

标定脉冲星导航探测器的荧光X射线光源

代锦飞 赵宝升 盛立志 周雁楠 陈琛 宋娟 刘永安 李林森

Fluorescence X-ray source used for calibrating the detector of X-ray navigation

Dai Jin-Fei Zhao Bao-Sheng Sheng Li-Zhi Zhou Yan-Nan Chen Chen Song Juan Liu Yong-An Li Lin-Sen

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 149701 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.149701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.149701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种脉冲星信号模拟新方法

[A new method for the pulsar signals simulation](#)

物理学报.2014, 63(21): 219701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.219701>

X射线脉冲轮廓稳定性对导航精度的影响

[Effect of stability of X-ray pulsar profiles on range measurement accuracy in X-ray pulsar navigation](#)

物理学报.2014, 63(6): 069701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.069701>

噪声模态单元预判的经验模态分解脉冲星信号消噪

[Empirical mode decomposition pulsar signal denoising method based on predicting of noise mode cell](#)

物理学报.2013, 62(20): 209701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.209701>

基于S变换的脉冲星辐射脉冲信号检测

[Pulsar signal detection based on S-transform](#)

物理学报.2013, 62(13): 139702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.139702>

X射线脉冲星自主导航的观测方程

[Timing equation in X-ray pulsar autonomous navigation](#)

物理学报.2013, 62(13): 139701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.139701>

标定脉冲星导航探测器的荧光X射线光源*

代锦飞¹⁾²⁾ 赵宝升¹⁾ 盛立志^{1)†} 周雁楠¹⁾ 陈琛¹⁾ 宋娟¹⁾²⁾
刘永安¹⁾ 李林森¹⁾²⁾

1)(中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

2)(中国科学院大学, 北京 100084)

(2014年12月9日收到; 2015年2月17日收到修改稿)

为标定X射线脉冲星导航用探测器, 设计了一种荧光X射线源, 该射线源的工作原理是用X射线管的出射线轰击特定荧光靶材, 从而获得能量一定的荧光X射线, 并以此作为标定探测器的荧光X射线光源. 采用硅漂移半导体探测器在大气环境下测试了按上述原理搭建的荧光X射线光源的能谱分布和光子流量, 从光子流量入手推算了该荧光X射线光源用于真空系统中对探测器进行标定的可行性. 研制出了荧光X射线光源样机, 并在真空系统中对荧光X射线光源样机光子流量做了测试. 在探测距离 $D_x = 300$ cm, X射线管管流 $I_a = 200$ μ A时, 所测得的荧光X射线光源光子流量可达 19.57 ph/s@4.51 keV, 25.22 ph/s@5.41 keV, 33.27 ph/s@8.05 keV, 确认了所提方法的可行性, 获得了标定探测器的荧光X射线光源.

关键词: 脉冲星导航, 荧光X射线光源, 探测器标定

PACS: 97.60.Gb, 07.85.Fv, 07.05.Fb

DOI: 10.7498/aps.64.149701

1 引言

近年来, X射线脉冲星自主导航备受研究者的关注^[1-5], X射线探测器作为整个导航系统的关键器件之一, 对其开展研究至关重要. X射线探测器的研究应用已有几十年之久, 但是用于X射线脉冲星导航的探测器还处于探索研究阶段^[6-8]. 对此类探测器的具体性能也从未给出过严格定量的标定结果. 为了进一步推进X射线脉冲星导航领域的研究进程, 必须获得能量、光子流量可调的X射线光源.

目前常用的X射线光源为同步辐射或者X射线管. 虽然同步辐射X射线光源具有其他光源不可比拟的优点, 但是同步辐射实验站紧缺且系统复杂, 很难在同步辐射实验站完成标定实验; 一般的X射线管, 其原理是利用加速的阴极电子轰击阳极靶从而产生X射线, 它以线状的特征光谱叠加在连续光谱上的形式出现^[9,10], 不适于标定探测器的能

量响应.

为了获取带宽较窄的X射线光源, 本文提出利用X射线管轰击特定荧光靶材的方法来获得荧光X射线作为光源. 采用该方法获得的荧光X射线光源能够最大限度地减少光源背景, 使光源接近单色化, 并且可以通过荧光靶的替换实现光源能量范围的调节.

2 基本原理与实验系统

2.1 荧光X射线光源的产生原理

当照射在荧光靶上的X射线能量 $E = \lambda/c$ (λ 为X射线波长) 大于荧光靶材的任一壳层结合能时, 就会将此壳层电子激发, 并在该壳层留下空穴. 根据能量最低原理, 该壳层之上其他壳层的电子将自发向该层跃迁; 与此同时, 发射荧光X射线. X射线激发的荧光X射线能量满足:

$$E_X = RhC(Z - A_n)^2(n_1^{-2} - n_2^{-2}), \quad (1)$$

* 国家自然科学基金(批准号: 61471354)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lizhi_sheng@opt.ac.cn

$$\lambda = R(Z - A_n)^2(n_1^{-2} - n_2^{-2}), \tag{2}$$

其中 E_X 表示荧光 X 射线的能量; R 表示里德伯常数; h 为普朗克常数; C 代表光速; Z 表示原子序数; A_n 是常数; n_1, n_2 为原子轨道主量子数.

物质在 X 射线照射下发射荧光 X 射线的概率称为该物质元素的荧光产额 (w). 对同一原子, 荧光产额将按照 w_K (K 系荧光产额), w_L (L 系荧光产额), w_M (M 系荧光产额) 的顺序急剧减小. 所以 K 系辐射最容易产生, 故选用 K 系荧光 X 射线作为光源. 对于 K 系荧光 X 射线辐射 $n_1 = 1, n_2 = 2, A_n = 1$, 一旦 Z 选定, 就可获得能量已知的 K 系荧光 X 射线束. 因此, 可以选择不同荧光靶材产生不同的 K 系荧光 X 射线束作为标定探测器的光源来实现光源能量范围调节的目的.

2.2 实验装置系统

为了验证采用上述方法获取荧光 X 射线光源的可行性, 搭建了实验装置. 以钛 (Ti)、铬 (Cr)、铜 (Cu) 三种荧光靶材为研究对象, 对荧光 X 射线光源的能谱分布、光子流量等数据进行测试. 荧光靶材参数如表 1 所列.

表 1 荧光靶材的具体参数

Table 1. The specific parameters of the fluorescent targets.

荧光靶类型	Ti	Cr	Cu
靶材尺寸/mm ²	30 × 3		
纯度/N	4.5	3	5
谱峰 $K\alpha$ /keV	4.51	5.41	8.05

实验装置示意图如图 1, X 射线管是具有栅极控制的 Mo 靶 X 射线管 [11], 探测器采用硅漂移探测

器 (silicon drift detector, SDD). 本文选用 Amptek 公司的 X-100SDD 作为标准探测器对荧光 X 射线光源能谱分布、光子流量等数据进行探测, 该探测器的能量分辨率可达 125 eV@5.9 keV.

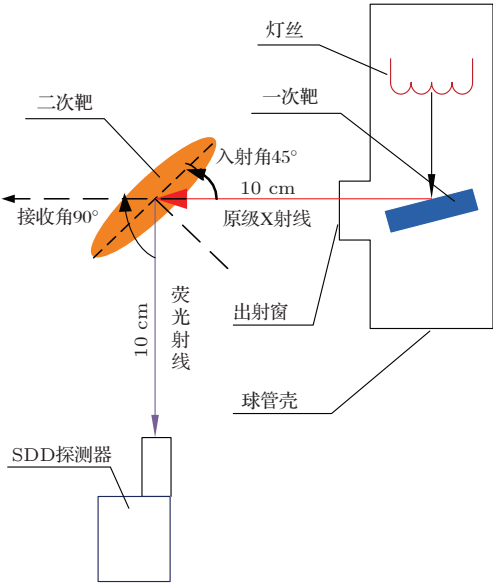


图 1 实验装置示意图

Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up.

3 实验结果与分析

3.1 初步实验验证

3.1.1 光源能谱测试

采用图 1 所示的实验装置, 由 SDD 采集的 Ti 荧光靶光源的能谱如图 2 (a) 所示; 图 2 (b) 为相同条件下采用 SDD 探测器直接采集的普通 Ti 靶 X 射线管发射的射线能谱.

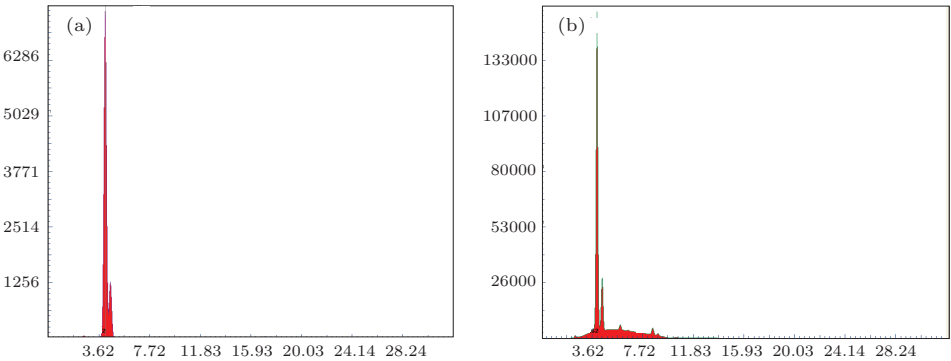


图 2 Ti 荧光靶荧光 X 射线光源与普通 Ti 靶 X 射线光源的谱图对比 (a) Ti 荧光靶荧光 X 射线光源谱; (b) 普通 Ti 靶 X 射线光源谱

Fig. 2. The spectra comparison between Ti fluorescent X-ray source and the Ti target X-ray source; (a) the spectra of Ti fluorescent X-ray source; (b) the spectra of common Ti X-ray source.

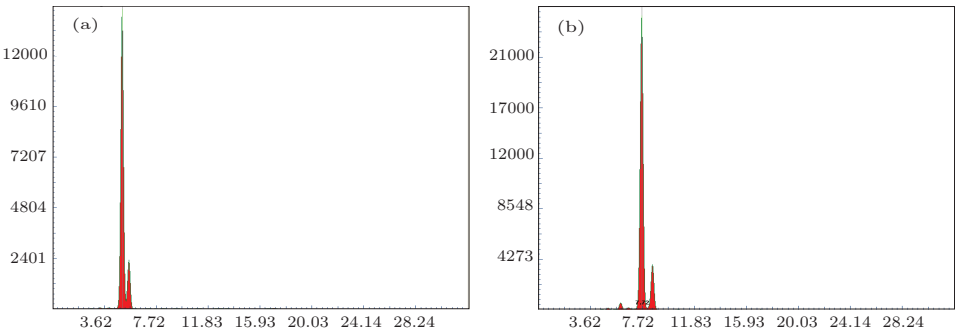


图3 不同荧光X射线光源的能谱 (a) Cr荧光靶荧光X射线光源谱; (b) Cu荧光靶荧光X射线光源谱
Fig. 3. Spectrum generated by different fluorescent X-ray source: (a) spectrum generated by Cr target fluorescent X-ray source; (b) spectrum generated by Cu target fluorescent X-ray source.

对比图2(a)和图2(b)可以明显看出: (a)中几乎没有背景, 只有一个很强的主峰, 经能量标定归结为Ti荧光靶的 K_{α} 线, 虽然有 K_{β} 线的出现, 但是只是对荧光X射线光源带宽略有影响, 其强度与主峰相比很小, 对探测器能量响应的标定不会产生不良影响. 其余两个荧光X射线光源的能谱图如图3所示, 其中图3(a)为Cr荧光靶的荧光X射线光源谱图, 图3(b)为Cu荧光靶的荧光X射线光源谱图. 能谱测试实验结果显示, 采用二次打靶的方式产生的荧光X射线光源减少了X射线光源背景, 证明荧光X射线光源作为探测器标定光源在能谱分布方面的适用性.

3.1.2 光源光子流量测试与分析

衡量荧光X射线光源是否能够满足需求的另一个重要参数是光子流量. 采用图1所示的实验装

置, 在大气环境下, 用SDD探测器对不同X射线管管流下荧光X射线光源光子流量进行了测量, 用探测器直接输出的计数率(phs/s)表示光子流量, 计数率越高, 表明光子流量越强. 表2是在X射线管高压 $V_a = 24$ kV, 不同管流(I_a)时测得的不同荧光X射线光源光子流量情况.

荧光X射线光源是在 10^{-3} Pa以下的真空环境中使用, 表2中的数据是在大气条件测得的. 因此, 对表2中的数据进行了扣除空气衰减修正计算[12], 处理后的结果如图4所示.

由图4可知, 荧光X射线光源的光子流量与管流呈现明显的线性关系, 随管流的增大而增大. 因此, 可以通过调节管流来实现荧光X射线光源的光子流量调节, 以适应不同标定条件下的光子流量需求.

表2 不同荧光X射线光源的光子流量数据
Table 2. Photon flux data of different fluorescent X-ray source.

X射线管高压	Cu 荧光靶荧光 X射线光源		Cr 荧光靶荧光 X射线光源		Ti 荧光靶荧光 X射线光源	
	$I_a/\mu\text{A}$	计数率/phs·s ⁻¹	$I_a/\mu\text{A}$	计数率/phs·s ⁻¹	$I_a/\mu\text{A}$	计数率/phs·s ⁻¹
24 kV	1	731	0	320	1	312
	7	3721	7	1634	8	1431
	26	29967	21	5802	28	4314
	64	53389	60	15499	72	10462
	123	71505	112	28791	125	18052
	164	83611	159	40155	167	23845
	193	94330	190	48268	197	27969
	216	102255	213	54166	218	31222
	236	109149	234	59163	240	33874
	254	115470	253	63333	255	36296
	269	116112	266	66582	271	38193

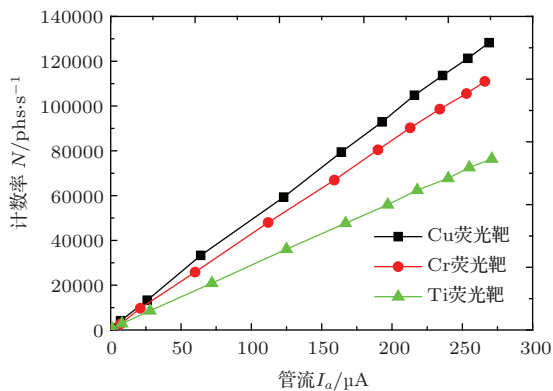


图4 荧光X射线光源光子流量随管流的变化曲线
Fig. 4. The relation curve for photon flux of fluorescent X-ray source with tube current.

分析了荧光X射线光源的光子流量与X射线管管流、探测距离之间的关系. 首先根据光源的光子流量与探测距离之间的平方反比定律可知, 光子流量与探测距离有如下关系:

$$\frac{N_{0I_a}}{N_{xI_a}} = \frac{D_x^2}{D_0^2}, \tag{3}$$

即

$$N_{xI_a} = \frac{N_{0I_a} D_0^2}{D_x^2}, \tag{4}$$

这里 D_0 为探测器距离光源出口的距离且 $D_0 = 10\text{ cm}$; N_{0I_a} 表示在距荧光X射线光源 D_0 位置、X射线管管流为 I_a 时扣除空气衰减后的光子流量, N_{xI_a} 表示在距离荧光X射线源 D_x 位置、X射线管管流为 I_a 时探测器探测到的光子流量; N_{0I_a} 可由表2获知.

其次, 对图4的曲线做了拟合, 拟合结果可统一表示为(5)式, 而不同能量荧光X射线光源的拟合系数 R , B 如表3所列.

$$N_{0I_a} = RI_a + B. \tag{5}$$

将(5)式代入(4)式可得

$$N_{xI_a} = (RI_a + B)D_0^2/D_x^2, \tag{6}$$

此式即为光子流量、管流、探测距离之间的相互关系式.

根据(6)式, 对在 $I_a = 200\text{ }\mu\text{A}$, $D_x = 300\text{ cm}$ 时的荧光X射线光源的光子流量做了计算, 对于Ti, Cr, Cu三种荧光靶, 其流强分别为65 phs/s, 93 phs/s, 106 phs/s. 该光子流量完全可以满足标定X射线脉冲星导航探测器能谱响应时的光子流量要求; 而在需要对探测器的脉冲还原性能做标定时, 可以通过调节管流使得荧光X射线光源光子流

量符合实际脉冲星辐射的光子流量. 光源光子流量的初步测试结果表明所提的荧光X射线光源方案能够满足标定X射线脉冲星导航用探测器的光子流量要求.

表3 荧光X射线光源光子流量强度拟合式中的系数
Table 3. The fitting coefficient of fluorescence X-ray source photon flux intensity.

荧光光源荧光靶	不同能量的荧光光源的拟合系数	
	$R/\mu\text{A}^{-1}$	B
Ti	281.112	666.386
Cr	417.452	643.751
Cu	475.416	1170.555

3.2 荧光X射线光源样机光子流量测试分析

经过初步的实验验证, 研制出适用于脉冲星导航地面模拟系统中的荧光X射线光源样机, 荧光X射线光源样机效果图如图5所示.

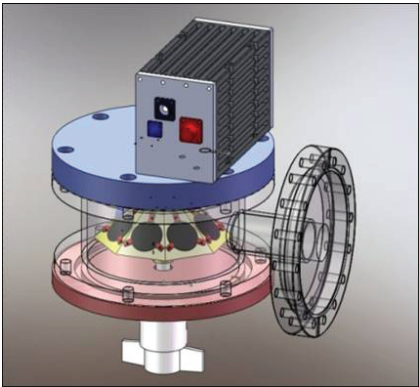


图5 荧光X射线光源样机效果图
Fig. 5. Fluorescence X-ray source proto type.

将此光源安装于X射线脉冲星导航地面模拟系统之中, 做了进一步的光子流量测试. 在X射线管管流 $I_a = 200\text{ }\mu\text{A}$ 条件下, 分别对探测距离为125, 300 cm两种情况下不同能量的光子流量做了测试, 对Cu, Cr, Ti光源的测试结果如表4所列.

表4 光源样机的光子流量测试结果
Table 4. Test results of the prototype fluorescence X-ray source.

探测距离 D_x/cm	不同荧光X射线光源的光子流量计数率/phs·s ⁻¹		
	Cu靶荧光光源	Cr靶荧光光源	Ti靶荧光光源
125	180.77	137.47	101.97
300	33.27	25.22	19.57

由(4)式计算的在 $D_x = 300\text{ cm}$, $I_a = 200\text{ }\mu\text{A}$ 时的光子流量与荧光X射线光源样机在真空系统

中测得的数据存在偏差,这是因为在实际的机械结构设计与制造过程中,为达到精密机械配合,做了一定的机械结构参数修改所引起的. 具体为: 1) 初步搭建的实验装置中, X射线管射线出口无光阑,而所设计的光源样机在X射线管射线出口设置了4 mm的光阑,限制了X射线管出射线到达荧光靶面的强度; 2) 初步搭建的实验装置中, X射线管出射射线到达荧光靶面的距离为10 cm. 而对于荧光X射线光源样机, X射线管出射射线到达荧光靶面的距离为5.6 cm.

4 结 论

本文提出采用荧光X射线束作为标定探测器光源的思路,通过实验验证了其可行性. 研制出了荧光X射线光源样机,经测试该荧光X射线光源在能谱分布和光子流量两方面均可满足对脉冲星导航探测器的标定使用要求;解决了无适用的标定探测器的X射线光源的问题,推进了脉冲星导航地面模拟系统的研究进程. 不过该荧光X射线光源在单色性上还有改进余地,为提高其单色性,已开展滤光的研究. 未来该光源将能够应用于探测器标定、导航算法验证等方面,服务于脉冲星导航领域的研究.

参考文献

- [1] Hanson J E 1996 *Ph. D. Dissertation* (Stanford: Stanford University)
- [2] Sheikh S I 2005 *Ph. D. Dissertation* (Maryland: University of Maryland)
- [3] Shuai P, Li M, Chen S L, Huang Z 2009 *Principle and Method of X ray pulsar Navigation System* (Beijing: China Astronautic Publishing House) (in Chinese) [帅平, 李明, 陈绍龙, 黄震 2009 X射线脉冲星导航系统原理与方法 (北京: 中国宇航出版社)]
- [4] Fei B J, Sun W J, Xiao Y 2006 *J. Acad. Arm. Force Engineer.* **20** 59 (in Chinese) [费保俊, 孙维瑾, 肖昱 2006 装甲兵工程学院学报 **20** 59]
- [5] Hu H J, Zhao B S, Sheng L Z, Yan Q R 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 029701 (in Chinese) [胡慧君, 赵宝升, 盛立志, 焉秋容 2011 物理学报 **60** 029701]
- [6] Hu H J 2011 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [胡慧君 2011 博士学位论文 (西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所)]
- [7] Sheng L Z, Zhao B S, Zhou F, Wang P 2013 *Acta Photon. Sin.* **42** 1071 (in Chinese) [盛立志, 赵宝升, 周峰, 王朋 2013 光子学报 **42** 1071]
- [8] Song J, Zhao B S, Sheng L Z, Liu Z 2014 *Acta Photon. Sin.* **43** 0823002 (in Chinese) [宋娟, 赵宝升, 盛立志, 刘哲 2014 光子学报 **43** 0823002]
- [9] Xu J A, Bi Y 2012 *Physics* **41** 219 (in Chinese) [徐济安, 毕延 2012 物理 **41** 219]
- [10] Niu H B, Wang K G, Wang L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1807
- [11] Sheng L Z, Zhao B S, Wu J J, Zhou F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 129702 (in Chinese) [盛立志, 赵宝升, 胡慧君, 周峰 2013 物理学报 **62** 129702]
- [12] Wang T Q, Wei X D, Li H J, Lu W 2007 *Atom. Energy Sci. Technol.* **41** 402 (in Chinese) [王同权, 魏晓东, 李宏杰, 路伟 2007 原子能科学技术 **41** 402]

Fluorescence X-ray source used for calibrating the detector of X-ray navigation*

Dai Jin-Fei¹⁾²⁾ Zhao Bao-Sheng¹⁾ Sheng Li-Zhi^{1)†} Zhou Yan-Nan¹⁾ Chen Chen¹⁾
Song Juan¹⁾²⁾ Liu Yong-An¹⁾ Li Lin-Sen¹⁾²⁾

1) (State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

2) (University of Chinese Academy of Science, Beijing 100084, China)

(Received 9 December 2014; revised manuscript received 17 February 2015)

Abstract

Lots of research work on the X-ray pulsar navigation detector has been carried out, but the rigorous quantitative calibration results of these detectors have never been given out. In order to further promote the research process in X-ray pulsar navigation field, a kind of high-precision X-ray source which could be tunable in energy distribution and photon flux is necessary. A new method has been proposed to generate such an X-ray source, in which a conventional X-ray tube which is called the original level tube is used to excite a special fluorescence target to generate fluorescence X-ray source. Firstly, the primary experiment system is built, with which the intensity of the fluorescence X-ray source is measured in atmospheric environment. The result indicates that the fluorescence X-ray source can be implemented in vacuum system to calibrate the detectors. Then an integral fluorescence X-ray source is fabricated which can be used in vacuum system and its intensity is measured under the condition of $D_x = 300$ cm and $I_a = 200$ μ A. The photo fluxes are obtained to be 19.57 phs/s at 4.51 keV, 25.22 phs/s at 5.41 keV, and 33.27 phs/s at 8.05 keV. These data demonstrate the correctness of our method and that this new fluorescence X-ray source can be used to calibrate the x-ray pulsar navigation detector.

Keywords: X-ray pulsar navigation, fluorescence X-ray source, detector calibration

PACS: 97.60.Gb, 07.85.Fv, 07.05.Fb

DOI: 10.7498/aps.64.149701

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61471354).

† Corresponding author. E-mail: lizhi_sheng@opt.ac.cn