RHIC-STAR时间投影室的升级

杨驰¹, 陈金辉², 马余刚^{2,3}, 徐庆华^{1*}

1. 山东大学前沿交叉科学青岛研究院, 粒子物理与粒子辐照教育部重点实验室, 青岛 266237;

2. 复旦大学现代物理研究所, 核物理与离子束应用教育部重点实验室, 上海 200433;

3. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800

*联系人, E-mail: xuqh@sdu.edu.cn

收稿日期: 2019-02-18; 接受日期: 2019-03-13; 网络出版日期: 2019-05-31

国家自然科学基金(编号: 11520101004)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2014CB845400)资助

摘要 位于美国布鲁克海文国家实验室的相对论重离子对撞机RHIC计划于2019–2020年进行能量扫描二期实验项目, 其主要科学目标是研究强相互作用物质的相结构并寻找相变临界点. STAR时间投影室内扇区丝室升级(inner TPC, iTPC)是该项目关键的探测器升级. iTPC升级将拓展STAR带电粒子测量的赝快度覆盖区间, 并提高动量及能量损失测量的分辨率. iTPC升级将重新制作包括读出丝室和电子学在内的全部24块内扇区模块. iTPC丝室包括阳极丝、阴极丝、门极丝共3层丝面, 丝张力及丝面的高度都需要高精度控制. 我们设计了丝张力精密测量装置以及高精度丝面安装系统, 高质量完成了全部iTPC丝室探测器的研制. 实现了探测器增益均匀性1.5% (RMS)、能量分辨率25%(FWHM), 及强辐射环境下稳定工作的出色性能, 已在STAR实验安装并开始实验运行.

关键词 时间投影室, 多丝正比室, 增益均匀性, 能量分辨率

PACS: 29.30.-h, 29.40.Cs, 29.40.Gx

1 STAR时间投影室升级介绍

位于美国布鲁克海文国家实验室的相对论重离子对撞机RHIC上的STAR实验组计划于2019年开始进行重离子碰撞的能量扫描二期实验, 其主要物理目标是研究强相互作用(QCD)物质的相结构及可能存在的相变临界点^[1]. 该能量扫描的范围是基于能量扫描一期发现的出现相变迹象的低能量区域. RHIC能量扫描一期项目从2010年开始, 2014年结束, 扫描了从每核子质心系对撞能量200–7.7 GeV之间的8个能量. 结果显示,

20 GeV以下的区间有跟相变相关的重要物理课题, 例如QCD相变临界点、夸克胶子等离子体(Quark Gluon Plasma, QGP)消失信号、一阶相变及手征相变等. 在能量扫描二期中, STAR实验将重点获取高统计量的20 GeV以下的金核-金核碰撞数据^[1].

对STAR时间投影室(Time Projection Chamber, TPC)内扇区读出丝室升级(inner TPC, iTPC)是STAR二期能量扫描计划的重要组成部分^[2], 也是STAR即将开展的能量扫描二期实验至关重要的前提. 时间投影室是一种能同时测量带电粒子的三维空间坐标、动量

引用格式: 杨驰, 陈金辉, 马余刚, 等. RHIC-STAR时间投影室的升级. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 102008

Yang C, Chen J H, Ma Y G, et al. Inner TPC upgrade at RHIC-STAR (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 102008, doi: 10.1360/SSPMA-2019-0049

和鉴别粒子种类的气体漂移探测器. STAR时间投影室为桶状结构(见图1), 长度4.2 m, 桶部直径4 m. 它具有极好的空间分辨率、动量分辨率和电离能损 dE/dx 分辨率, 实现方位角全覆盖, 粒子识别能力强^[3]. 自RHIC运行以来, TPC已成功运行近20年, 性能稳定可靠, 是STAR探测器的核心. 基于该探测器STAR实验取得了一系列的重要科学发现, 例如发现了近完美流体的存在和喷注淬火现象, 观测到强的部分子集体流^[4], 观测到最重的反物质原子核-反氦4^[5-7]等.

iTPC升级对TPC内扇区读出丝室进行重新优化设计和制作, 包括阴极读出条的重新优化设计, 采用新一代电子学并实现全覆盖, 以及对丝室的完全更新. 升级目标包括: (1) 拓展粒子赝快度覆盖区间、提高粒子测量的接收度; (2) 更好的动量分辨以及提高用于粒子鉴别的能量损失的精度; (3) 降低带电粒子的可鉴别横动量下限. 此升级通过增加读出通道数, 把读出条从13列增加到40列, 从而把目前内扇区只有20%的读出覆盖率提高到接近100%的读出覆盖. 这些改进可以把时间投影室的赝快度覆盖从 $|\eta| < 1.0$ 提高到 $|\eta| < 1.5$, 带电粒子能损分辨率从7.5%提高到5.8%, 可鉴别的粒子横动量下限由125 MeV/c降低到60 MeV/c. 在此升级中, 所有24块时间投影室内扇区的多丝正比室(Multiwire Proportional Chamber, MWPC)模块都将被替换成全新的模块. 图2是一个内扇区模块的示意图.

iTPC丝室升级由STAR合作组内多个研究单位合作完成, 其中读出丝室由中国组负责, 电子学由美国负责. 本文将重点介绍STAR中国组负责的iTPC读出丝室探测器的研制及性能测试结果.

图1 (网络版彩图)STAR实验时间投影室结构
Figure 1 (Color online) Structure of STAR TPC.

2 iTPC端盖多丝正比室模块制作

iTPC读出丝室模块结构如图2所示, 包括铝制的支撑背板, 读出板及阳极、阴极和门极三层丝面等. 制作过程中需要严格控制丝的位置和张力的参数, 以满足升级的性能指标要求. 具体的制作包括以下几个步骤: 读出板黏合、丝挂载安装、绕丝和丝面安装.

单个丝室模块包含164根阳极丝、681根阴极丝以及681根门极丝. 三层丝的详细参数见表1. 丝张力、丝间距(Pitch)和三层丝面的距离都有很高的精度要求, 以保证探测器的均匀性和稳定性. 其中, 丝张力的精度要求为 $\pm 6\%$, 而丝间距和不同丝面距离的精度要求10 μm 以内. 下面分别描述如何实现该质量控制.

在丝面安装前, 各类丝将首先由绕线机绕在一个可拆卸的丝框上. 在绕丝的过程中, 丝张力和丝间距

图2 (网络版彩图)iTPC端盖丝室模块分解图(a)和示意图(b). 图片来自文献[8]
Figure 2 (Color online) The exploded view (a) and the assembly (b) of iTPC sector. Plot is from ref. [8].

表 1 iTPC 丝室主要参数

Table 1 iTPC wire parameters

丝面	材料	直径 (μm)	丝间距 (mm)	与读出板距离 (mm)	张力 (N)
阳极	钨丝	20	4	2	0.5
阴极	铍铜丝	75	1	4	1.2
门极	铍铜丝	75	1	10	1.2

由张力传感器和步进电机控制. 在绕丝完毕涂胶固定后, 我们利用专门设计的通过震动频率来检测丝张力的激光检测系统, 来进行丝张力的逐丝扫描. 这套系统通过一个吹气孔使得待测丝震动, 然后收集丝上反射的激光信号幅度转换成的电信号, 用傅里叶分析的方法获得该丝震动的特征频率, 从而计算得到丝张力, 张力的测量精度小于1%. 图3是丝张力测试系统的照片, 具体的测量原理和过程详见文献[9]. 图4(a)给出了一个阳极丝张力测量的结果.

丝框张力检测合格后, 通过包括丝梳在内的落丝系统安装到丝室铝框的挂载上. 落丝系统主要由高平整度($6\mu\text{m}$ 以内)的花岗石平台、丝梳系统、丝框位移装置、涂胶系统构成. 落丝系统的各部分集成到花岗石台子上, iTPC模块置于系统的中央, 落丝时丝框覆盖整个探测器, 见图5. 丝梳由其水平和垂直两个平面来保证两个方向的位置精度都在 $10\mu\text{m}$ 以内. 丝梳根据每层丝面的高度被固定在花岗石台面. 在整个丝框的丝面通过导轨调节准确落入丝梳的齿中, 并完全接触到水平和垂直的两个基准面后, 整个丝面的丝间距

图 3 (网络版彩图)利用震动频率抽取丝张力的激光测试系统

Figure 3 (Color online) Laser-based wire tension measurement system based on vibration frequency.

和丝面高度就被精确地固定下来, 然后把丝用胶固定在丝挂载上并逐根焊接. 图4(a)是一个丝室模块的阳极丝张力分别在丝框上和固定到丝挂载之后的测量结果. 可以看出, 落丝过程很好地保持了丝的张力, 并且

图 4 (网络版彩图)阳极丝面在丝框上和安装到模块上后的丝张力分布和丝间距分布. (a) 丝张力分布: 蓝色代表丝框上的丝张力, 红色是丝面安装后的丝张力; (b) 丝间距分布: 阳极丝在丝框上和安装到丝挂载上后的丝间距分布, 并用高斯函数拟合, 其标准偏差分别用 σ_s 和 σ_t 表示

Figure 4 (Color online) The distribution of wire tension and wire pitch of the anode wire on the wire frame and on the sector. (a) Wire tension distributions on transfer frame (blue) and on sector (red). (b) The anode wire pitch distribution on the wire transfer frame (blue) and on the sector (red). Gaussian functions are used in the fit. σ_s and σ_t are the standard deviations of wire pitch distribution on sector and on wire transfer frame, respectively.

图 5 (网络版彩图)丝框安装系统
Figure 5 (Color online) Wire mounting system.

测量值落在 (51 ± 3) g以内, 达到 $(0.5 \pm 6\%)$ N的精度要求.

我们的丝张力测试系统还可以通过激光逐丝扫描来精确测量丝间距. 图4(b)是阳极丝面在丝框上和安装到模块上后的丝间距分布, 绕线机给出的丝间距精度在 $50\text{ }\mu\text{m}$ 左右, 经过丝梳的校正, 丝间距的精度大幅提高到 $3\text{ }\mu\text{m}$ 左右(标准偏差), 达到了要求的 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以内. 其他丝面丝间距都达到了类似的精度, 确保了探测器的均匀性和能量分辨率等性能. 为保证批量制作的探测器性能优良, 我们建立了细致的批量制作流程及质量控制体系, 每一步都建立了质量控制表格及相应的严格审核体系.

3 iTPC性能测试系统

在丝室模块制作完成后, 我们利用X射线源进行系统的性能检测来确保每一个探测器的性能符合要求. STAR要求丝室性能的技术指标包括: (1) 阳极丝增益均匀性好于2% (RMS/Mean); (2) 阳极丝能量分辨率小于30% (FWHM/Mean); (3) 在强辐射环境下稳定工作.

基于上述性能测试要求, 我们搭建了一套基于X射线的探测器测试系统. 如图6所示, 整套系统包括支撑结构、测试箱、可进行二维移动的X射线源、气体系统、信号放大和读出系统等组成. 其中, X射线源为 0.1 mCi 的 ^{55}Fe 放射源或者铜靶X射线管, 距离阳极丝面 10 mm . 测试窗由厚度 0.1 mm 的PCB板制作, 使X射线可以较容易地穿过. 工作气体为典型的P10气体(90%氩气+10%甲烷). 测试时, ^{55}Fe 信号源可以在约40

图 6 (网络版彩图) iTPC性能测试系统
Figure 6 (Color online) iTPC performance testing system.

根阳极丝上产生响应.

测试中, 每隔 5 s 记录测试箱中的温度和气压, 以对测量结果进行必要的温度和气压修正. 二维平台可以实现放射源对阳极丝的自动定位从而进行逐丝扫描. 我们采用一个电荷灵敏的前置放大加成型的器件(Amptek A225)和一个多道分析仪(Amptek 8000D)来记录阳极丝读出的信号. 此读出系统的电荷分辨能力好于 0.6% , 同时在需求的动态范围内测量通道数与电荷有着很好的线性, 利用信号发生器对通道数做了电荷标定^[8].

4 性能测试结果

^{55}Fe 放射源的K壳层X射线能谱的全能峰位对应能量约为 5.9 keV , 该能量的X射线在氩气的全能峰相当于约225个电子, 而在探测器中的逃逸峰对应约110个电子. 此前iTPC原型模块的测试结果已经在*Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*杂志发表^[8].

4.1 ^{55}Fe 源的X射线能谱

图7显示了阳极丝工作电压 1120 V 时, 多道分析仪读出的单根阳极丝上信号的通道数分布样图. 可以清晰地观测到 ^{55}Fe 对应的全能峰和逃逸峰. 通过一个双高斯函数加噪声本底函数的拟合, 得到全能峰对应的增益为2400左右, 两个峰位的比(全能峰/逃逸峰)为2.0, 和预期的一致. 同时, 通过半高宽给出的能量分辨率为20%, 是比较理想的, 好于STAR升级之前27%左右的能量分辨率.

图 7 (网络版彩图) 阳极丝电压 1120 V 时阳极丝上读出的 ^{55}Fe X 射线谱

Figure 7 (Color online) The ^{55}Fe X-ray spectrum of anode wire from MCA at anode voltage of 1120 V.

我们对阳极丝高压进行了扫描, 阳极丝增益随高压变化的关系见图 8 所示. 图中除了显示实验测量结果外, 还给出了利用 Garfield++ 输入 iTPC 模块参数后得到的增益模拟结果. 可以看到测量到的阳极增益随高压指数上升, 符合预期. 此外实验测量和模拟的结果也比较一致, 偏差最大在 1200 V 不超过 9%, 在工作电压 1120 V 附近偏差小于 1%, 显示我们对探测器结构的优化符合预期.

在 iTPC 丝室模块批量制作之前, 我们还细致研究了计数率、温度、气压对增益的影响, 详细的测量结果和讨论见参考文献[8]. 在探测器的性能测试中, 我们对温度和气压变化产生的增益影响进行了修正, 获得了准确的探测器性能测试结果.

4.2 增益均匀性及能量分辨率

对制作完成的 iTPC 模块进行性能测试时, 每根阳极丝选择 3 个不同的位置, 分别测量增益与能量分辨率. 图 9(a) 显示了一个 iTPC 丝室模块利用 ^{55}Fe 测试每根阳极丝得到的增益. 不同颜色的数据点代表着每根丝上不同的位置. 图 9(b) 是所有阳极丝增益的分布. 增益均匀性 RMS/Mean 约在 1.0%. 批量制作的共 28 个模块的测试数据显示, 所有丝室的增益均匀性为 1.5% 左右, 满足 STAR 预期的 2% 的升级要求.

图 10(a) 显示了一个 iTPC 丝室模块每根阳极丝不同位置测得的能量分辨率. 和图 9(a) 一样, 不同颜色的

图 8 (网络版彩图) 阳极丝增益随高压的变化及与 Garfield++ 模拟的比较

Figure 8 (Color online) Comparison of anode wire gain from measurement and Garfield++ simulation.

图 9 (网络版彩图) 一个 iTPC 端盖丝室模块每根阳极丝的增益(a)和所有丝上增益的分布(b)

Figure 9 (Color online) The gas gain at three different positions (left, middle, right) of anode wires for one iTPC sector (a) and the gas gain distribution of anode wires (b).

数据点代表丝上不同的位置. 图10(b)是能量分辨率的分布. 从图中可以看出, 能量分辨率(FWHM/Mean)平均为19.0%. 批量测试中, 所有模块的能量分辨率均好于25%, 满足STAR实验组设定的30%的升级要求. 从这两项丝室关键性能数据指标上看, 制作的丝室模块在关键性能上实现甚至优于设计要求.

另一个关键性能检测是探测器在强辐照环境下长时间工作的稳定性. 为此, 我们使用强流X射线管进行24 h的工作稳定性检测. 通过调节X射线管强度, 丝室阳极丝高压的漏电流被控制在约500 nA, 这与STAR时间投影室在500 GeV的高亮度质子-质子对撞环境下工作时的漏电流相当. 测试结果显示, 所有模块的所有高压供电通道都没有观察到漏电流的异常变化, 验证了探测器良好的工作稳定性.

图 10 (网络版彩图)一个iTPC端盖丝室模块每根阳极丝位置的的能量分辨率(a)和所有丝上能量分辨率的分布(b)

Figure 10 (Color online) The energy resolution measured at three different positions (left, middle, right) for each anode wire with one iTPC sector (a) and the energy resolution distribution of anode wires (b).

4.3 在线运行测试及径迹重建

2017年底第一个制作完毕的iTPC探测器模块运到STAR实验顺利安装, 在2018年的正式运行中, 运行良好, 获取的金-金碰撞实验数据经过径迹重建优化, 完全实现了预期的带电粒子径迹的物理性能提升. 图11给出了该iTPC模块和没有升级的模块具体性能的对

图 11 (网络版彩图)第一个安装的iTPC模块径迹重建性能和没有升级的模块对比. (a) 带电粒子径迹的击中数分布; (b) 带电粒子赝快度分布; (c) 带电粒子横动量分布

Figure 11 (Color online) Tracking performance comparison between 1st installed iTPC sector and regular sector before upgrade. (a) Number of hits distribution for charge tracks; (b) pseudo-rapidity distribution for charge tracks; (c) transverse momentum distribution for charge tracks.

比. 具体的性能提升体现在: (1) 每条带电粒子径迹的最大击中数(Hit)从升级前的45扩展到72, 相应的粒子赝快度范围成功扩展到 $|\eta| < 1.5$; (2) 粒子识别能力显著提升, 体现在径迹的能量损失分辨率从7.5%提高到了5.8%; (3) 可测量的粒子横动量的最低阈值从125 MeV降低到了60 MeV; (4) 测量到的粒子动量分辨率也得到显著提升.

这些性能的提升对于实现能量扫描的物理目标-QCD物质相结构的研究至关重要, 例如对相变临界点寻找敏感的粒子涨落, 在一期能量扫描中不同碰撞能量下展现出不同的趋势, 出现了相变临界点的迹象, 但显著程度不足, iTPC升级后覆盖的前向快度区的粒子涨落对此更敏感, 有可能给出相变临界点确定性的答案^[1,10].

5 总结与展望

STAR时间投影室内扇区读出丝室(iTPC)升级是STAR实验能量扫描计划中探测器升级的关键部分. 在完成iTPC探测器性能优化及样机制作基础上, 我们确立了探测器制作流程及质量控制体系, 搭建了基于X-

射线的性能测试系统, 顺利完成了STAR升级所需的全部iTPC探测器的制作. 它们都通过了包括阳极丝增益均匀性、能量分辨率, 以及强辐射环境下的稳定性三个方面的性能检测. 每个探测器模块所有阳极丝的增益均匀性在1.5%(RMS/Mean)左右, 达到STAR预期的2%的要求. 探测器能量分辨率均好于25%(FWHM/Mean), 超过STAR实验预期的30%的目标. 探测器模块运到了STAR实验所在地布鲁克海文实验室, 通过进一步性能检测后全部24块探测器模块于2018年底成功安装到STAR探测器. 目前已经开始顺利运行, 为RHIC-STAR实现二期能量扫描实验的物理目标打下坚实的基础, iTPC升级带来的这些性能提升是QCD物质相结构、相变临界点的寻找等重要物理研究的重要前提.

iTPC丝室的成功研制提升了STAR中国组在STAR国际合作中的地位和影响力, 并通过这种紧密合作, STAR中国组掌握了读出丝室探测器的制作技术、性能优化方案, 以及如何建立可靠的技术流程和质量控制体系, 确保制作出的探测器性能优良, 为相关实验技术研发^[11]以及在我国重大科学工程中的应用打下基础.

致谢 感谢STAR/iTPC合作组的支持和帮助, 特别是和中国科学技术大学、美国布鲁克海文国家实验室和劳伦斯伯克利国家实验室的密切合作才使这一项目顺利完成. 感谢山东大学何璿教授和祝成光教授, 以及中国科学院高能物理研究所的李金研究员对本项目的指导和帮助.

参考文献

- Adamczyk L, et al. (The STAR Collaboration). Studying the Phase Diagram of QCD Matter at RHIC. Technical Report. STAR Note 0598, 2014, available from <https://drupal.star.bnl.gov/STAR/starnotes/public/sn0598>
- Adamczyk L, et al. (The STAR Collaboration). Technical Design Report for the iTPC Upgrade. Technical Report. STAR Note 0644, 2015, available from <https://drupal.star.bnl.gov/STAR/starnotes/public/sn0644>
- Anderson M, Berkovitz J, Betts W, et al. The STAR time projection chamber: A unique tool for studying high multiplicity events at RHIC. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2003, 499: 659–678
- Adams J, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. Experimental and theoretical challenges in the search for the quark-gluon plasma: The STAR Collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions. *Nucl Phys A*, 2005, 757: 102–183
- Abelev B I, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. Observation of an antimatter hypernucleus. *Science*, 2010, 328: 58–62
- Agakishiev H, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. Observation of the antimatter helium-4 nucleus. *Nature*, 2011, 473: 353–356, arXiv: 1103.3312
- Chen J, Keane D, Ma Y G, et al. Antinuclei in heavy-ion collisions. *Phys Rep*, 2018, 760: 1–39, arXiv: 1808.09619
- Shen F, Wang S, Kong F, et al. MWPC prototyping and performance test for the STAR inner TPC upgrade. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect*

- A, 2018, 896: 90–95, arXiv: [1805.03938](#)
- 9 Wang X, Shen F, Wang S, et al. Design and implementation of wire tension measurement system for MWPCs used in the STAR iTPC upgrade. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2017, 859: 90–94, arXiv: [1704.04339](#)
- 10 Luo X, Xu N. Search for the QCD critical point with fluctuations of conserved quantities in relativistic heavy-ion collisions at RHIC: An overview. *Nucl Sci Tech*, 2017, 28: 112
- 11 He Y F, Wang Y F, Zhao Y T, et al. Prototype of neutron sensitive MWPC detector with delay-line readout (in Chinese). *Nucl Tech*, 2018, 41: 080403 [何越峰, 王艳凤, 赵映潭, 等. 基于延迟块读出的多丝正比室探测器的研制. *核技术*, 2018, 41: 080403]

Inner TPC upgrade at RHIC-STAR

YANG Chi¹, CHEN JinHui², MA YuGang^{2,3} & XU QingHua^{1*}

¹ *Institute of Frontier and Interdisciplinary Science, Key Laboratory of Particle Physics and Particle Irradiation (MoE), Shandong University, Qingdao 266237, China;*

² *Institute of Modern Physics, Key Laboratory of Nuclear Physics and Ion-beam Application (MoE), Fudan University, Shanghai 200433, China;*

³ *Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

The second phase of the Beam Energy Scan (BES-II), has been scheduled at RHIC at Brookhaven National Laboratory during 2019–2020 and the major scientific task is to study the QCD phase diagram and search for the possible critical point in relativistic heavy ion collisions. The physics measurements rely on key upgrades on beam luminosity and the detector upgrades, for example the inner Time Projection Chamber (iTPC) upgrade at the STAR experiment. With the proposed iTPC upgrade at STAR, the pseudo-rapidity coverage will be extended and the precision of energy loss for particle identification will be improved significantly, resulting in a big improvement in the acceptance for the measurement. The iTPC upgrade will rebuild all 24 inner multi-wire proportional chamber (MWPC) readout sectors including new electronics. The STAR-China group is responsible for the MWPC R&D and mass production. The MWPC includes three layers of wires: anode, shield, and gated wire grids, above the PCB pad plane board. High precision of wire location and wire tension of the wire grids on Aluminum strong back are required during the assembly in order to meet the desired detector performance. A laser based wire tension measurement system has been designed and implemented to inspect the wire tension and pitch. A strict control of the mechanical tolerance of the components has also been realized with position precision of 10 μm for wire pitch, and the distance between pad plane and wire planes using wire comb. The anode wire tension has been kept within 6% of desired value. With these quality control enforced, the gain uniformity and the energy resolution are around 1.5% (RMS/Mean) and 25% (FWHM/Mean) respectively, for all 28 produced sectors, tested using a ^{55}Fe X-ray source. Comparing to the required values of 2% for gain uniformity and 30% for energy resolution by STAR, all sectors are qualified with good performances. The required 24 sectors have been installed at STAR experiment successfully.

time projection chamber, multi-wire proportional chamber, gain uniformity, energy resolution

PACS: 29.30.-h, 29.40.Cs, 29.40.Gx

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0049](#)