

文章编号: 1007-4627(2015)03-0358-05

空间低能离子探测器的紫外响应测试

张卫^{1,2}, 史钰峰^{1,2}, 单旭¹, 李毅人^{2,3}, 郝新军^{2,3}, 缪彬^{2,3}, 徐春凯¹,
陈向军¹, 陆全明^{2,3}, 汪毓明^{2,3}, 张铁龙^{2,3}

- (1. 中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026;
2. 中国科学院近地空间环境重点实验室, 合肥 230026;
3. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026)

摘要: 在空间离子探测过程中, 太阳紫外光也会进入探测器产生光污染信号。为了考察它对离子探测的影响, 搭建了一套模拟太阳紫外光污染的地面测试系统, 并对自主研发的空间低能离子探测器原理样机进行了紫外响应测试。实验结果表明: 沿水平方向进入分析器的紫外光响应可以忽略, 而以一定倾斜角进入分析器的紫外光响应计数率约为 $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 。根据测试结果, 估算出探测器对太阳紫外光的抑制率约为 10^{-8} , 分析了紫外光污染对探测空间低能离子如质子和 α 粒子的影响。对于质子, 由于其通量大, 紫外光的影响不大。而对于通量较小的 α 粒子, 紫外光的影响较大, 需要进一步采取有效措施进行抑制。此外, 本测试系统可以推广到其它空间粒子探测器的太阳紫外光污染的地面模拟测试。

关键词: 空间离子探测器; 太阳紫外响应; 地面测试系统

中图分类号: O4-33 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.03.358

1 引言

等离子体是充斥日地空间环境的基本介质。在行星际空间中, 它主要包含来自太阳风的能量低于 100 keV 的带电粒子(如电子、质子、 α 粒子及其它重离子); 而在近地空间, 它还包含被电离的地球大气分子, 这些带电粒子一起被地球磁场俘获, 几乎充满着整个近地空间^[1-2]。太阳活动是近地空间环境受到扰动的根源。在平静时期, 地球附近的等离子体速度是 400 km/s 左右, 地球磁层顶距离地球 20 个地球半径处。但在日冕物质抛射等太阳爆发活动造成的灾害性空间天气期间, 地球附近的等离子体速度每秒钟可达上千公里, 地球磁层可能会被压缩到同步卫星轨道高度, 并产生大量高能带电粒子, 引起地球磁层、电离层以及地磁场的剧烈变化。不同时期, 空间等离子体的通量、能谱、成分等状态参数有着显著的改变, 这些都是研究太阳活动及其在行星际空间中的传播和扰动的过程和物理机制, 以及地球磁层、电离层和大气层对太阳活动和行星际扰动响应的链锁变化和空间层次的耦合过程的观测基础^[3]。另一方面, 空间等离子体分布的不均匀性和扰动, 会引起航天

器的充放电效应, 干扰航天器电子设备的正常工作, 甚至引发设备故障^[4]。因此, 探测空间等离子体的状态和变化, 获得各种粒子的状态参数, 对于了解太阳活动的形成机制和太阳风对地球磁层的影响, 以及研究灾害性空间天气事件的发生和发展过程等都具有重要意义。

近几十年来, 人类开展了许多重要的空间探测计划, 各种不同的粒子探测技术(如: 朗缪探针、法拉第杯、静电分析器、飞行时间谱仪等)已经成功应用到空间等离子体的探测任务。其中, 顶帽型静电分析器与通道电子倍增器或微通道板及位置阳极的组合是空间低能离子探测中广泛采用的一种技术^[5-12]。在空间低能离子探测过程中, 强度为 $10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (1 AU)^[13] 的太阳紫外光也会大量进入到静电分析器(Electro static Analyzer, ESA), 经过多次反射最终会打在探测器上, 产生光污染信号。为了减少紫外光的影响, 研究工作者设计了一种带有准直器的顶帽型 ESA, 它为正对入口方向进入的紫外光提供了出口通道; 对于其它方向进入的紫外光, 需要把电极表面加工成锯齿状, 增加光在分析器内的反射次数, 并在电极表面涂上对紫外光具有高吸收率的导电材料, 以提高光的衰减率^[9,14-15]。然

收稿日期: 2014-07-20; 修改日期: 2014-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41327802)

作者简介: 张卫(1989-), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 从事原子与分子物理研究; E-mail: zhweil@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 单旭, E-mail: xshan@ustc.edu.cn.

而, 这些方法对紫外光污染的抑制效果需要进行测试。理想的测试应该在空间环境中进行, 即在轨飞行测试, 这样获得的数据才更加真实可靠。但是一旦发现紫外光抑制效果不理想, 可能会导致对低通量粒子的探测任务失败。因此, 在空间等离子体探测器研制的过程中, 地面上模拟太阳紫外光污染的测试是一个不可缺少的环节。Gershman 等^[16]利用光线追迹方法仿真了紫外光在静电分析器中的传输特性, 对于砂化的分析器铝电极表面, 他们模拟的紫外抑制结果与实验结果相当; 而对于镀有 Cu₂S 膜的电极表面, 他们的模拟结果与实验相差较大, 这与他们选取的电极表面结构参数和反射模型密切相关。虽然计算机模拟可以为探测器的紫外抑制研究提供一种便利的测试方法, 但是其模拟结果仍然需要实验的进一步检验。可见, 在地面上建立太阳紫外模拟装置, 测试探测器对紫外光的抑制, 为探测器的在轨测量提供可以比对的基准数据, 具有空间科学研究的现实意义。

本文将介绍新搭建的一套模拟太阳紫外光的地面测试系统, 并对自主研发的带有准直器的顶帽型静电分析器原理样机进行了紫外光响应测试。

2 测试装置

在模拟太阳紫外响应的测试实验中, 一种常用的方法是利用已知数目的紫外光子, 从不同的角度射入 ESA 入口的准直狭缝, 通过测量经过电极表面多次反射后最终打在探测器上的光子数, 考察紫外光对探测器的影响程度。

图 1 给出搭建的紫外光响应测试装置示意图, 主要包括紫外光源、顶帽型 ESA、电子学与数据获取系统、调节平台和真空系统。下面分别对各个部分进行介绍。

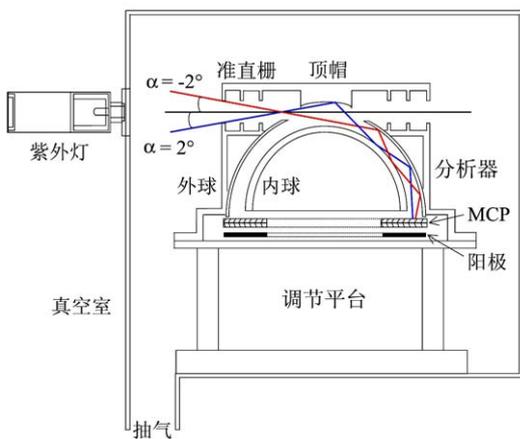


图 1 (在线彩图) 紫外光响应测试装置示意图

2.1 紫外光源

研究表明^[13]: 在一个天文单位处太阳光中波长小于 125 nm 的紫外光子强度约为 $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 其中最主要的成份(约 80%)是来自于太阳中氢的 Lyman α 线(121.6 nm)。为了较为真实地模拟太阳紫外光的情况, 选用由 Resonance LTD 公司生产的射频氖灯(型号: D2ArCM-L)作为地面测试系统的紫外光源, 该灯发射的紫外光经过直径 10 mm 的氟化镁窗后, 输出光子的波长从 116.5 ~ 7000 nm, 光子强度在波长为 116.5 ~ 160 nm 时较高, 典型值为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 这种型号的紫外光源曾用于哈勃空间望远镜的标定^[17]。为了使分析器接收到的光子数与太阳光子数大致相当, 我们把紫外灯放置在距离分析器入口 60 cm 的位置, 这样紫外光源在分析器入口处光子的数密度约为 $1.4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 比太阳的紫外光子密度略大。

2.2 ESA

空间低能离子谱仪原理样机采用带有准直器的顶帽型 ESA 与位置灵敏探测器相结合的一种主流技术。它主要包括准直栅极、顶帽电极、外球电极、内球电极、微通道板(micro-channel plate, MCP)和位置阳极等。准直栅极由三对半径不同、高度相同并具有共同对称轴的光学挡板组成, 分别固定在顶帽和外球上, 形成一定的视场, 准直狭缝的宽度由上下两层光学挡板的距离决定。准直栅极主要有两方面作用, 一方面限制粒子进入分析器的立体角, 另一方面增加进入准直栅极内光子的反射次数, 提高光的吸收效率^[5,9,14]。此外, 我们还把顶帽电极和外球电极的内表面加工成锯齿状, 增加光在分析器内的反射次数。为了补偿 ESA 出口的边缘电场和屏蔽 MCP 高压对 ESA 的电场渗透, 在 ESA 出口与 MCP 之间设计了一个高透过率(90%)的栅网。利用离子光学模拟软件 SIMION8.0 对 ESA 的几何参数和性能进行了细致的优化设计和模拟仿真, 具体参数如表 1 所列。

表 1 ESA 的几何参数与性能参数

几何参数	性能参数
内球半径 $R_1 = 30 \text{ mm}$	分析器常数 $K = 7.43$
外球半径 $R_2 = 32 \text{ mm}$	能量范围 $E = 30 \sim 20 \text{ keV/q}$
顶帽半径 $R_3 = 34 \text{ mm}$	能量分辨率 $\Delta E/E = 12.8\%$
顶帽半角 $\theta = 14.6^\circ$	极角分辨 $\Delta\alpha = 4.66^\circ$
出口截角 $\sigma = 4^\circ$	有效探测面积 $A = 26.56 \text{ mm}^2$
分析器视角 $6^\circ \times 180^\circ$	几何因子 $G_F = 8.69 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{eV/eV}$

位置灵敏探测器由 Chevron 型的 MCP 和紧随其后的 12 个分立阳极组成。MCP 是从北方夜视南京分公司订制的环形 MCP，其内孔直径 30 mm、外径 88 mm、厚度 1.2 mm、通道长径比 $L/D = 40$ 。位置阳极采用 PCB 板表面镀金的制作方法，12 个分立阳极呈扇形岛状分布，每个阳极接收的方位角 β 范围为 15° ，总共可以涵盖 180° 。整个位置灵敏探测器和其前面的栅网一起固定 ESA 的出口平面处。

2.3 电子学与数据获取系统

图 2 给出了测试装置的电子学与数据获取系统示意图，从 ESA 通道出来的离子或光子打在 MCP 上转化为电子，经过 MCP 倍增放大的电子束团被金属阳极接收。用 RC 耦合电路从阳极引出电荷信号，由电荷灵敏前置放大器 (PA) 转换成电压信号，再经主放大器 (MA) 放大成形，送入多通道数据采集卡进行模数变换和数据采集。而采集卡的触发是由 MCP 背电极引出的快信号经过快放大器 (FA) 和恒比定时器 (CFD) 处理得到的 TTL 信号提供的，这样可以确保采集的各阳极信号是来自 MCP 的电荷信号，从而提高信噪比。整个数据采集系统的控制、数据的读取和存储是通过计算机完成的。

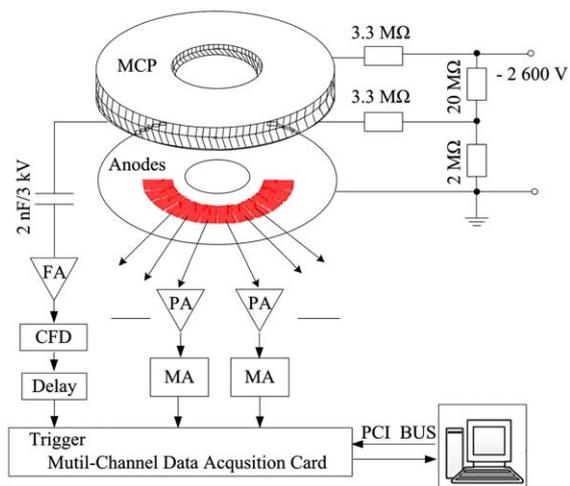


图 2 (在线彩图) 电子学与数据获取系统示意图

2.4 调节平台

为了考察探测器对不同入射角度的紫外光子的响应，设计了一个简易的三维调节平台。测试前把整个 ESA 放置在调节平台上，首先让激光水平仪发射的激光束与紫外灯的中心保持在一个水平面上，然后调节 ESA 的位置，使其入口平面中心与激光束一致，这样可以使紫外光源发射的光束沿着 ESA 入口中心进入 (即 $\alpha = 0^\circ$)。在此基础上，调节 ESA 使之倾斜，倾斜

角的大小是利用游标角度尺测量 ESA 入口中心线与激光束的中心线之间夹角来获得的。根据 ESA 入口准直狭缝的大小，倾斜角的范围为 $-3^\circ \sim 3^\circ$ 。

2.5 真空系统

ESA 的紫外测试实验需要在真空环境中进行，设计的真空系统采用机械泵和分子泵级联的方式实现高真空。真空泵选用 Edwards 公司生产的 XDS35i 干式涡轮机械泵 (抽速 10 L/s) 和 STPA1303C 涡轮分子泵 (抽速 1300 L/s)，真空室的本底真空度好于 5.0×10^{-6} Pa，满足测试实验的需求。

3 测试结果与分析

在进行紫外测试实验时，考虑到 ESA 的极角范围 ($-3^\circ \sim 3^\circ$) 和目前调节平台的角精度 ($\sim 1.2^\circ$)，选取 3 种不同入射角度的紫外光分别进行测试，即光入射方向相对 ESA 入口中心水平面的倾角分别是 $\alpha = -2^\circ, 0^\circ, 2^\circ$ 。图 3 给出了不同角度下探测器对紫外光响应的计数率。从图中可以看出，在 $\alpha = -2^\circ$ 和 2° 时，7 号阳极的计数率最高，分别为 1680 s^{-1} 和 190 s^{-1} ，而其它阳极的计数率很少，这是因为紫外光的入射方向正好对应 7 号阳极的方位角范围。对于 $\alpha = -2^\circ$ ，紫外光进入 ESA 后先打在外球电极表面，再经过内、外球表面的多次反射到达探测器上，从而导致较大的响应计数。

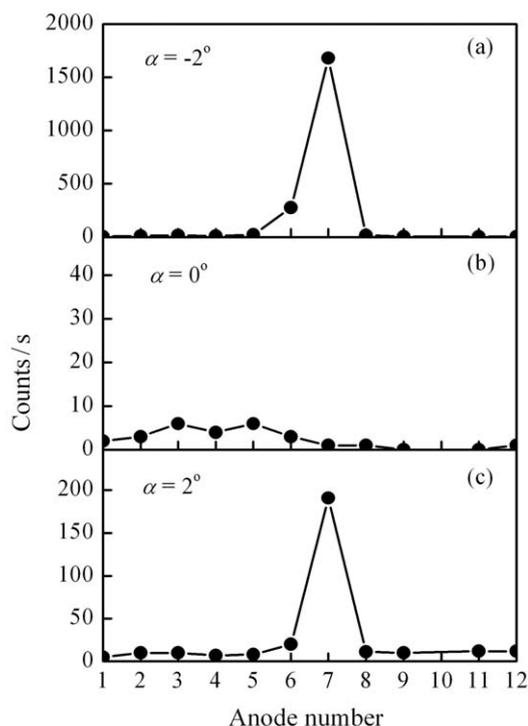


图 3 探测器对不同入射方向的紫外光响应

而对于 $\alpha = 2^\circ$, 紫外光进入 ESA 后先打在顶帽电极表面, 大部分光子反射到其它方向, 只有小部分光子可以进入 ESA 内外球通道, 再经过多次反射到达探测器上, 从而导致相对较小的响应计数。对于 $\alpha = 0^\circ$, 紫外光进入 ESA 后直接从预留开口通道出去, 测试结果给出所有阳极的计数率不到 10 s^{-1} , 这是正是顶帽型 ESA 设计的预期结果。

为了分析紫外光对空间低能离子探测的影响程度, 根据本文测试的紫外抑制率 $r(\sim 10^3/10^{11} = 10^{-8})$,

并考虑到太阳紫外光子和空间低能离子的密度 $\rho(1 \text{ AU})^{[12-13]}$, 以及 ESA 的有效接收面积 A 、几何因子 G_F 和 MCP 的探测效率 $\eta^{[18]}$, 根据下面的公式(1)和(2)分别估算了 ESA 探测器对太阳紫外光响应的计数率 N'_t 和对空间低能离子响应的计数率 N_t , 如表 2 所列。

$$N'_t = N'_{in} \times r = \rho \times A \times r, \quad (1)$$

$$N_t = N_{in} \times \eta = \rho \times G_F \times \eta, \quad (2)$$

式中 N'_{in} 和 N_{in} 分别为进入 ESA 的光子数和离子数。

表 2 低能离子探测器对空间离子和太阳紫外光响应的计数率估算

	密度	ESA接收数/ s^{-1}	MCP效率/%	计数率/ s^{-1}
紫外灯	$1.4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	3.7×10^{11}	~ 1	$\sim 10^3$
太阳紫外光	$3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	8×10^{10}	~ 1	$\sim 10^2$
空间低能离子 H^+	$10^7 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$\sim 7 \times (10^3 \sim 10^6)$	~ 60	$\sim 10^3 \sim 10^6$
α 粒子	$10^5 \sim 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$\sim 7 \times (10^1 \sim 10^4)$	~ 60	$\sim 10^1 \sim 10^4$

从表 2 中可以看出, 对于探测能量为 $0.1 \sim 10 \text{ keV}$ 的质子, 由于其密度大, 预计探测到的计数率约为 $10^3 \sim 10^6 \text{ s}^{-1}$, 而太阳紫外污染的计数率约 10^2 s^{-1} , 不超过离子计数的 10%, 可见对质子的探测数据影响不大。而对于密度较低的离子如 α 粒子等^[12,19-20], 预计探测到的 α 粒子计数率约为 $10^1 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$, 而太阳紫外污染的计数率约 10^2 s^{-1} , 远超过 α 粒子计数率的下限 (10 s^{-1}), 太阳紫外光的影响较大, 需要进一步采取有效措施把紫外光污染计数抑制到几十个以内, 即紫外抑制率达到 10^{-9} , 这样测量的数据才会准确可靠。

4 结论

本文介绍了新搭建的一套模拟太阳紫外光污染的地面测试系统, 并利用该系统对自主研制的顶帽型静电分析器原理样机进行了紫外光响应测试。实验结果表明本系统的测试方法可行、性能可靠, 而且具有结构简单、测试方便的特点, 可以推广应用于其它空间粒子探测器的太阳紫外光响应测试。在下一步工作中, 将改进测试系统的调节平台, 设计一个高精度的全自动的四轴真空定位转台, 实现对空间粒子探测器性能的精细测试。

致谢 感谢北京航空航天大学曾立教授的讨论和帮助。

参考文献:

- [1] HUNDHAUSEN, A J. Coronal expansion and solar wind[M]. Berlin: Springer-Verlag, WestGermany, 1972: 1-16.
- [2] VAN Allen J A. Origins of Magnetospheric Physics[M]. Iowa: University of Iowa Press, 2004: 93.
- [3] WANG Shui, WEI Fengsi. Progress in Geophysics, 2007, **22**(4): 1025. (in Chinese)

- (王水, 魏奉思. 地球物理学进展, 2007, **22**(4): 1025.)
- [4] KOONS H C, GORNEY D J. Journal of Spacecraft and Rockets, 1991, **28**(6): 683.
 - [5] YU Dejiang, LIU Ying, REN Qiongying. Chinese Journal of Space Science, 2001, **21**(4): 359. (in Chinese)
(于德江, 刘颖, 任琼英. 空间科学学报, 2001, **21**(4): 359.)
 - [6] LIU Z X, ESCOUBET C P, PU Z, *et al.* The double star mission[C]//Annales Geophysicae. Copernicus GmbH, 2005, **23**(8): 2707.
 - [7] CAO J B, LIU Z X, YAN C X, *et al.* First results of Chinese particle instruments in the Double Star Program[C]//Annales Geophysicae, 2005, **23**(8): 2775-2784.
 - [8] ESCOUBET C P, LIU Z X, PU Z, *et al.* Double Star-First Results[C]//Annales Geophysicae. 2005, **23**(8): 2705.
 - [9] CARLSON C W, MCFADDEN J P. Geophysical Monograph Series, 1998, **102**: 125.
 - [10] PASCHMANN G, LOIDL H, OBERMAYER P, *et al.* IEEE Transactions on, Geoscience and Remote Sensing, 1985 (3): 262.
 - [11] RÈME H, COTIN F, CROS A, *et al.* Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1987, **20**(6): 721.
 - [12] RÈME H, BOSQUED J M, SAUVAUD J A, *et al.* Space Science Reviews, 1997, **79**(1-2): 303.
 - [13] HEROUX L, HINTEREGGER H E. Journal of Geophysical Research: Space Physics (1978-2012), 1978, **83**(A11): 5305.
 - [14] ALSOP C, SCOTT S, FREE L. Geophysical Monograph Series, 1998, **102**: 269.
 - [15] ZURBUCHEN T H, BOCHSLER P A, SCHOLZE F. Optical Engineering, 1995, **34**(5): 1303.
 - [16] GERSHMAN D J, ZURBUCHEN T H. Review of Scientific Instruments, 2010, **81**(4): 045111.
 - [17] MOLLY L M, WILLIAM H M, LAWRENCE N. MAJORANA. Ultraviolet and VUV sources for in-flight calibration of space experiments[C]//Proc SPIE 1945, Space Astronomical Telescopes and Instruments II, 1993:478.

- [18] JOSEPH L W. Reprinted from Nuclear Instruments and Methods, 1979, **162**: 587. Physical Review Letters, 1968, **20**(8): 393.
- [19] BAME S J, HUNDHAUSEN A J, ASBRIDGE J R, *et al.* [20] HANSTEEN V H, LEER E, HOLZER T E. The Astrophysical Journal, 1997, **482**(1): 498.

Testing of the Ultraviolet Response of Space Low-energy Ion Detector

ZHANG Wei^{1,2}, SHI Yufeng^{1,2}, SHAN Xu¹, LI Yiren^{2,3}, HAO Xinjun^{2,3}, MIAO Bin^{2,3}, XU Chunkai¹, CHEN Xiangjun¹, LU Quanming^{2,3}, WANG Yuming^{2,3}, ZHANG Tielong^{2,3}

(1. Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Key Laboratory of Geospace Environment, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China;

3. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In the detection of space ions, solar ultraviolet (UV) can also enter the detector and generate a noise to the signal of ions. A testing system on the ground is built to test the UV response of detector. Experiments on a home-made principle prototype of space low-energy ion detector are carried out by using this system. The results show that the response of detector to the UV entering the electrostatic analyzer along the horizontal direction can be negligible and counts of the response to the UV along a bias direction are about $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$. According to the measured results, the UV suppression ratio is estimated to be about 10^{-8} and the influence of solar UV on the detection of space low-energy ions such as proton and alpha particle has been analyzed. For proton, the influence is insignificant due to its high flux. But for the low flux alpha particle, the influence of solar UV is noticeable and further rejection is needed. In addition, this system can also be applied to test the UV response of other space particle detectors.

Key words: space ion detector; solar ultraviolet response; testing system on the ground

Received date: 20 Jul. 2014; **Revised date:** 15 Sep. 2014

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (41327802)

Corresponding author: SHAN Xu, E-mail: xshan@ustc.edu.cn.

<http://www.npr.ac.cn>