

放电等离子烧结原位合成 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 化合物及性能研究*

包黎红¹⁾ 那仁格日乐¹⁾ 特古斯¹⁾ 张忻²⁾ 张久兴^{2)†}

1) (内蒙古自治区功能材料物理与化学重点实验室, 内蒙古师范大学, 呼和浩特 010022)

2) (新型功能材料教育部重点实验室, 北京工业大学, 北京 100124)

(2013年6月23日收到; 2013年7月22日收到修改稿)

以 LaH_2 , CeH_2 纳米粉和无定形 B 粉为原料, 通过放电等离子烧结原位合成法制备了单相、高致密度的 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 稀土六硼化物. 系统研究了该系列化合物的晶体结构、表面织构、力学性能、电输运特性及热发射性能. 结果表明, 该方法制备出的样品致密度均高于 96%, 维氏硬度最高值达到 2310 kg/mm^2 , 说明具有良好的力学性能. 热发射结果表明, 当阴极温度为 1873 K, 外加电压为 1 kV 时, $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.4}\text{B}_6$ 的最大发射电流密度达到 40.7 A/cm^2 , 该值高于单纯 LaB_6 和 CeB_6 电流密度值. 因此, $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 多元稀土六硼化物作为热阴极材料将有良好的应用前景.

关键词: 稀土六硼化物, 阴极材料, 热电子发射

PACS: 61.66.Fn, 79.40.+z

DOI: 10.7498/aps.62.196105

1 引言

稀土六硼化物具有逸出功低、发射稳定性好、耐离子轰击强、蒸发率低在动态环境下具有良好的工作重复性而成为了发射性能优良的阴极材料. 在雷达、航空航天、电子工业、仪器仪表、医疗器械等多个领域有广泛应用. 其中 LaB_6 单晶已成功应用于各种电镜、X 射线衍射单色器等高亮度电子源设备^[1-3]. 近年来, 多元稀土六硼化物与 LaB_6 相比具有更低的逸出功及良好的发射稳定性等优点而受到广泛关注^[4,5]. 目前对于多元稀土六硼化物的研究主要集中于纳米粉末^[6]及单晶方面^[7-9]. 但制备出的单晶尺寸小、晶体质地低、制作成本高很难在实际应用方面得到突破, 而纳米粉的研究也处于初步阶段. 与纳米粉和单晶体材料相比, 多晶具有制作成本低, 可制备出大发射面积阴极而广泛应用于大功率、高频微波器件中. 但传统热压烧

结法制备出的多晶块体致密低, 逸出功大直接影响了阴极发射性能^[10,11]. 柳术平等^[12]采用热压烧结法制备出 $\text{La}_{0.55}\text{Ba}_{0.45}\text{B}_6$ 和 $\text{La}_{0.4}\text{Eu}_{0.6}\text{B}_6$ 多元稀土六硼化物, 但致密度为 90%—95%, 且发射电流密度较小. 高瑞兰等^[13]采用热压烧结法制备出了 LaB_6 多晶块体, 相对密度为 92%均未达到实际使用要求. 因此, 提高多元稀土六硼化物致密度是目前所面临的难题之一.

本课题组的张久兴等人首次采用放电等离子烧结原位合成技术 (SPS), 以稀土 LaH_2 纳米粉与 B 粉为原料, 在无氧环境下烧结温度为 1250—1450 °C, 烧结压强为 50 MPa 下成功的制备出了高致密的 LaB_6 多晶块体^[14-16]. 烧结过程中稀土 La 液相的出现 (La 熔点为 920 °C), 有利于粉末之间孔洞的排出, 有助于质量的迁移致密度高达到 99.7%. 与传统固相烧结法相比整个烧结过程被“活化”, 无需添加烧结剂能获得高致密的烧结体, 表明该方法有效地解决了多晶块体致密度低的问题.

* 国家自然科学基金 (批准号: 51161017)、内蒙古自治区重大基础研究开放课题 (批准号: 120294) 和内蒙古自然科学基金 (批准号: 2010MS0104) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zjiuxing@bjut.edu.cn

基于本课题组前期研究基础, 本文为了有效地降低 LaB_6 逸出功, 并提高发射性能, 主要研究了 Ce 元素掺杂对 LaB_6 晶体结构、微观织构、电输运性能、力学性能及发射性能的影响规律, 从而制备出了性能优良的 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 多元稀土六硼化物阴极材料.

2 实验方法

2.1 LaH_2 和 CeH_2 纳米粉的制备

采用蒸发-冷凝法, 以稀土 La 和 Ce 块作为阳极, 钨棒作为阴极在真空抽至 1.0×10^{-3} Pa 时, 经高纯 (99.9993%) 氩气冲洗后充入体积比为 3:1, 总气压为 0.08 MPa 的高纯 (99.9993%) 氢气和氩气, 在反应电流 60 A, 电弧电压 30 V 的条件下制备 LaH_2 和 CeH_2 纳米粉末.

2.2 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 的 SPS 烧结制备及表征

将蒸发-冷凝法制备的 LaH_2 和 CeH_2 纳米粉末及 B 粉按 $x:1-x:6$ 的比例在无氧环境下装入内径为 $\Phi 20$ mm 石墨模具中进行真空放电等离子烧结, 烧结设备型号为 SPS-3.20MK-V. 烧结参数如下, 烧结温度 1300—1450 °C, 烧结压强 50 MPa, 保温时间 5 min, 升温速率 120 °C/min. 装粉与烧结的整个过程都是在配有氧含量净化装置的一体化系统中进行, 有效地避免了样品的氧化. 反应烧结方程式如下:

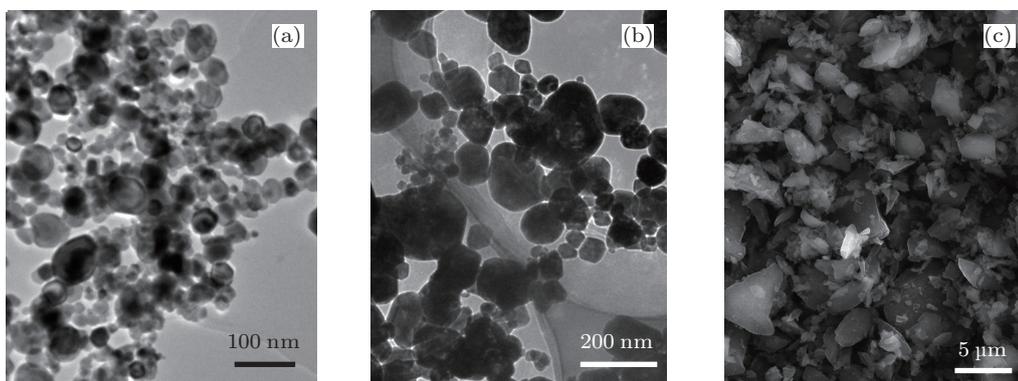
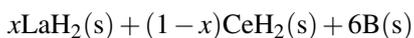


图 1 (a) 和 (b) 为 LaH_2 , CeH_2 纳米粉末 TEM 照片; (c) 为无定形 B 粉 SEM 照片

3.2 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 物相分析

图 2(a) 是烧结温度为 1450 °C, 烧结压强为



烧结样品物相由 XRD(D8 Advance) 测定; 纳米粉末形貌及粒径分析由 TEM: JEM-2010 透射电镜完成; 配备 EDAX/TSL 公司 EBSD 分析软件 TSL OIM 5.2 的 FEI NanoSEM 200 场发射扫描电镜做样品断面形貌及电子背散射衍射 (EBSD) 分析; 采用 Magix pw2403X 射线荧光光谱仪进行元素成分分析; 采用 Archimedes 法测密度; HXD-1000 数字显微硬度计测硬度. 样品的热电子发射性能测试在电子科技大学电子发射性能测试仪上进行, 测试真空度为 1×10^{-3} Pa, 阳极电压为脉冲电压, 频率为 120 Hz, 脉冲宽度为 20 μs .

3 结果与讨论

3.1 原料粉末形貌分析

图 1 给出了原料粉末形貌照片, (a) 和 (b) 分别为 LaH_2 和 CeH_2 纳米粉末的 TEM 照片. 从图中可看出, 纳米粉末平均粒径分布在 20—100 nm, 形状为球形. 图 1(c) 为无定形 B 粉扫描电镜照片. 从图中可看出, 该粉末形貌为无规则, 平均粒径分布在 2—5 μm , 表现出了无定形粉末形貌特点. 由于稀土纳米粉末具有粉末粒度小、表面活性高、比表面积大、熔点低、扩散系数高等特点, 并且无定形 B 粉与晶态 B 粉相比具有很高的活性, 这些将有利于低温烧结高致密多晶块体.

50 MPa 下的 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ ($x = 0, 0.4, 0.6, 0.8$) 块体的 XRD 衍射图谱. 从图中可看出当掺杂量 $x = 0$ 时, 该烧结体由单相的 CaB_6 型结构构成, 空间群为

$Pm\bar{3}m$, 没有发现其它杂质相的出现. 当掺杂量增加到 $x = 0.4, 0.6$ 和 0.8 时, 衍射峰没有明显变化, 杂质相也没有出现, 这表明在该烧结温度和压强下成功制备出了 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 单相多晶块体. 图 2(b) 给出了掺杂量为 $x = 0$ (CeB_6) 和 $x = 0.8$ ($\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{B}_6$) 多晶体实物照片. 其中烧结体直径为 20 mm , 厚度为 5 mm . 烧结体直径可通过改变烧结模具内径而

制备出尺寸更大的样品. 而且目前区域熔炼法制备出的单晶体直径仅为 $8\text{—}10\text{ mm}$, 可见本文烧结出的多晶体能提供更大的发射面积, 应该有很好的应用前景. 观察图 2(b) 中的样品颜色可发现, CeB_6 的颜色为深蓝色, 而 $\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{B}_6$ 的颜色为紫红色, 这表明该系列样品结晶良好. 表 1 给出的荧光光谱分析结果表明, 所有样品纯度均达 99.0% .

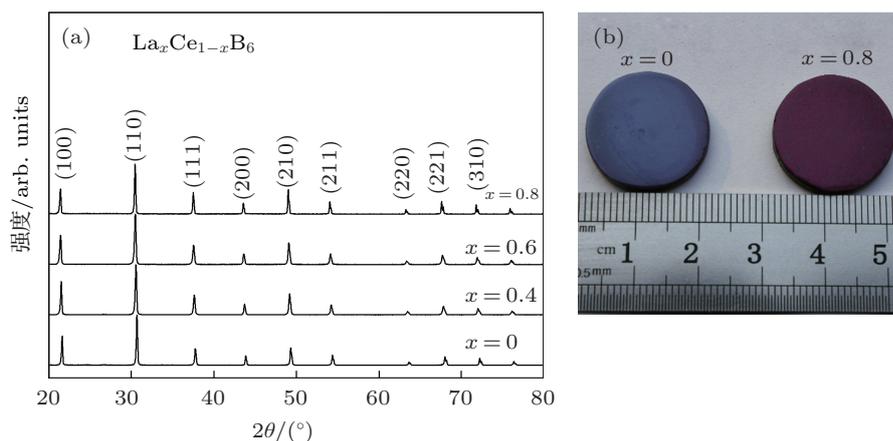


图 2 (a) 烧结温度为 $1450\text{ }^\circ\text{C}$, 压强为 50 MPa 下的 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ XRD 图谱; (b) 烧结体实物照片

3.3 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 力学性能

表 1 中给出了烧结温度为 $1450\text{ }^\circ\text{C}$, 压强为 50 MPa 下的 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ ($x = 0, 0.4, 0.6, 0.8$) 多元稀土六硼化物的致密度及硬度值. 显然所有烧结体致密度均高于 96% , 维氏硬度最高值达到 2310 kg/mm^2 , 表现出了良好的力学性能. 而传统的热压固相烧结方法制备出的多晶块体致密度仅在 $80\%\text{—}92\%$, 这主要是由于稀土六硼化物结构中 B-B 之间的共价键结合使粉末之间存在很强的“屈服强度”, 在烧结过程中很难形成烧结颈, 很难得到高致密块体. 而本文所采用的放电等离子原位烧结法, 有效地避免了固相烧结过程. 在烧结过程中当烧结温度为 $729.6\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $852.7\text{ }^\circ\text{C}$ 时, LaH_2 和 CeH_2 纳米粉末进行脱氢反应, 生成 La , Ce 纳米粉和 H_2 . 当温度升高至 $1450\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 液态的 La (熔点为 $920\text{ }^\circ\text{C}$) 和液态的 Ce (熔点为 $799\text{ }^\circ\text{C}$) 与固态的 B (熔点为 $2300\text{ }^\circ\text{C}$) 反应生成 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 多晶体. 烧结过程中稀土液相的出现, 有利于粉末之间孔洞的排出, 有助于质量的迁移, 与传统固相烧结法相比整个烧结过程被“活化”, 无需添加烧结剂就能获得高致密的烧结体.

3.4 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 的电子背散射衍射 (EBSD) 分析

稀土六硼化物的每个晶面中稀土原子与硼原子之间的结合方式及占位不同使得晶面之间发射性能存在“各向异性”. 第一性原理计算结果显示, 每个晶面的逸出功顺序为^[17] $\Phi_{(310)} < \Phi_{(210)} < \Phi_{(100)} < \Phi_{(110)} < \Phi_{(111)} < \Phi_{(211)}$. 在我们前期研究中发现, SPS 的特殊烧结机理会对样品产生织构现象. 因此在烧结过程中调节烧结参数, 制备出有利于电子发射的织构将会对发射性能的提高有重大意义. 图 3 给出了烧结温度为 $1450\text{ }^\circ\text{C}$, 烧结压强为 50 MPa 下的多晶 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ ($x = 0, 0.4, 0.6$) 的晶粒取向图. 图中不同颜色代表晶粒的不同取向, 从而判定该系列样品存在明显的织构. 从图中可发现晶粒均为等轴晶, 粗细均匀, 晶界清晰致密, 平均晶粒度 $3\text{—}5\text{ }\mu\text{m}$, 没有发现孔洞从而进一步说明了样品的高致密性.

表 1 多元稀土六硼化物的致密度及硬度

$(\text{La}_x\text{Ce}_{1-x})\text{B}_6$	纯度/%	相对密度/%	维氏硬度/(kg/mm^2)
CeB_6	99.3	97.5	2091
$\text{La}_{0.4}\text{Ce}_{0.6}\text{B}_6$	99.0	96.1	2310
$\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.4}\text{B}_6$	99.1	96.3	2285
$\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{B}_6$	99.0	98.0	2190

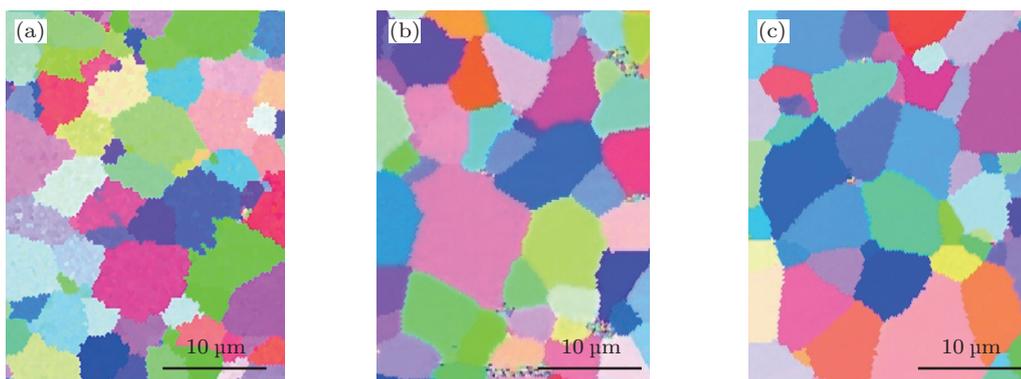


图3 $(La_xCe_{1-x})B_6$ 的晶粒取向分布图 (a) $x=0$; (b) $x=0.4$; (c) $x=0.6$

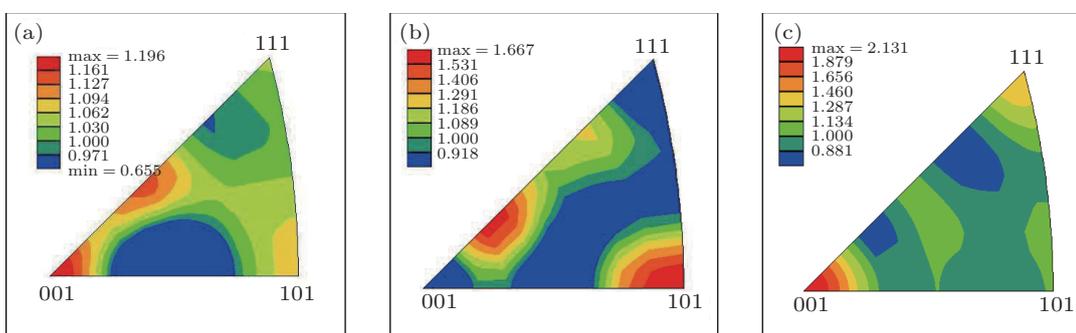


图4 $(La_xCe_{1-x})B_6$ 的ND反极图 (a) $x=0$; (b) $x=0.4$; (c) $x=0.6$

图4给出了 $(La_xCe_{1-x})B_6$ ($x=0, 0.4, 0.6$) 样品的ND (样品表面法向) 反极图. 从图中可知SPS烧结制备的三个样品都形成了一定量的织构. 结合4(a)和(c)发现, 样品 CeB_6 和 $La_{0.6}Ce_{0.4}B_6$ 主要由(100) 织构构成, 而样品 $La_{0.4}Ce_{0.6}B_6$ 由(110) 织构构成, 这些织构均有利于降低表面逸出功. 经分析认为形成该织构主要是在液相反应烧结过程中, 在晶粒生长阶段烧结温度和轴向压力相结合导致样品存在织构现象.

电阻是电子对声子的散射作用. 对于稀土六硼化物阴极而言, 电阻率是个重要物理参数, 它对发射性能的改进有着重要作用, 特别对“直热式”阴极的制备意义重大. 图5给出了 $La_xCe_{1-x}B_6$ ($x=0, 0.4, 0.6, 1$) 电阻率随温度变化曲线, 为了方便比较 $x=1$ (LaB_6) 的电阻率数据摘自文献[4]. 从图5可知所有样品电阻率均随温度的升高而线性增加, 表现出了典型的金属导电性, 其中 $La_{0.6}Ce_{0.4}B_6$ 的电阻率在测量温度为 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 时分别为 $32.19\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 和 $52.26\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$; $La_{0.4}Ce_{0.6}B_6$ 的电阻率在测量温度为 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 分别增加到了 $378\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 和 $59.26\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$, 这表明随着Ce含量

的增加电阻率比 LaB_6 明显增大.

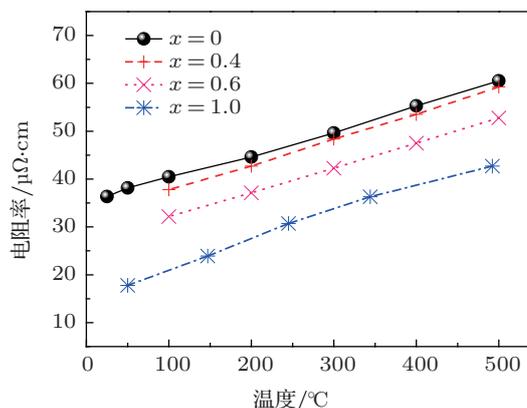


图5 $La_xCe_{1-x}B_6$ ($x=0, 0.4, 0.6, 1$) 电阻率随温度变化曲线

3.5 $La_xCe_{1-x}B_6$ 热发射性能

稀土六硼化物阴极中 CeB_6 与 LaB_6 相比具有电阻率高、蒸发率低发射过程中抗污染能力强等优点而有望取代 LaB_6 成为新一代阴极材料. 但其发射电流密度低而有待于进一步提高. 本文目的在于通过元素掺杂制备出发射电流密度均大于 CeB_6 和 LaB_6 的 $La_xCe_{1-x}B_6$ 多元稀土六硼化物, 并且保

持较大的电阻率. 图 6 给出了 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 在阴极温度为 1773 K 和 1873 K 时的发射电流密度随外加电压变化曲线. 从图 6(a) 可看出, 多晶 CeB_6 在阴极温度为 1773 K 和 1873 K, 外加电压为 1000 V 时, 最大发射电流密度分别为 5.4 A/cm^2 和 24.3 A/cm^2 . 当掺杂量为 $x = 0.4$ 和 0.6 时, 多晶 $\text{La}_{0.4}\text{Ce}_{0.6}\text{B}_6$ 和 $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.4}\text{B}_6$ 的最大发射电流密度分别增加到 27.9 A/cm^2 和 40.7 A/cm^2 , 表明掺杂后的多元稀土六硼化物 $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.4}\text{B}_6$ 的电流密度均高于 CeB_6 和 LaB_6 (图 6(d)) 的发射电流密度, 表现出了良好的发射性能. 金晓等人 [18] 从直径为 $\Phi 3 \text{ mm}$ 的单晶

LaB_6 发射面中, 阴极温度为 1820 K 时, 得到的最大发射电流密度为 24 A/cm^2 . 王汉斌等 [19] 在二极管结构的测量体系中, 当测量温度为 1870 K 时, 单晶 LaB_6 最大发射电流密度达到 5.75 A/cm^2 . 姚剑峰等 [20] 在研究单晶和多晶 LaB_6 热发射性能时发现, 单晶 LaB_6 工作点较高且具有较好的发射电流密度, 在 1773 K 和 1823 K 时, 发射电流密度分别为 17.3 A/cm^2 和 30.0 A/cm^2 . 而本文发射电流密度均高于以上文献报道, 说明本文所采用的原位反应烧结法成功制备出了发射性能优良的 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 多元稀土六硼化物阴极材料.

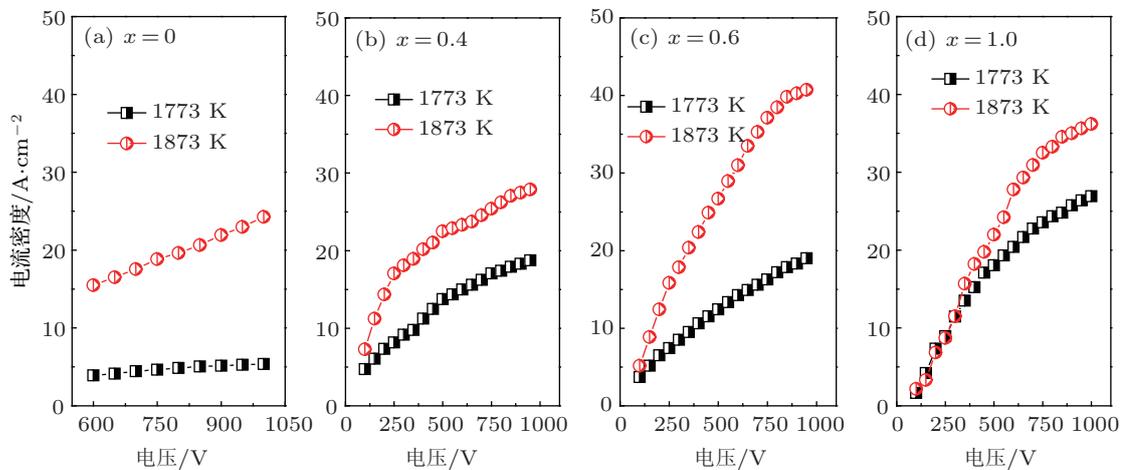


图 6 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 不同温度下的热发射性能 (a) $x = 0$; (b) $x = 0.4$; (c) $x = 0.6$; (d) $x = 1$

4 结论

采用放电等离子原位反应烧结法成功制备出了单相的高致密的 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 多元稀土六硼化物, 并研究了其热发射性能. 结果表明, 该方法制备出的多晶体致密度均高于 96%, 维氏硬度最高值达到 2310 kg/mm^2 , 表现出了良好的力学性能. 实验中还发现, 由于 SPS 特殊烧结机理导致了烧结样品存在

织构现象, 这些织构有利于降低表面逸出功而提高发射电流密度. 热发射结果表明, 多元稀土六硼化物 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 中, 当 x 含量为 $x = 0.6$ 时, 最大发射电流密度高达 40.7 A/cm^2 , 比未参杂的 LaB_6 和 CeB_6 的电流密度都高, 表现出了良好的发射性能. 因此多元稀土六硼化物 $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.4}\text{B}_6$ 作为热阴极材料应该有很好的应用前景.

[1] Lafferty J M 1951 *J. Appl. Phys.* **22** 299
 [2] Mandrus D, Sales B C, Jin R 2001 *Phys. Rev. B* **64** 012302
 [3] Nishitani R, Aono M, TanaKa T, Kawai S, Iwasaki H, Oshima C, Nakamura S 1980 *Surf. Sci.* **95** 341
 [4] Bao L H, Zhang J X, Zhang N, Li X N, Zhou S L 2012 *Phys. Scr.* **85** 035710
 [5] Bao L H, Zhang J X, Zhou S L, Tegus 2011 *Chin. Phys. B* **20** 058101
 [6] Carlsson M, Garcia F J, Johnsson M, Gulian A 2005 *Journal of Materials Science* **40** 2991
 [7] Mituko O 1976 *J. Crystal Growth* **33** 193
 [8] Kou Z Q, Ma X, Di N L, Li Q A, Cheng Z H 2005 *Chin. Phys.* **14** 1896
 [9] Wang S, Pomjakushina E, Shiroka T, Deng G, Nikseresht N, Ruegg C, Conder K 2010 *J. Crystal Growth* **313** 51
 [10] Storms E K 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 2961
 [11] Storms E K, Mueller B A 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 2966
 [12] Liu S P, Yang Q S, Chen W P, Liu J X, Li Z H 2006 *Rare Metals and Cemented Carbides* **34** 8 (in Chinese) [柳术平, 杨庆山, 陈卫平, 刘甲祥, 李中华 2006 稀有金属与硬质合金 **34** 8]
 [13] Gao R L, Yu H S, Yu J L, Han J D, Min G H, Yang X L 2002 *Journal of shandong university* **32** 595 (in Chinese) [高瑞兰, 于化顺, 于晋涟, 韩建德, 闵光辉, 杨晓亮 2002 山东大学学报 **32** 595]
 [14] Zhou S L, Zhang J X, Liu D M, Lin Z L, Huang Q Z, Bao L H, Ma R

- G, Wei Y F 2010 *Acta Mater* **58** 4978
- [15] Zhou S L, Liu D M, Zhang J X 2008 *J. Inorganic Materials* **23** 1199 (in Chinese) [周身林, 刘丹敏, 张久兴 2008 无机材料学报 **23** 1199]
- [16] Zhou S L, Liu D M, Zhang J X, Jin S 2009 *Rare Metal Materials and Engineering* **38** 313 (in Chinese) [周身林, 刘丹敏, 张久兴, 金帅 2009 稀有金属材料与工程 **38** 313]
- [17] Uijtewaal M A, De Wijs G A, Groot R A 2006 *J. Phys. Chem. B* **110** 18462
- [18] Jin X, Liu X S, Huang S R, Cai G H 1995 *High Power Laser and Particle Beams* **7** 555 (in Chinese) [金晓, 刘锡三, 黄孙仁, 蔡公和 1995 强激光与粒子束 **7** 555]
- [19] Wang H B, Xu Z, Lu H P, Deng R P, Yang X, Gan K Y, Jin X, Li M, Liu X S 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 932 (in Chinese) [王汉斌, 许州, 卢和平, 邓仁培, 杨肖, 甘孔银, 金晓, 黎明, 刘锡三 2005 强激光与粒子束 **17** 932]
- [20] Yao J F, Chen X, Jiang J P, Li J, Gao Y J, Yan S Q, Chen Q L 2002 *Vacuum Electronics* **1** 1 (in Chinese) [姚剑峰, 陈旭, 江剑平, 李季, 高玉娟, 阎肃秋, 陈其略 2002 真空电子技术 **1** 1]

Synthesis and properties of $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ compounds by in-situ spark plasma sintering*

Bao Li-Hong¹⁾ Narengerile¹⁾ O. Tegus¹⁾ Zhang Xin²⁾ Zhang Jiu-Xing^{2)†}

1) (Inner Mongolia Key Laboratory for Physics and Chemistry of Functional Materials, College of Physics and Electronic Information, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

2) (The Key Laboratory of Advanced Functional Materials, Ministry of Education, College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 23 June 2013; revised manuscript received 22 July 2013)

Abstract

Polycrystalline rare-earth hexaboride ($\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}$) B_6 were prepared by means of the reactive spark plasma sintering (SPS), using mixed powders of GdH_2 , NdH_2 and B. The crystal structure, surface texture, mechanical property, electrical resistivity, and thermionic emission properties of the sintered samples were investigated. It is found that all the samples sintered by SPS exhibit high density (> 96%) and high value of Vickers hardness (2310 kg/mm²), which are much higher than those made by traditional method. Thermionic emission results indicate that the maximum emission current density of $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.4}\text{B}_6$ is 40.7 A/cm² under the applied voltage of 1 kV at 1873 K, which is larger than that of LaB_6 and CeB_6 . Thus, the mixed crystal of borides ($\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}$) B_6 , as a cathode, promises good prospects in application.

Keywords: rare-earth hexaboride, cathode materials, thermionic emission

PACS: 61.66.Fn, 79.40.+z

DOI: 10.7498/aps.62.196105

* Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51161017), the Open Major Basic Project of Inner Mongolia (Grant No. 120294), and the Natural Science Foundation of Inner Mongolia, China (Grant No. 2010MS0104).

† Corresponding author. E-mail: zjiuxing@bjut.edu.cn