



## CEE-TPC中GEM读出探测器传输性能实验研究

魏向伦 鲁辰桂 张俊伟 马朋 杨贺润 邱天力 李蒙 胡荣江 段利敏

### Experimental Research on Transmission Performance of GEM Readout Detector in CEE-TPC

WEI Xianglun, LU Chengui, ZHANG Junwei, MA Peng, YANG Herun, QIU Tianli, LI Meng, HU Rongjiang, DUAN Limin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC46>

#### 引用格式:

魏向伦, 鲁辰桂, 张俊伟, 马朋, 杨贺润, 邱天力, 李蒙, 胡荣江, 段利敏. CEE-TPC中GEM读出探测器传输性能实验研究[J]. *原子核物理评论*, 2020, 37(3):765–770. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC46

WEI Xianglun, LU Chengui, ZHANG Junwei, MA Peng, YANG Herun, QIU Tianli, LI Meng, HU Rongjiang, DUAN Limin. Experimental Research on Transmission Performance of GEM Readout Detector in CEE-TPC[J]. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(3):765–770. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC46

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### CsI(Tl)+Si-APD探测器的性能测试

Performance Test of the CsI(Tl)+Si-APD Detector

原子核物理评论. 2017, 34(2): 190–194 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.02.190>

#### 基于GEM工艺的裂变时间投影室中裂变碎片的讨论

Discussion on Fission Fragments in Fission Time Projection Chamber Based on GEM Detector

原子核物理评论. 2019, 36(2): 197–203 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.197>

#### 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>

#### 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>

#### 用于GPPD谱仪的大面积闪烁体中子探测器性能测试

Performance Test of the Array Scintillator Detector with a Large Area for GPPD

原子核物理评论. 2019, 36(2): 190–196 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.190>

#### 基于相对论平均场有效对力的中子物质BCS-BEC跨越

BCS-BEC Crossover in Neutron Matter with RMF Effective Pairing Interaction

原子核物理评论. 2018, 35(4): 505–510 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.04.505>

文章编号: 1007-4627(2020)03-0765-06

## CEE-TPC 中 GEM 读出探测器传输性能实验研究

魏向伦<sup>1,2</sup>, 鲁辰桂<sup>1</sup>, 张俊伟<sup>3</sup>, 马朋<sup>1</sup>, 杨贺润<sup>1,†</sup>, 邱天力<sup>1,2</sup>, 李蒙<sup>1,2</sup>, 胡荣江<sup>1</sup>, 段利敏<sup>1</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 华北水利水电大学, 郑州 450045)

**摘要:** 气体电子倍增器 (GEM) 因其具有较好的位置分辨以及各项同性的二维结构等优点, 近年来受到了广泛的关注, 在 HIRFL-CSR 上正在建设的低温高密核物质测量谱仪 (CEE) 也计划使用 GEM 作为 TPC 的读出探测器。不同电场条件下 GEM 探测器的传输特性对探测器的有效增益及能量分辨有较大影响。文中研究了单层 GEM 探测器中漂移区电场及感应区电场对探测器传输特性的影响; 随后研究了双层 GEM 探测器的电压分配及传输区电场对探测器电荷传输性能的影响。结果表明, 在单层及多层 GEM 探测器中, 漂移区电场、传输区电场及感应区电场主要通过改变电子透过率和 GEM 雪崩电场强度及分布影响探测器的电荷传输性能, 进而影响探测器的有效增益及能量分辨。以上实验结果表明 GEM 探测器是 CEE-TPC 读出探测器的理想选择, 同时测试结果也为 TPC 中多层级联 GEM 工作点的选择提供了参考依据。

**关键词:** GEM; 传输性能; 有效增益; 能量分辨

**中图分类号:** O571

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC46

### 1 引言

低温高密核物质测量谱仪 (CSR External-target Experiment, 简称 CEE) 建成后, 将成为我国第一台运行于 GeV 能区, 基于国内核物理大科学装置 HIRFL-CSR 的大型核物理实验装置。其主要科学功能是利用粒子在磁场中的偏转, 通过测量粒子的径迹和飞行时间实现该能区的重离子碰撞中带电粒子产物的近全空间测量, 图 1 为其总体结构示意图。其中 TPC (Time Projection Chamber) 作为径迹探测器用于测量带电粒子径迹, 并给出动量进行粒子鉴别。CEE-TPC 的设计中拟选用多层级联的 GEM 作为其端盖倍增读出探测器, TPC 所需要测量的目标反应产物包括  $\pi$ 、 $p$ 、 $d$ 、 $t$ 、 ${}^3\text{He}$ 、 ${}^4\text{He}$ , 计算得到的  $\pi$  介子的电离能损约为 2.2 keV,  ${}^4\text{He}$  的电离能损约为 13.4 keV, 分别为上述反应产物中能损的最小值和最大值。根据上述能损信息及 CEE-TPC 所选用读出电子学 (SAMP A<sup>[1]</sup>, 其输入动态最大值为 100 fc) 和读出 Pad 的初步设计, 计算得到 GEM 读出探测器的增益应取 2000 左右。基于此并结合 CEE-TPC 中 GEM 读出区的结构设计, 本文通过实验对 GEM 探测器内不同区域的电场如何影响 GEM 传输特性从而影响探测器有效增益这一特点进行了系统的研究, 通过此研究可以

检验 GEM 是否可以满足 CEE-TPC 的应用, 如满足要求可进一步为 CEE-TPC 中级联 GEM 工作点的选择提供可靠的参考。本文同时进行了探测器能量分辨的测试, 用以辅助研究 GEM 雪崩状态; 另外, CEE 中要求 TPC 动量分辨  $\pi$ 、 $p$  典型值 5% 且总体优于 10%, 推算出探测器能量分辨应好于 26%, 本文测试也可为此提供参考。

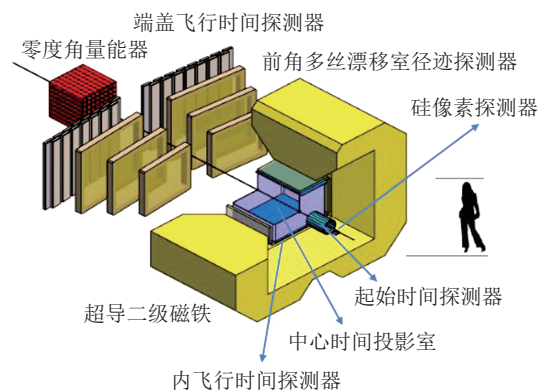


图 1 (在线彩图) CEE 总体概念图

本文分为五部分, 首先介绍了 GEM 探测器的应用背景, 其次介绍了单层及双层 GEM 的结构特点及实验装置; 第三部分以及第四部分, 分别研究了单层及双层 GEM 在不同电场条件下的传输特性的变化对探测器

收稿日期: 2020-01-13; 修改日期: 2020-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11875302, 11875301, 11705242)

作者简介: 魏向伦 (1990-), 男, 河北邢台人, 博士, 从事核技术及应用研究; E-mail: weixl@impcas.ac.cn

† 通信作者: 杨贺润, E-mail: yanghr@impcas.ac.cn.

有效增益和能量分辨的影响；最后为文章的总结。

## 2 实验装置及测试原理

图 2 为单层 GEM 探测器和双层 GEM 探测器的结构示意图，均由漂移极、GEM 膜、读出极组成。探测器采用欧洲核子中心 (CERN) 生产的标准 GEM 膜，由

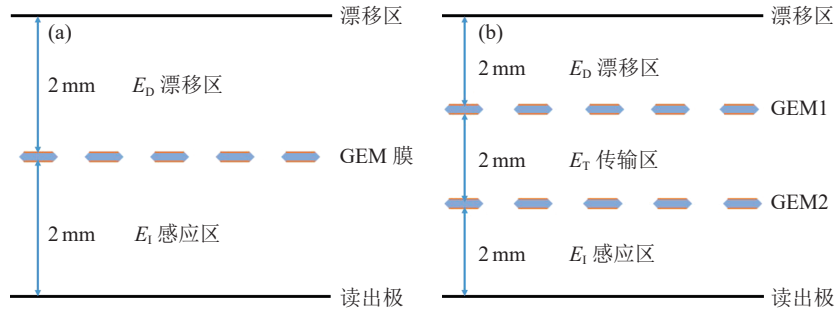


图 2 (在线彩图) 单层 (a) 和双层 (b) GEM 探测器的结构示意图

实验中采用 P10 气体 (90%Ar+10%CH<sub>4</sub>)，工作在常压流气模式下。单层 GEM 探测器中，漂移极与 GEM 膜之间的区域为漂移区，漂移电场由  $E_D$  表示；GEM 膜与读出阳极之间的区域为感应区，感应电场由  $E_1$  表示。双层 GEM 探测器中，两层 GEM 之间的区域为传输区，传输电场由  $E_T$  表示。实验使用 5.9 keV 的 <sup>55</sup>Fe 放射源进行测试，X 射线在漂移区与氩原子相互作用使其电离产生电子离子对，大部分原初电离电子在漂移区电场的作用下漂移到 GEM 孔间进行雪崩，单层 GEM 产生的雪崩电子经感应区由读出极收集，双层 GEM 中上层 GEM 孔间产生的雪崩电子经传输区进入到下层 GEM 孔间再次雪崩，最后由读出极收集，读出极测到的增益定义为探测器的有效增益。实验中阳极信号与收集到的电荷数成正比，在探测器正常的工作状态下，有效增益的变化可反映出传输性能的变化<sup>[3-4]</sup>，本文主要通过控制变量法对 GEM 的传输性能进行研究。实验中阳极信号经电荷灵敏前放 (142PC, ORTEC)、主放 (572A, ORTEC) 最后由多道分析器 (ASPEC-927, ORTEC) 获取，测试实物图如图 3 所示。

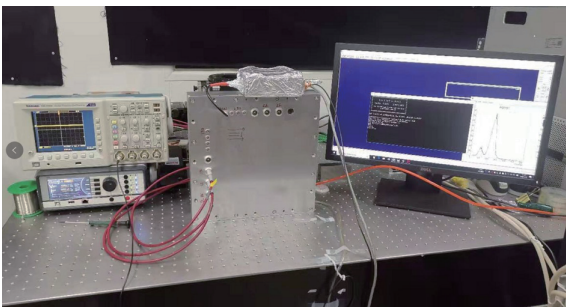


图 3 (在线彩图) 实验装置实物图

50 μm 厚的聚酰亚胺 (kapton) 膜做为基材，两侧各覆盖 5 μm 厚的铜作为电极构成。GEM 膜孔径 70 μm，孔中心距 140 μm，相邻孔呈正三角形分布<sup>[2]</sup>。漂移极采用 13 μm 的双面镀铝 Mylar 膜拉制而成。实验中 GEM 探测器的结构与 CEE-TPC 中的结构保持一致，漂移区间距、传输区、感应区间距均为 2 mm。

## 3 单层 GEM 实验结果及分析

### 3.1 $E_D$ 的变化对传输性能的影响

在单层 GEM 测试中，首先需要确定 GEM 的最佳工作电压区间，根据以往的模拟结果<sup>[5]</sup>，漂移区电场设定为 1 kV/cm，感应区电场设定为 4 kV/cm，GEM 压差  $\Delta V_{GEM}$  的测试范围为 350~450 V。随着 GEM 上下电极的压差  $\Delta V_{GEM}$  的增大，GEM 孔间电场逐渐增大，导致雪崩倍数增大，探测器的有效增益随之增大<sup>[6]</sup>；随着 GEM 压差的增大，能量分辨变好， $\Delta V_{GEM}$  大于 430 V 时分辨好于 20%，如图 4 所示。

根据上述 GEM 工作电压的测试结果，在单层 GEM 探测器的测试过程中，取  $\Delta V_{GEM}$  为 410 V 作为 GEM 的工作电压，图 5 分别展示了  $E_1$  分别为 1, 4, 6, 8 kV/cm 时， $E_D$  的变化对有效增益的影响；图 6 为  $E_1$  取不同值时， $E_D$  的变化对探测器能量分辨的影响。

$E_D$  小于 1.3 kV/cm 时，由图 5 可发现，随着  $E_D$  的增大，探测器有效增益增大。此阶段有效增益变化的主要原因为原初电离电子在漂移区内的复合变小，漂移区中有更多的原初电离电子数可以进入到 GEM 雪崩区参与雪崩<sup>[7-9]</sup>；图 6 中能量分辨的变化也可印证此点，因为漂移区电子复合几率减小，使得能量分辨变好。

$E_D$  大于 1.3 kV/cm 且小于 4.5 kV/cm 时，由图 5(b-d) 可发现，随着  $E_D$  的增大，有效增益减小。此阶段主要原因为终止在 GEM 上表面电极的原初电离电子增多，即 GEM 膜电子透过率降低，进入到小孔内参与雪崩的电子几率减小，同时导致此阶段能量分辨随  $E_D$  的增大变差，如图 6 所示。

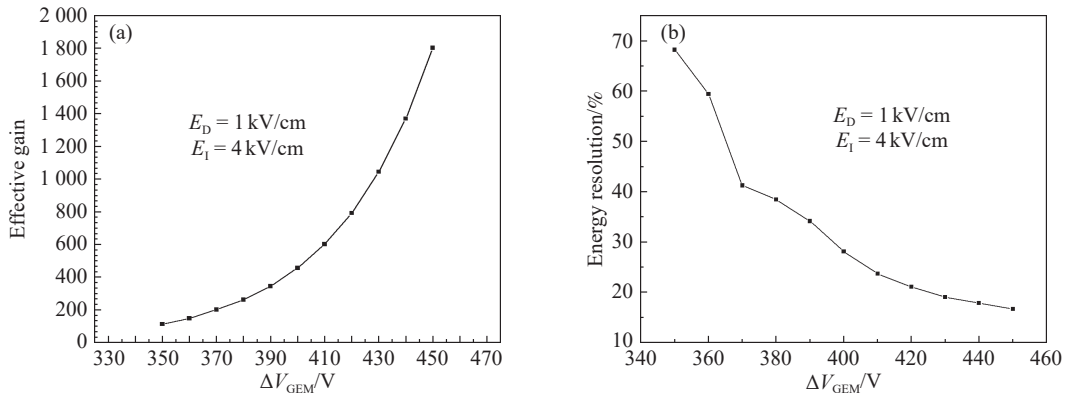


图 4 单层 GEM 有效增益 (a) 及分辨随 GEM 压差的变化

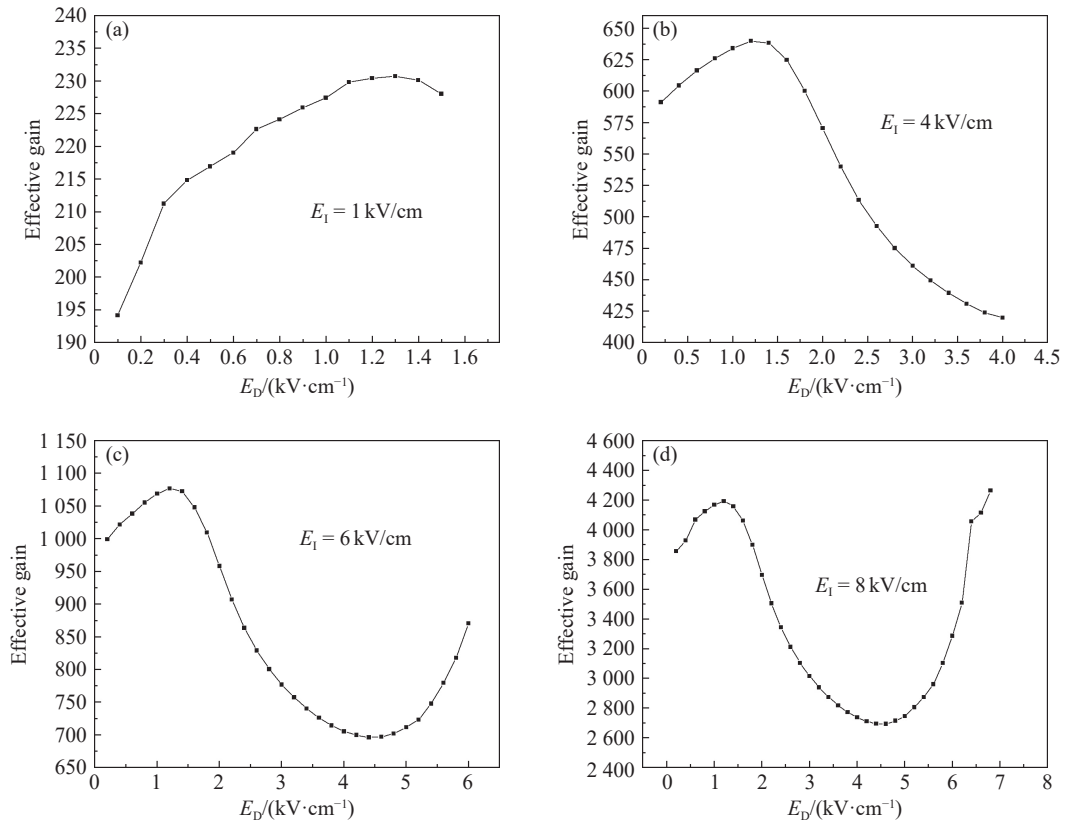


图 5 E<sub>1</sub> 分别为 1, 4, 6, 8 kV/cm 时, 有效增益随 E<sub>D</sub> 的变化

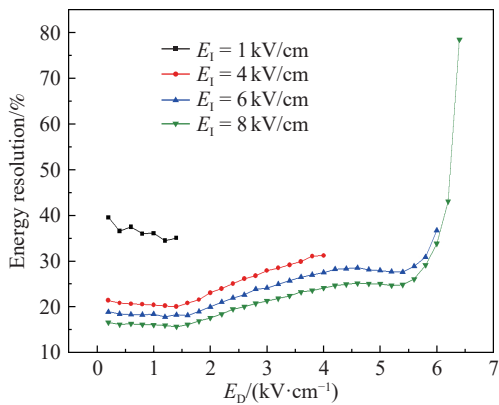


图 6 (在线彩图) 单层 GEM 探测器中 E<sub>1</sub> 固定时能量分辨随 E<sub>D</sub> 的变化

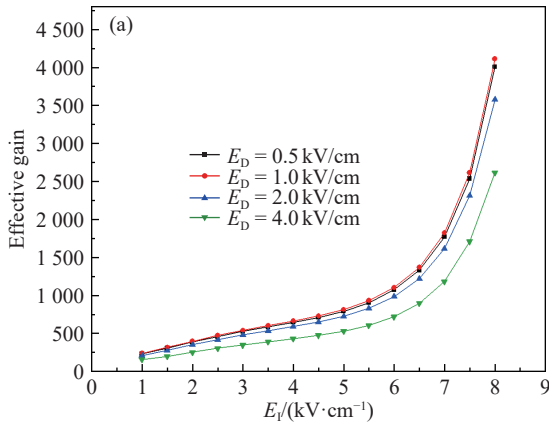
$E_D$  大于 4.5 kV/cm 且小于 5.5 kV/cm 时, 由图 5(c~d) 可见, 随着  $E_D$  的增大, 有效增益转而增大。此阶段有效增益变大的主要原因为漂移区电场的增大使 GEM 孔间的电场增强及 GEM 孔间雪崩区域增大 [5], 使得 GEM 孔间增益的增大超过电子透过率的减小量, 所以有效增益转而变大; 另外, 此阶段 GEM 膜的电子透过率减小放缓使能量分辨基本保持不变, 如图 6 所示。

$E_D$  大于 5.5 kV/cm 时, 由图 5(c~d) 可见, 随着  $E_D$  的增大, 有效增益急剧增大。主要原因为 GEM 孔间雪崩区开始由小孔向孔外 (漂移区) 延伸, 导致有效增益增大 [5, 10]; 由于雪崩区向漂移区的延伸, 原初电子在漂移区产生预防大, 预防大的倍增电子部分终止在

GEM 上表面 [3, 5, 10], 从而使能量分辨快速变差。

### 3.2 $E_T$ 的变化对传输性能的影响

图 7 为实验测得的漂移区电场  $E_D$  分别为 0.5, 1, 2, 4 kV/cm 时, 有效增益和能量分辨随着感应区电场  $E_T$  的变化。  $E_T$  从 1 kV/cm 增大到 5 kV/cm 时, 由图 7(a) 可发现, 随着  $E_T$  的增大, 有效增益变大, 一方面因为感应区电场的增强, 使更多的雪崩电子的终止位置由 GEM 下表面电极转移到读出极上, 使有效增益增加,



另一方面感应区电场增强使 GEM 孔内电场增强, 此阶段也会使有效增益增大; 以上两点也可用于解释此阶段能量分辨的变化。当  $E_T$  大于 5 kV/cm 小于 7 kV/cm 时, 感应区电场的增强使 GEM 孔间电场增强, GEM 孔内的增益的增大成为主要影响因素, 从而使有效增益指数增大; 此阶段内 GEM 孔间雪崩涨落的减小也成为能量分辨变好的主要因素。  $E_T$  大于 7 kV/cm 后, GEM 孔间雪崩区向感应区延伸, 导致有效增益呈指数增大。

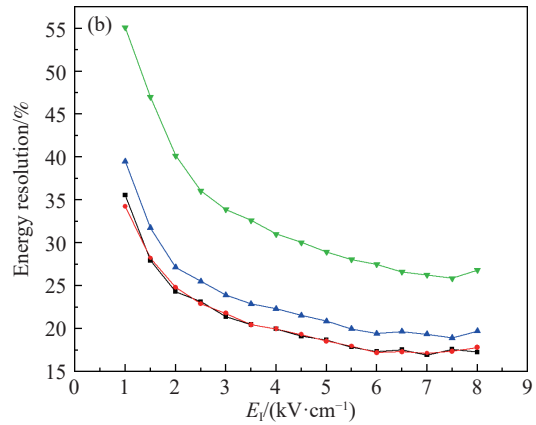


图 7 (在线彩图) 单层 GEM 探测器中  $E_D$  固定时, 有效增益 (a) 与能量分辨 (b) 随  $E_T$  的变化

## 4 双层 GEM 实验结果及分析

### 4.1 双层 GEM 电压分配对传输性能的影响

双层 GEM 探测器工作时, 上层 GEM 雪崩产生的电子漂移到下层 GEM 小孔中再次参与雪崩, 其数量远

大于在上层 GEM 小孔中参与雪崩的原初电子数, 所以为保证下层 GEM 长期稳定工作, 上层 GEM 电压较高时, 下层 GEM 工作电压一般保持在较低的电压差。图 8 展示了双层 GEM 不同的电压分配对探测器有效增益及能量分辨的影响。

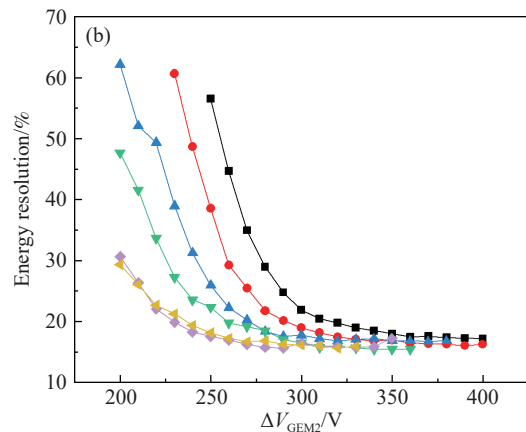
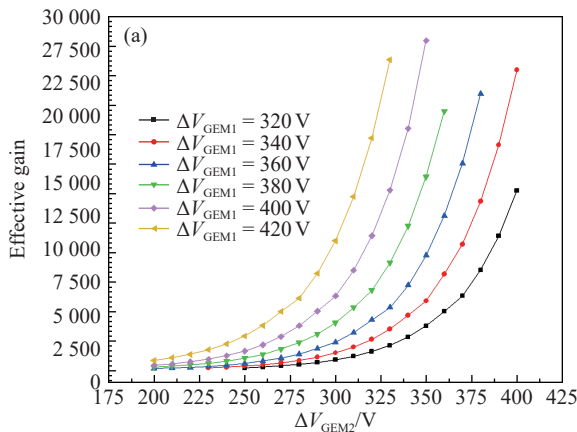


图 8 (在线彩图) 双层 GEM 探测器中电压分配对有效增益 (a) 和能量分辨 (b) 的影响

根据单层 GEM 的测试结果选定  $E_D$ 、 $E_T$ 、 $E_1$  分别为 1, 2, 4 kV/cm; 上层 GEM 压差  $\Delta V_{GEM1}$  设定为 320, 340, 360, 380, 400 及 420 V, 下层 GEM 压差  $\Delta V_{GEM2}$  的变化从 200 V 增大到 400 V。如图 8 所示, 随着  $\Delta V_{GEM2}$  的增大, 因为下层 GEM 雪崩增益变大, 使有效增益呈指数增长, 且引进的雪崩涨落逐渐变小, 能

量分辨逐渐变好并趋于稳定。下层 GEM 电压确定后, 上层 GEM 电压越大, 整体探测器的雪崩涨落变小, 能量分辨变好。

### 4.2 传输区电场 $E_T$ 的变化对传输性能的影响

上层 GEM 雪崩产生的电子的终止位置可分为四部

分,如图9所示。第一部分,雪崩后立刻被上层GEM下表面电极收集;第二部分,在向下层GEM漂移的过程中,与正离子或气体分子复合;第三部分,漂移到下层GEM小孔中参与再次雪崩;第四部分,被下层GEM的上表面电极收集。上述过程中只有第三部分电子可能会在读出阳极上感生信号,而当两层GEM的压

差、漂移区电场 $E_D$ 、感应区电场 $E_I$ 确定的情况下,传输区电场的大小直接影响到总增益的大小,即可反映出 $E_T$ 对传输性能的影响。在双层GEM探测器的研究中,两层GEM之间的传输区,可分别看作为上层GEM的感应区以及下层GEM的漂移区,从而与单层GEM的测试结果对比研究。

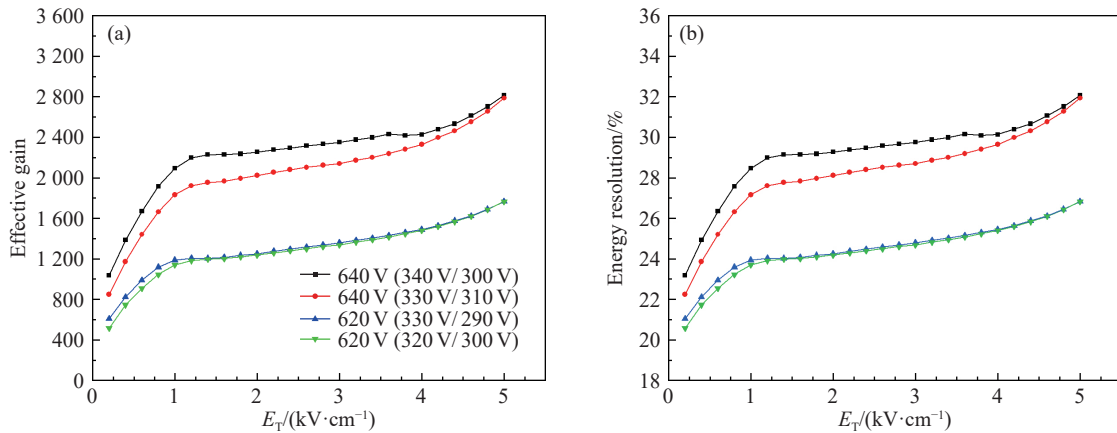


图9 (在线彩图) 双层GEM探测器中有效增益(a)和能量分辨(b)随 $E_T$ 的变化

实验中设定漂移区电场 $E_D=1$  kV/cm, 感应区电场 $E_I=4$  kV/cm, 两层GEM压差 $\Delta V_{GEM}$ 的总和、上层GEM压差、下层GEM压差分别设定为640 V (340 V/300 V)、640 V (330 V/310 V)、620 V (330 V/290 V)、620 V (320 V/300 V), 用以对比同样的总电压不同的电压分配下有效增益及能量分辨随 $E_T$ 的变化<sup>[10]</sup>。实验结果如图9所示。

当 $E_T$ 增大时, 可视为上层GEM的感应区电场增大, 亦可视为下层GEM漂移区电场增大。

当 $E_T$ 小于1.5 kV/cm时, 对于上层GEM,  $E_T$ 增大即感应区电场增大, 更多的雪崩电子的终止位置由上层GEM下表面变到下层GEM小孔间, 使得有效增益增大; 对于下层GEM,  $E_T$ 增大即漂移区电场增大, 电子在传输区的复合变少, 有效增益增大。两者共同作用使得双层GEM有效增益增大, 能量分辨变好。

当 $E_T$ 大于1.5 kV/cm小于4.5 kV/cm时, 对于上层GEM,  $E_T$ 增大即感应区电场增大, 更多的雪崩电子的终止位置由上层GEM下表面变到下层GEM小孔间, 使得有效增益增加; 对于下层GEM,  $E_T$ 增大即漂移区电场增大, 使其电子透过率降低, 有效增益减小; 两种情况同时作用, 前者作用效果大于后者, 使得双层GEM有效增益变大, 能量分辨变好。参考图5及图7, 此结果与单层GEM测试结果一致。

当 $E_T$ 大于4.5 kV/cm时,  $E_T$ 增大, 上层GEM因其感应区电场增大, 使其GEM孔间雪崩电场增强且雪

崩区域增大, 使有效增益增大;  $E_T$ 增大, 下层GEM漂移区电场继续增大, 下层GEM孔间电场增大带来的增益增大的影响, 大于电子透过率减小带来的影响, 所以有效增益增长变快, 且两层GEM的孔间电场分布区域相对稳定, 能量分辨到达坪区。此结果与单层GEM测试结果一致, 参考图5-7。

## 5 结论

通过实验本文系统地研究了GEM探测器漂移区电场、传输区电场、感应区电场对探测器有效增益及能量分辨的影响。结果表明, 漂移区电场 $E_D$ 对GEM传输特性的影响, 主要表现在改变漂移区内电子复合、改变GEM膜的电子透过率以及改变GEM孔间电场强度及分布等方面。感应区电场 $E_I$ 对GEM传输特性的影响主要表现在改变雪崩电子的分布、改变GEM孔间雪崩电场的强度及区域等方面。在研究双层及多层级联GEM探测器中传输区电场 $E_T$ 对GEM探测器传输特性的影响时, 可将传输区电场分别看作为上层GEM的感应区电场和下层GEM的漂移区电场进行分析, 文中分别对其进行了讨论, 实验表明 $E_T$ 对有效增益的影响与单层GEM的测试结果一致。

根据实验结果, 在CEE-TPC的后续实验中, 可通过调整GEM读出探测器不同GEM间的电压分配及不同区域的电场强度, 来满足TPC的增益要求, 使TPC可以实现CEE中反应产物的全测量; 在此基础上可以

通过细致的调节以上参数,使 GEM 读出区的传输特性达到最佳。

#### 参考文献:

- [1] ADOLFSSON J, PABON A A, BREGANT M, et al. *Journal of Instrumentation*, 2017, 12(4): C04008.
- [2] SAULI F. *Nucl Instr and Meth A*, 2016, 805: 2.
- [3] BACHMANN S, BRESSAN A, ROPELEWSKI L, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 1999, 438: 376.
- [4] PATRA R N, SINGARAJU R N, BISWAS S, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2017, 862: 2.
- [5] ZHANG J W. Study on the Performance of GEM-TPC Detector[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017: 15. (in Chinese)  
(张俊伟. GEM-TPC性能研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017: 15.)
- [6] BRESSAN A, BUZULUTSKOV A, ROPELEWSKI L, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 1999, 423: 119.
- [7] GIOMATARIS Y, REBOURGEARD PH, ROBERT J P, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 1996, 376: 29.
- [8] NIKOLOPOULOS K, BHATTACHARYA P, CHERNYATIN V, et al. *Journal of Instrumentation*, 2011, 6: 06001.
- [9] ALFONSI M, CROCI G, PINTO S D, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2011, 671: 6.
- [10] NARDO L D, FARAHMAND M. *Nucl Instr and Meth A*, 2016, 819: 154.

## Experimental Research on Transmission Performance of GEM Readout Detector in CEE-TPC

WEI Xianglun<sup>1,2</sup>, LU Chengui<sup>1</sup>, ZHANG Junwei<sup>3</sup>, MA Peng<sup>1</sup>, YANG Herun<sup>1,†</sup>, QIU Tianli<sup>1,2</sup>,  
LI Meng<sup>1,2</sup>, HU Rongjiang<sup>1</sup>, DUAN Limin<sup>1</sup>

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. North China University Of Water Resources And Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

**Abstract:** The Gas Electron Multiplier (GEM) has attracted wide attention due to its better position resolution and isotropic two-dimensional structure, GEM is also planned to be used as the TPC readout detector in CSR External-target Experiment (CEE) under construction. The transmission characteristics of GEM under different electric field conditions have great influence on the effective gain and energy resolution of the detector. In this paper the effects of the electric field in the drift region and the induction region on the transmission characteristics of the detector are performed on single GEM, and the effects of voltage distribution and electric field in induction region on the transmission characteristics of double-layer GEM detector were studied. The results show that in single and multi-layer GEM detectors, electric fields in the different region affect the transmission characteristics of the detector mainly by changing the electron transmittance and changing the avalanche field intensity and distribution of GEM, which will affect the effective gain and energy resolution of the detector finally. The above experimental results indicate that GEM detector is a good candidate for CEE-TPC readout detector and they also provide a reference for the selection of the working point of multi-layer GEM in TPC.

**Key words:** GEM; transmission characteristics; effective gain; energy resolution

Received date: 13 Jan. 2020; Revised date: 21 Apr. 2020

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11875302, 11875301, 11705242)

† Corresponding author: YANG Herun, E-mail: yanghr@impcas.ac.cn.