

micro-bulk 工艺 micromegas 的研究*

樊瑞睿¹⁾ 侯凤杰¹⁾ 欧阳群^{1)†} 范胜男¹⁾²⁾ 陈元柏¹⁾ 伊福廷¹⁾

1) (中国科学院高能物理研究所, 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2011 年 7 月 5 日收到; 2011 年 8 月 31 日收到修改稿)

本文介绍了 micromegas 探测器的主要工艺——micro-bulk 工艺, 并使用 ^{55}Fe 放射源对制作完成的 micro-bulk 工艺原理探测器进行了测试, 对比了与绝缘丝工艺原理探测器能量分辨率的差别, 并进一步研究了 micro-bulk 工艺探测器电子透过率等性能测试的结果.

关键词: micromegas micro-bulk 能量分辨率

PACS: 29.40.Cs

1 引言

传统对撞机物理中径迹探测器主要由气体丝室承担, 其原型为 1968 年由 Charpak 等^[1]发明的多丝正比室. 但由于空间电荷效应的影响, 这种探测器的计数率在 $10^4/\text{s}$ 以内, 极大的限制了气体丝室探测器在高亮度对撞机中的应用. 为了解决这个问题, 20 世纪 90 年代, 一类新型微结构气体探测器 (micro pattern gaseous detector) 发展起来, 这类探测器具有时间响应快, 计数率高, 空间分辨好等特点. 典型的微结构探测器有 micromegas (MICRO-MESH-GASEOUS-STRUCTURE)^[2], GEM (gas electron multiplier)^[3] 等.

1996 年 micromegas 探测器发明于法国 Saclay 实验室, 在 Giomataris 等人^[2]详细说明了该探测器的工作原理和制作方式. 随着制作工艺的进一步发展, 大面积 micromegas 探测器广泛的应用于各种物理实验中, 如欧洲核子中心的 COMPASS 实验^[4], 日本的 T2K 实验^[5]等. 在 COMPASS 实验中, 束流事例率高达 $450 \text{ kHz}/\text{cm}^2$, 在这种计数率下的 micromegas 探测效率接近 100%, 空间分辨率达到 $90 \mu\text{m}$, 时间分辨达到 9.3 ns . 在 T2K 实验中, micromegas 探测器作为 TPC 读出, 制作面积达到

了 $0.7 \text{ m} \times 2 \text{ m}$.

典型的 micromegas 探测器分为漂移区和雪崩区两部分, 设置如图 1 所示.

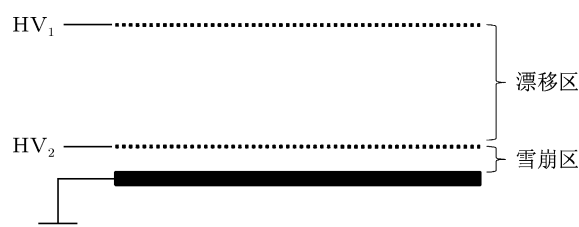


图 1 micromegas 探测器结构示意图

这种非对称结构探测器装置一般具有三个电极, HV_1 漂移电极、 HV_2 雪崩电极和读出电极. 漂移区电场大小保持在 $100 \text{ V}/\text{cm}$, 雪崩区电场保持在 $40000 \text{ V}/\text{cm}$ 左右. 位于 HV_1 和 HV_2 间的气体主要作为探测介质, 产生原初电离, 原初电离电子在漂移电场作用下向 HV_2 电极漂移. HV_2 雪崩电极由金属微网构成, 由于网眼的存在, 可以使电子穿过雪崩电极, 进入下面的雪崩区. 进入雪崩区的电子在强电场作用下倍增, 倍增信号在 HV_2 与 PCB 读出电极上感应出大小相同方向相反的信号. 在实际应用中, 漂移区一般设置在 3 mm 到 1 cm 之间, 雪崩区高度设置在 $50\text{—}150 \mu\text{m}$ 范围内.

* 国家自然科学基金 (批准号: 10775156) 资助的课题.

† E-mail: ouyq@ihep.ac.cn

本文将详细介绍一种较常见的 micromegas 探测器的制作工艺——micro-bulk 工艺, 同时与传统的绝缘丝工艺进行了能量分辨、电子透过率等性能测试的对比, 并对结果进行了说明.

2 探测器的制作

micromegas 的制作关键技术在于雪崩区的厚度控制, 对其均匀性有很高的要求. 传统的制作工艺为使用 $100\ \mu\text{m}$ 左右直径的绝缘丝作为隔离物, 方法如下.

首先, 清洁 PCB 板, 将 $100\ \mu\text{m}$ 的尼龙丝均匀缠绕在 PCB 板上, 间隔 $2\ \text{mm}$ 左右; 其次将尼龙丝使用胶水或胶带固定, 并使之保持一定的拉力. 由于一般的尼龙丝在拉力下会发生形变, 所以这里采用的是 $0.1\ \text{mm}$ 直径渔线作为绝缘丝; 然后将 400 目不锈钢编织网使用 $3\ \text{kg}/\text{cm}$ 的拉力拉伸, 并黏贴在 PCB 读出电路板上, 保持受压力均匀. 实验图如图 2 所示.

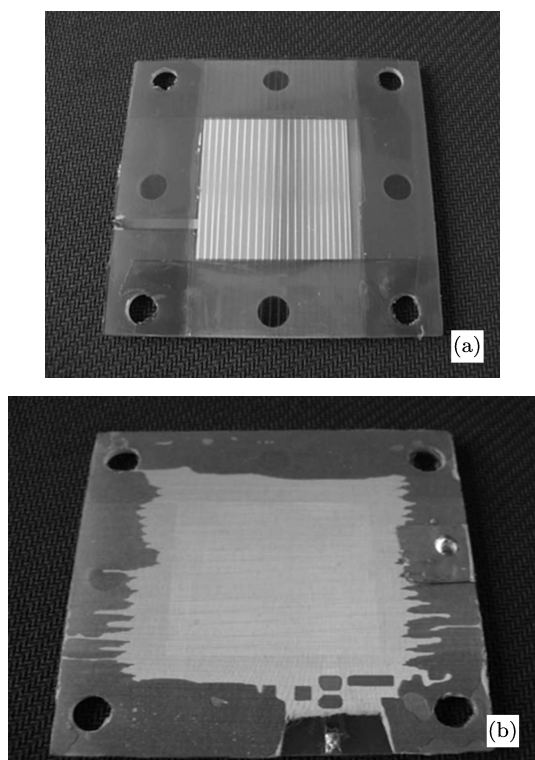


图 2 尼龙丝作为支撑的 micromegas (a) 为缠绕好尼龙丝的 PCB 板; (b) 为黏贴好金属网电极的 micromegas

这种方法简单便于操作, 但由于丝网仅靠拉力固定于绝缘丝上, 造成厚度的均匀性较差不利于大面积制作, 同时尼龙丝的死区较大, 探测效率较低. 为了改善并提高 micromegas 的制作水平, 新近发展

出了 bulk 工艺^[6] 和 micro-bulk^[7] 工艺. 这两种工艺极大的提高了雪崩区厚度的均匀性, 同时便于大面积制作. 其中 bulk micromegas 探测器已经作为主要制作工艺被 T2K^[5] 实验以及 ATLAS^[8] 升级方案所接受, 得到了广泛的应用.

micro-bulk 工艺是 2001 年发展的 micromegas 制作工艺, 其基本思想是基于双面刻蚀技术, 通过刻蚀双面覆铜的 Kapton 膜, 制作出 micromegas 探测器的微网电极以及支撑柱子. 迄今为止, 这种工艺制成的 micromegas 探测器得到了 micromegas 探测器最好的能量分辨^[7], 同时世界其他实验室也在积极推动这种工艺的大型化.

micro-bulk 使用双面覆铜的 $50\ \mu\text{m}$ 厚 Kapton 膜进行化学刻蚀, 制作工艺流程如图 3. 首先将上下两面铜层覆上光刻干膜 (图 3(a)), 使用不同模版照射使得上层光刻干膜成型为微网结构, 下层光刻干膜成型为支撑柱结构 (图 3(b)). 再使用腐蚀液将上下层铜膜刻蚀出铜网及柱子结构 (图 3(c)), 最后将下层铜膜作为模板使用腐蚀液将 Kapton 刻蚀出柱子的形状 (图 3(d)). 刻蚀后的 Kapton 膜作为支撑柱, 可以将读出 PCB 与上层铜网隔离出 $50\ \mu\text{m}$ 间距.

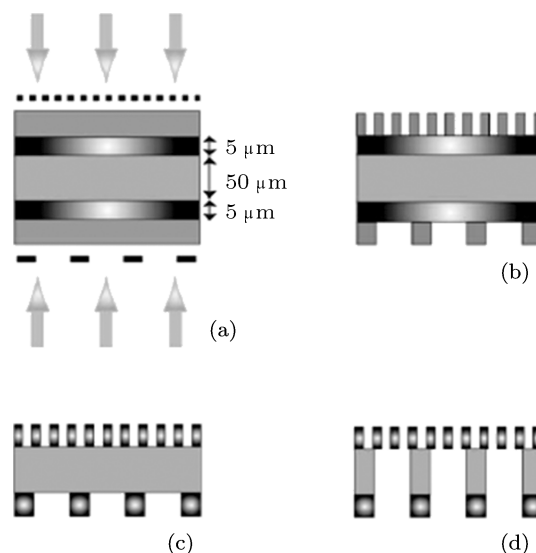


图 3 micro-bulk 工艺流程

实验中我们将铜膜腐蚀出等间距为 $140\ \mu\text{m}$, 直径 $50\ \mu\text{m}$ 的圆孔网, 作为雪崩电极的形式 (图 4(a)). 刻蚀得到的 Kapton 柱子间隔 $2\ \text{mm}$ 直径 $300\ \mu\text{m}$, 如图 4.

将刻蚀好的铜网拉平, 贴敷于 PCB 上形成雪崩区. 同时, 将 400 目编织网制作的漂移极通过尼龙柱固定在雪崩区上方 $3\ \text{mm}$ 处. 最后, 将组装好的探

探测器放入气密盒中, 整个探测器制作完毕. 制作完成的探测器灵敏区面积为 $2.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$, PCB 采用单 PAD 读出.

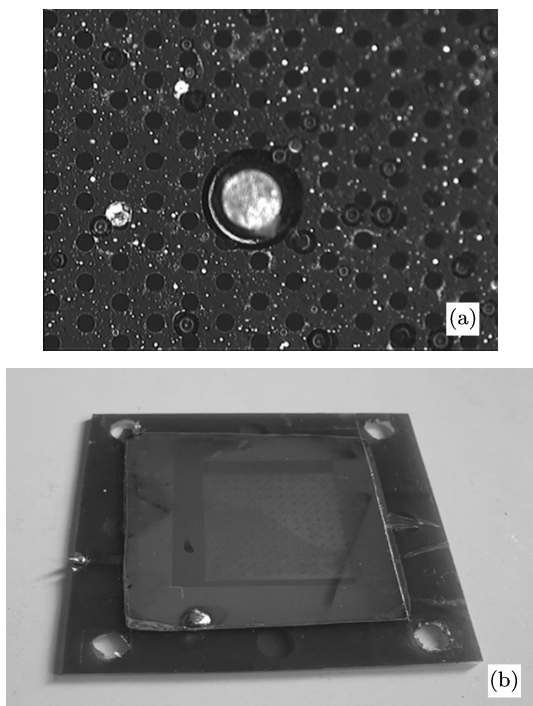


图4 micro-bulk 工艺刻蚀网及成品探测器

3 实验设置及结果

实验测试了绝缘丝工艺和 micro-bulk 工艺两种原理探测器的能量分辨性能, 使用的工作气体分别为 $95\% \text{Ar} + 5\% \text{isobutane}$ 和 $90\% \text{Ar} + 10\% \text{isobutane}$ 混合气体, 采用流气式工作模式. ^{55}Fe 放射源在漂移区产生原初电离并在雪崩区进一步放大. 放大信号通过 HV_2 金属网电极读出, 进入 ORTEC 142IH 电荷灵敏前置放大器和 572A 主放大器进行信号成型放大. 最后进入 ORTEC ASPEC 927 多道分析器进行获取.

绝缘丝工艺原理探测器使用得到能谱如图 5.

从图 5 中可以得到 ^{55}Fe 5.9 keV 的全能峰能量分辨率为 40%. micro-bulk 工艺的原理探测器得到 ^{55}Fe 能谱如图 6.

测试得到的 ^{55}Fe 能谱能量分辨率为 28%, 远好于尼龙丝工艺下的能量分辨率. 这说明 micro-bulk 工艺下雪崩电场的均匀性相比绝缘丝工艺有了较大的提高.

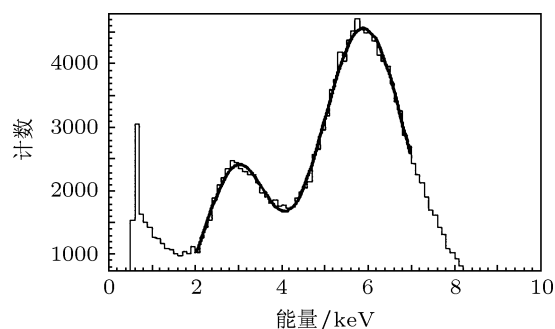


图5 尼龙丝工艺 micromegas 探测器测试 ^{55}Fe 放射源能谱

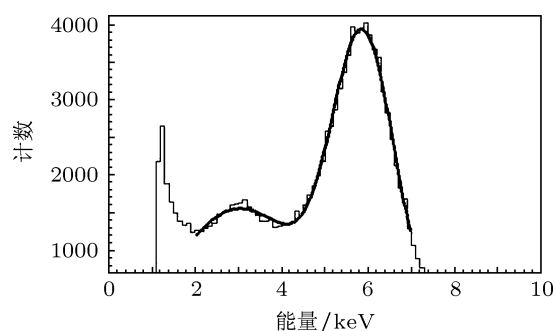


图6 micro-bulk micromegas 探测器 ^{55}Fe 能谱响应

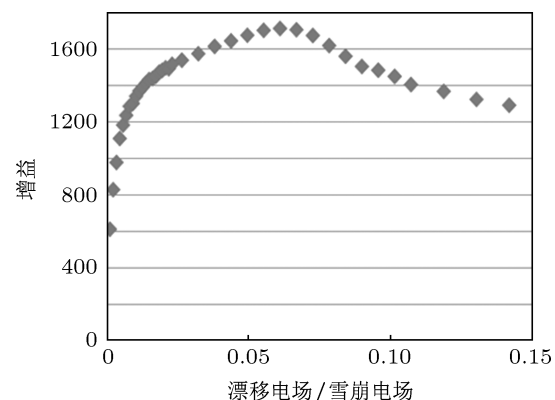


图7 漂移电场对探测器增益的影响(横坐标为漂移电场和放大电场比值, 纵坐标为增益)

在 micro-bulk 工艺探测器的测试中我们注意到, 原初电离电子从漂移区进入雪崩区的过程中, 穿过铜网的效率是影响 micromegas 探测器性能的重要指标. 调整上下电场关系可以影响电子的穿过率, 进而影响整个探测器的增益.

进一步的测量中, 通过固定雪崩区电场, 改变 3 mm 漂移区电场得到了探测器的增益曲线变化如图 7 所示.

可以看出探测器增益最初随漂移电场与雪崩电场比值增大而增大, 在比值为 0.07 左右时达到最大值后逐渐减小. 这是由于漂移区电场过小时, 原初电离电子在漂移区扩散过大, 导致原初电离电子

被漂移电极或室体各部分吸收;随着漂移电场的增加,电子更多的到达雪崩区;漂移电场过大会造成电子速度过大,降低进入雪崩电极孔内的概率,从而降低增益.通过合理的调节两者的比值可以得到探测器达到的最高增益为 1700 倍.

4 结论

在 Kapton 刻蚀技术已经日趋成熟的背景下,我们完成了 micro-bulk 工艺 micromegas 探测器的

初步研制.制作了探测器的雏形,并为今后的完善取得了宝贵的经验. micro-bulk 工艺克服了普通 micromegas 制作中编织网的不均匀性,同时保障了隔离柱子的均匀高度,极大的提高探测器的能量分辨率,适合进行大面积制作.在今后 micromegas 的发展中,这种直接生成的微网结构可以更好的结合阻性膜等其他探测器读出方式. micro-bulk 工艺的 micromegas 也将随着探测器本身的不断应用得到更好的机遇.

-
- [1] Charpak G, Bouclier R, Bressani T 1968 *NIM* **62** 262
 - [2] Giomataris Y, Rebourgeard P, Robert J P 1996 *NIMA* **376** 29
 - [3] Sauli F 1997 *NIMA* **386** 531
 - [4] Abbon P, Albrecht E, Alexakhin V Yu 2007 *NIMA* **577** 455

- [5] Bouchez J, Burke D R, Cavata Ch 2007 *NIMA* **574** 425
- [6] Fan R R, Hou F J, Ouyang Q 2010 *Chin. Phys. C* **34** 1636
- [7] Delbart A, Oliveira R D, Derre J 2001 *NIMA* **461** 84
- [8] Alexopoulos T, Altintas A, Alvgim M 2010 *NIMA* **617** 161

The study of micro-bulk micromegas*

Fan Rui-Rui¹⁾ Hou Feng-Jie¹⁾ Ouyang Qun^{1)†} Fan Sheng-Nan¹⁾²⁾
Chen Yuan-Bo¹⁾ Yi Fu-Ting¹⁾

1) (*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Particle detection and Electronic,
Institute of High Energy Physics, Beijing 100049, China*)

2) (*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 5 July 2011; revised manuscript received 31 August 2011)

Abstract

The fabrication process of micro-bulk micromegas is introduced. The energy resolution of the ^{55}Fe X-ray is compared with the result of nylon line micromegas. Furthermore, the detailed effect of electric field is discussed.

Keywords: micromegas micro-bulk energy resolution

PACS: 29.40.Cs

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 10775156).

† E-mail: ouyq@ihep.ac.cn