

# 小动物正电子断层成像仪性能测试\*

高 飞<sup>1)</sup> 刘华锋<sup>1)†</sup> 施鹏程<sup>2)</sup>

1) 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

2) 南方医科大学医学图像处理重点实验室, 广州 510515)

(2006 年 9 月 27 日收到, 2006 年 12 月 3 日收到修改稿)

设计了一系列实验对 Concorde MicroPET Rodent R4 小动物正电子断层成像系统(该系统是 Concorde Microsystems 公司开发的小动物专用 PET 扫描仪, 该扫描仪具有 32 层探测器环, 动物入口孔径为 120mm, 横向视野为 100mm, 轴向深度为 78mm, 标称的视野中央处的空间分辨率可达 1.8mm 以下)的空间分辨率、灵敏度、散射率等性能参数进行了测试, 测试结果显示该扫描仪视野中心的横向空间分辨率为 1.9 mm, 轴向空间分辨率为 1.88 mm, 在能窗设定为 250—750 keV 时系统的绝对灵敏度为 39.88 cps/kBq, 同样能窗下二维重建散射分数为 50.6%, 三维重建散射分数为 32.3%.

关键词: 正电子断层成像仪, 性能测试

PACC: 7870

## 1. 引 言

作为正电子发射断层成像(positron emission tomography, PET)技术的延伸, 小动物正电子断层成像仪(MicroPET)的出现为“活体”动物实验提供了一种全新的方法, 并已成为分子水平下生物医学研究的主要手段之一, 广泛地应用于脑功能成像、基因表达、肿瘤增殖以及各类药物的临床前期研究中. 小动物正电子断层扫描系统具有低成本、高灵活性, 可不限时间用于连续动物实验等优点, 并且由于采用了更小的探测器晶体和更小的探测环直径, 可以得到更高的空间分辨率, 同时灵敏度也有了很大提升<sup>[1-3]</sup>.

浙江大学浙江加州国际纳米技术研究院 2005 年引进的 Concorde MicroPET Rodent R4 小动物正电子断层成像系统是 Concorde Microsystems 公司开发的小动物专用 PET 扫描仪, 主要用于啮齿类动物(如大鼠、小鼠)的全身显像, 也可以用于较大动物(如家猫、家兔)的头部扫描. Concorde MicroPET R4 系统拥有 78 mm 的轴向视野, 仅需几个床位即可实现对被测小动物的全身扫描. 本文以 Concorde MicroPET R4 系统为基础设计了一系列测试小动物正电子断层成像仪的横向分辨率、轴向分辨率、断层

成像灵敏度、散射率等性能指标的实验, 并给出相应的实验描述及最终结果. 同时由于我们这台小动物正电子断层成像系统是国内第一台专用的小动物正电子断层成像系统, 所以希望通过我们的工作, 能够对国内相关的科研工作及类似系统的性能评价提供一些参考.

## 2. MicroPET R4 系统概述

Concorde MicroPET R4 系统的动物入口孔径为 120mm, 不仅可以用于大鼠小鼠的全身成像, 还可用于较大动物如家猫家兔等的脑部成像. MicroPET R4 系统中采用了  $8 \times 8$  LSO 晶体阵列, 等效的单个晶体尺寸为  $2.1 \text{ mm} \times 2.1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 晶体中心距离为 2.4 mm, 阵列中的晶体通过 100mm 长的光纤与位置敏感型光电倍增管(PS-PMT, Hamamatsu R5900-C8)相耦合, 然后同其后续的信号读取电路一并构成探测器. 4 组探测器并列相接构成了系统的探测器模块, 所以整个系统具有 32 层晶体环. 系统的所有探测器模块, 排列成内直径为 148 mm 的探测器环. MicroPET R4 系统的横向视野为 100 mm, 轴向深度为 78 mm, 并在其显像孔径的两端, 加有厚度为 25 mm 的屏蔽层, 以限制视野外放射性因素的干扰<sup>[1, 3]</sup>.

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2003CB716100)、浙江省科技计划重点项目(批准号: 2005C21019)和浙江大学现代光学仪器国家重点实验室开放课题(批准号: LMOI-0403)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: liuhf@zju.edu.cn

### 3. 主要性能参数及测试方法

对于小动物正电子断层成像系统来说,需要测试的主要参数有空间分辨率、能量分辨率、灵敏度、散射率、图像实验等。由于目前国际上尚无针对小动物正电子断层成像仪的测试标准,所以除了传统上使用的 Na-22 点源和 Ge-68 线源,我们还设计了大鼠、小鼠圆筒模型、大鼠、小鼠散射模型、Derenzo 微孔阵列模型等一系列模型(图 1)来做辅助测试<sup>[4-7]</sup>。



图 1 性能测试实验中所用的各种模型

#### 3.1. 空间分辨率

空间分辨率测试实验中最好使用放射性活度约为  $50 \mu\text{Ci}$ 、直径不大于  $1 \text{ mm}$  的标准 Na-22 点源,因实验室所备 Na-22 点源的直径达到了  $2 \text{ mm}$  以上,而系统空间分辨率的标称值为小于  $1.8 \text{ mm}$ ,显然此点源无法满足实验的需要,所以实际实验中使用了横截面直径为  $0.5 \text{ mm}$  的不锈钢细管灌注  $0.15 \text{ mCi}$  F-18 FDG 来进行空间分辨率测试实验。横向分辨率测试时将此不锈钢细管沿轴向固定于扫描床上并移至视场中央,扫描床以  $1 \text{ mm}$  的步长沿垂直方向从视场中心位置移至视场边缘,每个位置采集一次,整个实验过程设定能窗范围为  $350\text{--}750 \text{ keV}$ ,每次采集时间为  $60 \text{ s}$ ,使用默认设置重建正弦图,然后使用 Fourier 重组和二维滤波反投影算法(FORE + 2D-FBP)重建图像,数据不需要进行校正,对重建的图像进行高斯插值处理,使用最终求得的半高宽(FWHM)来表征系统的横向空间分辨率。

考虑到横向分辨率实验和轴向分辨率实验没有相关性,并且 F-18 FDG 的半衰期只有  $110 \text{ min}$ ,所以在横向分辨率实验后更换新的灌注  $0.15 \text{ mCi}$  F-18 FDG 的不锈钢细管来进行轴向分辨率实验。轴向分

辨率测试时将此不锈钢细管垂直固定于扫描床上并移至视场中央,扫描床以  $0.25 \text{ mm}$  的步长沿轴向从视场中心位置移至视场边缘,每个位置采集一次,整个实验过程设定能窗范围为  $350\text{--}750 \text{ keV}$ ,每次采集时间为  $60 \text{ s}$ ,数据处理方式与横向分辨率测试相同。

#### 3.2. 绝对灵敏度

断层成像灵敏度是表征被探测率的一个参数,在使用计数损失和偶然符合均可忽略的低活度放射源条件下,符合事件按该比例被探测。测量使用 Na-22 点源,测量过程中应使偶然符合率小于总符合率的  $2\%$ 。点源固定于扫描床上,并移至视场中心位置,从视场中心到距视场中心  $50 \text{ mm}$  偏移范围内,每隔  $2.5 \text{ mm}$  采集一次,每次采集时间为  $60 \text{ s}$ ,对每一次测量分别设置能窗范围为  $410\text{--}613 \text{ keV}$ ,  $350\text{--}650 \text{ keV}$ ,  $250\text{--}750 \text{ keV}$ ,  $200\text{--}800 \text{ keV}$ ,使用默认设置生成三维正弦图,数据采集时仅对随机符合进行校正。

#### 3.3. 三维灵敏度

三维灵敏度测试是作为对绝对灵敏度测试的一个补充,进一步描述符合事件被探测的比例。将 Na-22 点源固定在扫描床上,移动至横向视场的中心,然后以  $5 \text{ mm}$  的步长移动扫描床经过整个轴向视野,每个位置采集一次,采集时间为  $60 \text{ s}$ ,然后再以  $5 \text{ mm}$  的步长沿垂直方向从视场的中心移至视场边缘,每个位置重复进行轴向采集过程得到全部数据,与绝对灵敏度使用同样方法生成三维正弦图。

#### 3.4. 散射率

在正电子湮没中形成的初级  $\gamma$  射线的散射,将导致对辐射源定位探测出现虚假信息的符合事件,设计和制造中的偏差引起正电子发射断层成像装置对散射辐射具有不同的灵敏度。参照 NEMA NU 2-2001 标准,分别设计直径  $60 \text{ mm}$ ,长  $150 \text{ mm}$ ,离中心轴  $13 \text{ mm}$  处有贯穿孔的聚乙烯大鼠模型和直径  $30 \text{ mm}$ ,长  $150 \text{ mm}$ ,离中心轴  $7 \text{ mm}$  处有贯穿孔的聚乙烯小鼠模型(小鼠散射模型如图 2 所示,大鼠散射模型与其类似,具体可参照图所有模型实物图),将线源插入孔中进行测量<sup>[7-9]</sup>。模型固定与扫描床上然后置在整个视场的中心,能窗上限固定为  $750 \text{ keV}$ ,能窗下限分别设为  $250 \text{ keV}$ ,  $300 \text{ keV}$ ,  $350 \text{ keV}$ ,  $400 \text{ keV}$ ,  $450 \text{ keV}$ ,测量五组数据。

切片  $j$  散射分数通过如下方法计算:

$$SF_j = \frac{C_{S,j}}{C_{tot,j}}, \quad (1)$$

$C_{S,j}$  与  $C_{tot,j}$  分别为切片  $j$  对应散射计数及总计数。 $C_{S,j}$  按 IEC 61675-1 定义从各切片正弦图的累计投影中求得。

### 3.5. 图像实验

图像实验通过对 Derenzo 微孔阵列模型成像来实现, Derenzo 微孔阵列模型中含有 1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm、3 mm、3.5 mm 共 6 组微孔, 模型中灌注混合  $2mCi$  F-18 FDG 的水溶液, 放入视场中心采集 3 h。为了达到可能出现的更好的图像效果, 我们采用

Fourier 重组和二维有序子集算法(FORE + OSEM2D)进行图像重建, 模型如图 3 所示。

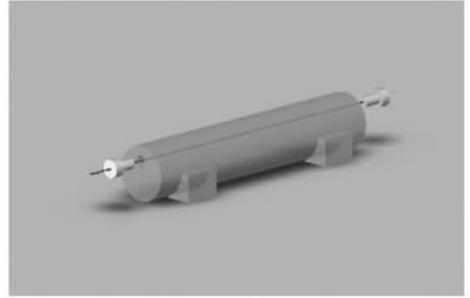


图 2 小鼠散射模型

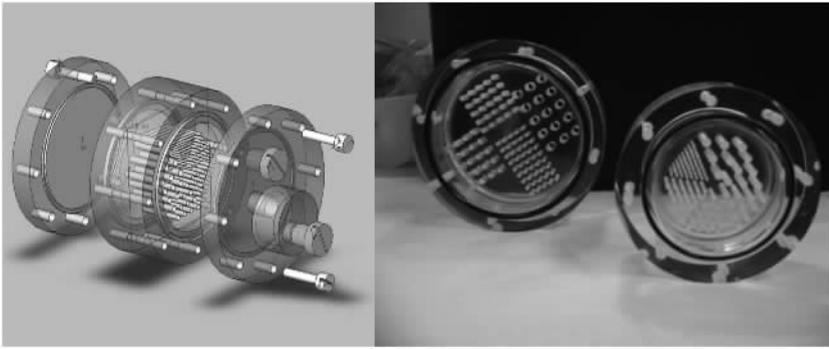


图 3 Derenzo 微孔阵列模型

## 4. 测试结果

### 4.1. 空间分辨率

使用滤波反投影(FBP)算法进行重建后得到的横向空间分辨率和轴向空间分辨率随偏移位置改变的曲线如图 4 所示。中心点的轴向分辨率为 1.88 mm, 横向分辨率为 1.9 mm, 5 mm 轴向偏移处的轴向分辨率为 2.05 mm, 5 mm 横向偏移处的横向分辨率为 2.23 mm。由于切片效应的存在, 从中心到 5 mm 偏移处的分辨率有较大的波动。横向分辨率从距视场中心 10 mm 偏移处至视场边缘近似线性变化。由于测试中使用了 F-18FDG 灌注的不锈钢细管而非标准点源, 考虑到衰减及实验环境的影响, 目前使用 FBP 算法重建得到的空间分辨率的结果已经可以满足要求。

### 4.2. 绝对灵敏度和三维灵敏度

使用 Na-22 点源测得的绝对灵敏度曲线如图 5

(a)所示。不同能量窗口下视野中心的平均灵敏度如下: 能窗 410—613 keV 时为 19.66 cps/kBq, 能窗 350—650 keV 时为 24.91 cps/kBq, 能窗 250—750 keV 时为 39.88 cps/kBq, 能窗 200—800 keV 时为 47.48 cps/kBq。测得的三维灵敏度图像如图 5(b)所示。

### 4.3. 散射率

二维数据经单个切片重组(SSRB)得到(设置环间距为 15 mm, 张角为  $31^\circ$ )。不同能量窗口下限对应的系统散射分数由各切片散射分数的平均数求得, 能窗下限分别设定为 250 keV, 300 keV, 350 keV, 400 keV, 450 keV 时, 测得的平均散射分数分别为 50.6%、41.9%、36.1%、29.6%、20.8%。二维模式下不同能窗下限时各切片散射分数如图 6(a)所示。

三维数据经 3D 模式得到(设置环间距为 15 mm, 张角为  $31^\circ$ )。不同能量窗口下限对应的系统散射分数由各切片散射分数的平均数求得, 能窗下限分别设定为 250 keV, 300 keV, 350 keV, 400 keV, 450 keV 时, 测得的平均散射分数分别为 32.3%、26.8%、20.7%、15.6%、9.7%。三维模式下不同能窗下限时各切片散射分数如图 6(b)所示。

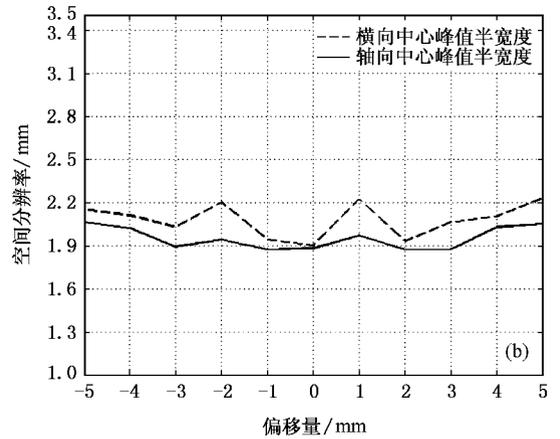
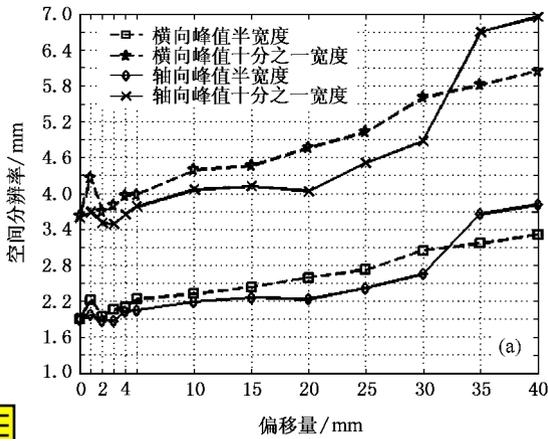


图 4 (a) 空间分辨率随偏移位置改变曲线 (b) 系统视场中心处的空间分辨率曲线

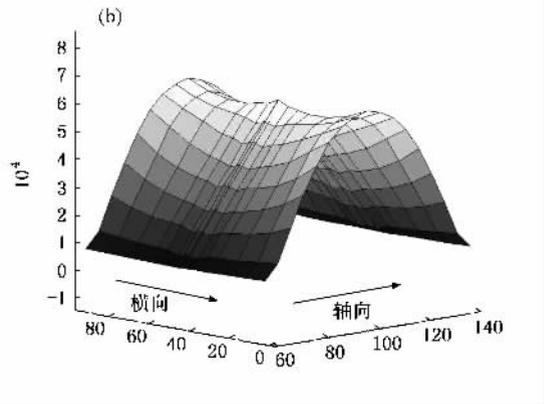
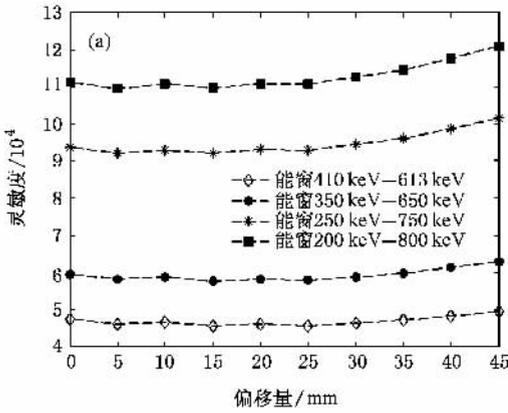


图 5 (a) 不同能窗下的二维灵敏度曲线 (b) 整体三维灵敏度曲线

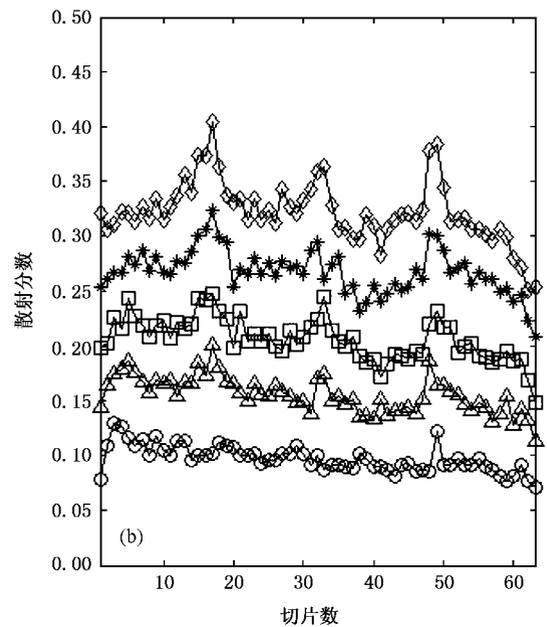
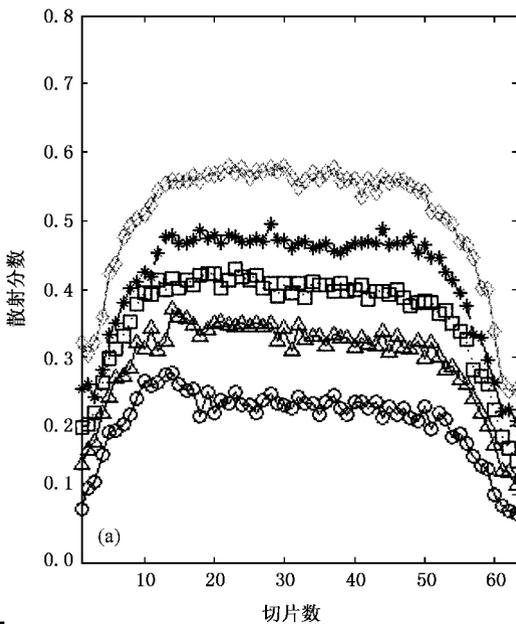


图 6 (a) 二维模式不同能窗下限各切片散射分数图(从上到下能窗下限依次为 250 keV 300 keV 350 keV 400 keV 450 keV) (b) 三维模式不同能窗下限各切片散射分数图(从上到下能窗下限依次为 250 keV 300 keV 350 keV 400 keV 450 keV)

#### 4.4. 图像实验

Derenzo 微孔阵列模型成像结果如图 7 所示,图

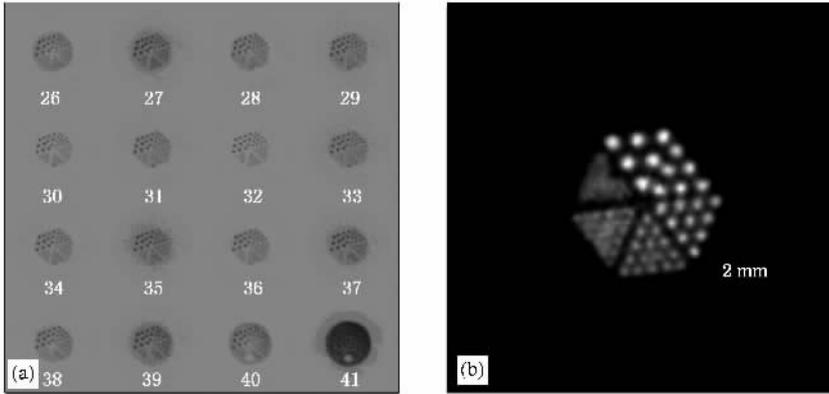


图 7 Derenzo 微孔阵列模型成像结果

## 5. 结 论

通过我们设计的一系列实验已经能够比较全面的测得 Concorde MicroPET R4 小动物正电子断层成像系统的性能参数。测试结果显示该扫描仪视野中心的横向空间分辨率为 1.9 mm, 轴向空间分辨率为

1.88 mm, 在能窗设定为 250—750 keV 时系统的绝对灵敏度为 39.88 cps/kBq, 同样能窗下二维重建散射分数为 50.6%, 三维重建散射分数为 32.3%。

特别感谢浙江大学医学 PET 中心的各位医师提供性能测试所需的放射性药物、纯净水以及其他支持。

- [ 1 ] Concorde Microsystems Inc. Concorde Microsystems manual 2006
- [ 2 ] Knoess C, Siegel S, Smith A, Newport D, Richerzhagen N, Winkeler A, Jacobs A, Goble R N, Graf R, Wienhard K, Heis W D 2003 *Eur J Nucl Med Mol Imaging* **30** 737
- [ 3 ] Tian Y 2006 *Doctor thesis* ( Zhejiang University )( in Chinese )[ 田毅 2006 浙江大学博士论文 ]
- [ 4 ] GB/T 18988.1 - 2003/IEC 61675 - 1 :1998 ( in Chinese )[ 正电子发射断层成像装置国家标准 ]
- [ 5 ] Tai Y C, Chatziioannou A, Siegel S, Young J, Newport D, Goble R N, Nutt R E, Cherry S R 2001 *Phys. Med. Biol* **46** 1845
- [ 6 ] Tai Y C, Ruangna A, Rowland D, Siegel S, Newport D, Chow P L, Laforest R 2005 *the Journal of Nuclear Medicine* **46** 455
- [ 7 ] NEMA NU 2 - 2001 Standard
- [ 8 ] Zhao H, Huang J, Lan H, Dong B Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2005 ( in Chinese )[ 赵 辉、黄 健、蓝 海、董宝中 2004 物理学报 **53** 2005 ]
- [ 9 ] Wei Q, Liu H, He S Y, Hao X P, Wei L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5525 ( in Chinese )[ 魏 强、刘 海、何世禹、郝小鹏、魏龙 2006 物理学报 **55** 5525 ]

# Performance evaluation of the microPET system<sup>\*</sup>

Gao Fei<sup>1)</sup> Liu Hua-Feng<sup>1)†</sup> Shi Peng-Cheng<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> *Stat Key Laboratory of Modern Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*

<sup>2)</sup> *Key Laboratory of Medical Image Processing, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China*

( Received 27 September 2006 ; revised manuscript received 3 December 2006 )

## Abstract

The Concorde MicroPET Rodent R4 system designed by Concorde Microsystems Inc. is the dedicated positron emission tomography (ECT) for studies of rodents. The scanner has 32 detector rings and a 120mm animal aperture. The transversal field of view (FOV) is 100mm, and the axial FOV is 78 mm. The spatial resolution at the center of FOV is smaller than 1.8 mm. This paper designs a series of experiments to evaluate the performance parameters (spatial resolution, sensitivity, scatter etc.) of the scanner. In the center FOV the transversal spatial resolution is 1.9mm, the axial spatial resolution is 1.88mm. The absolute sensitivity of the system is 39.88 cps/kBq for an energy window of 250KeV-750KeV. For the same energy window the 2D-reconstructed scatter fractions is 50.6%, the 3D-reconstructed scatter fractions is 32.3%.

**Keywords :** microPET, performance evaluation

**PACC :** 7870

<sup>\*</sup> Project supported by National Basic Research Program of China ( Grant No.2003CB716100 ), Key R&D Program of Science and Technology Department of Zhejiang Province ( Grant No.2005C21019 ) and Open Foundation by State Key Lab of Modern Optical Instrumentation ( Grant No.LMOI-0403 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : liuhf@zju.edu.cn