



## UvA-DARE (Digital Academic Repository)

### Danjing CeB<sub>6</sub> fashe xingneng ji ci dianzu ge xiang yixing yanjiu

Bao, L.-H.; Tao, R.-Y.; Tegus, O.; Huang, Y.-K.; Leng, H.-Q.; de Visser, A.

**DOI**

[10.7498/aps.66.186102](https://doi.org/10.7498/aps.66.186102)

**Publication date**

2017

**Document Version**

Final published version

**Published in**

Wuli Xuebao = Acta Physica Sinica

[Link to publication](#)

**Citation for published version (APA):**

Bao, L.-H., Tao, R.-Y., Tegus, O., Huang, Y.-K., Leng, H.-Q., & de Visser, A. (2017). Danjing CeB<sub>6</sub> fashe xingneng ji ci dianzu ge xiang yixing yanjiu. *Wuli Xuebao = Acta Physica Sinica*, 66(18), Article 186102. <https://doi.org/10.7498/aps.66.186102>

**General rights**

It is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), other than for strictly personal, individual use, unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

**Disclaimer/Complaints regulations**

If you believe that digital publication of certain material infringes any of your rights or (privacy) interests, please let the Library know, stating your reasons. In case of a legitimate complaint, the Library will make the material inaccessible and/or remove it from the website. Please Ask the Library: <https://uba.uva.nl/en/contact>, or a letter to: Library of the University of Amsterdam, Secretariat, Singel 425, 1012 WP Amsterdam, The Netherlands. You will be contacted as soon as possible.

单晶 CeB<sub>6</sub> 发射性能及磁电阻各向异性研究

包黎红 陶如玉 特古斯 黄颖楷 冷华倩 Anne de Visser

Anisotropy study on thermionic emission and magnetoresistivity of single crystal CeB<sub>6</sub>

Bao Li-Hong Tao Ru-Yu O. Tegus Huang Ying-Kai Leng Hua-Qian Anne de Visser

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 186102 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.186102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.186102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I18>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

磁控管用新型 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-HfO<sub>2</sub> 浸渍 W 基直热式阴极研究

A novel Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-HfO<sub>2</sub> impregnated W base direct-heated cathode in magnetron tube

物理学报.2016, 65(5): 057901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.057901>

稀土硼化物 La<sub>x</sub>Ce<sub>1-x</sub>B<sub>6</sub> 亚微米粉的制备及光吸收研究

Synthesis and optical absorption properties of La<sub>x</sub>Ce<sub>1-x</sub>B<sub>6</sub> submicron powders

物理学报.2015, 64(9): 096104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.096104>

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-thermionic 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 La<sub>x</sub>Ce<sub>1-x</sub>B<sub>6</sub> 化合物及性能研究

Synthesis and properties of La<sub>x</sub>Ce<sub>1-x</sub>B<sub>6</sub> 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>

单晶 CeB<sub>6</sub> 发射性能及磁电阻各向异性研究\*包黎红<sup>1)2)†</sup> 陶如玉<sup>1)</sup> 特古斯<sup>1)</sup> 黄颖楷<sup>2)</sup> 冷华倩<sup>2)</sup> Anne de Visser<sup>2)</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) (Van der Waals-Zeeman Institute, University of Amsterdam, Science Park 904, 1098 XH Amsterdam, The Netherlands)

(2017年4月14日收到; 2017年6月25日收到修改稿)

采用 X 射线劳厄定向法对单晶 CeB<sub>6</sub> 的 (110), (111), (210) 和 (310) 晶面进行了定向. 系统研究了不同晶面热发射性能及磁场对电阻率的影响规律. 结果表明, 当阴极温度为 1873 K 时 (110), (111), (210) 和 (310) 晶面最大发射电流密度分别为 38.4, 11.54, 50.4 和 20.8 A/cm<sup>2</sup>, 表现出了发射性能的“各向异性”. Richardson-Dushman 公式计算逸出功结果表明, 上述晶面中 (210) 晶面具有最低的逸出功, 为 2.4 eV. 从实际应用来看, 该晶面有望替代商业化的钨灯丝成为新一代的场发射阴极材料. 磁电阻率测量结果显示, 当晶体从 [001] 方向旋转至 [011] 方向时电阻率从 73 μΩ·cm 变化至 69 μΩ·cm, 表明电阻率在磁场中沿不同方向同样具有“各向异性”的特点.

关键词: CeB<sub>6</sub>, 逸出功, 磁电阻

PACS: 61.66.Fn, 65.40.gh, 79.40.+z

DOI: 10.7498/aps.66.186102

## 1 引言

自 20 世纪 80 年代至今, 稀土六硼化物铈 (CeB<sub>6</sub>) 作为重费米子化合物由于 4f 轨道电子与 5d 轨道电子之间的强相互作用而展现出许多奇特的电输运和复杂的磁结构<sup>[1-3]</sup>. 在低温区 CeB<sub>6</sub> 电阻率随着温度的降低而出现极小值表现出了“近藤”效应<sup>[4]</sup>, 而且磁结构也依次从顺磁相转变至反铁磁四极子相 (antiferroquadrupolar) 和反铁磁相 (antiferromagnetic)<sup>[5]</sup>. 因此 CeB<sub>6</sub> 低温物理性能一直是凝聚态物理研究的热点. 与此同时, CeB<sub>6</sub> 另外一个重要特性即发射性能也受到国内外学者的极大关注<sup>[6]</sup>. 与其他金属阴极相比, CeB<sub>6</sub> 具有逸出功低、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>[7,8]</sup>.

2009 年, 周身林等<sup>[9]</sup>通过放电等离子反应液相烧结法, 以纳米氢化铈 (CeH<sub>x</sub>) 和微米硼 (B) 粉为原料在真空环境中成功制备出了高致密的

CeB<sub>6</sub> 多晶块体, 维氏硬度和抗弯强度分别达到了 2051 kg/mm<sup>2</sup> 和 254.2 MPa, 表现出了良好的力学性能. 但由于多晶块体材料受到晶界和晶粒尺度等因素的影响发射性能有待于进一步提高. 随后本课题组在采用区域熔炼法制备大尺寸单晶 CeB<sub>6</sub> 过程中发现, 熔态下的 CeB<sub>6</sub> 挥发率远低于 LaB<sub>6</sub> 的挥发率, 表明所制备的单晶 CeB<sub>6</sub> 体具有更高的结晶质量及稳定的化学成分. 并且 (100) 晶面最大发射电流密度达到 47.1 A/cm<sup>2</sup>, 表现出了良好的热发射性能<sup>[10]</sup>. Mahmoud 等<sup>[11]</sup>的最新研究发现, 单晶 CeB<sub>6</sub> 在脉冲宽度为 5.5 μs, 加热功率为 8 MW 下的发射电流密度、工作寿命及逸出功与单晶 LaB<sub>6</sub> 相近, 并且耐离子轰击能力优于 LaB<sub>6</sub> 有望替代商业化的单晶 LaB<sub>6</sub> 成为新一代的热阴极微波电子枪.

然而迄今为止, 关于单晶 CeB<sub>6</sub> 其他晶面发射性能和逸出功方面的研究未见报道. 是否这些晶面中有发射性能优于 (100) 晶面而存在发射性能的“各向异性”的特点. 根据这个研究思路, 本文系统

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51662034) 和内蒙古自治区高等学校“青年科技英才支持计划”(批准号: NJYT-14-B03) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: baolihong@immu.edu.cn

地研究了单晶  $\text{CeB}_6$  不同晶面的热发射性能, 并采用 Richardson-Dushman 公式计算出了不同晶面的逸出功. 在此基础上, 进一步研究了  $\text{CeB}_6$  低温电阻率随外加磁场的变化规律, 结果发现电阻率在磁场中沿不同方向同样具有“各向异性”的特点.

## 2 实验方法

### 2.1 单晶 $\text{CeB}_6$ 制备

将  $\text{CeB}_6$  多晶棒放入光学区域熔炼炉中进行多次区熔, 熔区由四个 Xe 灯加热最高温度可达到  $3000\text{ }^\circ\text{C}$ . 光学炉型号为: FZ-T-12000-X-VII-VPO-MC-PC. 晶体生长过程中为了避免熔态下  $\text{CeB}_6$  的氧化, 通入高纯流动氩气作为保护气体, 气体流速为  $5\text{ L/min}$ , 气体压强保持在  $0.1\text{ MPa}$ . 为了使熔区更加均匀将籽晶和料棒反向旋转, 转速为  $25\text{--}30\text{ r/min}$ , 生长速度为  $10\text{--}14\text{ mm/h}$ .

### 2.2 单晶 $\text{CeB}_6$ 晶面表征与性能测试

采用 X 射线劳厄定向仪对单晶  $\text{CeB}_6$  的 (110), (111), (210) 和 (310) 晶面进行定向, 加速电压为  $30\text{ kV}$ , 电流为  $20\text{ }\mu\text{A}$ . 随后采用慢速线切割将定向的晶面切成横截面积为  $1\text{ mm}^2$  正方形的发射面, 并测量了阴极温度为  $1673, 1773$  和  $1873\text{ K}$  下的发射电流密度. 测试条件: 真空度为  $2 \times 10^{-4}\text{ Pa}$ ; 阳极

电压为脉冲电压, 频率为  $100\text{ Hz}$ , 脉冲宽度为  $10\text{ }\mu\text{s}$ . 采用四探针法, 在物性测量系统 PPMS (Dynacool, Quantum Design) 上测量了 (100) 晶面定向样品在磁场中从 [001] 方向旋转至 [011] 方向的电阻率, 电流方向平行于 [100] 方向, 磁场方向为 [001] 方向.

## 3 结果与讨论

### 3.1 单晶 $\text{CeB}_6$ 晶面表征

图 1 (a) 给出了  $\text{CeB}_6$  晶体结构示意图, 从图中可看出体积较大的 Ce 原子位于 (0, 0, 0) 晶格位置, 6 个 B 原子组成的八面体位于 (0.5, 0.5, 0.2) 晶格位置<sup>[12]</sup>, 空间群为  $Pm\text{-}3m$ . 该结构中 B 原子之间以共价键形式结合, 使得该硼化物具有熔点高、硬度大、热稳定性好和化学稳定性高等特点. 稀土 Ce 原子与 B 原子八面体间主要以离子键形式结合, 从而形成了稳定的简立方晶体结构, 其中简立方六个面为等效的 (100) 晶面. 图 1 (b) 给出了 (110) 晶面结构示意图. 相比于 (100) 晶面可看出, 该晶面主要由 B 原子八面体的对角线方向的两个 B 原子和 Ce 原子共同贡献. 而如图 1 (c) 和图 1 (d) 所示: (210) 晶面是由 B 原子八面体的顶角位置 B 原子和 Ce 原子共同贡献; (310) 晶面则是由 B 原子八面体的对角线方向和顶角的 B 原子共同贡献. 因此我们可推

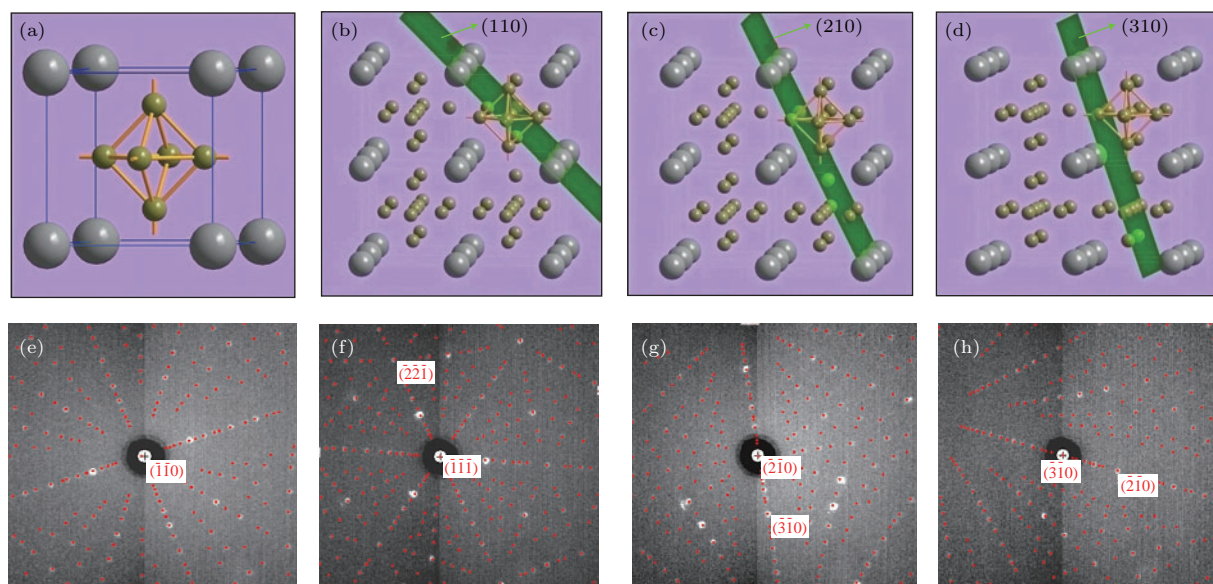


图 1 (网刊彩色) (a)—(d) 为  $\text{CeB}_6$  (100), (110), (210) 和 (310) 晶面结构示意图; (e)—(h) 为定向切割后的 (110), (111), (210) 和 (310) 晶面劳厄照片

Fig. 1. (color online) (a)—(d) (100), (110), (210) and (310) crystal surface structure of  $\text{CeB}_6$ ; (e)—(h) X-ray Laue diffraction of (110), (111), (210) and (310) crystal surfaces of  $\text{CeB}_6$ .

测出, 由于不同晶面中Ce原子和B原子占位及结合能的不同, 将会导致不同晶面的发射性能存在“各向异性”的特点. 图1(e)—(h)给出了单晶CeB<sub>6</sub>定向切割后的(110), (111), (210)和(310)晶面劳厄照片, 从图中可看出每个晶面都具有清晰的衍射斑点和较高的对称性, 充分说明所生长晶体具有良好的结晶质量.

### 3.2 单晶CeB<sub>6</sub>热发射各向异性研究

图2给出了单晶CeB<sub>6</sub> (110), (111), (210)和(310)晶面在测量温度为1673, 1773和1873 K的发射电流密度随外加电压的变化. 从图2(a)可看出, (110)晶面在测量温度为1673 K时, 发射电流密度随着外加电压的增加达到饱和值4.24 A/cm<sup>2</sup>. 当测量温度继续升高至1773和1873 K时, 最大发射电流密度分别增加至152和384 A/cm<sup>2</sup>. 从图2(b)可知, (111)晶面在测量温度为1673, 1773和1873 K时最大发射电流密度分别为0.9, 5.43和

11.54 A/cm<sup>2</sup>, 该发射性能完全不同于(110)晶面, 这也充分验证了我们假设的发射性能“各向异性”的特点. 从图2(c)中(210)晶面的发射性能可看出, 当测量温度为1673, 1773和1873 K时最大发射电流密度分别达到了6.2, 28.0和50.4 A/cm<sup>2</sup>, 这些值要远高于其他晶面发射电流密度, 表明该晶面具有最低的表面逸出功. 图2(d)中(310)晶面最大发射电流密度也仅为20.8 A/cm<sup>2</sup>, 该值也低于(210)晶面发射电流密度. 对于阴极材料而言, 由于材料表面与外界(真空)之间存在一个势垒W<sub>a</sub>, 所以电子要从阴极材料逸出必须应具有的能量为W<sub>a</sub>. 在0 K时, 电子越过势垒逸出阴极材料时至少从外界吸收的能量为

$$\Phi = W_a - E_F, \quad (1)$$

式中Φ为阴极材料的逸出功, 单位为电子伏特(eV), 它表征要使处于绝对零度下的金属中具有最大能量的电子逸出金属表面所需要给予的能量; E<sub>F</sub>为费米能级. 根据(1)式可知, 对于单晶CeB<sub>6</sub>而

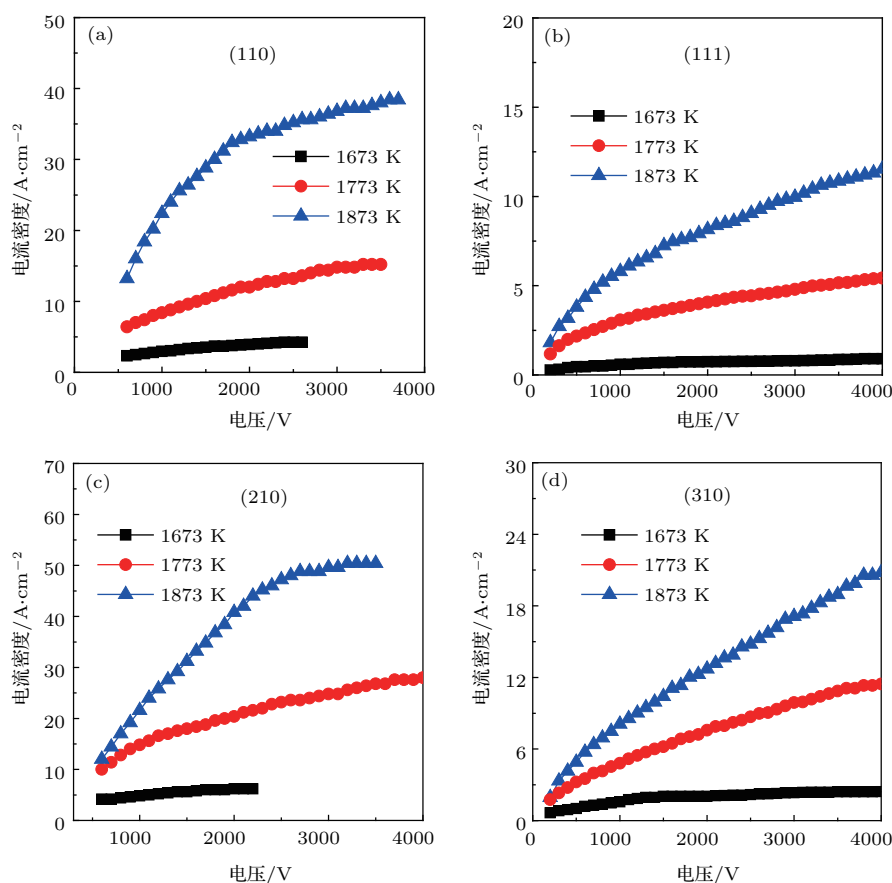


图2 (网刊彩色) 单晶CeB<sub>6</sub>不同晶面热发射电流密度 (a) (110); (b) (111); (c) (210); (d) (310)

Fig. 2. (color online) The thermionic emission current density of CeB<sub>6</sub> different crystal surfaces: (a) (110); (b) (111); (c) (210); (d) (310).



言每个晶面的费米能级是相等的. 因此, 影响每个晶面逸出功的是势垒高度. 结合图 1 (a)—(d) 发现, 由于沿着不同晶面方向 Ce 和 B 原子占位及结合能的不同, 会导致原子实对电子束缚能(势垒)的不同, 从而导致发射性能沿着不同晶面“各向异性”的特点.

根据热发射理论可知, 阴极材料发射电流密度与表面逸出功是密切相关的, 可用 Richardson-Dushman<sup>[13]</sup> 公式表示为

$$\lg(j_0/T^2) = \lg A - 5040 \frac{\varphi}{T}, \quad (2)$$

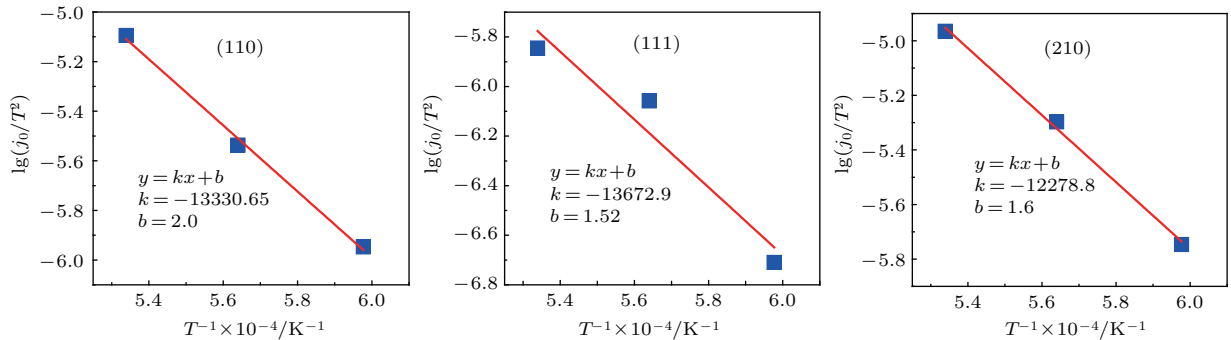


图3 (110), (111) 和 (210) 晶面发射性能 Richardson-Dushman 公式拟合曲线

Fig. 3. Richardson-Dushman plots of the electron emission characteristics of (110), (111) and (210) crystal surfaces.

表1 单晶 CeB<sub>6</sub> (110), (111) 和 (210) 晶面不同温度下的零场发射电流密度及理查森逸出功

Table 1. Zero-field emission current densities at different temperatures and work functions of (110), (111) and (210) crystal surfaces of CeB<sub>6</sub>.

T/K	(110)		(111)		(210)	
	$j_0/\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	$\varphi/\text{eV}$	$j_0/\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	$\varphi/\text{eV}$	$j_0/\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	$\varphi/\text{eV}$
1673	3.16		0.55		5.01	
1773	9.12		2.75		15.85	
1873	28.18		5.01		38.02	
		2.64		2.71		2.40

目前较为广泛使用的热场发射灯丝为单晶 LaB<sub>6</sub>, 已在扫描电子显微镜和透射电子显微镜中商业化. 其中(100)晶面在阴极温度为1700 K时, 发射电流密度为10 A/cm<sup>2</sup>左右. 当阴极温度为1923 K时最大发射电流密度可达到65 A/cm<sup>2</sup>以上<sup>[14]</sup>. 本文虽然没有测量1700 K下发射电流密度, 但相比1773 K下的发射电流密度可知单晶 CeB<sub>6</sub> (111) 和 (310) 晶面发射电流密度要低于 LaB<sub>6</sub> (100). 而单晶 CeB<sub>6</sub> (110) 晶面发射电流密度值152 A/cm<sup>2</sup>应接近或有可能低于 LaB<sub>6</sub> (100) 晶

面发射电流密度. 而(210)晶面在1773 K下最大发射电流密度值28.0 A/cm<sup>2</sup>要高于 LaB<sub>6</sub> (100) 发射电流密度. 然而我们在测量过程中发现, 阴极材料不仅一面发射电子, 而且侧面也存在电子发射现象, 这有可能会造成测量结果稍偏高. 但对定性研究单晶 CeB<sub>6</sub> 不同晶面发射性能影响不大. 在冷场发射电子显微镜中通常采用钨单晶作为电子枪的发射源, 钨的逸出功约为4.5 eV. 然而本文所制备的单晶 CeB<sub>6</sub> (210) 晶面逸出功为2.40 eV, 表现出了较低的逸出功及良好的发射性能. 并且根据我们

前期研究发现<sup>[15]</sup>, 通过电化学腐蚀方法可制备出高场发射因子的单晶稀土六硼化物场发射单尖. 因此从实际应用角度来看, 单晶 CeB<sub>6</sub> 同样具有良好的场发射性能.

### 3.3 单晶 CeB<sub>6</sub> 磁电阻率各向异性研究

电阻率是表征材料电输运性能的重要物理量, 它不仅与材料本身有关, 而且还与温度、压力和磁场等外界因素有关. 室温下 CeB<sub>6</sub> 显示金属性并且电阻率为 34.5 μΩ·cm (图 4(b)) 要高于 LaB<sub>6</sub> 的 15 μΩ·cm<sup>[14]</sup>, 因此它更适合制备“直热式”热阴极. 在低温区由于 Ce 原子 4f 轨道局域电子与传导电子之间的强相互作用, 使得局域磁性原子对传导电子散射的贡献更加明显, 反而电子与声子相互作用的散射明显减弱, 从而导致磁场与电阻率之间存在很多奇特的物理性能.

图 4(a) 给出了磁电阻测量示意图, 测量过程中电流方向平行于 [100] 方向, 磁场方向平行于 [001] 方向. 为了进一步研究磁场对电阻率的影响规律, 测量过程中将样品从 -8° 旋转至 170°, 这也等效于如图 4(a) 所示的外加磁场在垂直于电流的平面内旋转了 178°. 图 4(b) 给出了零磁下 CeB<sub>6</sub> 电阻率随温度的变化. 从图 4(b) 可看出, 当温度从 300 K 降至 125 K 时电阻率缓慢从 34.5 μΩ·cm 减小至 31.3 μΩ·cm, 这主要是由于随着温度的降低晶格热振动对电子散射减小导致的. 当温度从 125 K 降低至 1.8 K 过程中电阻率先是缓慢增加至 50 K 附近, 随后迅速增加至最大值 94.3 μΩ·cm, 表现出了典型的“近藤”效应. 从低温区放大图 4(c) 可清楚地看出, 在温度为  $T_Q = 3.3$  K 和  $T_N = 2.4$  K 时出现了两个明显相变点. 根据 Bogach 等<sup>[16]</sup> 和 Terzioglu 等<sup>[17]</sup> 磁电阻测量结果可知, 这两个相变点分别对应于由顺磁至反铁磁四极子相的转变温度 ( $T_Q$ ) 及反铁磁四极子相至反铁磁相的转变温度 ( $T_N$ ), 这也被大量的中子衍射和核磁共振等实验所证实<sup>[18-20]</sup>.

图 5(a) 给出了不同磁场下的电阻率随温度的变化. 从图 5(a) 可看出随着外加磁场增加, 转变温度  $T_Q$  从 3.3 K 增加至 5.95 K 而转变温度  $T_N$  却消失. 分析认为这主要是由于反铁磁四极子相和反铁磁相相互竞争的结果. 根据 Sera 等<sup>[21]</sup> 弹性中子衍射结果可知, 反铁磁四极子相是由 Ce 原子四重简并的  $T_8$  基态电子相互作用而产生的, 该相随着

外加磁场的增加会抑制反铁磁相而自身得到增强, 从而导致了转变温度  $T_Q$  的增加. 图 5(b) 给出了外加磁场为 6 T, 测量温度为 6 K 下未旋转和旋转 45° 后电阻率对比图, 相比发现这两组电阻率值没有完全重合, 表明沿着不同方向磁电阻率有所不同.

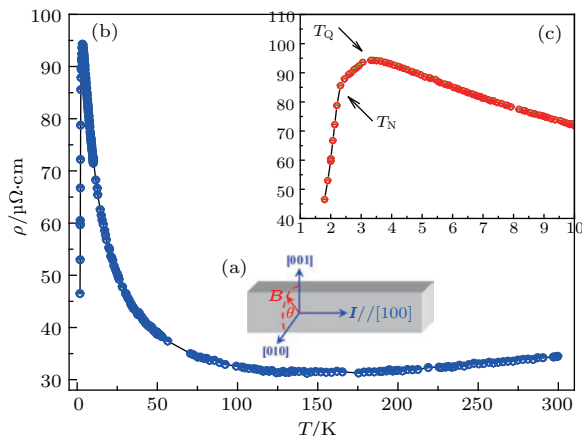


图 4 (网刊彩色) (a) 磁场中样品旋转过程中测量电阻率示意图; (b) 零磁场电阻率随温度的变化; (c) 低温区电阻率放大图

Fig. 4. (color online) (a) Schematic of magnetoresistivity measurement at rotating the sample; (b) temperature dependence of resistivity under zero magnetic field; (c) the magnification image of resistivity at low temperature region.

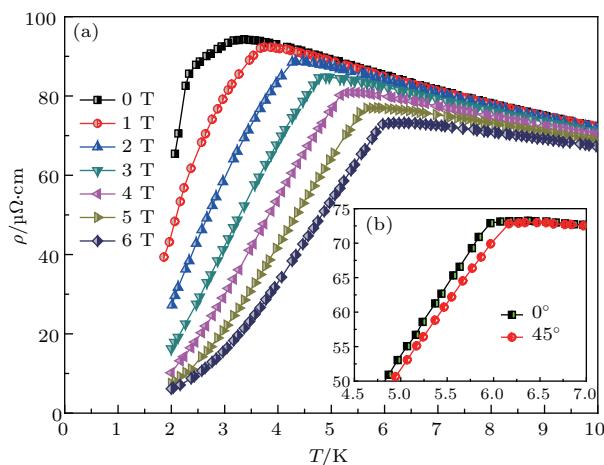


图 5 (网刊彩色) (a) 不同磁场下电阻率随温度的变化; (b) 磁场为 6 T, 温度为 6 K 下, 样品旋转角度为 0° 和 45° 的电阻率随温度的变化

Fig. 5. (color online) (a) The temperature dependence of electrical resistivity under different magnetic fields; (b) the temperature dependence of electrical resistivity with rotation angle of 0° and 45° under magnetic field of 6 T at 6 K.

图 6 为外加磁场为 6 T, 测量温度为 6 K 下的 CeB<sub>6</sub> 电阻率随样品旋转角度的变化. 从图 6 可看出, 当转动角度从负 8° 增加至 170° 时电阻率按照

正弦函数周期变化. 当晶体从[001]方向旋转至[011]方向时振幅从 $73 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ 变化至 $69 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ , 表明电阻率在磁场中沿不同方向具有“各向异性”的特点. 通常而言, 磁电阻是指电子在沿着费米面输运过程中由于受到磁场的洛伦兹力而改变运动方向所致. 在输运过程中电子不仅受到洛伦兹力的作用而且受到电场力 $qE$ 的综合作用. 当磁场方向为[001]时, 磁场与速度方向垂直, 洛伦兹力为最大, 表明对应磁电阻为最大(对应于图6最大值). 当磁场转至[011]方向时, 磁场与电子速度方向夹角减小, 会导致洛伦兹力也减小, 从而使得电阻率降低(对应于图6最小值). 因此, 单晶 $\text{CeB}_6$ 磁电阻的“各向异性”归功于电输运过程中磁场方向的改变导致了电子受到的洛伦兹力的改变.

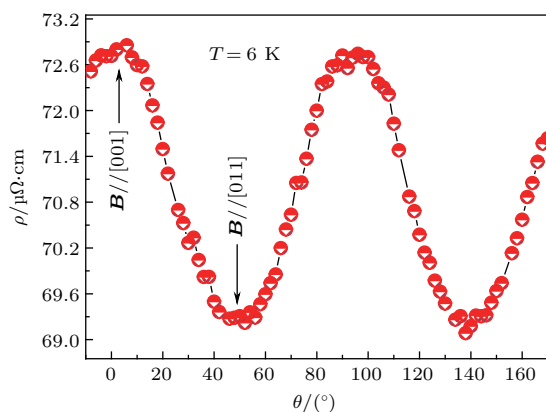


图6 (网刊彩色) 外加磁场为6 T, 温度为6 K时电阻率随样品旋转角度的变化

Fig. 6. (color online) Angular dependence of the  $\text{CeB}_6$  electrical resistivity under magnetic field of 6 T and the temperature of 6 K.

## 4 结 论

采用区域熔炼法制备了高质量、大尺寸的 $\text{CeB}_6$ 单晶体, 结合劳厄定向法对(110), (111), (210)和(310)晶面进行了定向及切割. 在此基础上系统研究了不同晶面的发射电流密度及磁场对电阻率的影响规律. 结果表明, 当测量温度为1873 K时(110), (111), (210)和(310)晶面的最大发射电流密度分别为38.4, 11.54, 50.4和20.8  $\text{A}/\text{cm}^2$ , 表现出了发射性能的各向异性, 其中(210)晶面具有最低的逸出功约2.4 eV. 从实际应用角度来看, 单晶 $\text{CeB}_6$ 有望替代商业化的钨单晶电子发射源成为新一代的场发射阴极材料. 磁电阻测量结果表明, 随

着样品转动角度的增加磁电阻从 $73 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ 减小至 $69 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ , 表明磁电阻沿不同方向同样具有“各向异性”的特点.

## 参考文献

- [1] Mignot J M, André G, Robert J, Sera M, Iga F 2008 *Phys. Rev. B* **78** 014415
- [2] Tanaka Y, Staub U, Narumi Y, Katsumata K, Scagnoli V, Shimomura S, Tabata Y, Onuki Y 2004 *Physica B* **345** 78
- [3] Feyerherm R, Amato A, Gyax F N, Schenck A, Onuki Y, Sato N 1995 *J. Magn. Magn. Mater.* **140–144** 1175
- [4] Alistair S C, Gerd F, Dmytro S I 2016 *Rep. Prog. Phys.* **79** 066502
- [5] Mignot J M, Andre G, Sera M, Iga F 2007 *J. Magn. Magn. Mater.* **310** 738
- [6] Zhao Y M, Ouyang L S, Zou C Y, Xu J Q, Dong Y Z, Fan Q H 2010 *J. Rare Earth.* **28** 424
- [7] Daniel V, Sergiy P, Varvara P, Volodymyr F 2009 *IEEE Trans. Electron Dev.* **56** 812
- [8] Gu Z Z, Xi X L, Yang J C, Xu J J 2012 *Fuel* **95** 648
- [9] Zhou S L, Zhang J X, Liu D M, Bao L H 2009 *J. Inorg. Mater.* **24** 793 (in Chinese) [周身林, 张久兴, 刘丹敏, 包黎红 2009 无机材料学报 **24** 793]
- [10] Bao L H, Zhang J X, Zhou S L, Zhang N, Xu H 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 088101
- [11] Mahmoud B, Masayuki K, Toshiteru K, Hideaki O 2016 *IEEE Trans. Electron Dev.* **63** 1326
- [12] Nirpendra S, Sapan M S, Tashi N, Auluck S 2007 *J. Phys.: Condens. Matter* **19** 346226
- [13] Zhou S L, Zhang J X, Bao L H, Yu X G, Hu Q L, Hu D Q 2014 *J. Alloys Compd.* **611** 130
- [14] Lin Z L 1997 *High Power Laser Part Beams.* **9** 591 (in Chinese) [林祖伦 1997 强激光与粒子束 **9** 591]
- [15] Bao L H, Tegus O, Zhang J X, Zhang X, Huang Y K 2013 *J. Alloys Compd.* **558** 39
- [16] Terzioglu C, Ozturk O, Kilic A, Goodrich R G, Fisk Z 2006 *J. Magn. Magn. Mater.* **298** 33
- [17] Bogach A V, Glushkov V V, Demishev S V, Samarin N A, Paderno Y B, Dukhnenko A V, Shitsevalova N Y, Sluchanko N E 2006 *J. Solid State Chem.* **179** 2819
- [18] Mizuno K, Magishi K I, Kawakami M, Saito T, Koyama K, Kunii S 2003 *Physica B* **329–333** 597
- [19] Nakao H, Magishi K, Wakabayashi Y, Murakami Y, Koyama K, Hirota K, Endoh Y, Kunii S 2001 *J. Phys. Soc. Jpn.* **70** 1857
- [20] Effantin J M, Mingod J R, Burlet P, Bartholin H, Kunii S, Kasuya T 1985 *J. Magn. Magn. Mater.* **47–48** 145
- [21] Sera M, Ichikawa H, Yokoo T, Akimitsu J, Nishi M, Kakurai K, Kunii S 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 1578



# Anisotropy study on thermionic emission and magnetoresistivity of single crystal CeB<sub>6</sub>\*

Bao Li-Hong<sup>1)2)†</sup> Tao Ru-Yu<sup>1)</sup> O. Tegus<sup>1)</sup> Huang Ying-Kai<sup>2)</sup> Leng Hua-Qian<sup>2)</sup>  
Anne de Visser<sup>2)</sup>

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

2) (Van der Waals-Zeeman Institute, University of Amsterdam, Science Park 904, 1098 XH Amsterdam, The Netherlands)

( Received 14 April 2017; revised manuscript received 25 June 2017 )

## Abstract

Cerium hexaboride (CeB<sub>6</sub>) as a heavy fermion compound displays a number of interesting low-temperature physical properties such as dense Kondo behavior and a complex magnetic phase diagram due to the interaction between itinerant and local electrons. Recently, the electron emission property of CeB<sub>6</sub> has received much attention because it has potential applications in replacing the commercial LaB<sub>6</sub> cathode and serving as new-generation thermal cathodes. In addition, by comparison with other metal cathodes, it also possesses some advantages, such as a low work function, low volatility, high brightness, thermal stability and high mechanical strength. However, so far the thermionic emission properties of CeB<sub>6</sub> single crystal surfaces except for the (100) surfaces have been rarely reported. Whether the different crystal surfaces of CeB<sub>6</sub> contribute to the various interesting emission properties is main research purpose of the present work. In this paper, the (110), (111), (210) and (310) crystal surfaces of single crystal CeB<sub>6</sub> are determined by the X-ray Laue diffraction method, and their thermionic emission current densities are measured at different temperatures and applied voltages. As a result, the maximum emission current densities of the (110), (111), (210) and (310) crystal surfaces at 1873 K are 38.4, 11.54, 50.4 and 20.8 A/cm<sup>2</sup>, respectively. When their cathode temperatures are all 1773 K, their maximum emission current densities are 15.2, 5.43, 28.0 and 11.44 A/cm<sup>2</sup>. In addition, when the cathode temperature decreases to 1673 K, their maximum emission current densities are 4.24, 0.9, 6.2 and 2.43 A/cm<sup>2</sup>. It means that the thermionic emissions are strongly anisotropic for the different crystal surfaces. In general, the maximum emission current density of (100) crystal surface of LaB<sub>6</sub> single crystal is about 10 A/cm<sup>2</sup> at 1700 K. By comparing the emission current density of CeB<sub>6</sub> single crystal at 1773 K with that of LaB<sub>6</sub> at 1700 K, it is found that the emission properties of (210) crystal surface are maybe close to those of LaB<sub>6</sub>. The work function values of the (110), (111), (210) crystal surfaces calculated by the Richardson-Dushman formula are 2.64, 2.71 and 2.40 eV, respectively. Among these, the (210) crystal surface possesses the smallest value of the work function, which is hopeful for being used as an electron source of scanning electron microscopy. Zero-field magnetoresistivity measurements confirm the transition temperatures of  $T_Q = 3.3$  K and  $T_N = 2.4$  K. Field-angle dependent magnetoresistivity measurements show that the electrical resistivity varies between 69 μΩ·cm and 73 μΩ·cm when the crystal rotates from the [001] to the [011] direction. This indicates that the electrical resistivity in a magnetic field is also anisotropic.

**Keywords:** CeB<sub>6</sub>, work function, magnetoresistance

**PACS:** 61.66.Fn, 65.40.gh, 79.40.+z

**DOI:** 10.7498/aps.66.186102

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51662034) and the Program for Young Talents of Science and Technology in Universities of Inner Mongolia, China (Grant No. NJYT-14-B03).

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