

稀土硼化物  $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$  亚微米粉的制备及光吸收研究

包黎红 朝洛蒙 伟伟 特古斯

Synthesis and optical absorption properties of  $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$  submicron powders

Bao Li-Hong Chao Luo-Meng Wei Wei O. Tegus

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 096104 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.096104

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.096104>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I9>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于真空电子太赫兹器件的微型热阴极电子束源研究

[Study of mini-themionic electron sources for vacuum electron THz devices](#)

物理学报.2014, 63(5): 057901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.057901>

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

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

物理学报.2013, 62(19): 196105 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.196105>

等离子喷涂含钪氧化物阴极制备及发射特性研究

[Preparation and emission characteristic study of plasma-sprayed scandia-doped oxide cathode](#)

物理学报.2012, 61(7): 077901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.077901>

基于密度泛函理论解读不同高密度储氢材料释氢能力

[Interpretation of dehydrogenation ability of high-density hydrogen storage materials by density functional theory](#)

物理学报.2011, 60(2): 026103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.026103>

# 稀土硼化物 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 亚微米粉的制备及光吸收研究\*

包黎红<sup>1)†</sup> 朝洛蒙<sup>2)</sup> 伟伟<sup>1)</sup> 特古斯<sup>1)‡</sup>

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) (沈阳材料科学国家实验室, 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

(2014年10月16日收到; 2014年11月29日收到修改稿)

以稀土氧化物 $\text{La}_2\text{O}_3$ 和 $\text{CeO}_2$ 为稀土源, 以 $\text{NaBH}_4$ 为硼源在真空环境中通过固相反应成功制备出了分散性好的单相三元 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 亚微米粉. 系统研究了掺杂元素La对 $\text{CeB}_6$ 物相, 微观结构及光吸收性能的影响. 实验结果表明, La元素的掺杂没有改变 $\text{CeB}_6$ 的物相和晶体结构, 而是无序替代了Ce原子晶位. 光吸收结果表明, 随着La掺杂量的增加 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 分散液吸收谷波长从620 nm减小到610 nm出现了蓝移现象.

**关键词:** 稀土六硼化物, 纳米粉末, 光吸收

**PACS:** 61.66.Fn, 79.40.+z

**DOI:** 10.7498/aps.64.096104

## 1 引言

自从1950年Lefferty发现稀土六硼化镧( $\text{LaB}_6$ )具有优异的热发射性能以来, 研究者们利用其逸出功低、发射电流密度大、耐离子轰击、寿命长、动态环境下具有良好的工作重复性等优点<sup>[1-6]</sup>, 研制出各种形状的阴极材料而广泛应用于各种电子显微镜的灯丝及大型电子束焊机的离子源. 最近,  $\text{LaB}_6$ 的光学性质的另一个重要特性受到国内外学者们的极大关注<sup>[7,8]</sup>. 2003年Schelm等<sup>[9]</sup>将少量的 $\text{LaB}_6$ 纳米粉分散在聚乙烯醇中制备了透明薄膜, 发现在波长为600 nm附近的可见光区域具有很强的透射光; 而在波长为750—1300 nm附近的近红外区域具有很强的吸收特性, 这很好的满足了制备隔热玻璃的迫切要求. 2008年Takeda等<sup>[10]</sup>研究了二元 $\text{LaB}_6$ ,  $\text{CeB}_6$ ,  $\text{PrB}_6$ ,  $\text{NdB}_6$ 和 $\text{GdB}_6$ 超细粉末分散液掺入聚合物后的光吸收性能, 发现这

些硼化物具有相同的可见光穿透性, 其中 $\text{LaB}_6$ 在近红外区域具有最强的吸收. 2011年Yuan等<sup>[11]</sup>研究了不同晶粒尺度下的 $\text{LaB}_6$ 纳米粉末掺入聚合物聚甲基丙烯酸甲酯中的光吸收性能. 2012年Xiao等<sup>[12]</sup>采用第一性原理计算了单晶 $\text{LaB}_6$ 的介电函数, 吸收系数和反射系数, 揭示了可见光透射与等离子共振频率关系. 综上所述,  $\text{LaB}_6$ 纳米粉光学特性显然已成为研究热点, 它有望替代价格昂贵的银和金纳米颗粒而成为新一代的光吸收材料<sup>[13-15]</sup>.

然而到目前为止, 关于多元稀土六硼化物纳米粉的制备及光学性能未见报道. 本课题组在前期研究中发现, 三元稀土六硼化物 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 无论多晶或单晶块体, 其发射性能均优于单纯的 $\text{LaB}_6$ 或 $\text{CeB}_6$ <sup>[16,17]</sup>. 这也给我们一个重要启发, 三元 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 纳米粉末也会有独特的光吸收特性. 本文采用固相反应法制备出了三元稀土六硼化物 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 亚微米粉末, 并研究了其光吸收特性.

\* 国家自然科学基金(批准号: 51302129)、内蒙古自治区重大基础研究开放课题(批准号: 20130902)和内蒙古师范大学高层次人才科研启动经费项目(批准号: 2013YJRC017)资助的课题.

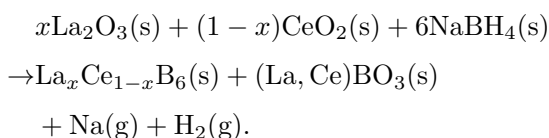
† 通信作者. E-mail: baolihong@imnu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: tegusph@imnu.edu.cn

结果表明,随着La掺杂量的增加 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 吸收谷波长向低波段方向移动,出现了蓝移现象.

## 2 实验方法

将纯度均为99.99%的 $\text{La}_2\text{O}_3$ 粉末(平均粒度为2  $\mu\text{m}$ )和 $\text{CeO}_2$ 粉末(平均粒度为3  $\mu\text{m}$ )与纯度为99.0%的 $\text{NaBH}_4$ 粉末按 $x:1-x:6$ 的摩尔比例在无水乙醇中进行研磨.混合均匀后的粉末自然烘干后装入模具中进行压块成型,随后装入石英管中烧结温度为1200  $^\circ\text{C}$ 保温时间为2 h真空条件下进行固相反应.烧结后的产物中主要含有 $\text{RBO}_3$  ( $R = \text{La}, \text{Ce}$ )的杂质相,所以对产物以稀盐酸,酒精和蒸馏水进行多次清洗,主要反应过程可如下表示:



清洗后的粉末物相由XRD (Philips PW1830)测定;粉末形貌及能谱分析由日立冷场发射扫描电镜FESEM (SU-8010)观察;粉末微观结构及单颗粒能谱分析由美国FEI 200 kV透射电镜(Tecnai F20 200 kV)完成.光吸收测定是将粉末分散在无水乙醇中,滴于玻璃后由紫外可见光光度计(PerkinElmer Lambda 750S)测定,光源波长为250—2500 nm.

## 3 结果与讨论

### 3.1 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 粉末物相分析

图1给出了反应温度为1200  $^\circ\text{C}$ ,保温2 h下的 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$  ( $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6$ )粉末XRD衍射图谱.从图中可看出当La掺杂量 $x = 0$ 时,该粉末物相由单相的 $\text{CeB}_6$ 型结构构成,空间群为 $Pm\bar{3}m$ 与标准卡片(PDF: D110670)相比没有发现 $\text{RBO}_3$ 杂质相的出现.当La掺杂量由 $x = 0.2$ 增加至 $x = 0.6$ 时,所有粉末均由单相的物相构成,表明在此反应温度下La原子无序的替代了Ce原子,形成了单相的三元稀土六硼化物 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ .根据本课题组前期近边X射线吸收研究表明<sup>[18,19]</sup>,稀土原料 $\text{La}_2\text{O}_3$ 和 $\text{CeO}_2$ 中La原子以 $\text{La}^{3+}$ 形式存在,而Ce原子以 $\text{Ce}^{3+}$ 和 $\text{Ce}^{4+}$ 混价形式存在.但在反应后的 $\text{LaB}_6$ 和 $\text{CeB}_6$ 中La和Ce原子均以单一

的 $\text{R}^{3+}$ 三价形式存在.这充分说明了混价态的原料如 $\text{CeO}_2$ 同样能制备出三价的稀土六硼化物.

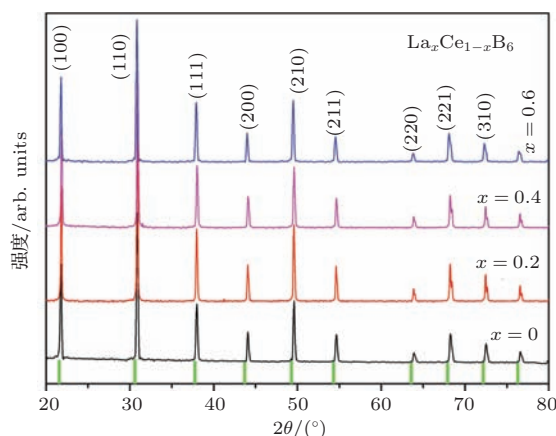


图1 (网刊彩色)反应温度为1200  $^\circ\text{C}$ ,保温2 h下的 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 粉末XRD图谱

Fig. 1. (color online) XRD pattern of the  $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$  powder prepared at 1200  $^\circ\text{C}$  for 2 h.

### 3.2 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 粉末形貌及微观结构分析

图2给出了反应温度为1200  $^\circ\text{C}$ ,保温2 h下的 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$  ( $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6$ )粉末FESEM照片.从图2(a)可看出,在此反应温度下 $\text{CeB}_6$ 粉末展现出了立方形貌的单晶颗粒,平均晶粒度达到200 nm表现出了良好的分散性,未发现团聚现象.比较图2(b), (c)和(d)可发现,La元素的掺杂没有改变粉末的立方形貌和晶粒尺度,平均晶粒度均保持在200 nm左右.

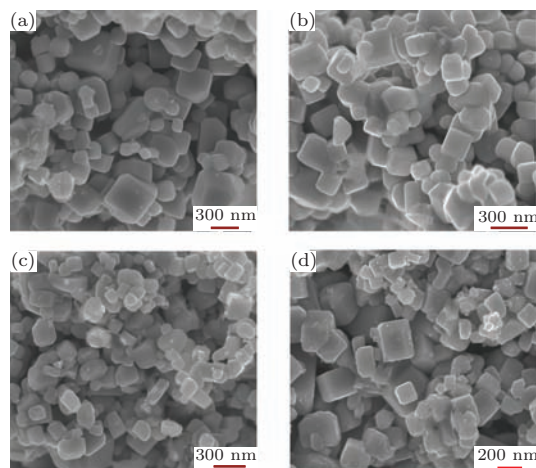


图2  $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 粉末SEM照片 (a)  $x = 0$ ; (b)  $x = 0.2$ ; (c)  $x = 0.4$ ; (d)  $x = 0.6$

Fig. 2. SEM image of  $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$  powder. (a)  $x = 0$ , (b)  $x = 0.2$ , (c)  $x = 0.4$ , (d)  $x = 0.6$ .

为了进一步验证La原子是否掺入 $\text{CeB}_6$ 单晶颗粒中而不是形成一个单独的 $\text{LaB}_6$ 单晶颗粒,我

们选择以  $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.4}\text{B}_6$  粉末为例对其单晶颗粒进行了表面元素分析. 如图 3(a) 所示选取颗粒平均晶粒度为  $1.5\ \mu\text{m}$ , 从右侧元素分布图可清楚的看出 La 和 Ce 元素均匀地分布在单晶颗粒表面, 表明 La 元素成功的掺入了  $\text{CeB}_6$  晶格中, 而不是形成单独的  $\text{LaB}_6$  颗粒. 图 3(b) 给出了所选单颗粒的能谱分析结果. 从能谱图中发现有少量的 Si 和 O 的峰出现, 分析认为这主要是由于在高温反应下少量的石英管渗透到样品表面所致. 能谱图中 C 和 Al 元素的出现是由于黏接粉末的导电胶成分所致.

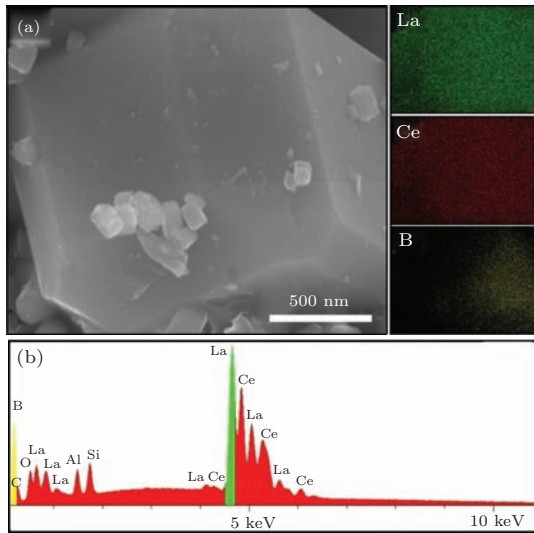


图 3 (网刊彩色)  $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.4}\text{B}_6$  粉末扫描电镜能谱分析

Fig. 3. (color online) EDS analysis of  $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.4}\text{B}_6$  powder.

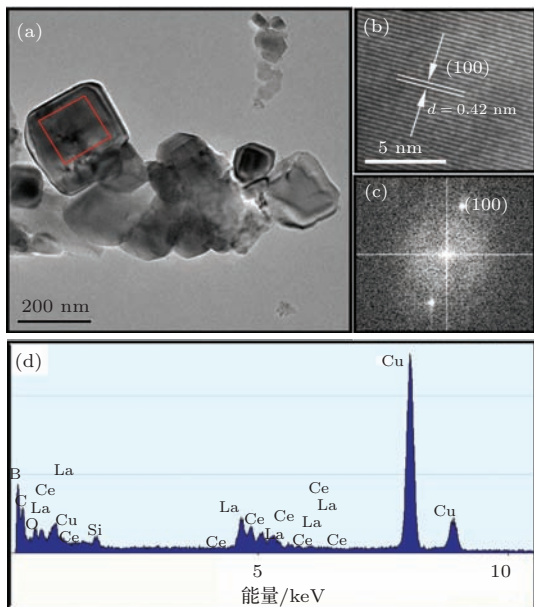


图 4 (网刊彩色) (a)  $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.4}\text{B}_6$  粉末透射电镜照片; (b) 高分辨照片; (c) 傅里叶变化; (d) 能谱分析

Fig. 4. (color online) (a) TEM analyses of  $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.4}\text{B}_6$  powder; (b) the HRTEM image; (c) the indexing FFT patterns; (d) EDS analysis.

图 4 为  $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.4}\text{B}_6$  粉末 TEM 照片及能谱分析结果. 图 4(a) 为明场像, 粉末形貌展现出立方结构, 平均晶粒度为  $200\ \text{nm}$  与扫描电镜观察结果一致. 图 4(b) 为所选单颗粒局部放大高分辨照片 (HRTEM), 在平行排列的晶面族中未发现层错、位错或孪晶等缺陷, 表明结晶度良好. 晶面间距  $d = 0.42\ \text{nm}$  与立方结构中的 (100) 晶面间距一致. 图 4(c) 中的快速傅里叶变换 (FFT) 再一次证明了该单晶体具有简立方结构. 图 4(d) 给出了所选单晶颗粒能谱分析, 结果表明与扫描电镜能谱结果相符, 再一次证明了 La 原子无序的替代了 Ce 晶位.

### 3.3 $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ 粉末光吸收特性

图 5 给出了  $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$  分散液光吸收图谱, 从图中可看出在波长为  $500\text{--}760\ \text{nm}$  的可见光区域所有样品均呈现出了不同程度的吸收最小值. 从放大图可清楚的看出, 当 La 掺杂量为  $x = 0$  时,  $\text{CeB}_6$  吸收最小值位置在  $620\ \text{nm}$ . 当 La 掺杂量增加至  $x = 0.2$  和  $0.4$  时,  $\text{La}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{B}_6$  和  $\text{La}_{0.4}\text{Ce}_{0.6}\text{B}_6$  分散液吸收谷波长有减小的趋势. 当 La 掺杂量继续增加至  $x = 0.6$  和  $0.8$  时,  $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.4}\text{B}_6$  和  $\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{B}_6$  吸收最小值分别减小到  $613$  和  $610\ \text{nm}$ , 表明 La 元素的掺杂使得  $\text{CeB}_6$  吸收谷波长明显向低波段方向移动, 产生了蓝移现象, 表现出了三元  $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$  硼化物的吸收谷波长连续可调特性. 在波长为  $1000\ \text{nm}$  的近红外区域附近所有样品具有很强的吸收. 从实际应用角度来看, 光吸收最小位置处往往伴随着很强的透射光和较弱的反射光, 并且本文所制备的样品在近红外区域具有很强的吸收特性, 这些光学性能很好的满足了制备隔热玻璃的迫切要求. 另外这一特性对提高聚合物太阳能电池转换效率也应有重要作用, 因为它对太阳光中可见光区域有很少的吸收, 这部分透射光也正是聚合物所吸收的光能.

根据光波波长与能量关系  $E = 1240/\lambda$  可知, 图 5 中吸收谷波长的变化与光波能量密切相关. Sato 等<sup>[20]</sup> 测量单晶  $\text{LaB}_6$  电子能量损失谱后发现, 当等离子共振能量为  $2.0\ \text{eV}$  时在此位置处吸收系数达到最小值, 与此对应的波长正好在可见光区域. Xiao 等<sup>[12]</sup> 采用第一性原理也很好的解释了等离子共振能量对应的振频率 (等离子共振频率) 处吸收系数达到最小值. 根据 Taketa 等<sup>[10]</sup> 报道  $\text{CeB}_6$  等离子共振能量为  $1.96\ \text{eV}$  要比  $\text{LaB}_6$  的  $2.0\ \text{eV}$  低, 这也是  $\text{CeB}_6$  吸收谷波长高于  $\text{LaB}_6$  的主要原因. 而

对于三元  $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$  的吸收谷波长可调特性可解释为与其对应的等离子共振能量分布在  $\text{CeB}_6$  和  $\text{LaB}_6$  区间, 从而出现吸收谷波长蓝移现象.

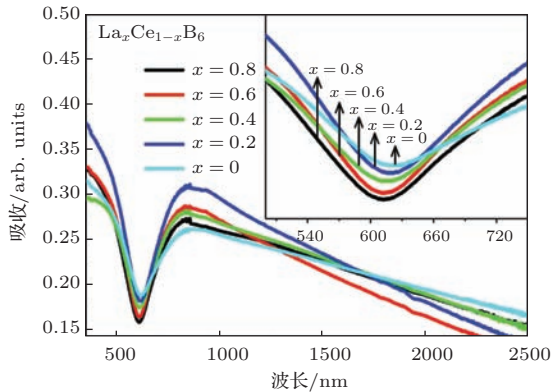


图5 (网刊彩色)  $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$  分散液薄膜光吸收图谱  
Fig. 5. (color online) Absorption spectrum of  $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$  dispersion.

## 4 结 论

本文采用固相反应法, 以稀土氧化物和硼氢化钠为原料在反应温度为  $1200^\circ\text{C}$  真空环境下成功制备出了单相的三元  $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$  亚微米粉. 系统研究了掺杂元素 La 对  $\text{CeB}_6$  物相, 微观结构及光吸收性能的影响. 结果表明, 在此反应温度下  $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$  具有  $\text{CaB}_6$ -型立方结构, 平均晶粒度达到 200 nm. 扫描电镜和透射电镜能谱分析证明 La 元素无序替代了 Ce 原子晶位. 光吸收结果表明, 随着 La 掺杂量的增加  $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$  分散液吸收谷波长从 620 nm 减小到 610 nm 出现了蓝移现象. 这一吸收谷波长连续可调特性, 将在制备隔热玻璃和提高聚合物太阳能电池转换效率方面会有很好的应用前景.

## 参考文献

- [1] Jha M, Patra R, Ghosh S, Ganguli A K 2013 *Solid State Commun.* **153** 35
- [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] Futamoto M, Nakazawa M, Kawabe U 1980 *Surf. Sci.* **100** 470
- [5] Rokuta E, Yamamoto N, Hasegawa Y, Trenary M, Nagao T, Oshima C, Otani S 1998 *Surf. Sci.* **416** 363
- [6] Zhang H, Zhang Q, Zhao G P, Tang J, Zhou O, Qin L C 2005 *J. Am. Chem. Soc.* **127** 13120
- [7] Lai B H, Chen D H 2013 *Acta Biomaterialia* **9** 7556
- [8] Lai B H, Chen D H 2013 *Acta Biomaterialia* **9** 7573
- [9] Schelm S, Smith G B 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 4346
- [10] Takede H, Kuno H, Adachi K 2008 *J. Am. Ceram. Soc.* **91** 2897
- [11] Yuan Y F, Zhang L, Hu L J, Wang W, Min G H 2011 *J. Solid State Chem.* **184** 3364
- [12] Xiao L H, Su Y C, Zhou X Z, Chen H Y, Tan J, Hu T, Yan J, Peng P 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 041913
- [13] Kim S S, Na S I, Jo J, Kim D Y, Nah Y C 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 073307
- [14] Huang Q, Wang J, Cao L R, Sun J, Zhang X D, Geng W D, Xiong S Z, Zhao Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1980 (in Chinese) [黄茜, 王京, 曹丽冉, 孙建, 张晓丹, 耿卫东, 熊绍珍, 赵颖 2009 物理学报 **58** 1980]
- [15] Li R, Zhu Y B, Di Y, Liu D X, Li B, Zhong W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 198101 (in Chinese) [李斌, 朱亚彬, 狄月, 刘冬雪, 李冰, 钟韦 2013 物理学报 **62** 198101]
- [16] Bao L H, Narengerile, Tegus O, Zhang X, Zhang J X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 196105 (in Chinese) [包黎红, 那仁格日乐, 特古斯, 张忻, 张久兴 2013 物理学报 **62** 196105]
- [17] Bao L H, Tegus O, Zhang J X, Zhang X, Huang Y K 2013 *J. Alloys. Comp.* **558** 39
- [18] Bao L H, Wurentuya, Wei W, Tegus O 2014 *Materials Characterization* **97** 69
- [19] Bao L H, Wurentuya, Wei W, Li Y J, Tegus O 2014 *J. Alloys. Comp.* **617** 235
- [20] Sato Y, Terauchi M, Mukai M, Kaneyama T, Adachi K 2011 *Ultramicroscopy* **111** 1381

# Synthesis and optical absorption properties of $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$ submicron powders\*

Bao Li-Hong<sup>1)†</sup> Chao Luo-Meng<sup>2)</sup> Wei Wei<sup>1)</sup> O. Tegus<sup>1)‡</sup>

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

2) (Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

( Received 16 October 2014; revised manuscript received 29 November 2014 )

## Abstract

According to original knowledge, lanthanum hexaboride ( $\text{LaB}_6$ ) as an excellent thermionic electron emitter is characterized by a low work function, a high emission density, and a high brightness. Recently, much attention has been drawn to its another excellent optical properties: strong light absorption in near infrared rays (NIR), and transparency in visible light (VL), which result from the free electron plasmon resonance. However, up to now the optical properties and syntheses of ternary rare-earth hexaborides have been very rarely reported in the literature. In this paper, ternary  $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$  submicron crystallines are successfully synthesized using a solid-state reaction, in which  $\text{La}_2\text{O}_3$  and  $\text{CeO}_2$  are used as rare-earth sources and  $\text{NaBH}_4$  as boron sources in a continuous vacuum condition. Effects of La doping content on the  $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$  phase composition, microstructure, and optical absorption properties are investigated by X-ray diffraction, scanning electron microscope (SEM), and transmission electron microscope (TEM). It is found that all the synthesized samples are composed of  $\text{CaB}_6$ -type single-phase alloy with a space group  $Pm\bar{3}m$  at the reaction temperature of 1200 °C held by 2 h. The SEM results indicate that the cubic-shaped ternary  $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$  crystals with a mean size of 200 nm are obtained and the energy dispersive spectrometer results confirm that the La atoms are randomly distributed at the lattice sites of  $\text{CeB}_6$ . High resolution transmission electron microscope images reveal the single-crystalline nature, and the FFT pattern indicates the lattice fringe  $d = 0.42$  nm which agrees well with the (100) crystal plane. EDS analysis of TEM also indicates the La element has been doped into  $\text{CeB}_6$ . And the optical absorption result shows that the absorption valley of  $\text{CeB}_6$  is 62 nm. With increasing La doping content to  $x = 0.6$  and 0.8, the absorption valleys of  $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.4}\text{B}_6$  and  $\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{B}_6$  decrease to 613 and 610 nm respectively indicating the blueshifts of the wavelength of absorption valley. From the view point of practical application, the tunable characteristic of  $\text{La}_x\text{Ce}_{1-x}\text{B}_6$  may extend the optical applications in improving the efficiency of organic photovoltaics, replacing the expensive gold and silver nanoparticles, which may have a good usage in optical filters.

**Keywords:** rare-earth hexaborides, nanocrystalline, optical absorption

**PACS:** 61.66.Fn, 79.40.+z

**DOI:** 10.7498/aps.64.096104

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51302129), the Open Major Basic Project of Inner Mongolia, China (Grant No. 20130902), and the High Level Talents Scientific Foundation of Inner Mongolia Normal University, China (Grant No. 2013YJRC017).

† Corresponding author. E-mail: [baolihong@imnu.edu.cn](mailto:baolihong@imnu.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [tegusph@imnu.edu.cn](mailto:tegusph@imnu.edu.cn)