

平面激光诱导荧光技术在交错电极介质阻挡放电 等离子体研究中的初步应用*

李 钢^{1)†} 徐燕骥¹⁾ 穆克进¹⁾ 聂超群¹⁾ 朱俊强¹⁾ 张 翼²⁾ 李汉明²⁾

1) 中国科学院工程热物理研究所先进能源动力重点实验室 北京 100080)

2) 中国科学院物理研究所光物理实验室 北京 100190)

(2007 年 10 月 8 日收到, 2008 年 4 月 2 日收到修改稿)

利用平面激光诱导荧光技术对交错电极介质阻挡放电过程中产生的痕量组分 NO 进行了检测. 通过数值模拟对实验结果进行了分析说明, 并对介质阻挡放电等离子体流动控制原理进行了简要分析. 此外还通过平面激光诱导荧光技术对等离子体诱导流动进行了直观显示.

关键词: 平面激光诱导荧光, 等离子体, 介质阻挡放电

PACC: 4700, 5000, 5100, 5200

1. 引 言

介质阻挡放电等离子体在电子、材料、环保、化工等行业有着广泛的应用^[1,2], 这类 DBD 等离子体激励器的构成如图 1(a)所示. 目前 DBD 等离子体也受到航空领域的重视. 在绝缘材料两侧交错布置电极的方式是航空领域所使用的等离子体激励器的

与众不同之处. 因此航空等离子体激励器生成的等离子体具有沿弦向变化特点. 两个由绝缘材料隔开的电极一个暴露在大氣中, 另一个镶嵌在绝缘材料里. 在高压高频交流电的作用下, 可在嵌入绝缘材料内的电极上方生成弱电离的低温非平衡等离子体(如图 1(b)), 并诱导周围空气形成静流量为零(ZNMF)的水平方向射流.

等离子体流动控制是基于“等离子体气动激励”

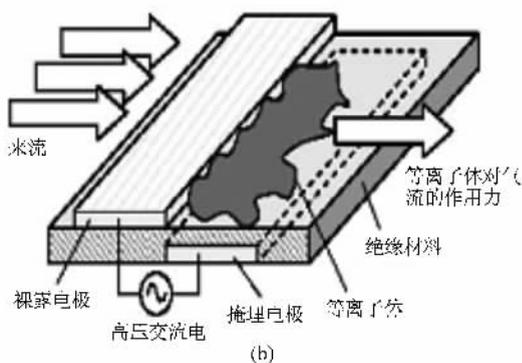
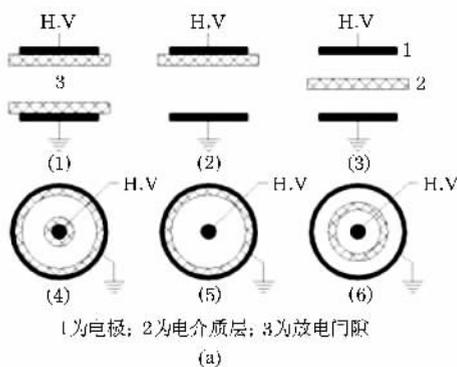


图 1 各种形式的 DBD 等离子体激励器 (a) 化工、材料领域使用的等离子体激励器 (b) 航空领域使用的等离子体激励器

这一新概念的主动流动控制技术, 具有结构简单、施加的气动激励作用频带宽、激励参数便于实时控制、响应迅速、能耗较低等优点. 已开展了大量的相关实验研究包括: 平板流动分离控制实验^[3]、不同形状

电极特性的实验^[4]、增大机翼升力实验^[5]、低压涡轮叶栅流动分离控制^[6]实验以及压气机^[7,8]和机身方面的实验^[9]等.

激光诱导荧光(LIF)技术是用激光激发待测分

* 国家自然科学基金(批准号 50676094, 50676095, 50736003, 50776086)资助的课题.

† E-mail: ligang_beijing010@163.com

子或原子的共振跃迁以探测它们在特定量子态聚居密度的灵敏技术. 由于它具有高灵敏度、高时间/空间分辨率、高信噪比的特点以及可测量燃烧中特别重要和活跃的痕量组分,如 OH, CH, NO 等,近 20 年来 LIF 技术受到人们的关注.

平面激光诱导荧光(PLIF)技术是在激光诱导荧光(LIF)方法的基础上衍生出的,能够提供成分浓度、温度、速度、压力等十分丰富的定性和定量信息. 由于 DBD 等离子体会改变附近空气的速度场、压力场、温度场以及产生大量的自由基和准分子,如 OH, O, NO 等,因此 PLIF 是 DBD 等离子体流动控制研究的强有力工具. PLIF 的信号强度高出其主要竞争对手如瑞利散射和拉曼散射几个数量级,因此很适于测量等离子体中以微量或示踪量出现的自由基和准分子浓度($< 10^{-3}$).

DBD 等离子体流动控制的效果与等离子体密度沿弦向分布有密切关系,由于 DBD 放电产生的是低密度等离子体—— 10^{16} m^{-3} 量级^[10],直接测量等离子体密度有很大难度. 本文利用 PLIF 技术对交错电极介质阻挡放电过程中产生的痕量组分 NO 进行了检测,此外还对等离子体诱导流动进行了直观显示. 在目前还没有见到采用 PLIF 系统对交错电极 DBD 等离子体开展的研究.

2. 实验系统

图 2 是 PLIF 测量系统示意图. 利用 Nd:YAG 固体激光器产生的三倍频光(波长 355 nm,脉宽 3 ns,单脉冲能量约 250 mJ,脉冲频率为 10 Hz)抽运染料激光器,经染料激光器中的光栅调谐获得波长约为 567.84 nm 的窄带激光束,再经 BBO 倍频晶体倍频为 283.92 nm 附近的紫外光,对于 NO 分子的检测,采用 226.03 nm 的紫外激发光,用以激发 NO 的 $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi(0,0)$ 跃迁中的 $Q_1(13)$ 和 $R_{12}(19)$ 线.

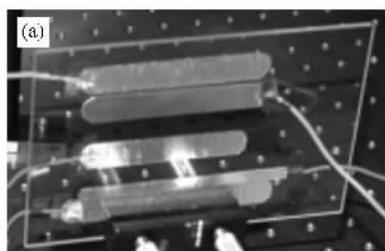


图 3 实验中使用的电极 (a)条形电极;(b)条形电极放电

紫外激发光束经过片光透镜组扩束为宽 160 mm,厚 0.5 mm 的薄片,透镜组包括一组圆凸透镜和一个凹柱面镜($f = -20 \text{ mm}$). 利用配备紫外镜头($f = 105 \text{ mm}$, $f/4.5$)的 ICCD 接受荧光,CCD 分辨率为 1600×1200 像素,动态范围 14 位,像素尺寸为 0.07 mm/pixel. 测量 NO 时,采用 BP254/10 的滤波片,接受 244—264 nm 波段的 NO 荧光. 通过纳秒级的可编程同步控制板触发和控制激光脉冲、像增强器和 CCD 相机的同步. 实验中,ICCD 快门速度设为 200 ns,延迟时间值为 2000 ns,这样可以保证在每个脉冲的脉宽内进行测量,并减少杂波的干扰.

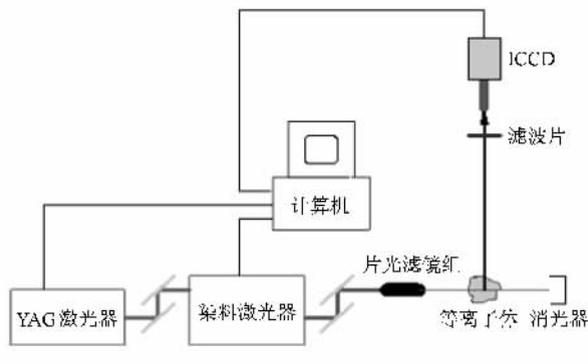


图 2 PLIF 测量系统示意图

3. 实验结果与讨论

图 3 给出了条形电极的实物图,由图 3(b)可见放电产生的等离子体发出淡紫色光.

图 4 给出了 DBD 放电过程中产生的 NO 检测结果,图 4 各图为放电过程中几个连续时刻的 PLIF 成像. 在激光入射区域,NO 分子受到特定波长的激光诱导发射出荧光,从而形成了条状荧光信号带. 这说明在 DBD 放电过程中有痕量组分 NO 产生,集中

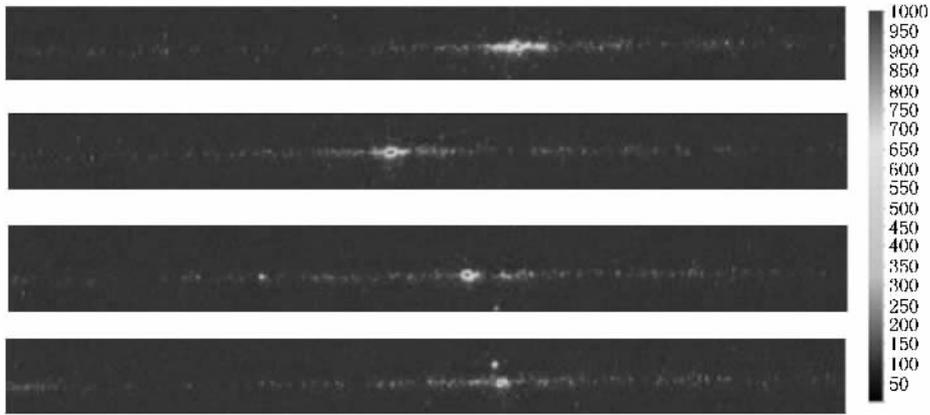


图 4 连续四个时刻电极周围的 NO 浓度分布

在电极边缘附近,并且 NO 浓度的产生呈现不稳定性.

实验中还观测到发生爬电时的 NO 分布. 图 5 为爬电示意图,由图 5 可见,激励电压很高时,高压电极会和附近的另一个未加电的电极之间放电,这两个电极在绝缘材料的同一侧,它们之间发生放电时没有受到绝缘材料的阻挡,称这个现象为爬电. 图 6 为发生爬电时利用 PLIF 系统观测到的 NO 分布.



图 5 爬电示意图

由于发生爬电时所加激励电压较高,因此图 6 中的 NO 生成区域较图 4 中的范围大,而且图 6 中捕捉到了发生爬电时的丝状 NO 浓度分布.

等离子体是在电场强度足够大,空气被击穿后产生的. 图 7 和图 8 分别是激励电压为 10 kV 时,通过数值模拟得到的电极周围电势分布和电场强度分布.

由图 7 可见电势在两电极之间的变化非常剧烈. 由图 8 可见电极边缘的电场强度最大,这使得附近的电子加速获得足够能量,并通过碰撞使中性粒子发生电离,新生成的电子也在电场中加速进而引起电子雪崩,因此等离子体在裸露电极边缘下游(指向掩埋电极)产生.

实验中观察到有 NO 产生,这表明空气中的氮分子和氧分子被离解成氮原子和氧原子,而后氮原子与氧原子复合生成了 NO. 而 N_2 的离解电压为 24.3 eV,大于 N_2 , O_2 的电离电压,分别是 15.58 和 12.2 eV,因此会有氮离子、氧离子生成,氮离子、氧离子在电场加速运动通过撞击会将动量传递给中性

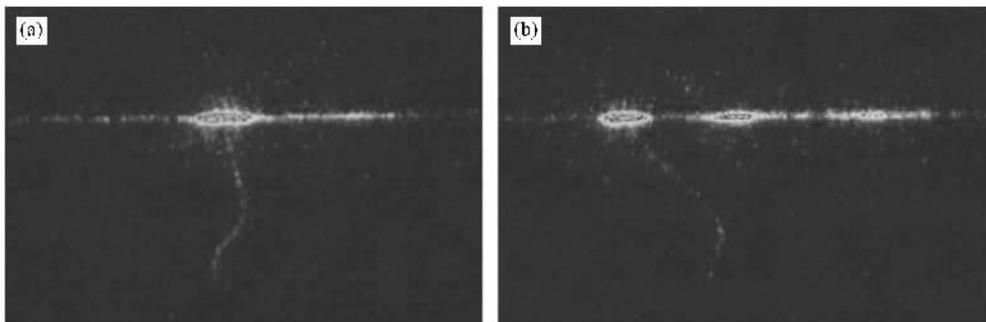


图 6 发生爬电时两个不同时刻 NO 浓度分布 (a) t_1 时刻 NO 浓度分布;(b) t_2 时刻 NO 浓度分布

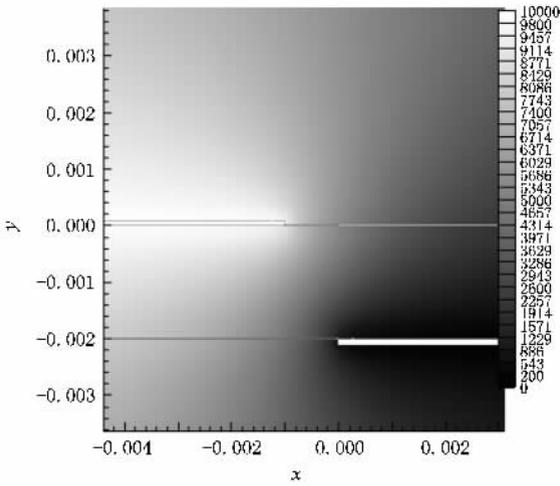


图 7 电极附近的电势分布

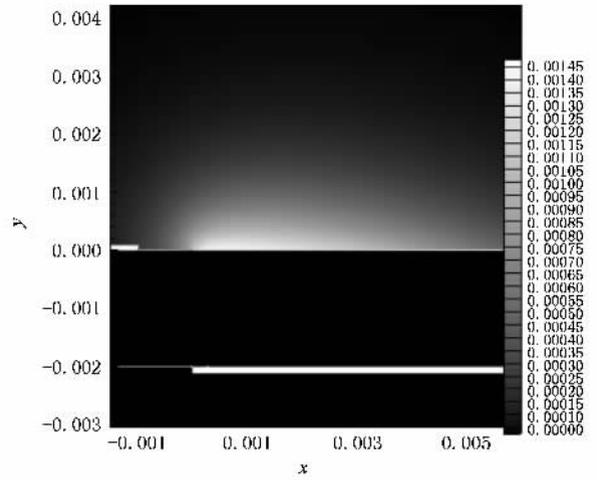


图 9 电荷密度分布

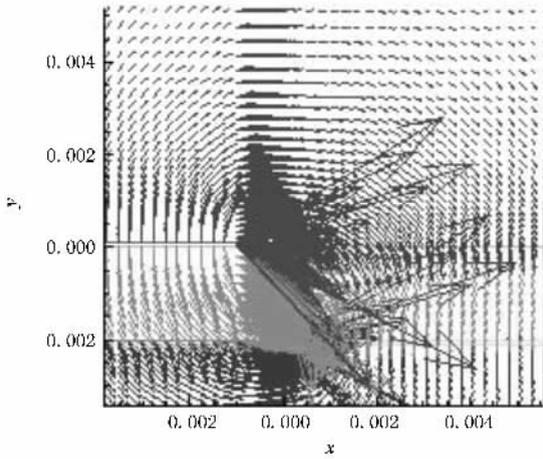


图 8 电极附近电场强度分布

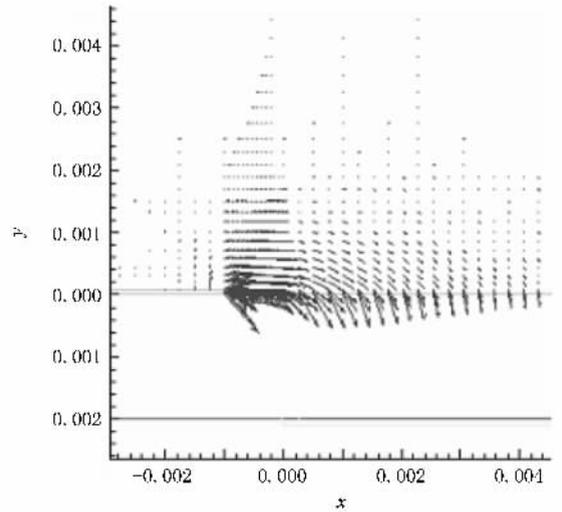
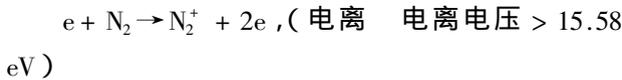
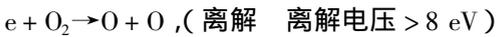
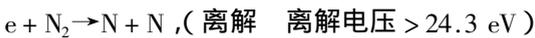


图 10 体积力矢量分布

的气体分子,这就产生了加速气体运动的效果.



在 DBD 等离子体流动控制的数值模拟中^[11],等离子体对周围空气的作用效果可通过体积力的形式引入 NS 方程,进而得到流场分布.体积力向量可由方程 $f_B = \rho_c E = \rho_c (-\nabla\phi)$ 求出,其中 ρ_c 是净电荷密度, E 是电场强度.图 9 是电荷密度分布图,图 10 是体积力矢量分布的数值模拟结果.

由图 9 可见等离子体主要生成在掩埋电极的上方,由图 10 可见电动体积力集中在裸露电极边缘以

及等离子体生成区域附近,在这个体积力的作用下会诱导周围空气运动.

实验中还通过 PLIF 系统对在等离子体激励作用下超声波雾化水雾的射流流场进行了显示,定性研究了 DBD 等离子体诱导出的速度大小与激励电压的关系,实验设备布置如图 11 所示,将雾化水雾的射流管放置在等离子体诱导出的水平射流的前方,基于光散射原理,利用 PLIF 系统接受水雾液滴散射的紫外光来显示水雾射流流场,测量时片光宽度调为 50 mm,不加滤波片.

图 12 是水雾射流的流场显示结果,考察等离子体诱导出的水平射流速度对水雾射流的影响,由图 12(a)-(e)激励电压由 0 增大至 21 kV. 等离子体诱导出的空气流动方向由图 12 所示.

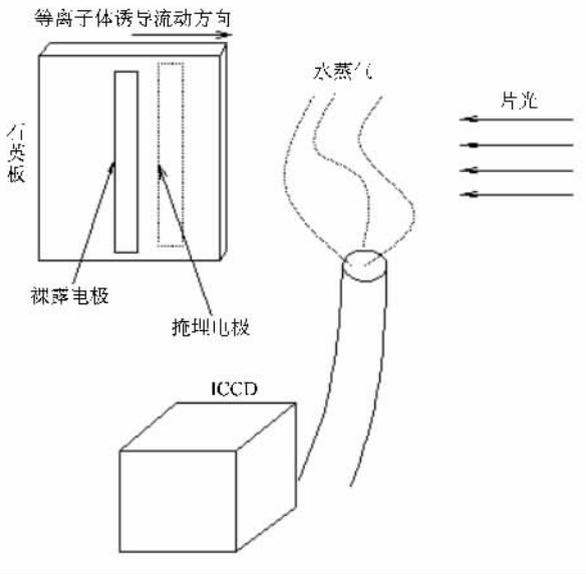


图 11 流动显示实验示意图

由图 12(a)可见在不加激励电压时,由于周围不存在明显的来流干扰,水雾射流呈稳定的直束状.逐渐增大激励电压对应图 12(b)–(e),水雾射流偏转越来越大,这表明随着激励电压的增加等离子体诱导出的水平射流速度也逐渐增大.这样通过 PLIF 流场显示的方法可以对 DBD 等离子体诱导周围空气流动这一现象有个定性的认识.

4. 结 论

利用平面激光诱导荧光技术对交错电极介质阻挡放电过程中产生的痕量组分 NO 进行了检测,并对等离子体诱导流动进行了直观显示.通过数值模拟对实验结果进行了分析说明,并简要分析了介质阻挡放电等离子体流动控制原理.

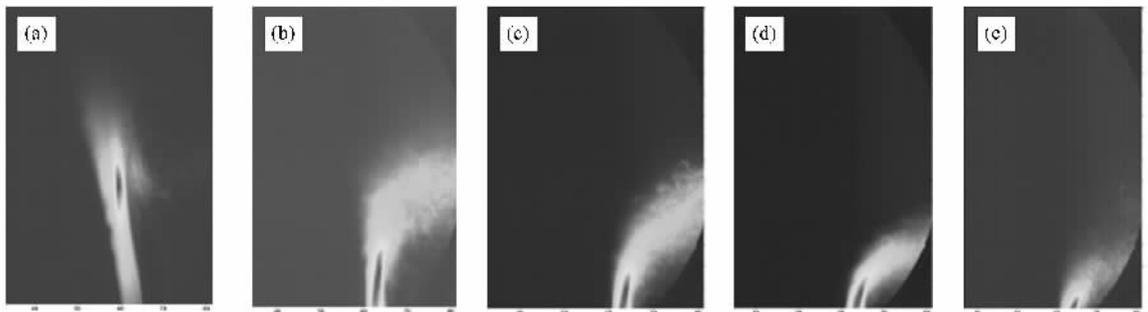


图 12 流动显示结果 (a) 0 kV, (b) 12 kV, (c) 18 kV, (d) 20 kV, (e) 21 kV

本文初步的实验结果表明,PLIF 系统是研究交错电极介质阻挡放电等离子体的有效手段,对目前的 PLIF 系统进一步扩充就可以获得等离子体放电

过程中生成的 O_3 的浓度分布,此外还可以对 DBD 等离子体引起的温度场、速度场、压力场的改变进行定量的研究.

- [1] Qi B, Ren C S, Ma T C, Wang Y N, Wang D Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 331 (in Chinese) [齐 冰、任春生、马腾才、王友年、王德真 2006 物理学报 **55** 331]
- [2] Li H M, Li G, Li Y J, Li Y T 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 969 (in Chinese) [李汉明、李 钢、李英俊、李玉同 2008 物理学报 **57** 969]
- [3] Boxx R, Rivir 2006 *Reattachment of a Separated Boundary Layer on a Flat Plate in a Highly Adversed Pressure Gradient Using a Plasma Actuator*. AIAA 2006-3023 3rd AIAA Flow Control Conference San Francisco California
- [4] Arvind S, Jamey D J, Ylidirim B S 2006 *Flow Control Using Plasma Actuators and Linear/Annular Plasma Synthetic Jet Actuators*

- AIAA 2006-3033 3rd AIAA Flow Control Conference San Francisco
- [5] Alexander N V, Mark R, Eric J J 2006 *An Experimental Investigation of Lift Enhancement and Roll Control Using Plasma Actuators* AIAA 2006-3383 37th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference San Francisco
- [6] Huang J H, Thomas C, Flint O T 2006 *AIAA Journal* **44** 1477
- [7] Huu D V 2007 *Control of Rotating Stall in Axial Compressors Using Plasma Actuators* AIAA 2007-3845, 37th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit Miami
- [8] Wu Y, Li Y H, Zhu J Q 2007 *Experimental Investigation of a Subsonic Compressor with Plasma Actuation Treated Casing* AIAA 2007-3849 37th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit

- Miami
- [9] Mehul P , Terry N , Srikanth V 2006 *Plasma Actuators for Hingeless Aerodynamic Control of An Unmanned Air Vehicle* . AIAA 2006-3495 3rd AIAA Flow Control Conference San Francisco
- [10] Roth J 1995 *Industrial Plasma Engineering* (Philadelphia : Institute of Physics Publishing)
- [11] Suzen Y B , Huang P G , Jacob J D 2005 *Numerical Simulations of Plasma Based Flow Control Applications* AIAA 2005-4633 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit Toronto

Application of planar laser induced fluorescence in the investigation of the stagger electrode dielectric barrier discharge plasma^{*}

Li Gang^{1)†} Xu Yan-Ji¹⁾ Mu Ke-Jin¹⁾ Nie Chao-Qun¹⁾ Zhu Jun-Qiang¹⁾ Zhang Yi²⁾ Li Han-Ming²⁾

1) *Key Laboratory of Advanced Energy and Power , Institute of Engineering Thermophysics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China*)

2) *Laboratory of Optical Physics , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100190 , China*)

(Received 18 October 2007 ; revised manuscript received 2 April 2008)

Abstract

Trace nitric oxide produced by dielectric barrier discharge was detected directly by the planar laser induced fluorescence system. Through numerical simulations , both the experimental results and the mechanism of plasma flow control were discussed briefly. Besides , flow induced by the dielectric barrier discharge plasma was visualized by the planar laser induced fluorescence system.

Keywords : planar laser induced fluorescence , plasma , dielectric barrier discharge

PACC : 4700 , 5000 , 5100 , 5200

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50676094 , 50676095 , 50736003 , 50776086).

[†] E-mail : ligang_ beijing010@163.com