

GEM 电极的三维电场分布计算*

周意²⁾ 李澄¹⁾ 安少辉 许咨宗

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230027)

摘要 基于有限元方法对 GEM 电极的电场分布进行模拟和计算, 得到了完整的三维电场分布。研究不同几何构型的 GEM 场强分布对电荷收集效率的影响, 给出了 4 种构型 GEM 电极的电场线透过率分别为: 双倒锥型 33.12%; 圆柱型 34.85%; 单锥型 40.70%; 单倒锥型 16.70%。计算得到的电场线透过率比二维电场分布的结果更加接近实验结果。

关键词 气体电子倍增器 电场分布 电荷收集效率

1 引言

GEM(Gas Electron Multiplier)是一种新型的电子倍增器件。使用 GEM 电极构成的多种类型的气体探测器, 正在研究用于新一代高亮度粒子物理实验和 X 射线成像^[1]。由于 GEM 电极特殊的几何构型和电场分布对 GEM 探测器的电荷传输和气体放大特性有很大影响, 使得用计算机对 GEM 电极的电场分布进行模拟和计算成为重要的环节。在对标准的双倒锥型 GEM 的气体放大性能测试的基础上^[2], 为了进一步了解 GEM 电极的几何构型对电荷传输的影响, 采用有限元算法和电场模拟程序(3D Max-

场分布的计算结果^[3-5]。由于二维模型不能精确的描述其中的电场分布, 使得计算结果与实验测量结果有较大的差别, 因此有必要采用了三维模型进行电场模拟和计算。

GEM 是用聚酰亚胺(Kapton)材料制成的一种薄膜电极。厚度一般为 $50\mu\text{m}$, 膜的两面都镀有铜膜。用化学蚀刻方法制成孔径为几十微米的小孔。GEM 几何结构见图 1。由于掩膜工艺和制作方法的不同, 孔的形状有双倒锥, 单倒锥, 和圆柱型的小孔, 小孔的布局一般为正六边形。

2 模型建立

标准的 GEM 电极的几何尺寸为: 孔径 $d = 60\mu\text{m}$, $D = 80\mu\text{m}$; 孔间距 $P = 140\mu\text{m}$; Kapton 膜厚度 $T = 50\mu\text{m}$, 铜膜厚度 $S = 5\mu\text{m}$ 。GEM 探测器按照电子运动过程可分为上漂移区, 雪崩放大区, 传输区(见图 2)。由于孔的平面布局是正六边形, 在进行三维电场计算时首先要选取适合的几何单元。一般有 3 种单元选取方式, 如图 3 所示。图 3(a)为单孔取样, 图 3(b)是在一个平行四边形的 4 个顶点的孔上各取一部分, 4 部分加起来能构成一个取样单元, 图 3(c)为一个矩形取样单元, 由矩形的一条边上两个顶

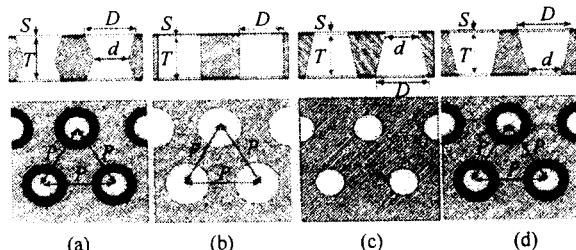


图 1 GEM 的 4 种构型

(a) 双倒锥型; (b) 圆柱型; (c) 单锥型; (d) 单倒锥型。

well), 对于不同构型的 GEM 电极内的电场分布了进行模拟和计算。许多有关的文章给出了 GEM 二维电

2003-06-25 收稿, 2003-08-11 收修改稿

* 国家自然科学基金(10075045)资助

1) E-mail: licheng@ustc.edu.cn

2) E-mail: zhouyi@mail.ustc.edu.cn

点的四分之一孔与另一条边中心的半个孔构成。由于正六边形布局的小孔，在 x 方向与 y 方向，相邻两个孔中心点之间的距离是不一样的，如果选用图3(a)所示的单元，那么小孔的布局就默认为成了 x 方向与 y 方向间距相同，也就是把小孔的布局默认成是矩形布局，与实际情况不符合。图3(b),(c)都反应的是正六边形布局，但是图3(b)的平行四边形结构不能表现出第一行与第三行对第二行的镜像对称关系。因此，在模拟中选取图3(c)的几何单元布局。标准的双倒锥型GEM三维几何模型如图4(a)所示。在该模型中，把背景空间的一部分与GEM的孔都填成了实体，并且是各自独立的。

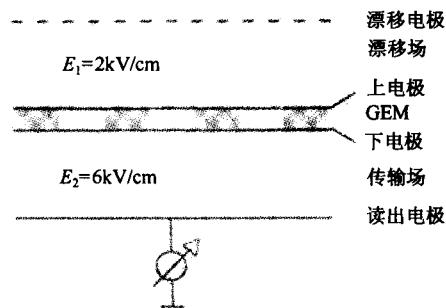


图2 GEM探测器模型

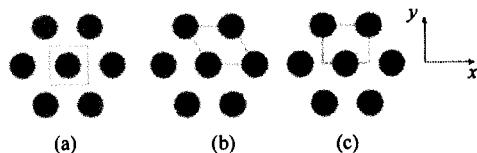


图3 GEM的3种不同几何单元的选取

需要指出的是，采用二维模型进行计算得到的电场分布，与采用三维模型进行计算得到的电场分布在一个平面上的投影是不同的。这主要是二维模型与三维模型比较，各自的光学透过率不同。以双倒锥型GEM为例，在三维模型中，孔的面积为 $S_1 = \pi \cdot 40^2$ ，一个几何单元总面积为 $S_2 = 140^2 \times \frac{\sqrt{3}}{2}$ ，所以

比值为 $\sigma_{3d} = \frac{S_1}{S_2} = 0.296$ 。在二维模型中，每个单元的面积正比于孔的直径，薄膜总面积为正比于单元的总长度，比值为 $\sigma_{2d} = \frac{80}{140} = 0.571$ 。因此，在计算电场分布时，三维模型才能真实反映电场线透过率。

几何模型的各部分材料的属性有：1) Kapton材料，其真空介电常数为 $\epsilon = 2.89$ ，电导率为 $\sigma = 6.67 \times 10^{-16} \text{ S/m}$ ；2) 背景空间为混合气体($70\% \text{ Ar} + 30\% \text{ CO}_2$)；3) 漂移场场强为 2 kV/cm ，传输场场强为

6 kV/cm ，GEM极间电压为 500 V 。

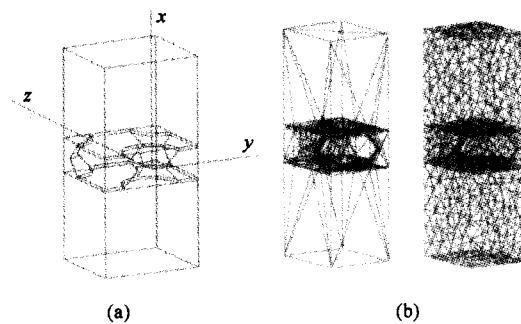


图4 双倒锥型GEM的几何模型(a)与模型的网格划分(b)

在网格的划分时，网格数目不能太少，否则会影响计算的精度。另一方面，网格数目不能太多，否则会增加计算时间，对计算机硬件资源的要求也会大幅度提高。综合考虑以上因素，选取网格数为25000左右^[6]。依据选取的几何单元模型，手动划分后，程序生成的网格如图4(b)所示。

3 场强分布

图5给出了4种孔型的GEM的电场 $|E|$ 在 xy 平面上的分布的计算结果。从图中可以看出，在Kapton膜内(x 方向)，电场几乎是均匀的，边缘处电场变化很大。图6分别给出4种GEM的电场沿 y

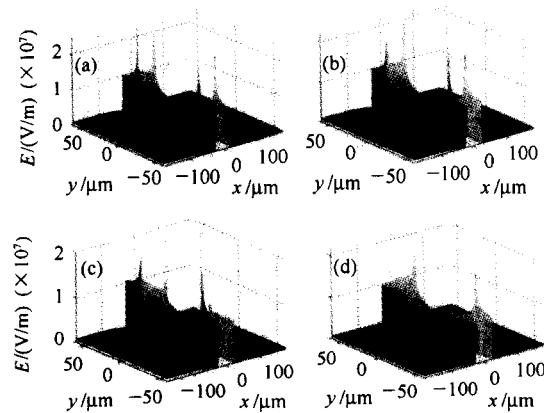


图5 xy 平面上的电场强度分布
(a)双倒锥型;(b)圆柱型;(c)单锥型;(d)单倒锥型。

方向的分布。在孔内，4种类型的GEM电场大小沿 y 方向变化规律有很大的不同，这是由GEM的孔型导致的。由于有限元算法计算精度限制，图6中的曲线出现左右不对称。4种GEM孔的中心($y=0, z=0$)电场随 x 坐标的变化规律见图7。在 $x=0$ 处电场由大到小依次是单锥型为 71.7 kV/cm ；单倒锥型GEM，为 71.4 kV/cm ；圆柱型GEM为 63.6 kV/cm ，双倒锥型GEM

为 63.3kV/cm , 对应不同 x 处场强分布有明显不同, 在与小孔相连的铜膜边缘处, 电场强度要远远大于其他地方的值, 这是由于尖端效应造成的.

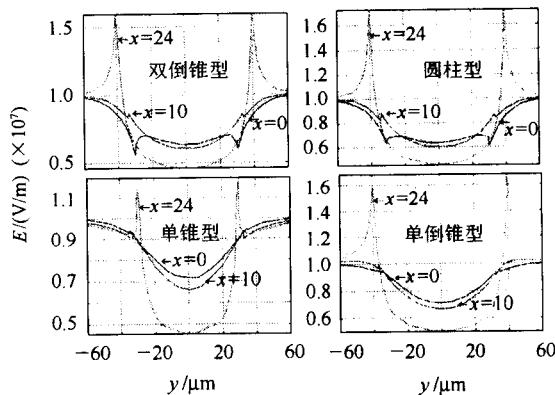


图6 xy 平面上电场强度随 y 坐标的变化
(固定 $x = 0, 10, 24 \mu\text{m}$)

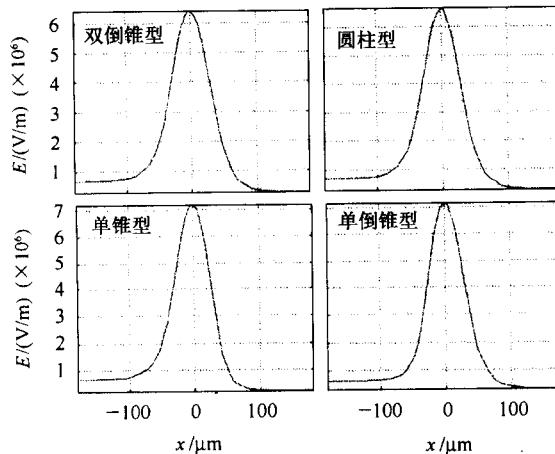


图7 孔中心处4种GEM的电场大小

4 电场线透过率

电场线的透过率直接影响GEM中雪崩放大产生的电子的透过率, 即反映了收集电荷的大小. 4种GEM电极中的二维和三维电场线分布见图8(计算时假定电场线由负电荷发出). 可以看出4种构型的GEM, 从上漂移电极发出的电场线都可以通过孔到达读出电极, GEM上电极发出的电场线有部分到达读出电极, 其他部分终止在GEM下电极上.

定义电场线的透过率为: 读出电极接收到的电场线条数(n_3), 与漂移电极和GEM上电极发出的电场线条数之和($n_1 + n_2$)的比值, 即 $T = \frac{n_3}{n_1 + n_2}$. 由于电场线的密度与电场强度成正比, 并且与发出电场线的电荷量成正比. 因此可以将电场线的条数的

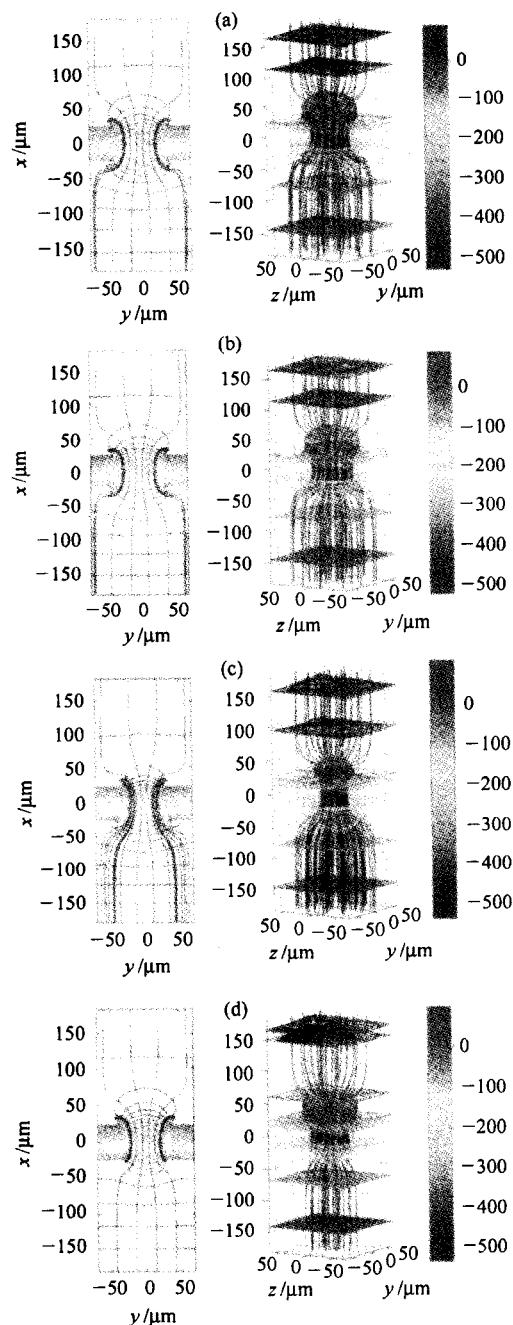


图8 4种几何构型的GEM的二维与三维电场线分布
(a) 双倒锥型; (b) 圆柱型; (c) 单锥型; (d) 单倒锥型.

比值转换成为发出电场线的电荷的比值, 即 $T = \frac{Q_1}{Q_2 + Q_3}$. 对双倒锥型GEM的计算结果是 $T = 33.12\%$, 圆柱型 $T = 34.85\%$, 单锥型 $T = 40.70\%$, 单倒锥型 $T = 16.70\%$. 实验上测量了双倒锥型GEM电荷透过率, 当漂移电场与传输电场比值为 $1/3$, 平均值为 38% ^[7]. 在同样条件下, 用二维模型计算出来的结果是 74.03% , 与实验结果相差较大. 图9给出双倒锥型GEM(漂移电场场强

$E_D = 2\text{kV/cm}$)透过率随传输场 E_t 的变化。随着传输场的增加电场线透过率趋向饱和。

计算结果还发现,当 GEM 极间电压 V_{GEM} 减小时

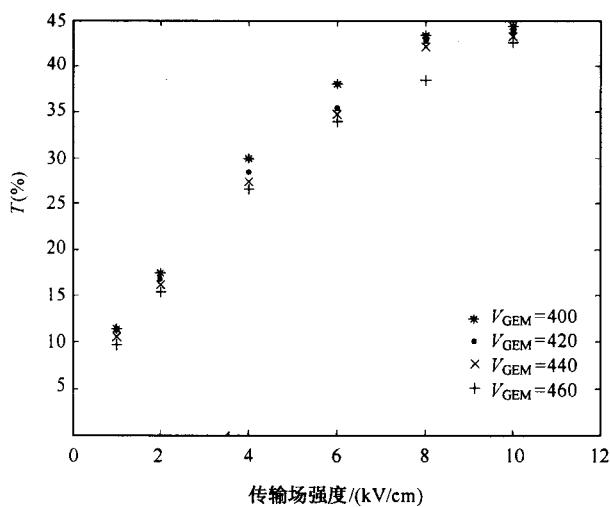


图 9 透过率随 E_t 变化

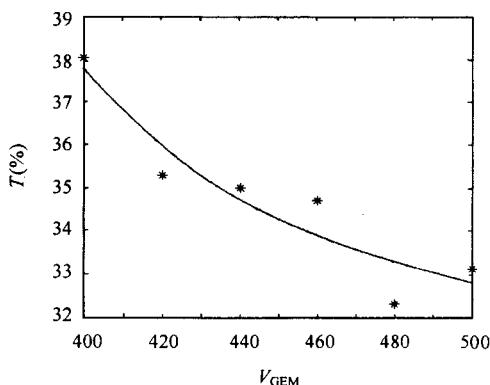


图 10 透过率随 V_{GEM} 的变化

(传输场与漂移场之比为 1/3),电场线的透过率增加, $V_{\text{GEM}} = 400\text{V}$ 与 500V 比较,电场线透过率提高了大约 15 % (如图 10 所示),但是孔的中心电场相应减小了大约 20 %。

5 结论

电场线的透过率直接从静电学的角度反应了 GEM 电极的几何构型对电荷传输的影响。从场强分布角度分析,4 种几何构型的 GEM 在工作电压在 400V 以上时,孔内场强都在 10kV/cm 以上,足以产生电子雪崩。在孔的边缘场强要比孔内场强大一倍以上,孔下方的电场也比上方要大 $\sim 0.5\text{kV/cm}$ 。从电场线分布分析,电场线透过率从大到小依次是:单锥型,圆柱型,双倒锥型,单倒锥型。对于双倒锥型 GEM,当固定漂移场场强不变(为 $E_D = 2\text{kV/cm}$)是,电场线在 GEM 孔中的透过率随传输场场强增加而增加,当传输场场强增大到 $E_D = 8\text{kV/cm}$ 以上时,透过率开始呈现出饱和的趋势,达到 45 % 左右。如果固定漂移场场强与传输场场强($E_D = 2\text{kV/cm}$, $E_t = 6\text{kV/cm}$),改变 GEM 两端的电压,则电场线透过率会随着电压的增大而减小。

根据有限元方法计算的到 GEM 三维电场分布能够全面反映 GEM 的实际电场分布。在计算时选取网格数为 25000 左右,计算精度达到 0.5 %。计算得到的电场线透过率比二维电场分布的结果更加能够反应真实结果。根据计算得到的场强分布可以进一步模拟 GEM 探测器的雪崩放大过程和电荷传输过程。

参考文献(References)

- 1 Fabio Sauli. Nucl. Instr. and Meth., 2003, **A505**:195—198
- 2 LI Cheng, XU Zi-Zong. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2000, **20**(5):351(in Chinese)
(李澄,许咨宗. 核电子学与探测技术,2000,**20**(5):351)
- 3 Bouianov O, Bouianov M, Orava R et al. Nucl. Instr. and Meth., 2000, **A450**:277—287
- 4 Bouianov O, Bouianov M, Orava R et al. Nucl. Instr. and Meth., 2001, **A458**:698—709
- 5 3D Simulation of Charge Transfer in a Gas Electron Multiplier (GEM) and Comparison to Experiment. CERN-OPEN-99/373
- 6 Tomas Motos Lopez. Electrostatic Field Calculation of the Gas Electron Multiplier (GEM) Using Ansoft's 3D Field Simulator. CERN/IT/99/5
- 7 QIANG Yi. Research on the Properties of Avalanche in Gas Electron Multiplier, Thesis of University of Science and Technology of China, 2002(in Chinese)
(强翼. GEM 探测器气体放大性能研究,中国科学技术大学毕业论文,2002)

Three Dimension Distribution of Electric Field in GEM Gas Detectors^{*}

ZHOU Yi²⁾ LI Cheng¹⁾ AN Shao-Hui XU Zi-Zong

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract The 3D distribution of electric field in GEM (Gas Electron Multiplier) electrode is calculated based on the finite element method. The transmissivity of electric field lines in four types of GEM are obtained, these are 33.12 %, 34.85 %, 40.70 %, and 16.70 % for double-conical, cylindrical, single-conical and inverse-conical electrodes respectively. The three dimensional calculation of electric field in GEM agrees with the experimental data better than the two dimensional calculation.

Key words Gas Electron Multiplier, distribution of the electric field, charge collection efficiency

Received 25 June 2003, Revised 11 August 2003

* Supported by National Natural Science Foundation of China(10075045)

1) E-mail: licheng@ustc.edu.cn

2) E-mail: zhouyi@mail.ustc.edu.cn