Ceramic Films

Hua Yinqun^{1,2} Ji Ping² Chen Ruifang¹ Zhao Shanyue²

¹*School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China*

²*School of Material and Science Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China*

Abstract ZnO-based ceramic films are deposited on Si (111) substrates by radio frequency magnetron sputtering technique, and the films are shocked by the Nd:YAG laser. The effect of laser shock on the electrical property of ZnO-based ceramic films is investigated. The results show that after laser shock processing, the films' grain size is reduced significantly and the surface are more smooth and compact. The electrical properties of films have been improved in varying degrees. The nonlinear coefficient is largest raised by 65.2%, the breakdown voltage is largest decreased by 38.92%, the leakage current density is largest decreased by 24.4%. After the laser shock processing, with the grain refinement and lattice distortion, the interface-state density is sharply increased, which leads to the improvement of the nonlinear coefficient. Therefore the electrical property of ZnO-based ceramic films is excellent.

Key words thin films; laser shock; ZnO-based ceramic films; radio frequency magnetron sputtering; interface-state density; the nonlinear coefficient

OCIS codes 310.4925; 310.3840; 160.4760

1 引 言

ZnO 电阻具有优良的非线性特性、低漏电流和高浪涌吸收能力等优点,是抑制瞬间高压、吸收浪涌电能理想器件^[1-2]。在 20 世纪 70 年代已经被应用在电器设备的高压防护方面,如电力系统防雷过电压和操作过电压等防护领域^[3-4]。近年来,随着电子计算机、家用电器、通讯技术、汽车电子工业、超大规模集成电路等方面的发展,各种电子元器件的驱动电压和耐压值逐渐下降。与此同时,由于静电、电磁脉冲(如人体静电放电)等原因导致的单一电子元器件损坏甚至整个集成电路出现损坏的情况也越来越多,为了保证这些系统的正常运行,对低压压敏电阻器的需求一直在增加^[5-6]。

收稿日期: 2014-12-24; 收到修改稿日期: 2015-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(51175234)

作者简介: 花银群(1963—),男,博士,教授,主要从事激光表面处理方面的研究。E-mail: huayq@ujs.edu.cn

采用薄膜技术制备低压 ZnO 压敏电阻器,可以精确控制薄膜厚度,其厚度可以在几纳米到几微米之间调节,因此在制备小功率的低压压敏电阻方面具有很好的潜力和优势^[7]。Horio 等^[8]利用射频溅射法制备了 ZnO/Pr₆O₁₁ 双层压敏薄膜,膜厚为 600 nm/400 nm,压敏电压为 20 V,非线性系数 α 值为 10。贾等^[9]利用溶胶-凝胶喷雾热分解法制备了 Bi₂O₃ 等掺杂的 ZnO 薄膜,厚度为 3.25~8.41 μm ,压敏电压为 13.58~25.31 V,非线性系数 α 值为 7.99~22.38。王等^[10]利用脉冲激光沉积法在普通光学玻璃上制备了 ZnO 多晶薄膜,膜厚约为 7 μm ,压敏电压为 3.5 V,非线性系数 ≥ 6 。黄等^[11]利用新型溶胶-凝胶法,将 Bi₂O₃、Sb₂O₃、Cr₂O₃、MnO 和 Co₂O₃ 掺杂的 ZnO 纳米粉体均匀分散于含有 Zn(CH₃COO)₂、Bi(NO₃)₃ 及 Sb₂O₃ 的溶胶中制成先驱体溶液,采用旋涂的方法制备了 ZnO 压敏薄膜,膜厚约为 3 μm ,非线性系数 α 值为 6.2,压敏电压为 5 V。然而,研究表明随着 ZnO 薄膜压敏电压的降低,其非线性系数也随之下降,从而使薄膜的压敏电性能降低。目前,利用激光冲击技术对材料改性的研究十分热门,而激光冲击处理技术的应用目前主要集中在对金属材料机械性能的提高方面^[12],对陶瓷材料的研究主要是力学性能^[13-14],而电性能的研究极少。花等^[15]研究了利用激光冲击处理来提高 ZnO 压敏陶瓷的电学性能,结果表明:激光冲击处理后,多组分陶瓷内产生了 β -Bi₂O₃相转变成 δ -Bi₂O₃相的相变,而这一相变过程会导致界面态密度的大幅度增加,进而提高非线性系数。张等^[13]采用激光冲击对 Al₂O₃陶瓷进行了冲击实验,在激光能量降低到一定程度的情况下,微观上也出现一定的塑性滑移特征,主要表现为晶界处出现大量的滑移线;在能量更低时,表现为微观塑性变形强化,这表明对激光冲击参数进行合理选择完全可以对脆性材料进行处理。因此,为了制备出低压压敏性能优异的电阻器,开展了陶瓷薄膜的激光冲击处理实验,研究激光冲击处理对薄膜电性能的影响。

2 实 验

2.1 ZnO/Si(111)薄膜的制备

选单晶硅片为衬底,衬底直径是 8 mm,先后置于无水乙醇、丙酮中超声清洗 15 min,最后用去离子水冲洗干净,烘干待用。在喷金设备中,对衬底表面进行喷金,从而在 Si 衬底上制备一层底电极。溅射靶材是按摩尔百分比 96.5% ZnO + 3.5% (MnO₂, Co₂O₃, Bi₂O₃, Cr₂O₃, Sb₂O₃) 烧结而成。在 sky-0826138 型高真空磁控镀膜装置中,采用射频磁控溅射法进行镀膜。本底真空度小于 1×10^{-4} Pa,溅射气压为 3.0 Pa,Ar 流量为标准状态下 30 mL/min,沉积时间为 60 min,溅射功率为 150 W,衬底温度为 150 $^{\circ}\text{C}$ 、300 $^{\circ}\text{C}$ 、450 $^{\circ}\text{C}$,薄膜厚度控制在 2 μm 。在激光冲击之后,利用自制的掩膜,重复上面的喷涂过程,在薄膜表面区域制备顶电极,电极面积约为 10 mm²。

2.2 ZnO/Si(111)薄膜激光冲击实验

通过对 ZnO 薄膜的激光冲击参数进行优化,确定 Nd:YAG 激光器参数如下:光斑直径为 6 mm,波长为 1064 nm,脉冲宽度为 22 ns,脉冲能量为 1.2 J。

激光冲击实验流程如下:在薄膜样品表面贴上 0.2 mm 厚的铝箔作为涂层,在铝箔表面涂上自主研发的液体作为约束层,厚度约为 0.5 mm,之后将基片镶嵌在模具中,对薄膜进行单次激光冲击处理。

2.3 测 试

采用 Nanoscope III 型原子力显微镜(AFM)来表征薄膜样品的表面形貌;采用 X 射线衍射仪(XRD)对薄膜进行物相分析(D/max 2500VB3./PC,射线源 CuK α);采用 JSM-7001F 型热场发射扫描电子显微镜和 Oxford 公司的 Inca Energy-350 型 X 射线能谱仪(EDS)对薄膜进行成分分析;将薄膜的顶电极和底电极连入如图 1 所示的电路中,绘制出 J - V 特性曲线。电流密度 J 为 1 mA/cm² 时加在器件上的电压为压敏电压,压敏电压的 80% 对应的电流为漏电流,非线性系数由下式计算:

$$\alpha = \frac{\lg I_2 - \lg I_1}{\lg V_2 - \lg V_1}, \quad (1)$$

式中 I_1, I_2 分别取 0.1 mA, 1.0 mA, V_1, V_2 分别为流经薄膜样品的直流电流为 0.1 mA 和 1 mA 时所对应的电压。

本次实验分为 3 组样品,分别为在 150 $^{\circ}\text{C}$ 、300 $^{\circ}\text{C}$ 、450 $^{\circ}\text{C}$ 下制备的薄膜样品,其厚度见表 1,对薄膜分别进行单次激光冲击。

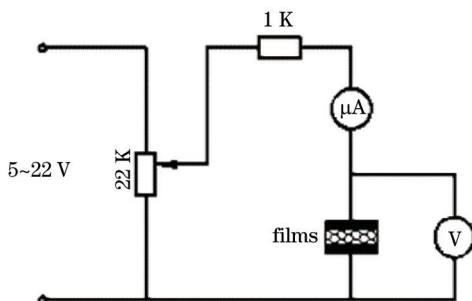


图 1 电路图

Fig.1 Circuit diagram

表 1 不同衬底下制备的薄膜的厚度

Table 1 Thickness of the films prepared at different substrate temperatures

Substrate temperature / $^{\circ}\text{C}$	150	300	450
Thickness /nm	1846.3	1875.0	2275.8

3 结果与讨论

3.1 电学性能测试

对激光冲击前后的薄膜样品进行 J - V 特性曲线测试,结果如图 2 所示。按照电性能参数的定义来计算 α , $V_{1\text{mA}/\text{cm}^2}$ (V), J_1 ($\mu\text{A}/\text{mm}^2$), 将计算结果列于表 2、3、4 中。从表 2、3、4 可以看出,薄膜经激光冲击处理后,电性能得到了不同程度地改善,其中:非线性系数有不同程度地提高,提高幅度最大为 65.2%;压敏电压有不同程度地降低,降低幅度最大为 38.92%;漏电流密度有不同程度地降低,降低幅度最大为 30.51%。300 $^{\circ}\text{C}$ 衬底温度下制备的薄膜经激光冲击处理后,非线性系数达到 21.38,压敏电压低至 2.92 V,漏电流密度低至 0.34 $\mu\text{A}/\text{mm}^2$,低压压敏性能良好。

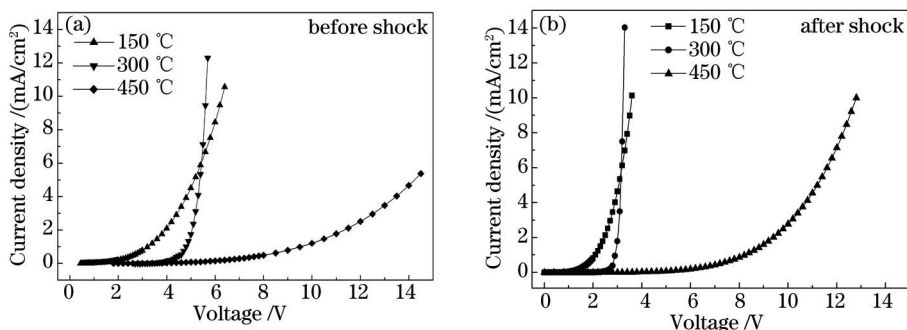


图 2 激光冲击处理前后薄膜样品的 J - V 曲线

Fig.2 J - V characteristic curves of films treated before and after laser-shock processing

表 2 激光冲击处理前后薄膜的非线性系数

Table 2 Nonlinear coefficient of films before and after laser-shock processing

Substrate temperature / $^{\circ}\text{C}$	Before shock α	After shock α	Rate /%
150	3.34	4.27	27.84
300	12.94	21.38	65.2
450	5.14	6.19	20.42

表 3 激光冲击处理前后薄膜的压敏电压

Table 3 Nonlinear voltage of films before and after laser-shock processing

Substrate temperature / $^{\circ}\text{C}$	Before shock $V_{1\text{mA}/\text{cm}^2}$ /V	After shock $V_{1\text{mA}/\text{cm}^2}$ /V	Rate /%
150	3.12	2.09	-33.01
300	4.78	2.92	-38.92
450	6.82	8.22	20.52

表4 激光冲击处理前后薄膜的漏电流密度

Table 4 Leakage current density of films before and after laser-shock processing

Substrate temperature / $^{\circ}\text{C}$	Before shock $J_L / (\mu\text{A}/\text{mm}^2)$	After shock $J_L / (\mu\text{A}/\text{mm}^2)$	Rate /%
150	5.56	3.86	-30.51
300	0.45	0.34	-24.4
450	4.38	3.14	-28.31

3.2 激光冲击后的薄膜微观结构

图3是300℃衬底温度下制备的薄膜进行激光冲击处理前后的AFM图片,从图中可以发现激光冲击处理后的薄膜表面形貌发生了明显变化,晶粒尺寸显著减小,相邻颗粒的间隙减小,晶粒之间更加致密。薄膜表面粗糙度显著降低,表面更加平滑。图4是对应于图2中薄膜样品的XRD图谱,其中,图3(a)是激光冲击态薄膜的XRD图,图3(b)是300℃下制备的薄膜的XRD图。样品的XRD图谱均只有一个较强的ZnO(002)衍射峰,薄膜具有(002)方向的单一择优生长,且试样(a)的(002)衍射角比试样(b)的(002)衍射角大,根据布拉格衍射方程 $2d\sin\theta=n\lambda$,衍射角向大角度偏移,说明(a)试样(002)晶面间距小于(b)试样晶面间距,表明激光冲击态的薄膜在C轴方向存在内应力。由于激光冲击处理引起的冲击塑性形变速度快,几纳秒内完成,应变率高达 10^7 s^{-1} ,从原理上讲,陶瓷材料也像金属材料一样,激光冲击波可以使材料产生塑性形变,而陶瓷材料属于脆性材料,一般不会发生塑性形变,但激光能量合适,可以发生微观塑性变形^[13]。激光冲击处理后,薄膜表面完好,表明只要激光冲击参数选择合理,完全可以对脆性材料进行处理。因此,无论从薄膜的表面形貌还是衍射图谱进行分析,激光冲击后的薄膜发生了显著的变化,这是因为在时间非常短的激光冲击过程中产生了激光冲击波,对薄膜施加了一定的冲击波压力,使得薄膜在力的作用下发生微量形变,从而导致晶粒细化、平整致密和晶格畸变。此外,由于有吸光涂层的有效隔热保护,可以有效抑制激光冲击处产生的瞬间温升,从而保证薄膜表面不被烧蚀。

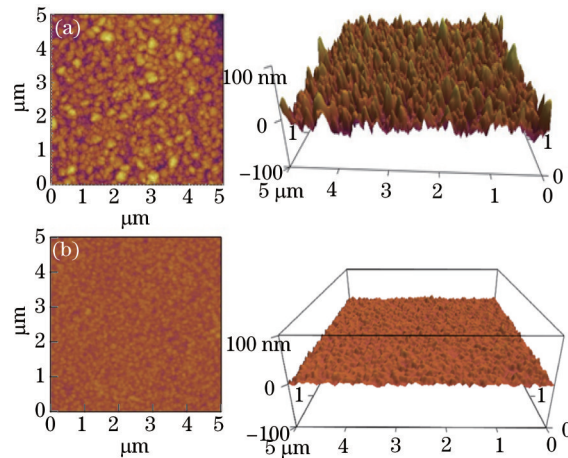


图3 氧化锌基陶瓷薄膜的AFM照片。(a) 300℃激光冲击之前;(b) 300℃激光冲击之后

Fig.3 AFM micrographs of the ZnO-based ceramic films. (a) 300 $^{\circ}\text{C}$ before shock; (b) 300 $^{\circ}\text{C}$ after shock

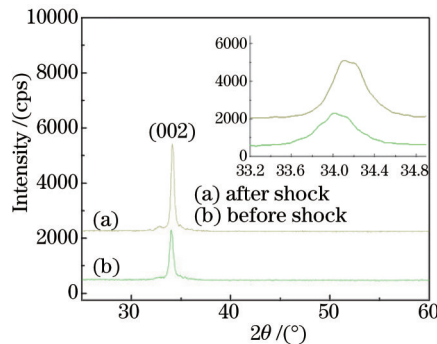


图4 氧化锌基陶瓷薄膜的XRD图谱

Fig.4 XRD patterns of ZnO-based ceramic thin films

3.3 激光冲击后的薄膜晶界特性参数分析

ZnO 压敏陶瓷薄膜的晶界是一层较薄的紊乱区,存在大量的界面态,能够捕获 ZnO 晶粒中的自由电子,在晶粒边界处的电子被耗尽,从而形成耗尽层。这样一来,就形成了一个从晶粒表面渗入晶粒体内一定深度 ω 的电子势垒,势垒高度 Φ_B ,如图 5 所示,称为双肖特基势垒^[16],正是产生压敏性能根源。

ZnO 薄膜的非线性特性起源于晶界缺陷势垒,为了探讨激光冲击处理对氧化锌基陶瓷薄膜电性能的影响规律,采用 Gupta 和 Carlson 提出的双肖特基势垒模型^[17](图 5 所示)来解释电性能的变化。在小电流区域,用该模型得出的通过压敏电阻的电流密度和外加电场与(2)式的关系,即肖特基热电子发射公式^[18]。

$$J = AT^2 \exp[(\beta E^{0.5} - \Phi_B)/(kT)], \quad (2)$$

式中 J 是电流密度, A 为 Richardson 常数, T 为绝对温度, E 为电场强度, Φ_B 为晶界势垒高度, K 为玻尔兹曼常数, β 是与势垒宽度有关的常数, $\beta = [1/(\gamma\omega)[2e^3/(4\pi\epsilon_0\epsilon_r)]]^{1/2}$ ^[18], γ 为单位长度晶粒数, ω 为晶界势垒宽度, e 是电子电荷(1.602×10^{-19} C), ϵ_0 是真空介电常数(8.85×10^{-14} F/cm), ϵ_r 是相对介电常数(ZnO 为 8.5)。固定 T 为室温,作 150℃、300℃、450℃ 衬底温度下制备的薄膜的激光冲击前后的 $\ln J - E^{0.5}$ 关系于图 6。由图 6 计算 ZnO 薄膜的晶界特性参数,包括势垒高度 Φ_B 、晶界势垒宽度 ω 、施主浓度 N_D 及界面态密度 N_s , 计算结果列于表 5。

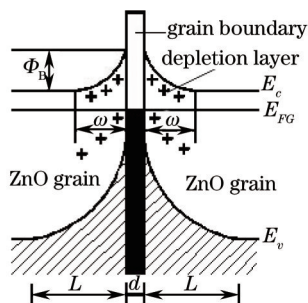


图 5 ZnO 肖特基势垒模型

Fig.5 ZnO Schottky barrier model

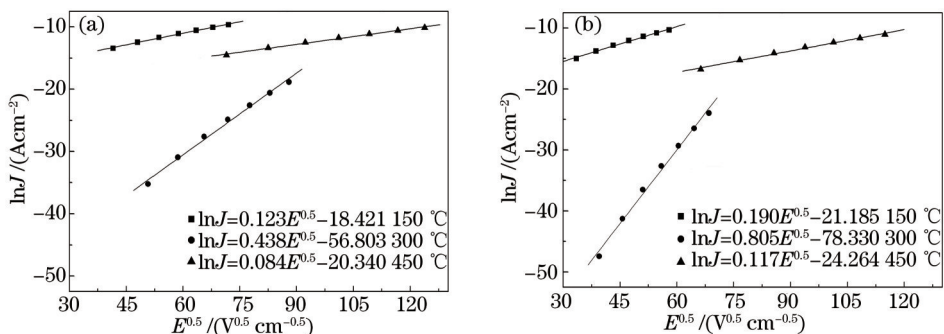


图 6 不同衬底温度下氧化锌基陶瓷薄膜冲击前后的 $\ln J - E^{0.5}$ 关系图。(a) 冲击前; (b) 冲击后

Fig.6 Relation patterns of $\ln J - E^{0.5}$ of the ZnO-based ceramic films at different substrate temperatures. (a) Before shock; (b) after shock

表 5 不同衬底温度下氧化锌基陶瓷薄膜冲击前后的晶界特性参数值

Table 5 Characteristic parameters of grain-boundary of ZnO-based ceramic films at different substrate temperatures before and after laser-shock processing

Annealing temperature /°C	State	Barrier height Φ_B /eV	Barrier width ω / nm	Donor concentration N_D /(10^{22} cm ⁻³)	Density of interface states N_s /(10^{14} cm ⁻²)
150	Before shock	0.88	0.733	0.15	1.12
	After shock	0.95	0.294	1.03	3.02
300	Before shock	1.86	0.113	13.5	15.3
	After shock	2.41	0.031	227	71.6
450	Before shock	0.93	3.76	0.0061	0.23
	After shock	1.03	1.81	0.029	0.53

由表5可知,激光冲击处理后,势垒高度 Φ_b 有所上升、势垒宽度 ω 有所下降,施主浓度 N_D 有所增大,而界面态密度 N_s 均大幅增加。根据公式 $\alpha \approx (\nu/E)\Phi_b^{3/2}$ ^[19]可知,非线性系数 α 与势垒高度 Φ_b 成正比, Φ_b 从1.86提高到2.41,促使 α 从12.94提高到21.38,因此势垒高度的增加能有效提高非线性系数。而根据公式 $\Phi_b = e^2 N_s^2 / 2\epsilon_0 \epsilon_r N_D$ ^[19],势垒高度 Φ_b 又与界面态密度 N_s 和施主浓度 N_D 密切相关。

激光冲击处理之后,晶粒受到冲击波压力挤压变形产生晶格畸变而引入缺陷,导致n型ZnO的本征原子缺陷增多,包括氧空位 V_o 和锌填隙 Zn_i ^[20-21]。试样的XRD图谱中没有第二相衍射峰出现,但不能排除掺杂元素以不定型态在晶界处偏聚。如图7是图3中激光冲击态薄膜的EDS能谱元素面扫描图,从图7中可知,Bi元素均匀地分布在薄膜各处,并且成一定规律性,分布于各个晶粒的晶界处。激光冲击处理之后,晶粒细化,晶界增多,晶粒表面积增大,因此增大了晶界处本征原子缺陷与偏聚于晶界处的Bi元素接触形成团簇的机会,从而在晶界处形成了受主态的复合缺陷^[22-24],使晶界处的界面态密度 N_s 大幅升高,导致晶界势垒 Φ_b 增大,从而提高了薄膜的非线性常数,由此形成了优良的压敏电性能。

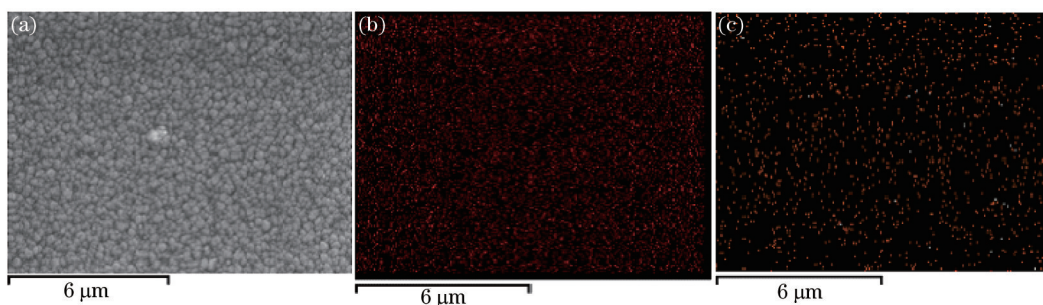


图6 激光冲击态的薄膜EDS元素面扫描图。(a)激光冲击后的薄膜表面;(b)薄膜中Zn元素的分布;(c)薄膜中Bi元素的分布

Fig.6 EDS energy spectrum of element surface scan of laser shock state sample. (a) Thin films surface after shock; (b) distribution of Zn in the thin films; (c) distribution of Bi in the thin films

4 结 论

激光冲击处理后,薄膜的电性能得到了不同程度地改善,其中300℃制备的薄膜的非线性系数达到21.38,提高幅度为65.2%;压敏电压低至2.92V,降低幅度为38.92%;漏电流密度低至0.34 $\mu\text{A}/\text{mm}^2$,降低幅度为24.4%,薄膜低压压敏性能良好。激光冲击处理之后,晶粒细化,晶界增多,晶粒表面积增大,薄膜内发生了晶格畸变,促使n型ZnO本征原子缺陷增多。因此增大了晶界处本征缺陷与偏聚于晶界处的Bi元素接触形成团簇的机会,从而在晶界处形成了受主态的复合缺陷,使晶界处的界面态密度 N_s 大大升高,导致晶界势垒 Φ_b 增大,从而提高了薄膜的非线性系数,由此形成了优良的压敏电性能。

参 考 文 献

- 1 Bueno P R, Varela J A, Longo E. SnO₂, ZnO and related polycrystalline compound semiconductors: An overview and review on the voltage-dependent resistance (non-ohmic) feature[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2008, 28(3): 505-529.
- 2 Jiang S L, Xie T T, Yu H, *et al.*. Studies on the degradation properties of the ZnO-based ceramic film varistors[J]. Microelectronics engineering, 2008, 85(2): 371-374.
- 3 Anas S, Mangalaraja R V, Poothayal M. Direct synthesis of varistor-grade doped nanocrystalline ZnO and its densification through a step-sintering technique[J]. Acta Materialia, 2007, 55(17): 5792-5801.
- 4 Bueno P R, Varela J A, Longo E. SnO₂, ZnO and related polycrystalline compound semiconductors: An overview and review on the voltage-dependent resistance (non-ohmic) feature[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2008, 28(3): 505-529.
- 5 Zhang Congchun, Zhou Dongxiang, Gong Shuping. The development of research on low-voltage ZnO varistor[J]. Journal of Functional materials, 2001, 32(4): 343-347.
张丛春,周东祥,龚书萍. 低压ZnO压敏电阻材料研究及发展概况[J]. 功能材料, 2001, 32(4): 343-347.
- 6 Xiao Shenggen, Gan Guoyou, Yan Jikang, *et al.*. Outline of fabrication techniques of low-voltage ZnO varistors[J]. China ceramic industry, 2006, 13(4): 40-44.
肖胜根,甘国友,严继康. ZnO压敏电阻器低压化浅谈[J]. 中国陶瓷工业, 2006, 13(4): 40-44.

- 7 Wang Yuping, Sun Danfeng, Gao Feng, *et al.*. Development and standardization of low voltage varistor[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2009, (2): 21-26.
王玉平, 孙丹峰, 高峰, 等. 低压压敏电阻的发展与标准化[J]. *电瓷避雷器*, 2009, (2): 21-26.
- 8 Horio N, Hiramatsu M, Nawata M, *et al.*. Preparation of zinc oxide/metal oxide multilayered thin films for low-voltage varistors[J]. *Vacuum*, 1998, 51(4): 719-722.
- 9 Jia Rui, Qu Fanqin, Wu Guangming, *et al.*. The preparation of low voltage ZnO-based varistor by spray pyrolysis and the study of dependence between the thickness and nonlinear characteristics[J]. *Journal of Functional materials*, 1999, 30(6): 636-638.
贾锐, 曲凡钦, 武光明, 等. ZnO系低压压敏薄膜的喷雾热分解法制备及膜厚对其压敏特性影响的研究[J]. *功能材料*, 1999, 30(6): 636-638.
- 10 Wang Yu, An Chengwu, Dai Xing, *et al.*. ZnO piezoresistive thin-film fabricated by pulsed laser[J]. *Piezo Electrics and Acoustooptics*, 1996, 18(5): 358-360.
王豫, 安承武, 戴星, 等. 脉冲激光制备ZnO压敏电阻薄膜[J]. *压电与声光*, 1996, 18(5): 358-360.
- 11 Huang Yanqiu, Liu Meidong, Li Churong, *et al.*. Preparation of ZnO ceramic thin films for low-voltage varistors[J]. *Piezo Electrics and Acoustooptics*, 2001, 23(5): 384-386.
黄焱球, 刘梅冬, 李楚容, 等. ZnO陶瓷薄膜的制备及其低电压压敏性质[J]. *压电与声光*, 2001, 23(5): 384-386.
- 12 Lu Ying, Zhao Jibin, Qiao Hongchao. Investigation of technical and strengthening mechanism research of TiAl alloy by laser shock peening[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1003013.
陆莹, 赵吉宾, 乔红超. TiAl合金激光冲击强化工艺探索及强化机制研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1003013.
- 13 Zhang Lingfeng, Zhang Yongkang, Feng Aixin, *et al.*. Fracture characteristic of Al₂O₃ ceramics by strong laser shock processing[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2006, 27(2): 113-116.
张凌峰, 张永康, 冯爱新, 等. 强激光冲击波作用下Al₂O₃陶瓷材料的断裂特征[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2006, 27(2): 113-116.
- 14 Gu Yongyu, Zhang Lingfeng, Lu Jinzhong, *et al.*. Micro-plastic deformation of ZrO₂ in high strain rate by laser shocking[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(12): 3318-3322.
顾永玉, 张凌峰, 鲁金忠, 等. ZrO₂陶瓷激光冲击预处理研究[J]. *中国激光*, 2009, 36(12): 3318-3322.
- 15 Hua Yinqun, Ji Guang, Sun Zhenzhen, *et al.*. Effect of laser shock wave on electrical property of ZnO varistor ceramics[J]. *Laser Technology*, 2011, 35(1): 133-136.
花银群, 吉光, 孙真真, 等. 激光冲击波对ZnO压敏陶瓷电学性能的影响[J]. *激光技术*, 2011, 35(1): 133-136.
- 16 Brillson L J, Mosbacker H L, Hetzer M J, *et al.*. Dominant effect of near-interface native point defects on ZnO Schottky barriers [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90(10): 102116.
- 17 Gupta T K, Carlson W G. A grain-boundary defect model for instability/stability of a ZnO varistor[J]. *Journal of Materials Science*, 1985, 20(10): 3487-3500.
- 18 Planarosa S A, Buenopr P R, Olivip P, *et al.*. Effect of Bi₂O₃ addition on the microstructure and electrical properties of the SnO₂CoNb₂O₅ varistor system[J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1997, 16(8): 634-638.
- 19 Wang Z L, Li S T. *Manufacture and Application of Zinc Oxide Varistors*[M]. Beijing: Science Press, 2009: 34.
- 20 Zeng Yong, Zhao Yan, Jiang Yijian. Effect of excimer laser irradiation for ZnO thin films under different atmospheres[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0207001.
曾勇, 赵艳, 蒋毅坚. 不同气氛下ZnO薄膜的准分子激光辐照效应[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0207001.
- 21 Liu Xuedong, Lu Ke, Ding Bingzhe, *et al.*. The lattice distortion of nano phase α -Fe(Si) [J]. *Chinese science Bulletin*, 1994, 39(3): 217-218.
刘学东, 卢柯, 丁炳哲, 等. α -Fe(Si)纳米相的晶格畸变[J]. *科学通报*, 1994, 39(3): 217-218.
- 22 Hou Qingyu, Guo Shaoqiang, Zhao Chunwang. First-principle study of the effects of oxygen vacancy on the electronic structure and the absorption spectrum of ZnO[J]. *Acta Phys Sin*, 2014, 63(14): 147101.
侯清玉, 郭少强, 赵春旺. 氧空位浓度对ZnO电子结构和吸收光谱影响的研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(14): 147101.
- 23 Oba F, Tanaka I. Effect on oxidation of chemical bonding around 3d transition-metal impurities in ZnO[J]. *Jpn J Appl Phys*, 1999, 38(6A): 3570-3574.
- 24 Oba F, Adachi H, Tanaka I, *et al.*. Energetics and electronic structure of point defects associated with oxygen access at a tilt boundary of ZnO[J]. *Journal of materials Research*, 2000, 15(10): 2167-2175.