



ALICE实验内径迹系统探测器升级

张彪 张李昂 邓文静 刘军 张文靖 柳东海 谭亚蕾 王亚平 孙向明 殷中宝 周代翠 黄光明
许怒

Inner Tracking System Upgrade for the ALICE Experiment

ZHANG Biao, ZHANG Li-ang, DENG Wenjing, LIU Jun, ZHANG Wenjing, LIU Donghai, TAN Yalei, WANG Yaping, SUN Xiangming, YIN Zhongbao, ZHOU Daicui, HUANG Guangming, XU Nu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC51>

引用格式:

张彪, 张李昂, 邓文静, 刘军, 张文靖, 柳东海, 谭亚蕾, 王亚平, 孙向明, 殷中宝, 周代翠, 黄光明, 许怒. ALICE实验内径迹系统探测器升级[J]. *原子核物理评论*, 2020, 37(3):734–741. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC51

ZHANG Biao, ZHANG Li-ang, DENG Wenjing, LIU Jun, ZHANG Wenjing, LIU Donghai, TAN Yalei, WANG Yaping, SUN Xiangming, YIN Zhongbao, ZHOU Daicui, HUANG Guangming, XU Nu. Inner Tracking System Upgrade for the ALICE Experiment [J]. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(3):734–741. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC51

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

重离子治癌加速器束诊探测器运动控制系统设计

Design and Development of Motion Control System for Heavy Ion Medical Machine Beam Diagnostics Detector
原子核物理评论. 2019, 36(4): 433–440 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.433>

THGEM探测器X光斑寻迹和位置分辨实验研究

Research on the X-ray Spot Tracing and the Position Resolution of THGEM Detector
原子核物理评论. 2018, 35(1): 61–65 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.01.061>

BC501A中子探测器的能量刻度及其在聚乙烯中子学积分实验中的应用

Electron Energy Calibration of BC501A Neutron Detector and Its Application in the polythene Neutronics Integral Experiment
原子核物理评论. 2017, 34(3): 586–590 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.586>

中国散裂中子源小角中子散射谱仪探测器研制

Small Angle Neutron Scattering Spectrometer Detector of China Spallation Neutron Source
原子核物理评论. 2019, 36(2): 204–210 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.204>

一种基于SiPM的新型起始时间探测器研制

Development of a New-typed Start-time Detector Based on SiPM
原子核物理评论. 2019, 36(3): 343–350 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.343>

应用于热中子的nTHGEM探测器性能研究

Performance Study of nTHGEM Detector for Thermal Neutron
原子核物理评论. 2018, 35(2): 172–178 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.02.172>

文章编号: 1007-4627(2020)03-0734-08

ALICE 实验内径迹系统探测器升级

张彪¹, 张李昂¹, 邓文静², 刘军², 张文靖¹, 柳东海¹, 谭亚蕾¹, 王亚平^{1,2,†}, 孙向明^{1,2},
殷中宝¹, 周代翠¹, 黄光明², 许怒^{1,2,3}

(1. 华中师范大学夸克与轻子物理教育部重点实验室暨粒子物理研究所, 武汉 430079;
2. 华中师范大学硅像素实验室, 武汉 430079;
3. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 大型重离子对撞实验 (A Large heavy-Ion Collision Experiment, ALICE) 按计划在大强子对撞机 (Large Hadron Collider, LHC) 的第二次停机 (2019—2021) 期间进行探测器升级工作。为了对强相互作用物质——夸克胶子等离子体 (Quark-Gluon Plasma, QGP) 的性质进行更细致的研究, 作为升级计划中重要的一个内容是把 ALICE 实验现有的内径迹系统探测器 (Inner Tracking System, ITS) 全面升级为基于单片有源像素传感器 (Monolithic Active Pixel Sensor, MAPS) 技术的硅像素探测器 (习惯称之为 ITS2), 并在 Run 3 和 Run 4 期间采集更多的铅核-铅核碰撞数据。新的 ITS2 共由 7 层 (内 3 层, 中间 2 层和外 2 层) 探测桶面组成, 共由 24000 余片尺寸为 $3\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$ 的 MAPS 硅像素芯片 (该芯片称之为 ALPIDE) 构成, 有效探测面积达 10 m^2 , 共约 120 亿像素。ALPIDE 芯片厚度为 $50\text{ }\mu\text{m}$, 单个像素的尺寸是 $27\text{ }\mu\text{m} \times 29\text{ }\mu\text{m}$, 该芯片具有低功耗、高空间分辨率和高速读出等特点。ITS2 将使 ALICE 探测器在测量极低横动量粒子时具备优异的探测效率和碰撞参数分辨率, 同时也使 ALICE 探测器适应于 LHC 高束流亮度环境。目前 ITS2 的探测器模块量产和测试已于 2019 年完成, 并在欧洲核子中心 (CERN) 洁净室完成了 7 层桶面的组装与安装, 于 2020 年完成试运行测试。2021 年 1 月启动 ITS2 在 ALICE 探测器中的安装与试运行工作, 计划于 2021 年 5 月底完成 ITS2 的安装与测试。本工作将对 ALICE/ITS2 的探测器结构、ALPIDE 芯片和升级进展等方面进行介绍。
关键词: LHC; ALICE; 内径迹系统探测器; 单片有源像素传感器; 试运行

中图分类号: O572.21+2

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC51

1 引言

探寻物质微观结构和质量起源, 一直是物理学研究的最前沿领域。自 20 世纪 60 年代以来, 人类建造了一系列大科学装置来研究高能碰撞中粒子的性质和相互作用。这些大装置包括交变梯度同步加速器 (Alternating Gradient Synchrotron, AGS)、超质子同步加速器 (Super Proton Synchrotron, SPS)、相对论重离子对撞机 (Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC) 以及欧洲核子研究中心的大型强子对撞机 (Large Hadron Collider, LHC) 等^[1]。

LHC^[2] 是目前世界上加速半径最大、碰撞能量最高的环形粒子加速器, 其加速环上一共有 4 个大型高能物理实验 (ALICE^[3], ATLAS^[4], CMS^[5] 和 LHCb^[6])。其中大型重离子对撞实验 (ALICE) 被建造用来研究强相互作用过程中产生的一种特殊物质形态——夸克胶子

等离子体 (Quark Gluon Plasma, QGP) 的性质。夸克胶子等离子体被认为产生于宇宙早期的演化中, 因此, 对夸克胶子等离子体的细致研究同时有助于我们了解宇宙的起源^[7]。

自 2009 年正式运行, ALICE 探测器利用其时间投影室探测器和飞行时间探测器等可测量全方位角的横动量范围从 $100\text{ MeV}/c$ 到 $5\text{ GeV}/c$ 的末态粒子, 具有极好的粒子鉴别能力。然而由于探测器本身的空间分辨率和物质质量的局限, 目前 ALICE 合作组对于一些低横动量的物理量测量精度还有待提高。LHC 将于第二次停机期间 (Long Shutdown, LS2) (2019—2021) 之后大幅提升束流亮度, 铅核-铅核碰撞的事件率将达到 50 kHz 。因此, 为了更进一步研究重味夸克、夸克偶素、低质量双轻子以及喷注的物理性质, ALICE 实验组计划在 LHC/LS2 期间对其探测器、读出电子学和数据获取与分析软件等进行升级^[8]。

收稿日期: 2020-01-14; 修改日期: 2020-05-20

基金项目: 政府间国际科技创新合作重点专项 (2016YFE0100900); 华中师范大学中央高校基本科研业务费项目资助 (CCNU19QN058)

作者简介: 张彪 (1992-), 男, 江西吉安人, 博士研究生, 从事粒子物理与核物理研究; E-mail: zhangbiao@mails.cnu.edu.cn

† 通信作者: 王亚平, E-mail: wangyaping@mail.cnu.edu.cn.

本次升级将提高 ALICE 探测器在低横动量区间的顶点以及径迹重建效率, 与此同时提升积分亮度和探测器的读出能力以获得更多的数据。此次升级的具体内容包括: 建造基于单片有源像素传感 (Monolithic Active Pixel Sensor, MAPS) 技术的全新硅像素内径迹探测器 (Inner Tracking System, ITS2); 时间投影室 (Time-Projection Chamber, TPC) 的多丝正比室 (Multi-Wire Proportional Chamber, MWPC) 升级为气体电子倍增探测器 (Gas Electron Multiplier, GEM); 将穿越辐射探测器 (Transition-Radiation Detector, TRD)、飞行

时间探测器 (Time-Of-Flight, TOF)、电磁量能器 (Electro-Magnetic Calorimeter, EMCal) 和光子谱仪 (PHOton Spectrometer, PHOS) 的读出电子学进行升级; 开发新的在线和离线数据获取分析系统 (Online & Offline, 简称 O²)^[8]。图 1 为目前的 ALICE 探测器, ITS 作为最靠近碰撞顶点的探测器, 它使 ALICE 实验具备在高粒子多重数的铅核-铅核碰撞事件中重建初级顶点和次级顶点的能力, 同时它还可以结合 TPC 对低横动量的粒子进行鉴别。

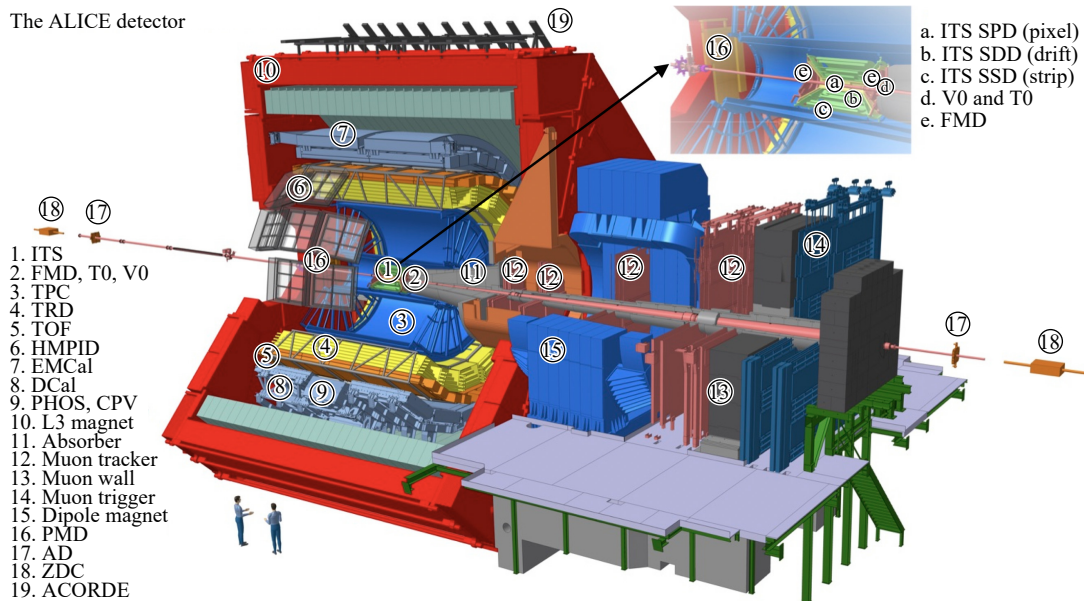


图 1 (在线彩图)ALICE 探测器结构示意图, 其中 1 号为目前的内径迹系统 (ITS) 探测器

2 内径迹探测器升级

2.1 目前的内径迹探测器

图 2 为目前的 ALICE ITS 探测器, 它由六层圆桶形的硅探测器组成, 相对于碰撞中心点的半径为 4 cm 到 43 cm, 对应的赝快度区间为 $|\eta| < 0.9$ 。如图 2 所示, 目前的 ITS 由三种不同拓扑结构和不同技术的硅探测器构成。ITS 最里面两层是硅像素探测器 (Silicon Pixel Detector, SPD), 每层 SPD 的物质量为 $1.14\% X_0$ (X_0 为辐射长度)。目前的硅像素探测器的像素的尺寸为 $50 \mu\text{m} \times 425 \mu\text{m}$, 因此在 r/ϕ 和 Z 的方向上的空间位置分辨率可以达到 12 和 $100 \mu\text{m}$, 还可以参加堆积事件判定移除。所谓“堆积事件”是指, 由于高亮度束流环境再加上探测器的读出时间远比束团穿过 (Bunch-crossings) 的时间间隔长, 从而导致多个事件的顶点被记录在一个事件里。比如, 时间投影室探测器的读出时间若

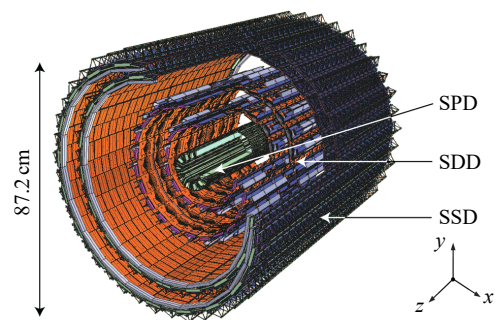


图 2 (在线彩图)目前的内径迹系统 (ITS) 探测器结构布局

远长于束团穿过的时间, 这就会导致来自于堆积事件的径迹被混合到一个事例里。当带电粒子穿过芯片像素单元时, 对应每个像素的读出电子学将会产生一个触发信号, 这样我们就可以得到粒子的击中点信息。中间两层为硅漂移探测器 (Silicon Drift Detector, SDD), 物质质量分别为 $1.13\% X_0$ 和 $1.26\% X_0$ 。最外面的两层为硅微

条探测器 (Silicon Strip Detector, SSD), 物质量为 $0.83\% X_0$ 。在 LHC Run 1 和 Run 2 中铅核-铅核碰撞的事件率最高可达到 8 kHz , 目前的 ITS 探测器的最大读出速率仅为 1 kHz (结合 SSD 探测器读出), 因此当前的 ITS 的读出能力无法适应 ALICE 在 LHC LS2 后的重离子对撞的实验和物理需求 [8]。

2.2 新的内径迹探测器

ITS 升级旨在提高重味强子的初级顶点和次级顶点的重建精度, 同时大幅度提升其读出速度。如图 3 所示, 新的 ITS2 由 7 层硅像素探测器构成, 外面 4 层称为外桶 (Outer Barrel), 里面 3 层称为内桶 (Inner Barrel)。内外桶均采用目前最先进的基于 MAPS 技术的硅像素芯片 (ALPIDE), 整个探测器集成了约 125 亿像素, 有效探测总面积约 10 m^2 , 读出速度快于 $10\text{ }\mu\text{s}$, 同时其抗辐照性还满足 LHC 束流亮度升级的强辐射环境要求 (最里层探测器需要承受超过 646 krad 的电离总剂量辐射 (TID) 计量以及 $9.2 \times 10^{12}\text{ MeV n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 非电离能损 (NIEL) 辐射) [8]。ALPIDE 芯片的像素尺寸为 $27\text{ }\mu\text{m} \times 29\text{ }\mu\text{m}$, 空间位置分辨率可达 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。ALPIDE 芯片厚度为 $50\text{ }\mu\text{m}$, 结合低质量的支撑结构, 使得 ITS2 的物质量大幅减少, 每层内桶和外桶的物质量分别为 $0.3\% X_0$ 和 $0.8\% X_0$ 。最后, 由于其优秀的空间分辨率以及良好的抗辐照能力, ITS2 更加靠近事件碰撞点, 由当前 ITS 的 39 mm 缩减到 22 mm 。目前的 ITS 探测器由基于三种不同半导体探测器技术的探测器构成, 并且它们

的几何机构也不相同, 而 ITS2 采用统一的基于 MAPS 技术的芯片模块。同时, 在机械支撑结构设计方面, ITS2 也考虑了内桶和外桶从 ALICE 探测器里移除或安装进去的操作。因此 ITS2 具备便捷的年检维修。

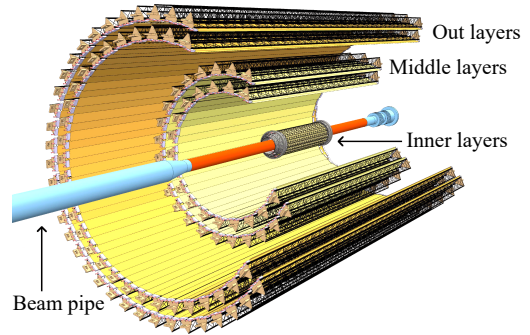


图 3 (在线彩图) 新的内径迹系统 (ITS2) 探测器的结构布局

ITS2 探测器大大提升了事件读出率, 在铅-铅碰撞中可以达到 100 kHz , 质子-质子碰撞中可以达到 400 kHz 。图 4 是基于模拟的 ITS2 的性能参数与基于实验数据的目前 ITS 的性能参数对比图。如图 4(a) 所示, 对于横动量为 $500\text{ MeV}/c$ 的带电 π 介子, ITS2 的位置分辨率可达 $40\text{ }\mu\text{m}$, 其位置分辨率相对于目前的 ITS 在 r/ϕ 方向和 Z 方向上分别提高了 3 倍和 6 倍 [8]。如图 4(b) 所示, 对于横动量为 $100\text{ MeV}/c$ 和 $300\text{ MeV}/c$ 的带电 π 介子, ITS2 的探测效率均可达 60% 和 90% 以上, 尤其在低横动量区间相对于目前的 ITS 得到了显著提升。

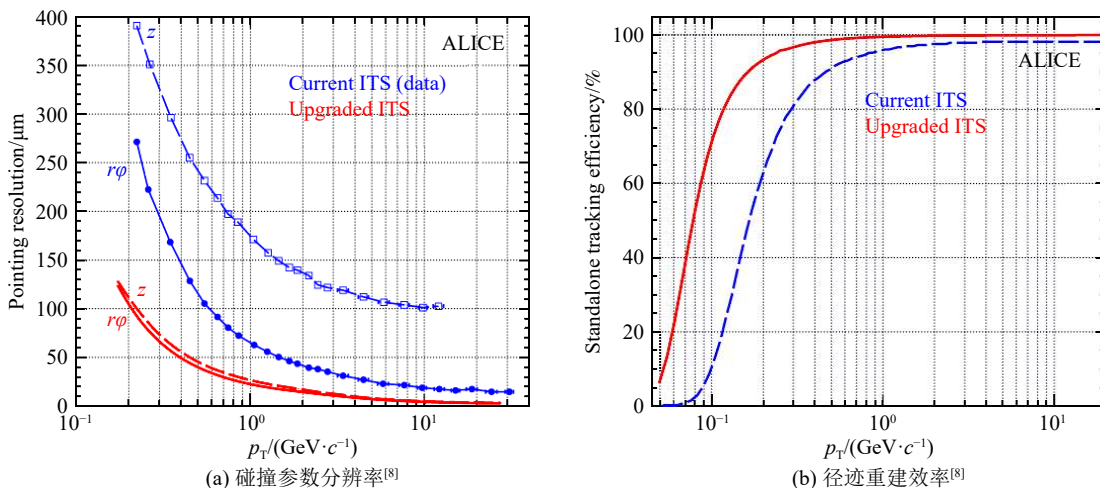


图 4 (在线彩图) ITS2 和目前的 ITS 性能比较, 红色线代表 ITS2, 蓝色点线代表 ITS

ITS2 由 7 层硅像素探测器组成, 每层都是由不同数量的狭板 (Stave) 组合构成圆桶形探测器层。整个 ITS2 一共由 192 个 Stave 构成。内桶探测器由 48 个 Stave 构成, 每个 Stave 由一个混合集成电路 (Hybrid Integrated Circuit, 简称 HIC) 模块、冷却板 (Cold

Plate)、冷却管 (Cooling Ducts) 和碳纤维支撑构件 (Space Frame) 组成, 如图 5(a) 所示。外桶探测器一共需要 144 个 Stave, 每个 Stave 由 4 个或 7 个 HIC 模块沿束流方向排列集成、电源总线 (Power Bus)、模块碳平板 (Module Carbon Plate)、冷却板 (Cold Plate) 和

碳纤维支撑构件 (Space Frame) 构成, 如图 5(b) 所示。外桶探测器共需要 1692 个 HIC 模块 [7]。单个 HIC 模块是指将 9 个 (内三层) 或 2×7 个 (外四层) ALPIDE 芯片

高精度地摆放固结在柔性印制电路板 (Flexible Printed Circuit, FPC) 上, 并通过高精密焊线实现芯片与 FPC 之间的电学连接。

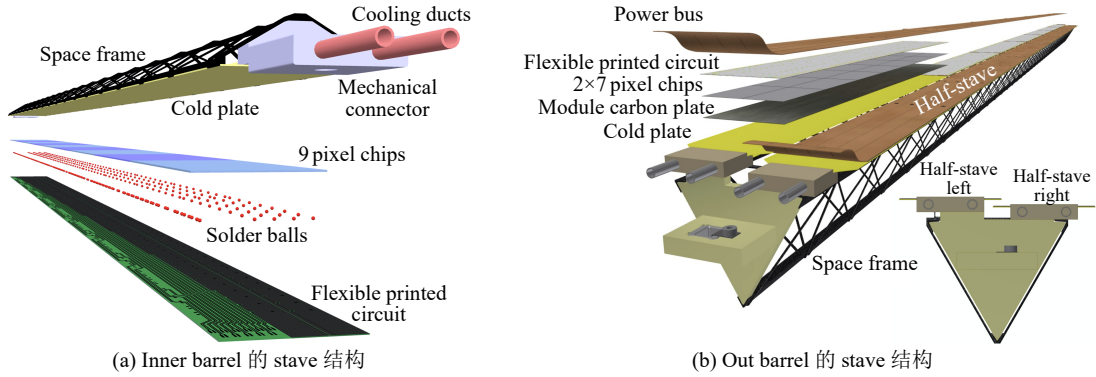


图 5 (在线彩图)ITS2 的 Stave 结构设计

单个内桶 HIC 模块由 9 个 ALPIDE 芯片沿束流方向排列校准, 采用的芯片厚度为 $50 \mu\text{m}$, 该部分模块在 CERN 进行组装和测试。单个外桶 HIC 模块由 14 个 ALPIDE 芯片构成, 采用 2×7 阵列形式沿束流方向排列校准, 芯片厚度为 $100 \mu\text{m}$, 如图 6 所示。由于外桶探测器一共需要 1692 个探测器模块, 考虑到成品率和备份, 整个 ITS2 一共需要生产 2500 个模块。因此, 全球一共有 5 个科研机构参与外桶 HIC 模块组装与测试, 包括意大利 INFN 巴里研究所、英国利物浦大学、韩国

釜山国立大学、法国斯特拉斯堡 IPHC 中心及中国华中师范大学。

2.3 ALPIDE 硅像素芯片

ITS2 采用的硅像素芯片名称为 ALPIDE (ALice Pixel DEtector, 简称 ALPIDE)。ALPIDE 芯片是由 CERN 联合包括华中师范大学在内的多个科研机构共同研发的一款基于 Tower Jazz 180nm 工艺的单片有源像素传感器 (MAPS) 技术的硅像素芯片。如图 7(a) 所示, ALPIDE 芯片采用 180nm 的 CMOS 四阱成像工艺, 高电阻 p 型外延层的厚度可达到 $25 \mu\text{m}$, 带电粒子穿过芯片时电离出大量的电子-空穴对, 在反偏压电场作用下电子被 N 型二极管快速收集起来, 然后通过内置的完整 CMOS 电路读出信号。ALPIDE 芯片尺寸为 $15\text{mm} \times 30\text{mm}$, 其芯片表面分布了 58 个提供数字电压、模拟电压、偏压及信号传输功能的焊盘。像素阵列为 512×1024 , 像素尺寸为 $27 \mu\text{m} \times 29 \mu\text{m}$, 每个像素单元都集成了一个放大器、甄别器以及多事件缓冲器, 集成时间为 $4 \mu\text{s}$, 如图 7(b) 所示。ALPIDE 芯片一共有两种读出模式, 在探测器正式运行取数时将采用连续

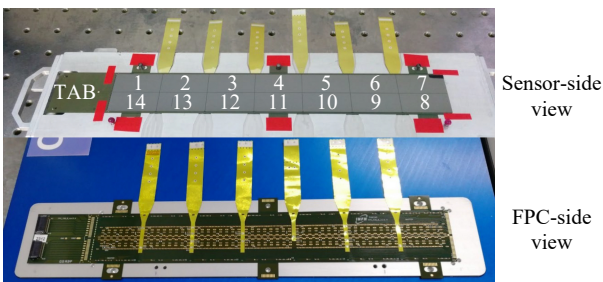
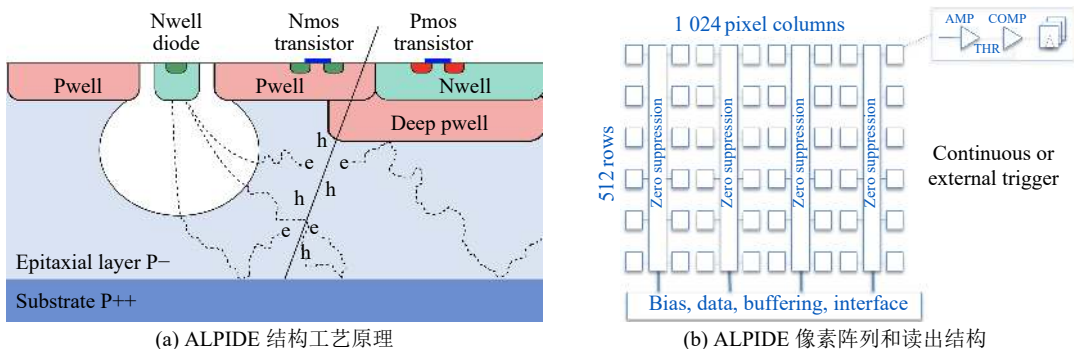


图 6 (在线彩图) 外桶 HIC 模块的示意图 (上图为芯片面视图, 下图为 FPC 面视图)



(a) ALPIDE 结构工艺原理

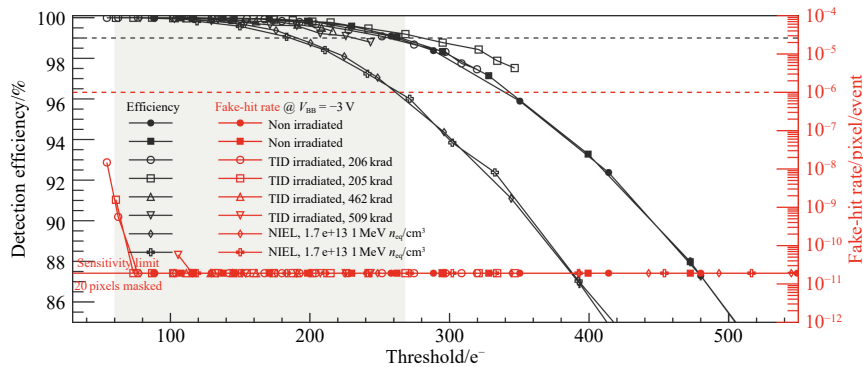
(b) ALPIDE 像素阵列和读出结构

图 7 (在线彩图) 基于 MAPS 技术的 ALPIDE 芯片

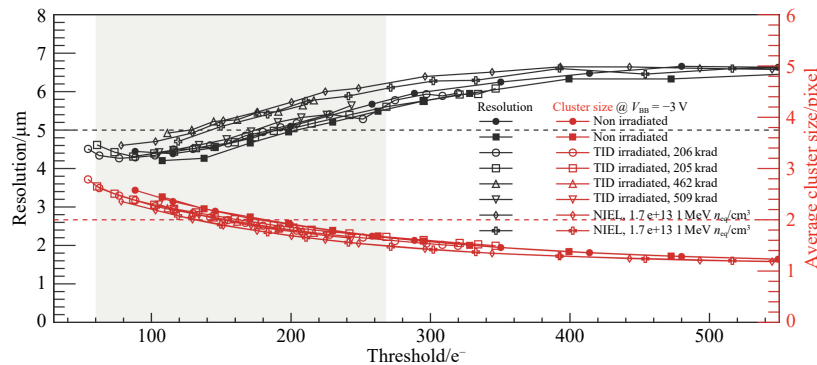
读出模式，而在性能测试和试运行中采用外部触发模式，芯片的平均功耗密度小于 20 mW/cm^2 ^[9]。

高能重离子碰撞实验会产生大量的高能粒子，因此位于碰撞中心区的 ITS2 工作于强辐射环境中，所以芯片的抗辐照能力决定了整个探测器的工作效率和寿命。ALICE 实验组在 CERN PS 上对 ALPIDE 芯片进行了能量为 $6 \text{ GeV}/c$ π 介子束流测试，测试过程为分别使用不加辐射、不同剂量的电离总剂量辐射 (TID) 以及非电

离能损 (NIEL) 辐射的芯片来进行阈值扫描。如图 8(a)，我们发现在 $0\text{--}200 \text{ e}^-$ 的阈值区间内，不同辐射情况下的芯片探测效率和假击中率并没有发生明显的变化，测试表明芯片具有很强的抗辐照能力。如图 8(b)，在阈值为 200 e^- 左右时，不同辐照情况下芯片在很宽的阈值范围里其位置分辨率均优于 $5 \mu\text{m}$ ，平均簇团尺寸约为 2 个，测试结果和芯片参数预计性能一致^[10]。



(a) 芯片的探测效率和假击中率与芯片触发阈值的关系^[10]



(b) 位置分辨率和平均击中簇团大与芯片触发阈值的关系^[10]

图 8 (在线彩图)ALPIDE 芯片束流测试结果 (图中关于 NIEL 的辐射剂量的单位应该为 1 MeV neq/cm^2)

3 ITS2 升级进展

3.1 ITS2 HIC 模块的集成与测试

ITS2 的 HIC 模块主要由 ALPIDE 芯片和 FPC 两部分构成，集成与测试的主要步骤如下：

(1) 芯片的高精度摆放：ALICIA 是由 ALICE 国际合作组和荷兰 IBS 公司联合研制的一台集像素芯片尺寸、破损度与洁净度检测和像素芯片高精度摆放等功能的自动化平台。利用 ALICIA 设备对芯片进行边缘与洁净度检测，将检测合格的芯片按照 HIC 模块要求的阵列方式进行摆放，如图 9(a) 所示。对芯片摆放位置进行精准定位，要求摆放精度优于 $5 \mu\text{m}$ 。

(2) 在 FPC 背面刷胶：ALPIDE 芯片和 FPC 之间通过非导电胶进行固结。采用胶带丝网 (Glue stencil)

的方式刷胶来保证芯片和 FPC 之间的位置校准，从而不污染芯片焊盘。

(3) 芯片和 FPC 固结：非导电胶初步固化时间为 5 小时左右，室温下完全固化需 24 小时。

(4) 模块绑线：完全固化结束后，利用已编程的自动化焊线机实现 $25 \mu\text{m}$ 铝线进行绑线。ALPIDE 每个焊盘需绑 3 条线连接到 FPC 对应焊盘，单个外桶 HIC 模块需要焊接 2286 条线，如图 9(b) 所示。

(5) 电学测试：焊线结束后进行单板的电学测试，包括阻抗测试、性能测试和耐久测试。其中阻抗测试是通过给探测器模块进行不同的电压测试来检查模块是否短路，测试电压包括数字电压 (DVDD)、模拟电压 (AVDD) 和偏压 (BACK-BIAS)。性能测试主要检查模块的具体表现情况，主要包含上电测试、FIFO 扫描、

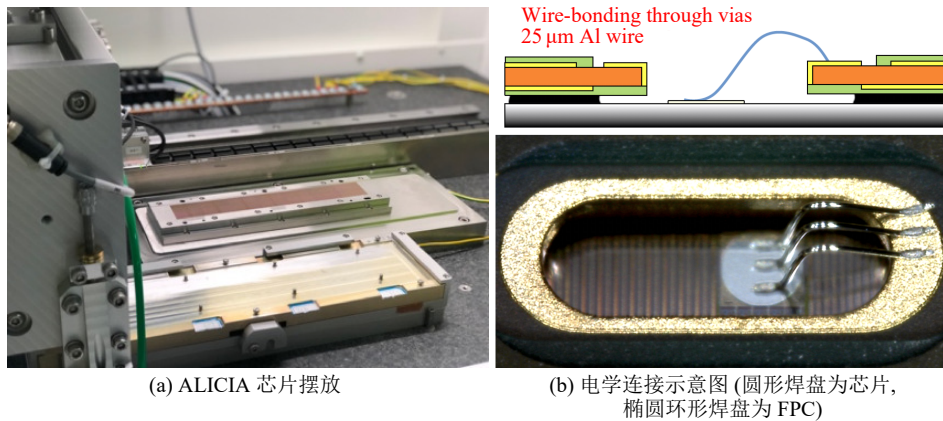


图 9 (在线彩图)ITS2 探测器混合集成电路 (HIC) 模块组装

数字扫描和阈值扫描。最后, 耐久测试内容和性能测试类似, 其特点是对模块进行长达 7 天的不间断性能测试, 其目的主要是检测模块的性能稳定性。

测试合格的 HIC 模块将用于 Stave 模块组装, 在此过程中需要执行的质量监控 (Quality Assurance, 简称

QA), 包括: 芯片的摆放精度统计, FPC 氧化情况监测, 芯片和 FPC 的固结力测试, 焊线拉力测试, 芯片阈值和噪声扫描等电学性能测试。图 10 为华中师范大学生产的部分 HIC 模块的芯片摆放精度和焊线拉力测试结果。

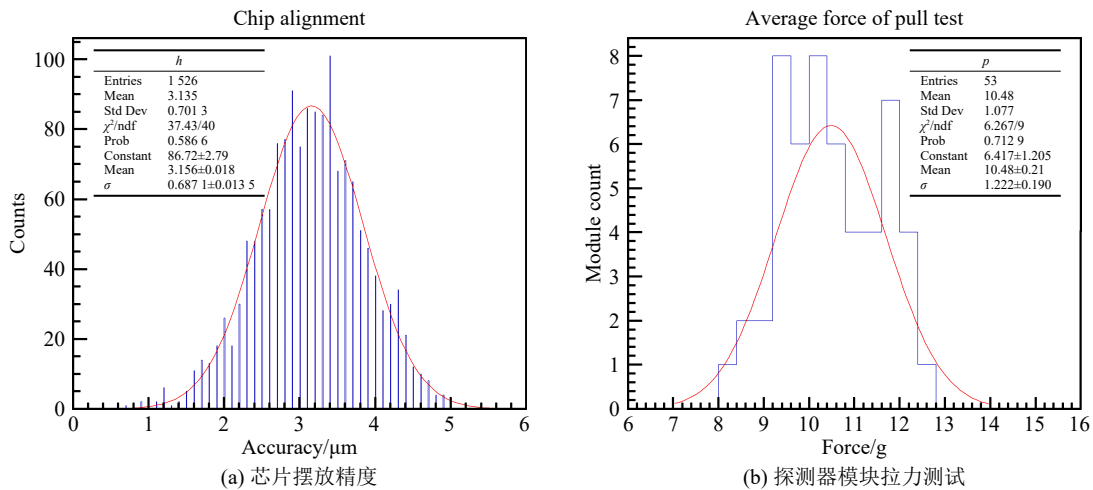


图 10 (在线彩图)ITS2 探测器 HIC 模块的质量控制: 芯片摆放精度保持在 5 μm 以内, 模块的平均拉力约为 10.5 g (合格为 8 g)

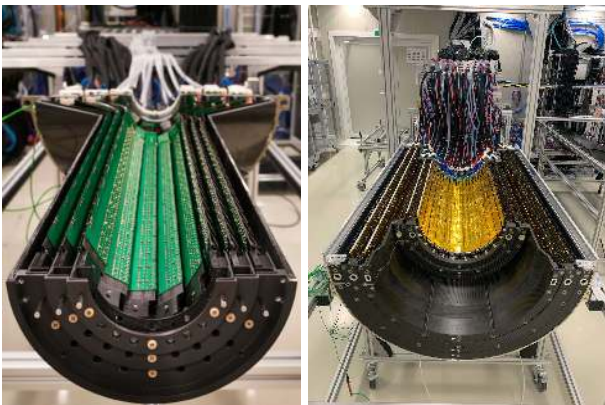
3.2 试运行

目前整个 ITS2 项目所需 ALPIDE 芯片已于 2019 年生产完毕, 芯片批量测试点韩国和 CERN, 一共生产测试了 70 000 余片芯片, 成品率为 64%。对于内桶 ITS2 探测器, CERN 一共组装了 95 个 Stave 模块用于组装和备用, 成品率约为 73%。而对于外桶探测器, 计划生产测试的 2500 个 HIC 模块也于 2019 年 6 月份完成量产, 其最终成品率为 85%, 达到预期成品率。15% 的不成功率主要包括以下几个原因: (1) 芯片和 FPC 用非导电胶固结时产生的焊盘污染; (2) 短路; (3) FPC 焊盘氧化造成的部分焊点无法焊接; (4) 部分芯片工作的模块 (HIC 模块质量按照电学性能由好到坏依次标记为

GOLD、SILVER、BRONZE、NOBB、PARTIAL 等, 只有 BRONZE 等级以上的 HIC 满足安装要求); (5) 物理损伤 (组装过程中造成的部分芯片的物理损伤)。

ITS2 的试运行已于 2019 年 5 月份在 CERN 启动, 于 2019 年 9 月份完成内桶面和外桶面的组装和安装, 如图 11 所示。整个探测器相应的制冷装置 (通过液体制冷维持工作温度不超过 30 $^{\circ}\text{C}$)、供电系统、读出电路和计算机系统也相继完成安装, 保障了在 CERN 洁净室开展全面的 ITS2 调试工作。同时, 探测器校准、刻度和宇宙线测试等工作也按计划顺利进行。

作为 ITS2 试运行的首批结果, 假击中率 (Fake-hit Rate) 和阈值的测量结果如图 12 所示^[11]。图 12(a) 显示, IB 半桶最内层 (Layer 0) 半桶面的 54 个 ALPIDE 芯片

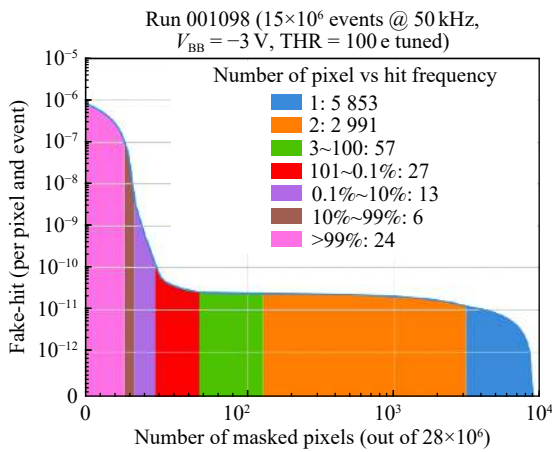


(a) Inner barrel 半桶组装测试 (b) Out barrel 半桶组装测试

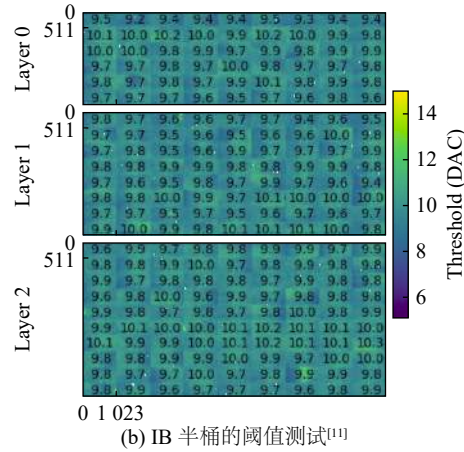
图 11 (在线彩图)ITS2 试运行安装

(约 2800 万像素)的假击中率低至 10^{-10} 每事件每像素, 该指标远优于 ITS2 设计指标要求的 10^{-6} 假击中数/事件/像素。图 12(b) 呈现的是 IB 半桶 (Layer 0, Layer 1 和 Layer 3 的三个半桶面) 的 216 个 ALPIDE 芯片的阈值分布图 (每 10 个 DAC counts 对应 100 个 e^-), 结果显示 ITS2 IB 半桶电学性能的整体一致性。此外, 宇宙线径迹在 ITS2 探测器中被观测到并重建。

ITS2 计划于 2021 年 1 月份完成在洁净室的试运行工作, 计划于 2021 年 3 月份和 5 月份分别完成 OB 和 IB 在 ALICE 探测器里的安装和测试任务, 并计划于 2021 年 5 月底启动为期 6 周的单独试运行测试, 接下来将开展 ALICE 探测器的整体试运行调试工作。



(a) IB 半桶最内层 (Layer 0) 半桶面的假击中率^[1]



(b) IB 半桶的阈值测试^[1]

图 12 (在线彩图)ITS2 IB 半桶的试运行测试结果

4 总结和展望

为了对强相互作用物质 QGP 的性质开展更精确的研究, 并满足 LHC 在 Run 3 和 Run 4 中的束流亮度的升级, ALICE 实验在 LHC 的第二次长停机期间对其探测器系统进行了重要升级, 其中最关键的一个升级是建造全新的 ITS 探测器。新的 ITS (称为 ITS2) 采用基于 MAPS 技术的硅像素芯片 ALPIDE, 该芯片具有低功耗、高空间分辨率和高速读出等特点, 共七层, 有效探测面积达 10m², 共约 120 亿像素。ITS2 将大幅提高末态粒子的径迹重建效率和读出速度, 并显著改善低横动量粒子的顶点重建性能, 这些将有利于对低质量双轻子物理和重味物理的精确测量。华中师范大学作为此次升级的主要参与单位之一参与了 ALPIDE 硅像素的设计和测试, 并承担了对新 ITS 外桶探测器 HIC 模块的组装、测试以及探测器的试运行等工作。华中师范大学承担的外桶 HIC 模块组装和测试任务已经于 2019 年 6 月

圆满完成。ITS2 已于 2019 年 10 月份在 CERN 的超净室完成集成与安装, 并按计划完成了探测器的试运行、刻度和校准等工作, 试运行测试结果证实 ITS2 探测器达到了预期性能。ITS2 于 2021 年 1 月份完成在洁净室的试运行工作, 并计划于 2021 年 5 月份完成在 ALICE 探测器中的安装与测试。

参考文献:

- [1] SHILTSEV, VLADIMIR D. *Physics-Uspekhi*, 2012, 55(10): 965.
- [2] KAHLE K. LHC Guide[EB/OL]. [2012-12-20]. <https://home.cern/resources/brochure/cern/lhc-guide>.
- [3] AAMODT K, ABRAHANTES Q A, ACHENBACH R, et al. *Journal of Instrumentation*, 2008, 3: S08002.
- [4] AAD G, ABAT A, ABDALLAH J, et al. *Journal of Instrumentation*, 2008, 3: S08003.
- [5] CHATRCHYAN S, HMAYAKYAN G, KHACHATRYAN G, et al. *Journal of Instrumentation*, 2008, 3: S08004.
- [6] ALVES J, AUGUSTO A, ANDRADE L, et al. *Journal of in-*

- strumentation 3, 2008, 3: S08005.
- [7] CARMINATI F, FOKA P, GIUBELLINO P, et al. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 2004, 30: 1517.
- [8] ABELEV B, ADAM J, ADAMOVA D, et al. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 2014, 41: 087002.
- [9] ŠULJIĆ M. ALPIDE. *Nucl Instr and Meth A*, 2016, 824: 434.
- [10] RINELLA G A, ALICE Collaboration. *Nuc Instr and Meth A*, 2017, 845: 583.
- [11] REIDT F, ALICE collaboration. *Nuclear Physics A*, 2020, 1005: 121793.

Inner Tracking System Upgrade for the ALICE Experiment

ZHANG Biao¹, ZHANG Li-ang¹, DENG Wenjing², LIU Jun², ZHANG Wenjing¹, LIU Donghai¹, TAN Yalei¹,
WANG Yaping^{1,2,†}, SUN Xiangming^{1,2}, YIN Zhongbao¹, ZHOU Daicui¹, HUANG Guangming², XU Nu^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Quark and Lepton Physics (MOE) and Institute of Particle Physics, Wuhan 430079, China;

2. Pixel Laboratory at CCNU (PLAC), Central China Normal University, Wuhan 430079, China;

3. Institute of modern physics (IMP), Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: A Large Ion Collider Experiment(ALICE) at the Large Hadron Collider(LHC) at CERN will undergo a major upgrade during the 2nd LHC Long Shutdown(LS2) scheduled in 2019~2021 that will allow to study in detail of strong interaction matter Quark-Gluon Plasma(QGP) properties. To collecting more Pb-Pb events during the Run 3 and Run 4, the replacement of the existing Inner Tracking System(ITS) with a completely new ultra-light high resolution detector based on Monolithic Active Pixel Sensors(MAPS) technique is one of the cornerstones within this upgrade program. The new ITS will consist of seven detection layers: 3 inner layers, 2 middle layers and 2 outer layers. The upgraded ITS will be realized using more than twenty-four thousand pixel chips (called ALPIDE) covering a total active surface of about ten square meters. The thickness of ALPIDE is 50 μm , also with a pixel pitch of 27 $\mu\text{m} \times 29 \mu\text{m}$. The main features of the ALPIDE are of low power consumption, high resolution and high speed readout. ITS2 will enable the ALICE detector to have excellent detection efficiency and impact parameter resolution when measuring extremely low transverse momentum particles, and also make the ALICE detector suitable for LHC high luminosity environment. At present, the production and test of the detector module of ITS2 project have been completed, and the integration of 7-layer barrel been completed at CERN clean room, and the on-surface commissioning has been completed in the end of 2020. The installation plan of ITS2 at the ALICE detector has been started in Jan. 2021, and is scheduled to be finished in end of May 2021. This talk will focus on the design and the physics performance of the new ITS, as well as the advanced techniques adopted in detector assembly and integration will be introduced. The status and commissioning of the ITS upgrade project will be reported.

Key words: LHC; A Large Ion Collision Experiment(ALICE); Inner Tracking System(ITS); Monolithic Active Pixel Sensor(MAPS); commissioning

Received date: 14 Jan. 2020; Revised date: 20 May 2020

Foundation item: National Key Research and Development Program of China(2016YFE0100900); Fundamental Research Funds for the Central Universities(CCNU19QN058)

† Corresponding author: WANG Yaping, E-mail: wangyaping@mail.ccnu.edu.cn.