

标准真空电馈通微型磁控管真空计及其性能研究

朱冠卿¹ 邹鹏飞¹ 毕海林¹ 王旭迪¹ 谢斌平² 董金奎² 曹青^{1*}

(1. 合肥工业大学机械工程学院 合肥 230009; 2. 费勉仪器科技(上海)有限公司 上海 201906)

Micro Magnetron Vacuum Gauge for Standard Vacuum Feedthrough and Performance

ZHU Guanqing¹, ZOU Pengfei¹, BI Hailin¹, WANG Xudi¹, XIE Binping², DONG Jinkui², CAO Qing^{1*}

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Fermion instruments (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201906, China)

Abstract The current application of cold cathode ionization vacuum gauges in micro-vacuum systems is relatively limited. In this study, research of magnetron gauge (MMG) was conducted, which successfully achieved the goals of small size and high vacuum measurement. The volume of this MMG is only 0.3 cm³, more than 30 times smaller than currently available magnetron gauges on the market. Additionally, its connector design allows it to be compatible with standard vacuum feedthroughs. The internal electromagnetic field and electron trajectory within the vacuum gauge were modeled. The current versus pressure curves of MMG among 10⁻⁴~10⁻⁷ mbar at -500~-2500 V were obtained from the experimental tests. The most suitable voltage for MMG measurement was selected for repeated measurements and fitted to obtain its sensitivity, and the error range of MMG was obtained by comparing the fitted data with the measured data of the calibrated vacuum gauge. The results show that this MMG can accurately measure the pressure of 10⁻⁴~10⁻⁷ mbar in micro-vacuum system.

Keywords Vacuum measurement, Magnetron gauge, Miniaturize

摘要 目前冷阴极电离真空计在微型真空系统中的应用较少,文章对一种磁控管真空计(MMG)进行研究,成功达到了微小尺寸与高真空测量水平同时满足的目标,该MMG体积仅有0.3 cm³,比目前市售的磁控管真空计小30倍以上,同时由于其连接器设计使其能够与标准真空电馈通相适配。用COMSOL模拟了磁控管真空计内部电磁场分布与电子运动轨迹,实验测试得到了MMG在-500~-2500 V电压下10⁻⁴~10⁻⁷ mbar之间的电流与真空度关系曲线,选取最适合MMG测量的电压进行重复测量并拟合得到其灵敏度,将拟合得到的数据与校准真空计测量数据对比得到MMG误差范围。该MMG可用于微型真空系统中10⁻⁴到10⁻⁷ mbar范围真空度的测量。

关键词 真空测量 磁控管真空计 微型化

中图分类号: TB772

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202312019

近年来,许多类型的真空计已经小型化,如皮拉尼真空计、摩擦真空计(FGs)^[4-6]但是高真空环境下的气体热导率非常小,这些真空计并不能适用与高真空测量。冷阴极电离真空计(CCG)为常规高真空测量提供了许多优点。它结构简单又经济耐用^[1-3]。热阴极电离真空计(HCG)存在的重要问题热除气和电子刺激解吸,冷阴极真空计可以忽略不

计,而且在低压下不存在导致误差的x射线效应。因此,对于高真空测量,冷阴极电离真空计无疑是更好的选择。

目前冷阴极真空计结构设计有了重大改进,如潘宁式真空计,磁控管式真空计,倒置磁控管式真空计等^[7-9]。但自推出以来,其物理尺寸几乎没有变化,对于许多应用来说,减小冷阴极真空计的物理

收稿日期: 2024-01-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF0717200); 国家自然科学基金青年基金项目(62101172)

* 联系人: E-mail: caoqing@hfut.edu.cn

尺寸是有益的,不仅可以缩小占用的体积,还可以消除与相邻电子束和磁性存储设备的干扰,减少真空计的磁性影响,使其能够更广泛的应用于航空航天、加速器等精密设备中^[10-11]。大多数商用的和最近报道的小型化 CCG 的内部体积至少为 10 cm^3 ,例如 MKS 系列 903 倒置磁控管换能器的内部体积为 15 cm^3 , B. R. F. Kendall 开发的小型磁控管真空计^[10]内部体积最小为 5 cm^3 ,即便是这样,体积依旧太大,无法集成在微型的真空室中^[12-14]。

本次工作研究对象是一种新型磁控管真空计(MMG),其内部体积为 0.3 cm^3 ,比起市售的小型化磁控管计的内部体积小约 30 倍。MMG 结构由圆柱形阳极、中心阴极和环形磁体组成。电场主要分布在阴极柱和阳极之间,为径向电场,电场线从阳极指向阴极。磁体提供的磁场沿着圆柱形阳极的轴线方向分布。当工作电压通入阴极时其工作过程可分为三个阶段:

(1)第一阶段是电子发射阶段,主要发生在 MMG 阴极或气相中。在大多数情况下是由宇宙射线随机触发的,但放射性、高能光子或场电子等也可能会诱发电子发射。

(2)第二阶段是电子受 MMG 的交叉磁场和电场影响下沿着一个或多个长度约为几毫米的短摆线路径移动,如图 1 所示。在摆线运动的一部分过程中,初级电子可能有足够的能量去碰撞电离气体分子。这种碰撞的概率将与气体密度成正比。如果发生这种电离碰撞,电子将可在电极之间的空间中重新加速。重复此过程,电流将会呈指数级增长。

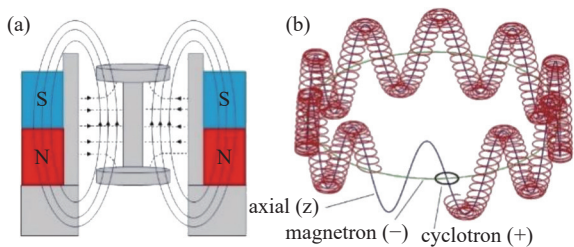


图1 MMG 原理示意图。(a) MMG 内部电磁场示意图,(b)电子轨迹示意图^[15]

Fig. 1 Schematic diagram of MMG principle. (a) Schematic diagram of the internal electromagnetic field in the MMG, (b) schematic diagram of electron trajectories^[15]

(3)第三阶段则是电流会在一定的真空度下增长到空间电荷阈值,电流逐渐稳定。

因此,要确保 MMG,能够在小体积、高真空这

两个条件的限制下能够工作良好,就需要实现其电场和磁场大小能够将电子限制在足够小的体积内,电子需要运动几公里才能在 10^{-7} mbar 的压力下与气体分子发生碰撞,以此来确保实际效率的气体电离。Shiyang Deng 等^[16]开发的小型 MMG 实现了这一需求,但其实验测试仅对其不同电压下电流与真空度关系进行测试,缺乏重复测试的对比,而且并没有与校准真空计进行误差对比,本次工作对这一工作进行了完整的测量过程,并分析了 MMG 的误差。

1 设计与建模

本次工作中的 MMG 结构如图 2,主要由两个部分组成,分别是右侧的电离区域与左侧的连接区域,电离区域由一个可拆卸的阴极,圆柱形阳极以及两个绝缘垫片组成,而左侧的连接区域由阴极和阳极的同轴连接器部分组成,其可以配套连接标准高压真空电馈通,该 MMG 的内部体积仅有 0.3 cm^3 ,同时同轴连接器部分可以保证能够准确快速的安装至电馈通等,能够适配大部分真空配件。

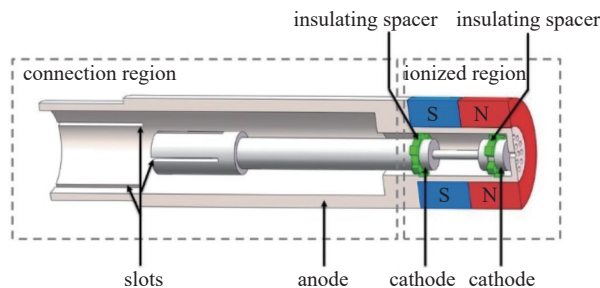


图2 MMG 内部结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the internal structure of MMG

MMG 阳极由一个长 12.4 mm , 外径 6.4 mm , 内径 5 mm 的圆柱体组成。顶部覆盖 $600\text{ }\mu\text{m}$ 厚的阳极端板,端板上打了多个直径 $600\text{ }\mu\text{m}$ 的孔;这些孔允许气体通过阳极并进入真空计。两个 6.4 mm 厚的环形磁铁(磁化方向:轴向)覆盖阳极。阴极位于阳极的纵轴上,由直径为 1.0 mm 的柱和两个直径为 3.5 mm 、间距为 6.0 mm 的阴极端板组成。两个绝缘垫片环绕阴极端板,以防止阳极和阴极之间短路。绝缘垫片具有锯齿状外围,目的是为了增大气体流导。垫片厚度为 $800\text{ }\mu\text{m}$,内径为 3.0 mm ,外径为 5.0 mm 。在两个阴极端板上刻有浅环形凹槽,使得绝缘垫圈能够固定在阴极阳极之间。绝缘层也位于顶部阴极端板的顶部,以防止电短路。阴极顶

板与阳极进气孔处用胶带连接,其阻挡了部分进气孔,为了保证进气在连接器部分增加了一圈半径为1 mm的进气孔,阴极实物如图3所示。

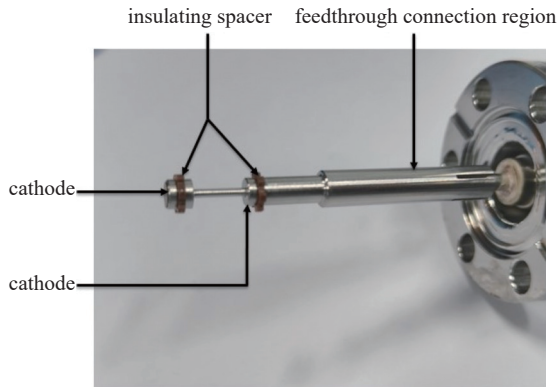


图3 MMG 阴极实物图

Fig. 3 Actual image of the cathode in MMG

阳极与阴极材料都选择放气率较小的316 L不锈钢,是真空设备的常用材料选择,同时316 L不锈钢磁导率较小,对磁场的影响较小。绝缘垫片最初选择尼龙材料,但是在实验测试过程中发现在高电压下被击穿,后续改进后选择聚酰亚胺制作。由于需要在微型体积下具有满足真空计正常工作的磁场,因此磁体不能选择铁氧体磁铁而选择了N42钕铁硼磁铁。阴极与阳极端板处用KAPTON胶带辅助连接。

2 仿真方法

对于MMG来说,最重要的就是要保证电子有足够的运动轨迹,为了对此进行研究,在COMSOL Multiphysics软件中建立了一个包含静电场和磁场物理模块的三维有限元分析模型。由于积分步较多,因此需要对模型进行简化,仅对MMG的电离区域进行仿真模拟,不包含阴极与阳极之间的绝缘垫圈,因为其对电子轨迹没有影响。阴极与阳极的材料均选择316 L不锈钢,其磁导率为1.6。环形磁铁在设计中应该由两个组成,为了简化模型将其合并为一个,对磁场影响不大,磁体材料选择N42钕铁硼磁铁,其相对磁导率为1.05沿模型的轴向的剩余磁通密度 B_r 为1.3 T。

在静电物理模块中,阳极表面接地,阴极表面电压为 V_k 。将 V_k 从-100 V变化到-1000 V,步长为100 V,根据电荷守恒方程研究得到的电场:

$$E = \nabla V_k \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r E) = \rho_v \quad (2)$$

其中 E 是电场, ϵ_0 是真空的介电常数(8.85×10^{-12} F/m), ϵ_r 是相对介电常数, ρ_v 是空间电荷密度,在这些模拟中假设为零。在用于磁场的物理模块中(不存在电流的情况下),采用磁通量守恒法分析磁场分布:

$$B = \mu_0 \mu_r H + B_r \quad (3)$$

$$H = -\nabla V_m \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\mu_0 \mu_r H) = 0 \quad (5)$$

式中, B 为磁通密度, H 为磁场强度, V_m 为磁标量势, μ_0 为真空磁导率($4\pi \times 10^{-7}$ H/m), μ_r 为相对磁导率。仿真可以估计在不同施加电压下几何形状产生的电场和磁场。

如图4所示,电场线主要从阴极柱径向指向阳极,场强最强的地方在两个阴极端板边缘,这与预期结果相同,因为阳极柱和阴极柱是同心,因此电场线会由阴极延伸到阳极表面。从图的仿真结果来看,通过磁体通孔的磁通量线大部分垂直于阴极端板,平行于阴极柱。在两个阴极端板之间的体积中,磁通密度主要集中在阴极的上端板与下端板之间,这有利于延长电子在内部运动轨迹。

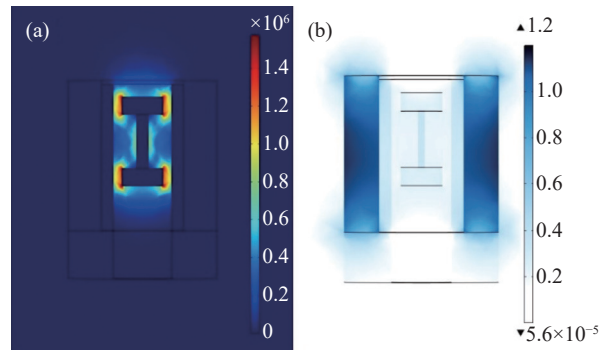


图4 MMG 内部电磁场仿真结果。(a) MMG 内部电场分布, (b) MMG 内部磁场分布

Fig. 4 Simulation Results of the electromagnetic field in MMG. (a) Internal electric field distribution in MMG, (b) internal magnetic field distribution in MMG

接着将以上模拟得到的稳态电场和磁场用于带电粒子追踪仿真模块,该模块边界条件设置是在阴极附近释放电子,并使用洛伦兹力的数值积分来估计得到电子轨迹:

$$m_e \alpha = F \quad (6)$$

$$F = q(E + v \times B) \quad (7)$$

其中 m_e 是电子的质量(9.1095×10^{-31} kg), α 是电子的

加速度, F 是作用在电子上的洛伦兹力, q 是单个电子携带的基本电荷 ($-1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$), v 是电子的速度。电子的初始速度垂直于阴极表面, 设置为 $1.229 \times 10^6 \text{ m/s}$ 。在这个速度下, 电子的等效动能为 4.3 eV ^[17], 这是阴极材料不锈钢的功函数与从不锈钢表面发射的电子的典型速度。

轨迹计算了多达 100 个积分步, 发现电子在两块阴极板之间绕着阴极柱做螺旋震荡运动, 如图 5, 如果电子能够在所有积分步中都没有碰撞到边界, 那么就可以认为电子的轨迹是“无限”螺旋状的, 很可能会发生气体碰撞电离。在这种情况下, 仿真得到的电场和磁场对 MMG 最合适。

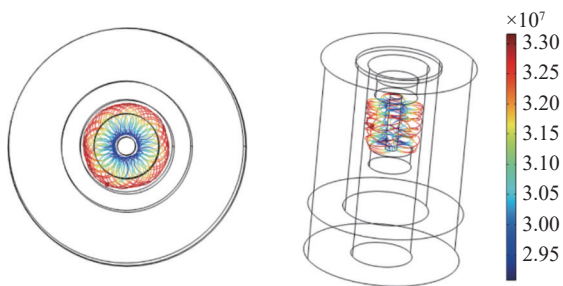


图5 电子运动轨迹

Fig. 5 Trajectory of electron motion

3 实验与测试结果

为了验证 MMG 的效果, 作者将其制造并安装在真空系统的标准电馈通上。如图 6 所示, 真空室由一个 CF35 四通组成, 并且由一体式 Pfeiffer hipace80 涡轮分子泵机组抽气。通过角阀调节腔室压力 p , 并通过莱宝 PT290 商用电离真空计监测。为了将阴极偏置在负高电压 V_k , 将提供电压为 -1000 V 的高压电源与 $10 \text{ M}\Omega$ 镇流电阻器串联, 并连接到真空电馈通的中心引脚。阳极接地(与真空室的其余部分隔离), 而电流 I_b 由皮安表测量, 电路连接线选择 MHV3000 V, 线径 6.1 mm 。在阳极和阴极之间发生意外短路的情况下, 电流将受到镇流器电阻器和高压电源的电流限制。

MMG 实验测试流程如下: 将 MMG 通过标准真空电馈通连接至腔体, 将 MMG 阴极通过 MHV 连接线连接至高压电源, 阳极则通过 BNC 连接线连接至皮安表, 将皮安表与高压电源均接地, 构成了测量电路。接着启动分子泵机组并将角阀保持在开启状态, 待校准真空计显示示数至 10^{-3} mbar , 此时达到 MMG 测量上限, 启动直流高压电源并调

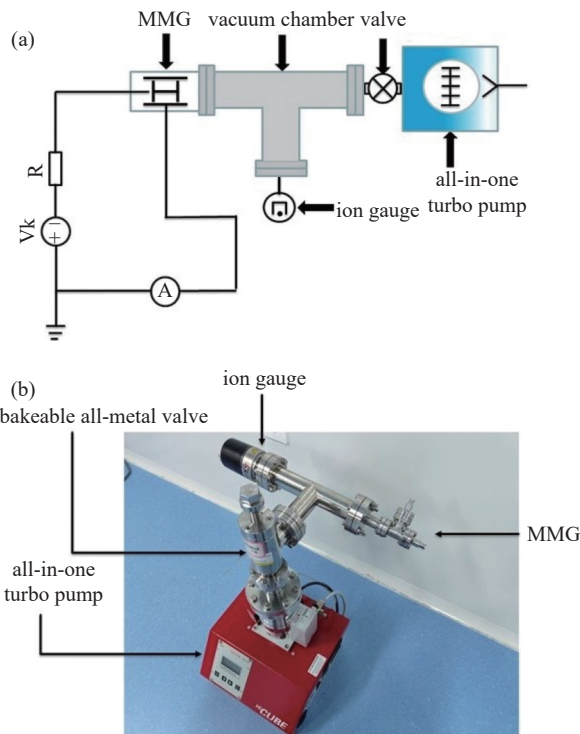


图6 实验装置图。(a)实验装置示意图,(b)抽气系统实物图

Fig. 6 Diagram of experimental setup. (a) Schematic diagram of experimental setup, (b) physical diagram of vacuum system

节至 -1000 V , 最终记录真空度从 $10^{-4} \sim 10^{-7} \text{ mbar}$ 对应的皮安表电流读数。接着分别调整电源电压至 -500 V 、 -1500 V 、 -2000 V 和 -2500 V 并重复上述过程。

测试得到的 $-500 \sim -2500 \text{ V}$ 电压下电流与真空度关系曲线如图 7 所示, $-1000 \sim -1500 \text{ V}$ 曲线在 $5 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ mbar}$ 范围内非常接近, 且线性良好; -2000 V 电压区间内, 电流在 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7} \text{ mbar}$ 与 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7} \text{ mbar}$ 两个阶段差距较大, 且测量下限为 $1 \times 10^{-6} \text{ mbar}$, 低于此范围电流波动较大, 无法测得数据。同样的情况在 -2500 V 电压测试时也有出现, 且测量下限上升到了 $1 \times 10^{-5} \text{ mbar}$, 由此可以推断, 高于 -1500 V 并不适用此 MMG 精确测量真空度。在 -500 V 电压测试过程中, 由于电压过低, 直到高于 $1 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ 才测得有效数据, 其测量范围在 $1 \times 10^{-2} \sim 1.7 \times 10^{-1} \text{ mbar}$ 之间。正常冷阴极电离真空计的测量上限在 $1 \times 10^{-4} \text{ mbar}$, 在 -500 V 电压下, MMG 测量上限可达 0.17 mbar , 但此电压下测量下限过高, 可以通过不同电压配合使用来增加 MMG 的测量上限。经过测试可以得出, MMG 的最佳使用电压在 $-1000 \text{ V} \sim -1500 \text{ V}$ 之间, 在此区间可以测

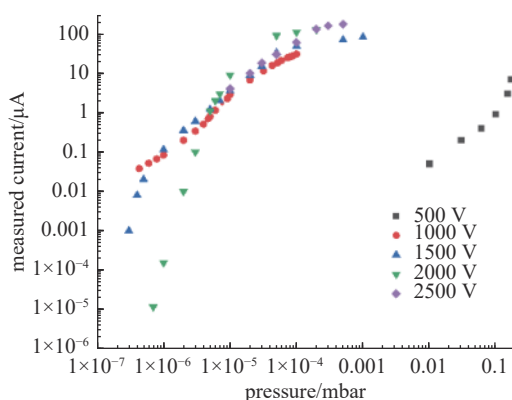
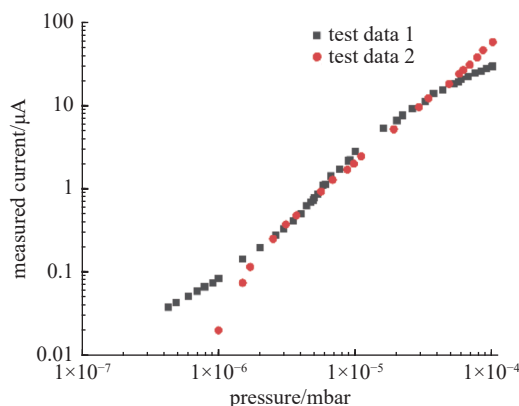


图7 不同电压下电流与真空度关系曲线

Fig. 7 Curve of current versus vacuum at different voltages

得的数据更精确,且线性更好。

为了得到 MMG 的重复测量效果,选取 -1000 V 电压 V_k 对 MMG 进行重复测量,电流随腔室压力的变化如图 8 所示。电流 I_D 从 $4.3 \times 10^{-7}\text{ mbar}$ 时的 37.7 nA 增加到 10^{-4} mbar 时的 $30.5\text{ }\mu\text{A}$ 。同时对真空计进行了重复测量,第二次测量电流 I_D 从 $4.3 \times 10^{-7}\text{ mbar}$ 时的 29.6 nA 增加到 10^{-4} mbar 时的 $58.22\text{ }\mu\text{A}$,两次测试在 $10^{-4} \sim 10^{-6}\text{ mbar}$ 之间基本吻合,低于 10^{-6} mbar 时偏差较大,推测这是由于在该量级电流很小,噪声较大,干扰电流对测量电流占比较大,在测量装置前增加屏蔽装置可以改善这一情况。

图8 -1000 V 电压重复测量结果Fig. 8 -1000 V repeat measurement results

在一定的压力范围内,MMG 的电流 I 与压力 p 遵循式 (8) 的幂次方关系:

$$I = Kp^n \quad (8)$$

式 (8) 中 K 和 n 对于给定的规管时为常数。影响 K 的参数有: 磁场、电场, 放电室的长度和真空腔体中气体的种类; 影响 n 的参数有: 磁场强度, 操作

电压和放电室的直径。指数 n 的值对于大多数磁控冷阴极规都介于 1.05 和 1.40 之间。需要通过实验确定待测真空计的 K 值对式 (8) 两端同取对数:

$$\lg I = \lg K + n \lg p \quad (9)$$

可以看出, 电流和压强的对数成线性关系。

4 分析结果和讨论

在 V_k 为 -1000 V 时, 在 10^{-4} 到 10^{-7} mbar 之间测量的 I_D 值用于估计 MMG 灵敏度, 用公式中的常数 K 表示, K 大小受于磁场和电场影响。如图 9 所示, 拟合曲线的灵敏度为 $0.066\text{ }\mu\text{A/mbar}$, 第二次测试 K 值为 $0.072\text{ }\mu\text{A/mbar}$, 两次测试在测量范围内灵敏度较为接近且线性拟合良好, 这表明 MMG 的气体电离频率与此范围内的压力成正比, 与之前对磁控管真空计的工作目标相一致。

当压力高于 10^{-4} mbar 时, 拟合方程的 I_D 值略大于测量值, 这是因为电场被镇流器电阻上的分压

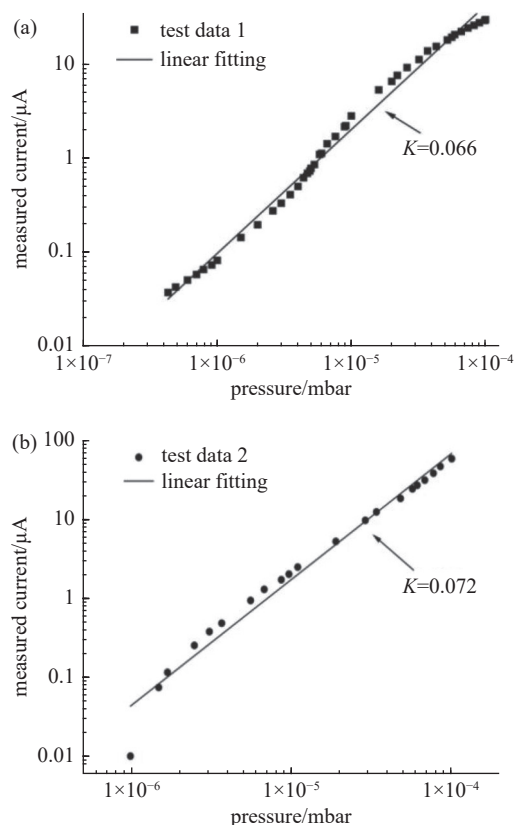


图9 两次测试 MMG 电流与真空度线性拟合。(a)第一次实验测试数据拟合, (b)第二次实验测试数据拟合

Fig. 9 Linear fitting of MMG current with vacuum was performed twice. (a) First experimental test data fit, (b) second experimental test data fit

减小了。当压力低于 10^{-7} mbar 时, 实测电流小于拟合方程计算电流。在此前的磁控管真空计研究中也报道了类似的情况^[18], 通常在较低的压力下中体现出来。这种现象的机理是, 当压力为 10^{-4} mbar 以上时, 存储的空间电荷处于饱和状态, 当压力低于 10^{-7} mbar 时, MMG 内部的空间电荷下降到饱和水平以下。MMG 的体积比以前研究过的器件小, 因此有可能只有在比以前研究过的更大的真空计更高的压力下才能达到饱和空间电荷。

由此可以得到 K 值的平均值, 将其带入式(8)便可以计算得出 MMG 对应校准真空计的强。再把这个值与校准真空计的测量结果进行比较, 其具体测量值如表 1 所示。

表 1 MMG 与校准真空计测量结果对比

Tab. 1 Comparison of MMG and calibrated vacuum gauge measurements

微型冷规 (mbar)	校准真空计 (mbar)	误差
1.7×10^{-6}	1.42×10^{-6}	16.4%
2.5×10^{-6}	2.43×10^{-6}	2.8%
3.1×10^{-6}	3.19×10^{-6}	2.9%
5.6×10^{-6}	5.95×10^{-6}	5.8%
6.8×10^{-6}	7.43×10^{-6}	9.2%
8.7×10^{-6}	9.01×10^{-6}	3.5%
9.7×10^{-6}	1.01×10^{-5}	4.1%
1.1×10^{-5}	1.16×10^{-5}	5.4%
1.9×10^{-5}	1.93×10^{-5}	1.5%
2.9×10^{-5}	2.95×10^{-5}	1.7%
3.4×10^{-5}	3.49×10^{-5}	2.6%
4.8×10^{-5}	4.57×10^{-5}	4.7%
5.7×10^{-5}	5.54×10^{-5}	2.8%
6.1×10^{-5}	5.95×10^{-5}	2.4%
6.8×10^{-5}	6.58×10^{-5}	3.2%
7.7×10^{-5}	7.55×10^{-5}	1.9%
8.5×10^{-5}	8.65×10^{-5}	1.7%
1×10^{-4}	1.01×10^{-4}	1.0%

表 1 中数据表明, 在低于 1.7×10^{-6} mbar 的范围, 除个别数据外, MMG 所测得的大部分数据与校准真空计相差都在 $\pm 5\%$ 以内; 加上校准真空计本身的典型精度为读数的 $\pm 20\%$ 因此, 本真空计最后的精度为读数的 $\pm 25\%$ 。这也和一般商用冷阴极电离真空计的精度接近。

5 结论

本次工作通过仿真与实验对相比目前商业磁控管真空计小 30 倍的 MMG 进行测试。仿真得出能够在小体积下大大延长电子运动轨迹的电磁场特征, 并对电子轨迹进行研究。实验测试得到了 MMG 在 $-500 \sim -2500$ V 电压下 $10^{-4} \sim 10^{-7}$ mbar 之间的电流与真空度关系曲线, 选取最适合 MMG 测量的电压进行重复测量并拟合得到其灵敏度, 将拟合得到的数据与校准真空计测量数据对比得到 MMG 误差范围。结果得出 MMG 可用于微型真空系统中在 $10^{-4} \sim 10^{-7}$ mbar 范围真空度的测量, 同时仅占据很小的系统内部体积。未来的工作可集中于研究进一步缩小 MMG 体积和扩大测量范围, 同时由于其极长的电子运动轨迹, 可以考虑更换其内部材料, 使其同时具备抽气功能。

参 考 文 献

- [1] Kendall B R F, Drubetsky E. Cold cathode gauges for ultrahigh vacuum measurements[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1997, 15(3): 740-746
- [2] Peacock R N, Peacock N T, Hauschulz D S. Comparison of hot cathode and cold cathode ionization gauges[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1991, 9(3): 1977-1985
- [3] Kendall B R F. Ionization gauge errors at low pressures[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1999, 17(4): 2041-2049
- [4] Chae J, Stark B H, Najafi K. A micromachined pirani gauge with dual heat sinks[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2005, 28(4): 619-625
- [5] Wilfert S, Edelmann C. Miniaturized vacuum gauges[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2004, 22(2): 309-320
- [6] Wang C X, Han X D, Li D T, et al. Latest advance in fabrication technologies of MEMS-type capacitance diaphragm gauge[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2019, 39(1): 24-33 (王呈祥, 韩晓东, 李得天, 等. MEMS 型电容薄膜真空计的关键技术研究进展 [J]. *真空科学与技术学报*, 2019, 39(1): 24-33(in Chinese))
- [7] Green S R, Malhotra R, Gianchandani Y B. Sub-torr chip-scale sputter-ion pump based on a penning cell array architecture[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2013, 22(2): 309-317
- [8] Penning F M. Ein neues manometer für niedrige gas-

- drucke, insbesondere zwischen 10^{-3} und 10^{-5} mm[J]. Physica, 1937, 4(2): 71–75
- [9] Cai M, Li D T, Cheng Y J, et al. Latest development of ionization gauges with field emitters[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2011, 31(6): 732–738 (蔡敏, 李得天, 成永军, 等. 场发射冷阴极电离规的研究进展 [J]. *真空科学与技术学报*, 2011, 31(6): 732–738(in Chinese))
- [10] Kendall B R F, Drubetsky E. Compact wide-range cold-cathode gauges[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2000, 18(4): 1724–1729
- [11] Li D T, Xi Z H, Wang Y J, et al. Vacuum metrology technology and its space application[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2021, 41(9): 795–816 (李得天, 习振华, 王永军, 等. 真空测试计量技术及其航天应用 [J]. *真空科学与技术学报*, 2021, 41(9): 795–816(in Chinese))
- [12] Grzebyk T, Górecka-Drzazga A. MEMS type ionization vacuum sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 246: 148–155
- [13] Humphries Jr S, Hwang C S. Miniature penning ionization gauge for pulsed gas measurements[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1984, 55(10): 1663–1665
- [14] MKSinst. com. Mks 903 inverted magnetron cold cathode vacuum transducer[EB/OL]. <https://www.mksinst.com/docs/UR/903.pdf>
- [15] Isoardi T, Ferretti A, Bonmassar L, et al. Modeling and simulation of sputter-ion pump performances[J]. *Vacuum*, 2023, 209: 111792
- [16] Deng S Y, Green S R, Gianchandani Y B. A 3D-printed miniature magnetron gauge for ultra-high vacuum environments[J]. *Vacuum*, 2018, 156: 264–270
- [17] Haynes W M. CRC handbook of chemistry and physics (97th edition)[M]. Boca Raton: CRC Press, 2016
- [18] Bryant P J, Longley W W Jr, Gosselin C M. Cold-cathode magnetron gauge characteristics[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology*, 1966, 3(2): 62–67