



ASIPP

# 用于EAST装置软X射线能谱诊断的10单元硅漂移探测系统

张继宗 胡立群 林士耀 徐立清 席莹

中科院等离子体物理研究所

2012. 8. 15



- EAST装置
- 软X射线能谱物理原理及其作用
- 系统的组成及测试
- 实验结果
- 总结

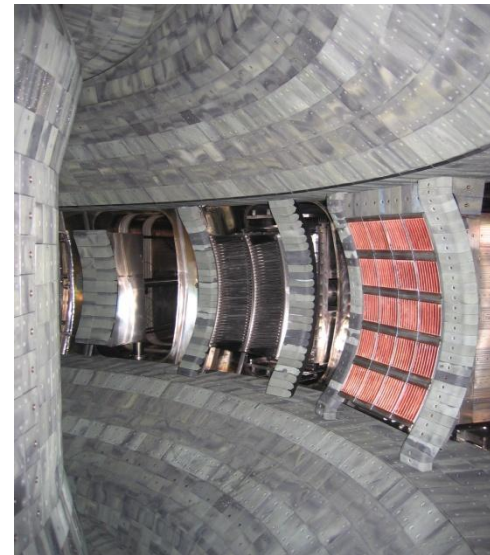
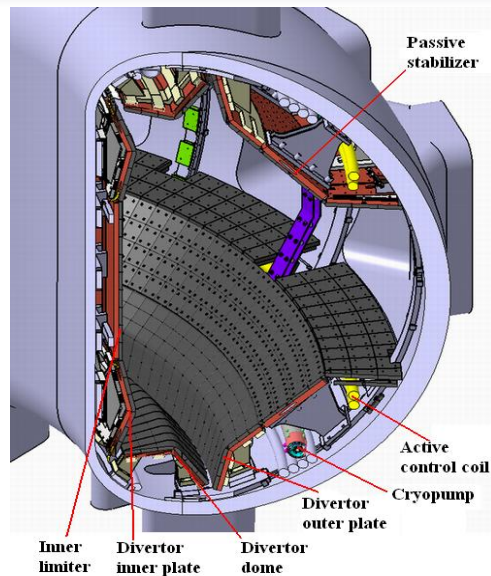
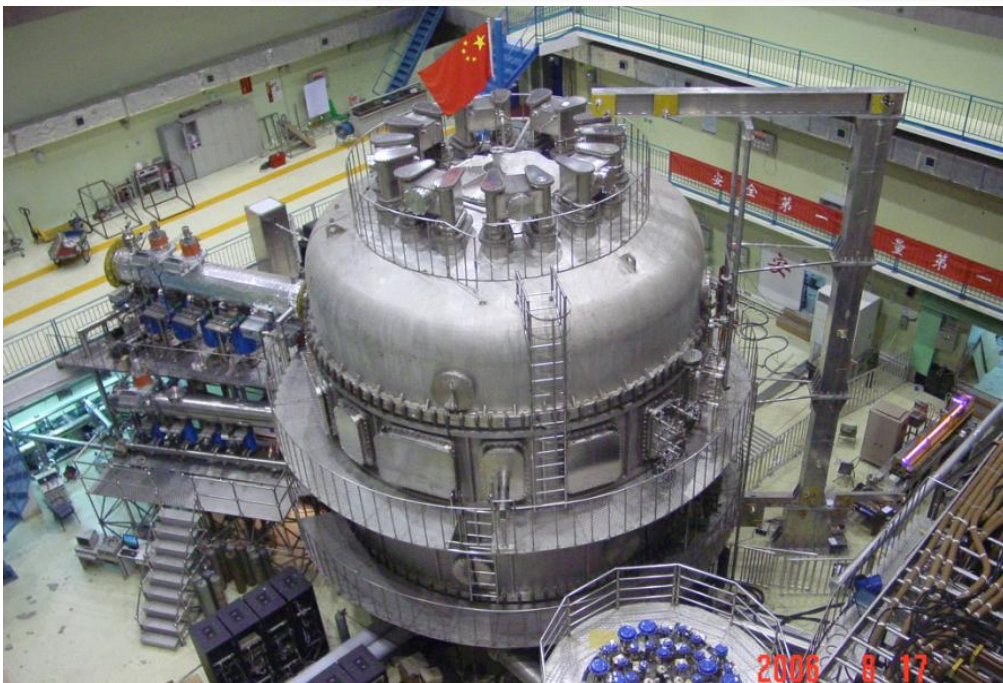


- **EAST装置**
- 软X射线能谱物理原理及其作用
- 系统的组成及测试
- 实验结果
- 总结



# EAST装置

ASIPP



EAST托卡马克是世界上第一台建成并投入运行的全超导非圆截面磁约束聚变实验装置，其基本参数：**纵场：1.5~3.5T；大半径：1.85m；小半径：0.45m；拉长比：1.2~2；运行电流：0.3-1MA；ICRF功率：6MW；LHCD功率：4MW。**

在2012年度实验中创造了两项托卡马克运行的世界记录：获得超过400秒长脉冲的高参数偏滤器等离子体、稳定重复超过30秒的高约束等离子体。



# 主要内容

ASIPP

- EAST装置
- 软X射线能谱物理原理及其作用
- 系统的组成及测试
- 实验结果
- 总结



## 等离子体中软X射线产生机制:

### 1) 轫致辐射:

$$\frac{dP_{ff,ij}(T_e, E_\nu)}{dE_\nu} = 3 \times 10^{-15} n_e n_i \left( \frac{n_{ij}}{n_i} \right) Z_{iff}^2 T_e^{-1/2} \times \bar{g}_{ff}(T_e, E_\nu) \exp(-E_\nu / T_e) [keV / (keV \cdot cm^3 \cdot s)]$$

### 2) 复合辐射:

$$\frac{dP_{fb,ij}(T_e, E_\nu)}{dE_\nu} = 3 \times 10^{-15} n_e n_i \left( \frac{n_{ij}}{n_i} \right) Z_{ij}^2 T_e^{-1/2} \times \beta_{ff}(T_e, E_\nu) \exp(-E_\nu / T_e) [keV / (keV \cdot cm^3 \cdot s)]$$

### 3) 线辐射:

$$P_L(T_e) = n_e n_i \langle \sigma \nu \rangle_{T_e, K\alpha} E_{K\alpha} \frac{keV}{cm^3 \cdot s}$$





## 等离子体中软X射线产生机制:

### 1) 轫致辐射:

$$\frac{dP_{ff,ij}(T_e, E_\nu)}{dE_\nu} = 3 \times 10^{-15} n_e n_i \left( \frac{n_{ij}}{n_i} \right) Z_{iff}^2 T_e^{-1/2} \times \bar{g}_{ff}(T_e, E_\nu) \exp(-E_\nu / T_e) [keV / (keV \cdot cm^3 \cdot s)]$$

### 2) 复合辐射:

$$\frac{dP_{fb,ij}(T_e, E_\nu)}{dE_\nu} = 3 \times 10^{-15} n_e n_i \left( \frac{n_{ij}}{n_i} \right) Z_{ij}^2 T_e^{-1/2} \times \beta_{ff}(T_e, E_\nu) \exp(-E_\nu / T_e) [keV / (keV \cdot cm^3 \cdot s)]$$

### 3) 线辐射:

$$P_L(T_e) = n_e n_i \langle \sigma v \rangle_{T_e, K\alpha} E_{K\alpha} \frac{keV}{cm^3 \cdot s}$$



## 通过分析软X射线能谱数据

- 热电子和超热电子速率时、空分布
- 热电子和超热电子温度时、空分布
- 中、高Z杂质含量时、空分布
- 有效电荷数 $Z_{\text{eff}}$





# 主要内容

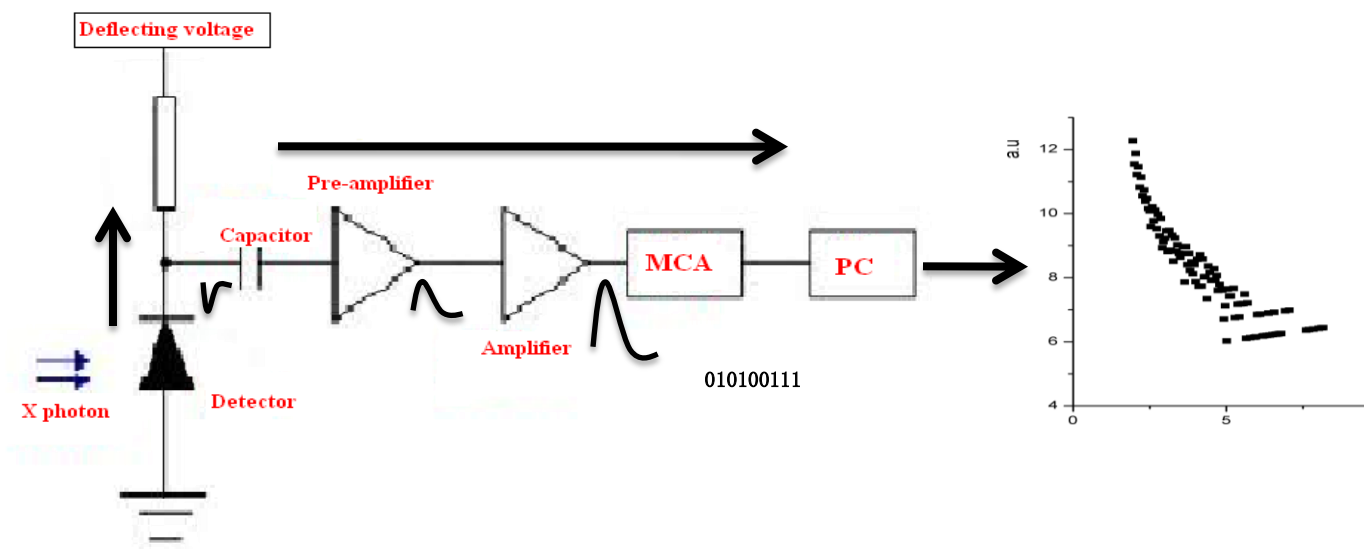
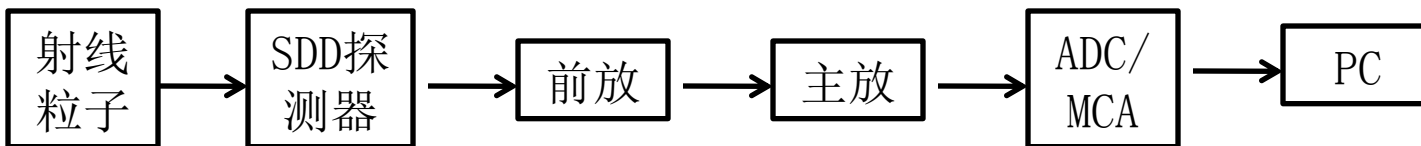
ASIPP

- EAST装置
- 软X射线能谱物理原理及其作用
- 系统的组成及测试
- 实验结果
- 总结



# 软X射线能谱系统工作原理

## 能谱的采集

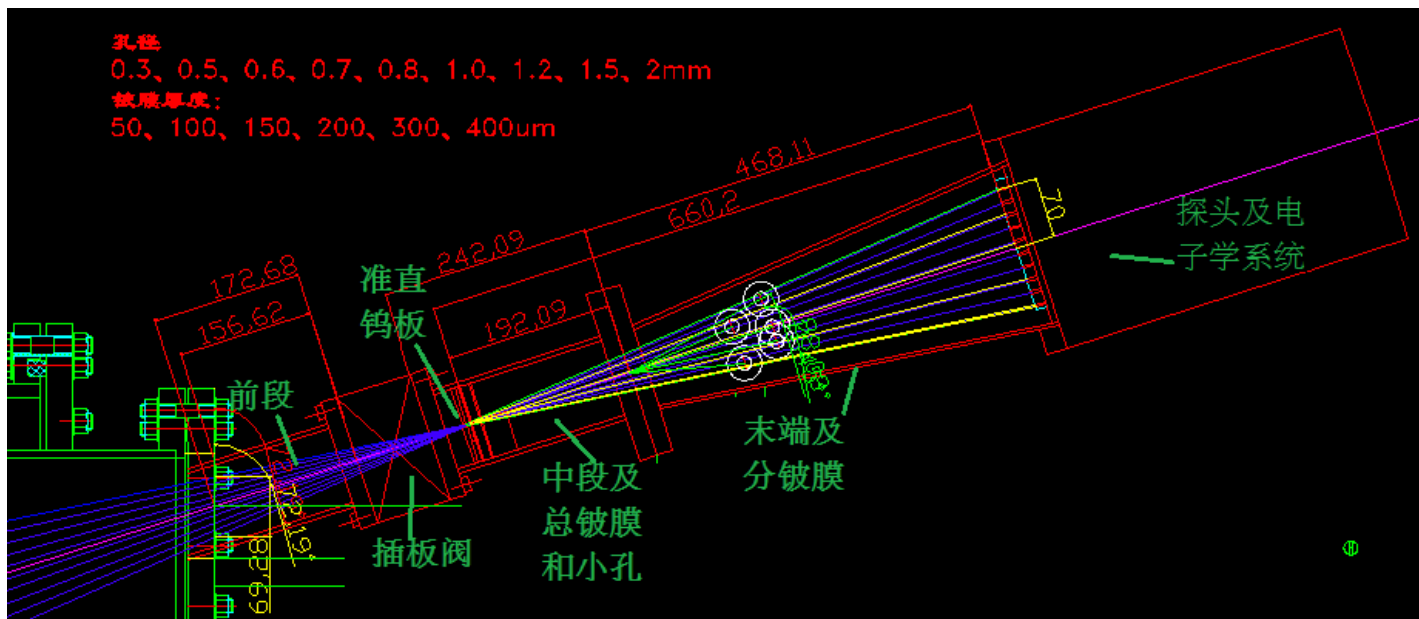


软X射线能谱系统中信号传输过程



# 软X射线能谱系统结构

ASIPP



10个高性能SDD探测器组成的线性阵列，探测器能量分辨率： $<133\text{eV}@5.9\text{keV}$   
10套相应的高速前放和主放，主放成型时间为 $0.25\mu\text{s}$ ，最大计数率为 $150\text{kcps}$   
5套铍膜和一套准直孔调节装置，用于调节光通量在合适的范围( $10\text{kcps}-100\text{kcps}$ )  
一套 $\Phi 100$ 插板阀用做能谱系统与EAST装置主真空室的隔离，便于系统装卸

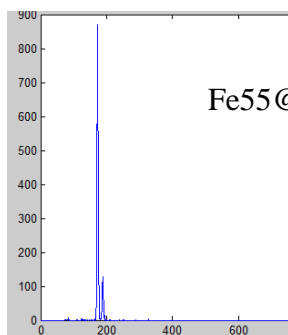


# 软X射线能谱系统测试标定

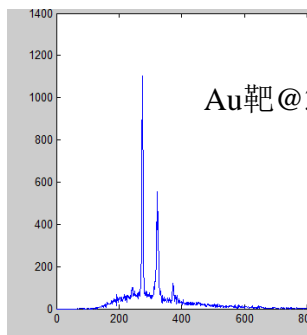
ASIPP

采用Fe-55源和AMTEK生产的金靶和银靶X射线管标定

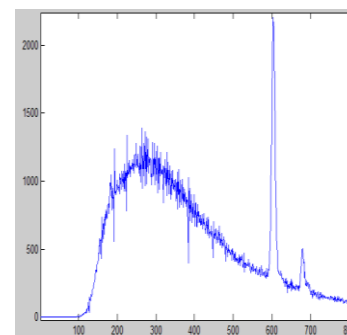
元素	特征线名	能量值keV
Mn-55	K $\alpha$	5.90
	K $\beta$	6.49
Ag-107.8	K $\alpha$	22.10
	K $\beta$	24.92
Au-197.2	L $\alpha$	9.71
	L $\beta$	11.44
	L $\gamma$	13.38



Fe55@3kcps



Au靶@30kcps



Ag靶@90kcps



# 软X射线能谱系统标定结果

ASIPP

探测器序号	特征能量keV	峰值道址	半高宽道数	线性拟合	探测器序号	特征能量keV	峰值道址	半高宽道数	线性拟合
01	5.90	174	4 ( 146 )	$y = 27.36x + 13.10$ $R^2 = 1$ <b>146eV@5.9ke</b> V <b>EMax=33keV</b>	06	5.90	169	4 ( 147 )	$y = 27.25x + 8.803$ $R^2 = 1$ <b>147eV@5.9ke</b> V <b>EMax=33keV</b>
	6.49	190	4			6.49	186	4	
	22.10	617	11			22.10	611	11	
	24.92	695	12			24.92	688	12	
	9.71	279	6			9.71	273	5	
	11.44	327	8			11.44	322	8	
	13.38	380	8			13.38	373	9	
02	5.90	183	4 ( 148 )	$y = 27.00x + 24.47$ $R^2 = 1$ <b>148eV@5.9ke</b> V <b>EMax=33keV</b>	07	5.90	-	-	
	6.49	199	4			6.49	-	-	
	22.10	621	10			22.10	-	-	
	24.92	697	12			24.92	-	-	
	9.71	287	5			9.71	-	-	
	11.44	335	9			11.44	-	-	
	13.38	386	9			13.38	-	-	
03	5.90	173	4 ( 150 )	$y = 26.56x + 16.63$ $R^2 = 1$ <b>150eV@5.9ke</b> V <b>EMax=34keV</b>	08	5.90	169	4 ( 144 )	$y = 27.74x + 5.952$ $R^2 = 1$ <b>144eV@5.9ke</b> V <b>EMax=32keV</b>
	6.49	189	4			6.49	186	4	
	22.10	603	11			22.10	619	11	
	24.92	679	13			24.92	697	12	
	9.71	274	5			9.71	275	6	
	11.44	322	8			11.44	324	9	
	13.38	372	8			13.38	378	10	
04	5.90	168	4 ( 146 )	$y = 27.29x + 7.680$ $R^2 = 1$ <b>146eV@5.9ke</b> V <b>EMax=33keV</b>	09	5.90	172	4 ( 145 )	$y = 27.56x + 9.508$ $R^2 = 1$ <b>145eV@5.9ke</b> V <b>EMax=32keV</b>
	6.49	184	4			6.49	188	5	
	22.10	611	11			22.10	619	11	
	24.92	687	12			24.92	696	13	
	9.71	272	5			9.71	277	6	
	11.44	322	8			11.44	326	10	
	13.38	374	8			13.38	378	10	
05	5.90	169	4 ( 146 )	$y = 27.28x + 8.299$ $R^2 = 1$ <b>146eV@5.9ke</b> V <b>EMax=33keV</b>	10	5.90	167	4 ( 145 )	$y = 27.51x + 5.143$ $R^2 = 1$ <b>145eV@5.9ke</b> V <b>EMax=32keV</b>
	6.49	185	4			6.49	184	5	
	22.10	611	11			22.10	613	12	
	24.92	688	12			24.92	691	13	
	9.71	273	5			9.71	272	6	
	11.44	321	8			11.44	321	9	
	13.38	374	9			13.38	373	10	



# 主要内容

ASIPP

- EAST装置
- 软X射线能谱物理原理及其作用
- 系统的组成及测试
- 实验结果
- 总结

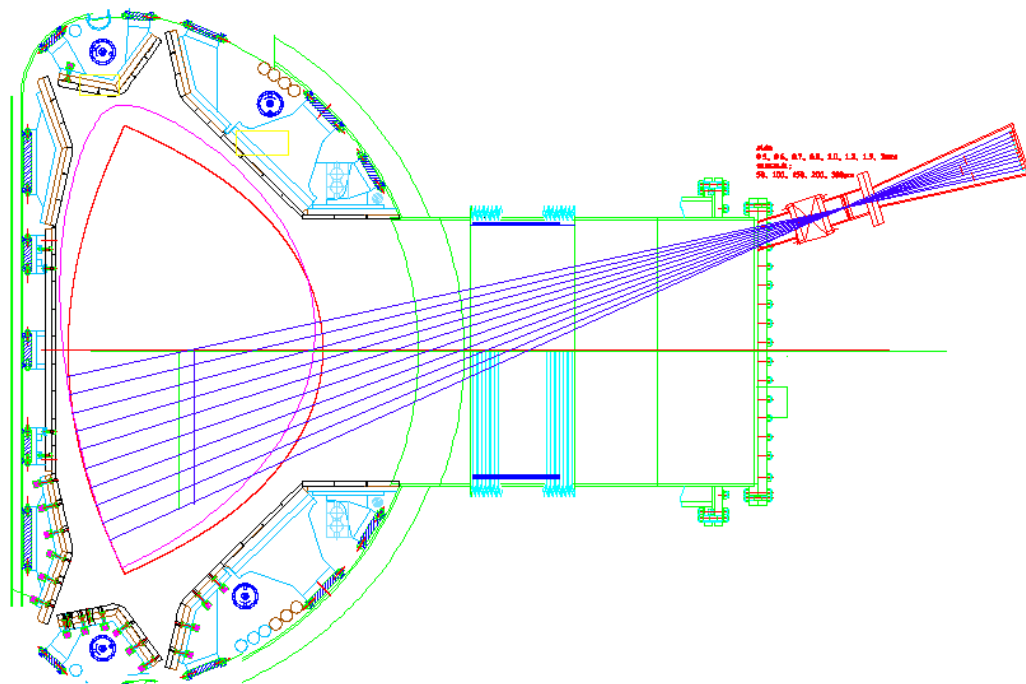


# 2012年度实验

ASIPP

## 系统空间布局

右图为软X射线系统在EAST上的安装示意图。观测范围覆盖等离子体的下半空间。每道探测器观测弦在 $R=1.85\text{m}$ 处的间距约为 $60\text{mm}$ ，具体弦位置见下表



10条弦在 $R=1.85\text{m}$ 处与水平赤道面的距离表（单位mm）

Channel	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
Distance	0	-55	-115	-175	-240	-305	-365	-435	-500	-570

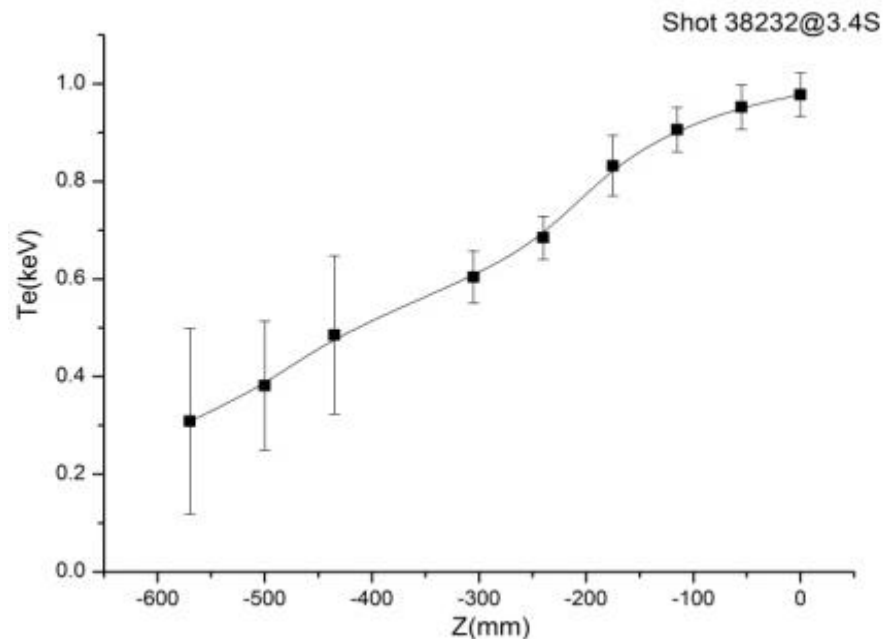
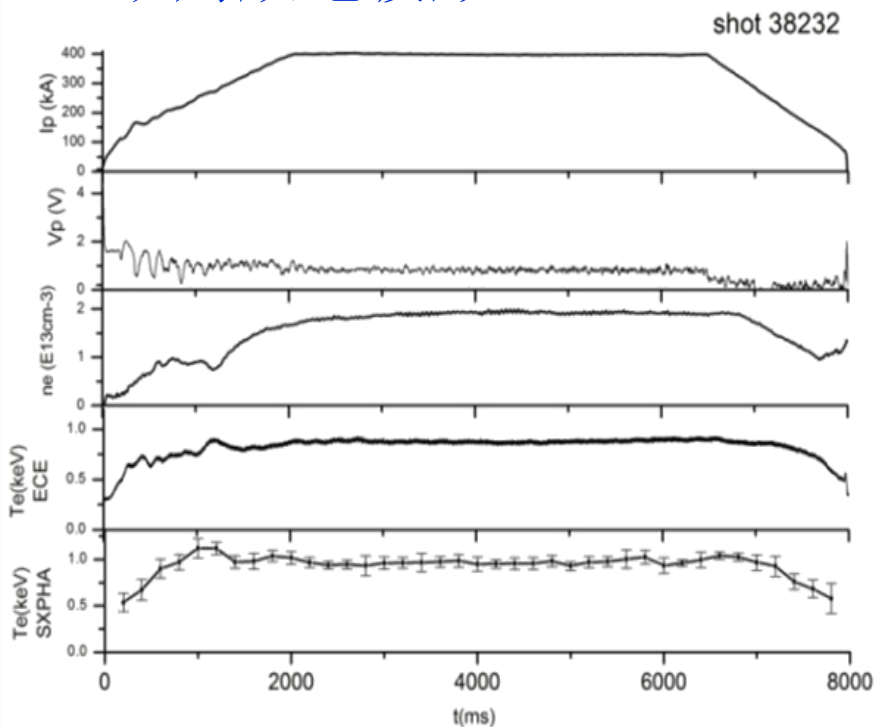




# 实验结果 (一)

ASIPP

## 欧姆放电波形



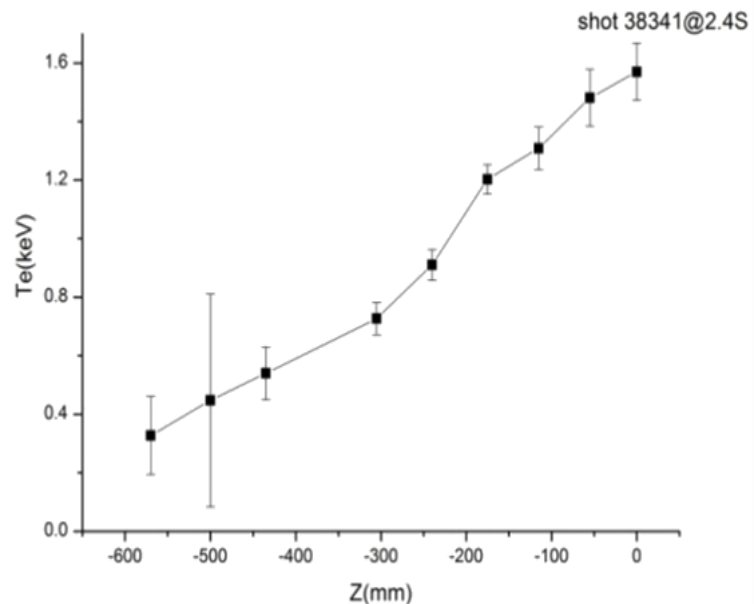
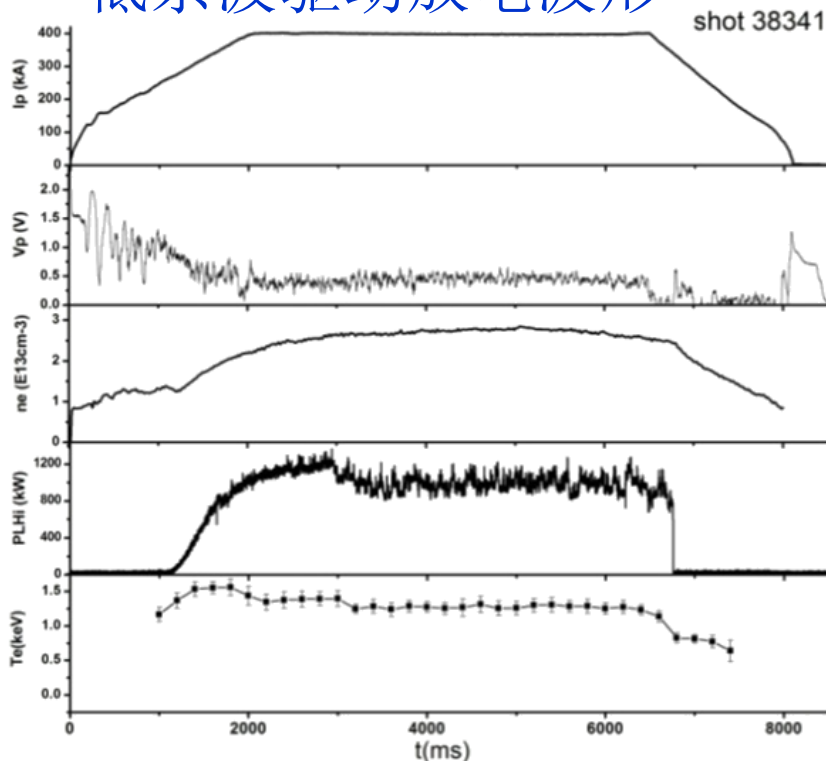
软X射线能谱诊断系统测量的电子温度随时间演化与ECE系统测量的基本是一致的。电子温度分布比较平缓，其趋势接近抛物线分布  $T_e(r) = T_{e0}(1 - (r/a)^2)^\alpha$



# 实验结果 (二)

ASIPP

## 低杂波驱动放电波形

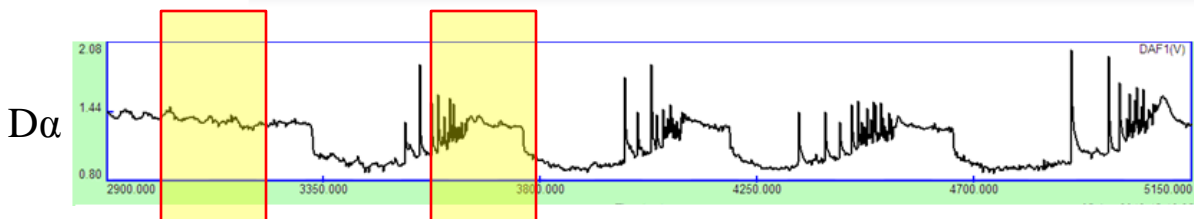


低杂波功率为1MW。从左图中可以看出，在3S附近时刻，电子温度也随低杂波功率降低而降低。右图为测得电子温度的空间分布。与欧姆放电相比较，在低杂波放电条件下，等离子体的电子温度剖面呈现峰化的趋势。



# 实验结果 (三)

ASIPP

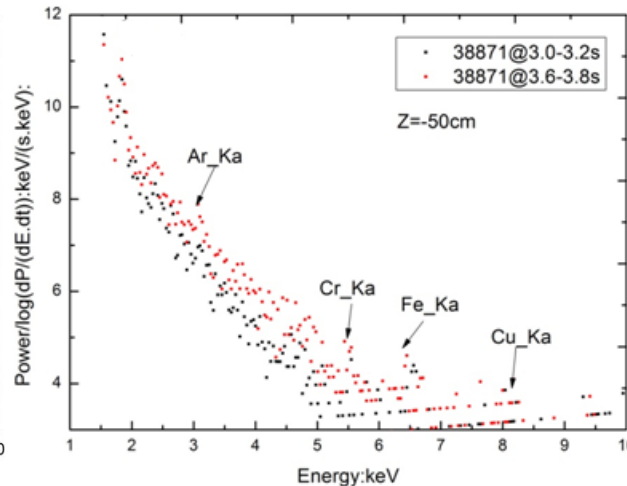
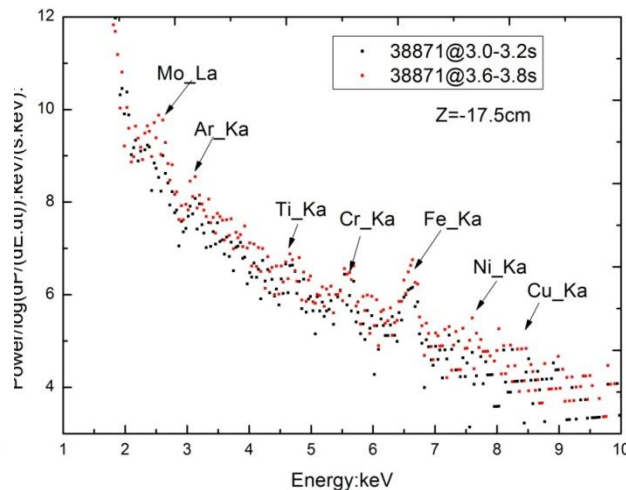
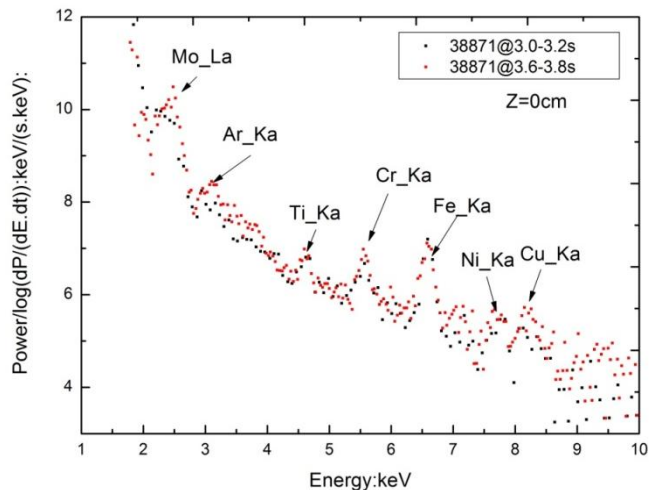


LH模转换放电

$I_p \sim 500 \text{ kA}$ ,  $N_e \sim 1.9 \rightarrow 5.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

$P_{\text{LHCD}} \sim 1.50 \text{ MW}$ ,  $P_{\text{ICRF}} \sim 400 \text{ kW}$ ,

位型~双零 (SN)



- 中、高Z杂质在等离子体内有明显的聚芯行为
- 在H模期间中、高Z杂质的线辐射强度要比L模期间强一些



# 主要内容

ASIPP

- EAST装置
- 软X射线能谱物理原理及其作用
- 系统的组成及测试
- 实验结果
- 总结



# 总结

ASIPP

- 基于高性能的10元SDD阵列，在EAST全超导托卡马克上建立了1套覆盖等离子体下半空间的软X射线能谱诊断系统
- 该诊断系统在EAST的2012春季实验中投入使用，获得了在各种放电条件下的电子温度和中、高Z杂质的时空分布，并验证了其有效性和可靠性
- 作为测量电子温度的传统诊断之一，该套软X射线能谱能够为相关物理问题的研究提供必要的数据
- 本诊断系统也是研究EAST等离子体中的中、高Z杂质行为的有力工具



**ASIPP**

**Thank You**