

文章编号: 1007-4627(2016)03-0365-05

$^{129}\text{Xe}^{q+}$ 轰击 N 型和 P 型 Si 表面时的电子发射产额研究

曾利霞^{1,2}, 徐忠锋², 赵永涛^{2,3}, 吴帆², 刘学良², 程锐³,
周贤明³, 雷瑜³, 刘世东³, 张艳宁³

(1. 咸阳师范学院与中国科学院近代物理研究所联合共建:离子束与光物理实验室, 陕西 咸阳 712000;
2. 西安交通大学激光和粒子束科学与技术研究所, 西安 710049;
3. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 在兰州重离子加速器国家实验室测量了1.8 MeV Xe^{q+} 离子分别轰击N型和P型Si两种靶材表面时的电子发射产额。实验中, 通过改变入射离子的电荷态, 研究了入射离子势能沉积对两种靶材表面电子发射产额的贡献。结果发现同一离子入射时, N型Si表面的电子发射产额高出P型Si表面的电子发射产额约12.5%; 对于具有相同入射动能的 Xe^{q+} 离子, 两种靶材表面的电子发射产额均随着入射离子势能的增加而线性增加。此外, 还测量了3.4 MeV Xe^{q+} 离子分别轰击以上两种靶材时的电子发射产额, 得到了类似的结果。本文利用功函数分别从动能电子发射和势能电子发射两个角度对实验结果进行了分析讨论。

关键词: 高电荷态离子; 电子发射产额; 阈值速度; 功函数

中图分类号: O562.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.03.365

1 引言

由于在原子物理、固体物理、等离子体物理等领域的应用需要, 高电荷态离子(HCIs)与固体表面相互作用的研究成为近年来广受关注的研究热点^[1-6]。二者相互作用过程中的电子发射研究不仅可以更加深入地了解带电粒子与物质的相互作用、验证电子发射理论, 而且可以应用到原子物理和核物理等相关领域, 如固体表面分析、粒子探测器、离子在固体中的损伤研究以及径迹蚀刻等^[7-10]。统计电子发射产额是研究电子发射的一个重要途径, 其值为每个入射离子所引起的电子发射数目的统计平均值。到目前为止, 大量的工作研究了入射粒子参数(如入射角度、动能、势能、原子序数等)以及靶材料参数(如靶原子序数 Z_T 等)对HCIs与靶材表面作用过程中的电子发射产额的影响^[11-13]。

硅(Si)这作为半导体材料, 在航空航天、电子电气、现代通信、宇宙航行、军事武器、能源开发等领域中有着广泛的应用, 因此关于其表面的电子发射研究有着重要的实际意义^[12-17]。文献[12]中, 用低能

的 He^{2+} , O^{2+} , Ne^{2+} 离子束轰击Si表面, 结果发现反冲原子对电子产额的贡献随着入射离子能量的降低而显著增大, 这正是实验结果有别于高能离子入射的主要原因, 在W靶的表面的电子发射测量也得到了一致的结果^[10]。文献[13-14]中报道了不同的高电荷态离子轰击Si表面, 成功实现了将动能电子发射产额和势能电子发射产额的分离, 并发现在相同入射速度下, 电荷态高的离子引起的动能产额反而小, 即电荷态对动能电子发射有抑制作用。文献[15]中测量了 $^{40}\text{Ar}^{q+}$ 轰击Si靶表面时的电子发射产额, 分别研究了入射离子在靶材表面的势能沉积和电子能损这两个因素对靶材表面的电子发射产额的影响。文献[16]中测量了 $^{207}\text{Pb}^{q+}$ 入射到Si靶表面时的电子发射产额, 发现入射离子的电荷态、入射角度和入射能量都与作用过程中的电子发射产额有很强的关联。以上文献中分别讨论了入射离子能量、入射角度、入射离子种类、电子能损、势能沉积等因素对Si表面电子发射产额的影响, 但是到目前为止, 尚未看到关于靶材的参杂情况对电子发射产额影响的相关报道, 本文的工作正是针对这一点展开的。

收稿日期: 2016-05-29; 修改日期: 2016-08-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11605147, 11075125, 11375138, 11505248); 高等学校博士学科点专项科研基金(2013020111-0066); 陕西省教育厅科研计划资助项目(16JK1824); 咸阳师范学院专项科研项目(12XSYK018); 咸阳师范学院教学改革研究项目(201402011)

作者简介: 曾利霞(1982-), 女, 山西大同人, 讲师, 硕士, 从事原子与分子物理研究; E-mail: zenglixia1982@126.com

通信作者: 徐忠锋, E-mail: zhfxu@mail.xjtu.edu.cn.

本文利用 Xe^{q+} 离子分别轰击 N 型和 P 型的 Si 靶表面, 通过改变入射离子的电荷态, 测量不同电荷态的 Xe^{q+} 离子与两种靶材表面作用过程中电子发射产额, 利用功函数对实验结果进行分析讨论, 从而了解靶材参杂情况对电子发射产额的影响。

2 实验装置和测量方法

本实验是在兰州重离子加速器国家实验室 320 kV 高电荷态离子综合研究平台上完成的, 这里完成过许多关于 HCl_s 与固体表面相互作用的实验^[3-6,12-17]。高电荷态离子 $^{129}Xe^{q+}$ 由 14.5 GHz 电子回旋共振离子源 (ECRIS) 提供^[18], 束流进入靶室后经过准直片 (Rejection aperture) 和金属罩 (Cage) 上的孔 (孔径分别为 3 和 5 mm), 最后垂直入射到靶上, 实验装置如图 1 所示。实验前, 通过调节靶室前的两个光栏使得束斑足够小, 使束流在作用于靶材表面之前不与准直片和金属罩发生碰撞, 这时准直片和金属罩上的电流均为零而靶上的电流达到最大。在实验过程中, 束流强度为十几到几百 nA, 束斑直径控制在 3 mm 以内, 靶室真空度保持在 10^{-7} Pa。实验选用的 P 型和 N 型 Si 靶厚度均为 400 μm , 表面积为 15 mm \times 15 mm。

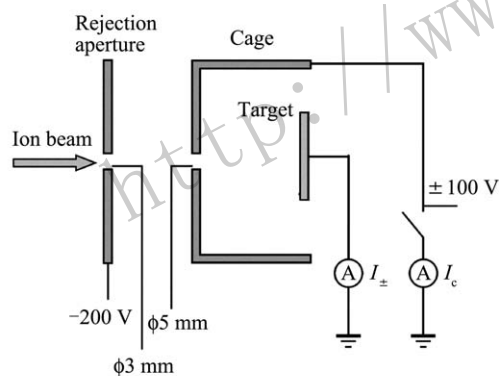


图 1 高电荷态离子与表面作用时电子发射产额实验测量装置示意图

实验中在金属罩上施加 ± 100 V 的偏压实现收集或者抑制靶上被激发的二次电子, 通过测量靶电流来确定电子发射产额 γ , 具体的实验原理可参考文献^[10, 15-16]。当金属罩上加 -100 V 电压时, 几乎所有从靶材表面发射出来的电子都被所加的负电压抑制而无法到达金属罩, 这是因为离子与固体表面作用时, 发射电子的能量高于 100 eV 的概率很低, 即能量大于 100 eV 的电子对总的电子发射产额影响甚微^[15], 此时靶电流 I_- 近似等于离子束电流 I_i ; 当金属罩上加 $+100$ V 电压时, 由于正电压的吸引, 金属罩几乎收集所有发射电子, 此时

靶电流 I_+ 近似等于入射离子束电流 I_i 与二次电子引起的电流 I_e 之和。电子发射产额可以由下式给出:

$$\gamma = \frac{I_+ - I_-}{I_-} q. \quad (1)$$

实验结果的误差可以根据式(1)和误差传递公式给出

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{\Delta I_+}{I_+} + \frac{\Delta I_-}{I_-}. \quad (2)$$

实验前, 利用酒精和丙酮对固体样品表面进行了净化处理。实验过程中, 样品表面吸附的杂质可以被束流离子自动清除。

3 实验结果与讨论

在实验正式测量开始前, 我们试测量了不同束流强度下的电子发射产额, 以确保测量装置对于同种入射离子与靶材组合能够得到稳定的电子产额值。试测量结果显示, 对于同种的入射离子与靶材组合, 当束流在几十到几百 nA 范围内变化时, 得到的电子发射产额在实验误差范围内是一个常量, 与前人的实验结果一致^[14-15]。

我们观测了入射能量为 1.8 MeV 的 $^{129}Xe^{q+}$ ($q = 13, 15, 17, 19, 23$) 离子分别与 P 型和 N 型 Si 表面作用的电子发射产额, 结果如图 2 所示。图中方形的实点是 N 型 Si 表面的电子发射产额, 圆形实点是 P 型 Si 表面的电子发射产额。实验发现, N 型 Si 表面的二次电子发射产额明显高于 P 型 Si 表面的二次电子发射产额; 对于具有相同入射动能的离子与靶材表面作用时, 电子发射产额随着入射离子电荷态升高而明显增加。结果表明电子发射产额与炮弹离子势能是直接相关的, 为了更好地研究二者的关系, 我们计算了入射离子的势能, 给出了 1.8 MeV $^{129}Xe^{q+}$ 分别轰击 N 型和 P 型 Si 表面时电子发射产额与入射离子势能的关系, 并对结果进行了线性拟合 (见图 3 和图 4), 拟合方程分别如式(3)和式(4)所示

$$\gamma = 14.66 + 6.04 \times E_P [\text{keV}], \quad (3)$$

$$\gamma = 14.26 + 5.37 \times E_P [\text{keV}], \quad (4)$$

对式(3)和式(4)可以理解为, 第一项(截距)是电子能损引起的电子发射部分, 之前的研究显示: 随着入射离子初动能的增加, 动能电子发射产额(第一项)逐次增加; 而第二项是势能沉积引起的电子发射部分, 可以看出势能沉积引起的电子发射产额与入射离子的势能成正比。入射离子势能每增加 1 keV, N 型和 P 型 Si 表面的电子发射产额分别增加 6.04 e^-/ion 和 5.37 e^-/ion , 即

相同的入射离子轰击下, N 型 Si 表面的电子发射产额要高出 P 型 Si 表面的电子发射产额约 12.5%。此外, 我们还测量了 3.4 MeV Xe^{q+} 离子分别轰击以上两种靶材表面时的电子发射产额, 得到了与图 2 类似的结果, 详见图 5。

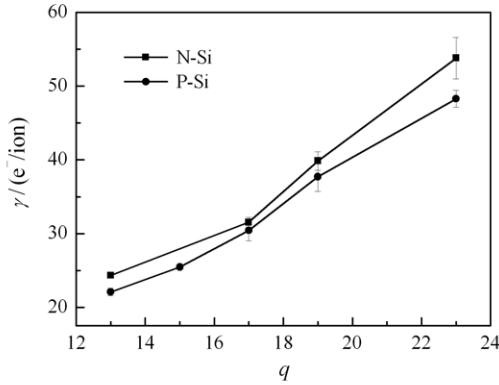


图 2 1.8 MeV $^{129}\text{Xe}^{q+}$ 轰击 N 型和 P 型 Si 表面时电子发射产额与入射离子电荷态的关系

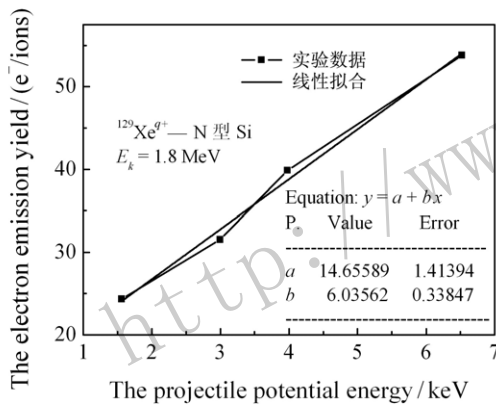


图 3 1.8 MeV $^{129}\text{Xe}^{q+}$ 轰击 N 型 Si 表面时电子发射产额与入射离子势能的关系

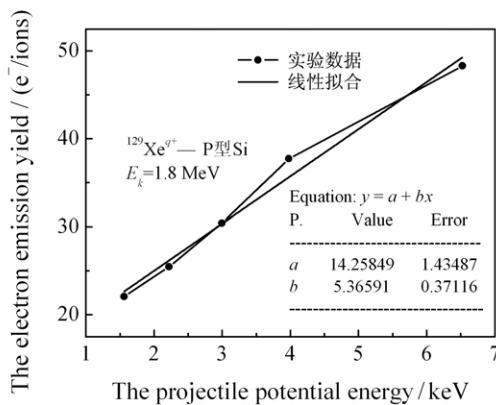


图 4 1.8 MeV $^{129}\text{Xe}^{q+}$ 轰击 P 型 Si 表面时电子发射产额与入射离子势能的关系

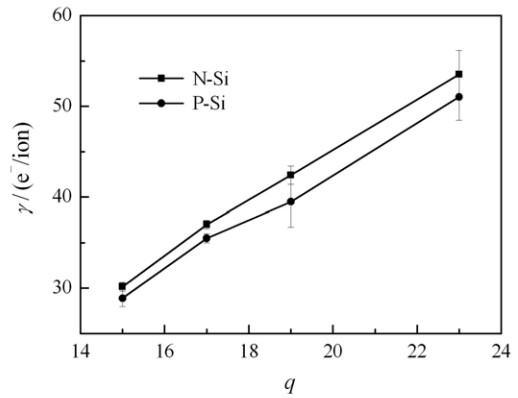


图 5 3.4 MeV $^{129}\text{Xe}^{q+}$ 轰击 N 型和 P 型 Si 表面时电子发射产额与入射离子电荷态的关系

按照电子发射中电子被激发的能量来源, 可以将电子发射过程分为动能电子发射 (Kinetic Electron Emission) 和势能电子发射 (Potential Electron Emission), 相应过程导致的电子发射产额被称为动能电子产额 γ_{KE} 及势能电子产额 γ_{PE} [19]。研究显示, 离子入射速度低于动能阈值速度 v_{th} 时, γ_{KE} 几乎为零; 而当离子入射速度高于动能阈值速度 v_{th} 时, γ_{KE} 随着离子速度线性增加, 形式如下

$$\gamma_{\text{KE}} = k(v - v_{\text{th}})\Theta(v - v_{\text{th}}), \quad (5)$$

式中 k 为比例系数, $\Theta(v - v_{\text{th}})$ 是阶越函数, 有

$$\Theta(v - v_{\text{th}}) = \begin{cases} 0, & v < v_{\text{th}} \\ 1, & v \geq v_{\text{th}} \end{cases}. \quad (6)$$

Baragiola 等 [20] 提出了一个被后来的研究者广范使用的计算靶材料动能电子发射阈值的公式, 它与材料的功函数 W_{ϕ} 和表面费米速度 v_{F} 有关

$$v_{\text{th}} = \frac{v_{\text{F}}}{2} \left[\left(1 + \frac{W_{\phi}}{E_{\text{F}}} \right)^{1/2} - 1 \right], \quad (7)$$

其中: $E_{\text{F}} = m_e v_{\text{F}}^2 / 2$, 为材料表面费米能, m_e 为电子质量。通过查参数并计算可得

$$v_{\text{F}}^{\text{Si}} = 2.09 \times 10^6 \text{ m/s}, \quad (8)$$

$$E_{\text{F}}^{\text{Si}} = 12.43 \text{ eV}, \quad (9)$$

由文献 [21] 可知, N 型和 P 型 Si 的功函数分别为

$$W_{\phi}^{\text{Si(N)}} = 4.85 \text{ eV}, \quad (10)$$

$$W_{\phi}^{\text{Si(P)}} = 4.91 \text{ eV}, \quad (11)$$

将式(8)~(11)代入式(7)得到 N 型和 P 型 Si 的动能阈值速度分别为

$$v_{\text{th}}^{\text{Si(N)}} = 1.87 \times 10^5 \text{ m/s}, \quad (12)$$

$$v_{\text{th}}^{\text{Si(P)}} = 1.89 \times 10^5 \text{ m/s}, \quad (13)$$

而入射离子 Xe^{q+} 的速度为 $1.64 \times 10^6 \text{ m/s}$, 大于式(12)和式(13)给出的 N 型和 P 型 Si 靶中的动能电子发射阈值, 因此实验观测到的产额一定包含动能电子发射产额。此时的动能电子发射产额表达式(5)可以表示为

$$\gamma_{\text{KE}} = k(v - v_{\text{th}}). \quad (14)$$

比例系数 k 决定于入射离子的种类及电荷态。电荷态越高, k 值越小^[13,19], 但变化不明显, 本实验中可将其近似看作常数。由式(14)可知, 对于同一入射离子, 靶材 v_{th} 值越高, 其表面的二次电子发射产额越低。因此有 N 型 Si 的动能电子发射产额要略高于 P 型 Si 的动能电子发射产额, 即式(3)的截距略高于式(4)。

势能电子发射主要是依靠入射的带电离子中和或退激时释放出的势能使表面的电子激发并发射的过程, 是由入射离子的势能沉积引起的, 发生在靶材料的表面以上和表面, 它对入射离子的动能没有阈值要求, 但要求携带的势能大于表面功函数的 2 倍。一般而言, 势能电子发射是在离子与表面碰撞前完成的。由于势能电子发射最小需要 W_{ϕ} 两倍大小的势能, 通过势能发射的最大电子数 n_{max} 可近似由下式确定^[7]

$$n_{\text{max}} = \frac{E_{\text{pot}}}{2W_{\phi}}, \quad (15)$$

式中 E_{pot} 为入射离子所带的势能。因为 $W_{\phi}^{\text{Si(N)}} < W_{\phi}^{\text{Si(P)}}$, 由式(15)可知 N 型 Si 表面比 P 型 Si 表面的势能发射的最大电子数要高些。

综上所述, 我们分别从动能电子发射产额和势能电子发射产额进行分析, 通过引入了功函数, 很好地解释了实验结果。此外还可以从参杂的角度简单地理解为, 在 N 型 Si 中电子为多子, 而在 P 型 Si 中空穴为多子, 因而 N 型 Si 中的电子获得入射离子传递给的能量机会更多, 这些电子克服材料表面势垒成为二次电子的概率就大, 也即相应的电子发射产额就相对高些。

4 结论

本文利用 1.8 MeV Xe^{q+} 轰击不同类型的 Si 表面, 测量了电子发射产额, 发现 N 型 Si 的电子发射产额明显高于 P 型 Si, 而 3.4 MeV Xe^{q+} 轰击这两种靶材也得到了类似的实验结果。我们分析, 造成这一结果的原因

可能是功函数的不同, 功函数会影响动能电子发射产额, 也会影响势能电子发射产额。此外还从参杂的角度对实验结果进行了分析。

致谢 本实验是在兰州重离子加速器国家实验室等离子体小组的成员和 320 kV 实验平台的研究人员的鼎力相助下完成的, 在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] HOFFMANN D H, BLAZEVIC A, KOROSTIY S, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2007, **577**: 8.
- [2] YANG Zhihu, SONG Zhangyong, CUI Ying, *et al.* Acta Phys Sin, 2008, **57**: 803. (in Chinese)
(杨治虎, 宋张勇, 崔莹, 等. 物理学报, 2008, **57**: 803.)
- [3] WANG X, ZHAO Y T, CHENG R, *et al.* Phys Lett A, 2012, **376**: 1197.
- [4] ZHANG Xiaolan, MEI Cexiang, ZHAO Yongtao, *et al.* Acta Phys Sin, 2013, **62**: 173401. (in Chinese)
(张小安, 梅策香, 赵永涛, 等. 物理学报, 2013, **62**: 173401.)
- [5] ZHANG Ying, ZHANG Xiaolan, XU Zhongfeng, *et al.* Nuclear Physics Review, 2010, **27**: 357. (in Chinese)
(张颖, 张小安, 徐忠锋, 等. 原子核物理评论, 2010, **27**: 357.)
- [6] ZHOU X M, CHENG R, LEI Y, *et al.* Nucl Instr Meth B, 2015, **342**: 133.
- [7] STOCKL J, SUTA T, DITROI F, *et al.* Phys Rev Lett, 2004, **93**: 263201.
- [8] LANG Changhui, ZHANG Xiaolan, XIAO Guoqing. Nuclear Physics Review, 2007, **24**(2): 214. (in Chinese)
(梁昌慧, 张小安, 肖国青. 原子核物理评论, 2007, **24**(2): 214.)
- [9] BAJALES N, CRISTINA L, MENDOZA S, *et al.* Phys Rev Lett, 2008, **100**: 227604.
- [10] ZENG L X, XU Z F, ZHAO Y T, *et al.* Laser Part Beams, 2012, **30**: 707.
- [11] LANG Changhui, ZHANG Xiaolan, LI Yaozong. Nuclear Physics Review, 2013, **30**(1): 63. (in Chinese)
(梁昌慧, 张小安, 李耀宗. 原子核物理评论, 2013, **30**(1): 63.)
- [12] WANG Jianguo, XU Zhongfeng, ZHAO Yongtao, *et al.* Acta Phys Sin, 2010, **59**: 7803. (in Chinese)
(王建国, 徐忠锋, 赵永涛, 等. 物理学报, 2010, **59**: 7803.)
- [13] XU Z F, ZENG L X, ZHAO Y T, *et al.* Laser Part Beams, 2012, **30**: 319.
- [14] WANG Y Y, ZHAO Y T, QAYYUM A, *et al.* Nucl Instr Meth B, 2007, **265**: 474.
- [15] ZHAO Yongtao, XIAO Guoqing, XU Zhongfeng, *et al.* Acta Phys Sin, 2007, **56**: 5734. (in Chinese)
(赵永涛, 肖国青, 徐忠锋, 等. 物理学报, 2007, **56**: 5734.)
- [16] WANG Yuyu, ZHAO Yongtao, XIAO Guoqing, *et al.* Acta Phys Sin, 2006, **55**: 0673. (in Chinese)
(王瑜玉, 赵永涛, 肖国青, 等. 物理学报, 2006, **55**: 0673.)
- [17] ZHOU X M, ZHAO Y T, CHENG R, *et al.* Nucl Instr Meth B, 2013, **299**: 61.
- [18] ZHAO Y T, XIAO G Q, XU H S, *et al.* Nucl Instr Meth B, 2009, **267**: 163.

- [19] VANA M, KURZ H, WINTER H P, *et al.* Nucl Instr Meth B, 1995, **100**: 402.
- [20] BARAGIOLA R A, ALONSO E V, FLORIO A O. Phys Rev B, 1979, **19**: 121.
- [21] STOCKER Horst (Ttranslate by WU Xizhen, LI Zhuxia, CHEN Shiping). Physics Handbook[M]. Beijing: Peking University Press, 2003: 974. (in Chinese)
(斯托克H 著(吴锡真, 李祝霞, 陈师平, 译.). 物理手册[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 974.)

Secondary Electron Emission from N-type and P-type Si Induced by $^{129}\text{Xe}^{q+}$

ZENG Lixia^{1,2}, XU Zhongfeng², ZHAO Yongtao^{2,3}, WU Fan², LIU Xueliang², CHENG Rui³,
ZHOU Xianming³, LEI Yu³, LIU Shidong³, ZHANG Yanning³

(1. Ion beam & Optical Physical joint Laboratory of Xianyang Normal University and Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Xianyang 712000, Shanxi, China;

2. Institute of Science and Technology for Laser and Particle Beams Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The electron emissions from N-type Si and P-type Si induced by 1.8 MeV $^{129}\text{Xe}^{q+}$ are measured in the National Laboratory of Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, The contribution to electron emission yield from potential energy of incident ions is studied through changing the charge state of incident ions. The results show that for the same incident ion, electron emission yield of N type Si surface is higher than that of P-type Si surface about 12.5%. For incident ions with the same kinetic energy, both electron emission yields of two targets increase linearly with incident ion energy. In addition, the electron emissions induced by 3.4 MeV $^{129}\text{Xe}^{q+}$ from N-type Si and P-type Si mentioned above are measured, which give similar results. The experimental results are analyzed and discussed using work function from two angles of the kinetic electron emission and the potential energy electron emission.

Key words: highly charged ions; electron emission yield; threshold velocity; work function

Received date: 29 May 2016; **Revised date:** 3 Aug. 2016

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11605147, 11075125, 11375138, 11505248); Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20130201110066); Scientific Research Program Funded by Shaanxi Provincial Education Department(16JK1824); Scientific Research Foundation of Xianyang Normal University(12XSYK018); Teaching Reform Research Program of Xianyang Normal University(201402011)

Corresponding author: XU Zhongfeng, E-mail: zhfxu@mail.xjtu.edu.cn.